

การควบคุมระดับนำด้วยตัวควบคุมแบบนิวโรฟัซซี่

NEURO FUZZY FOR LEVEL CONTROL APPLICATION



นาย เจษฎา สมใจ  
นาย เทียนชัย สุขศรี  
นาย บัญชา มงคลอินทร์

เลขที่.....  
เลขทะเบียน..... 42538  
วัน, เดือน, ปี 24 พ.ค. 2545

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# NEURO FUZZY FOR LEVEL CONTROL APPLICATION



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

2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

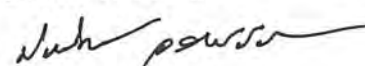
หัวข้อปริญญาโท การควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมนิวโรฟัซซี  
NEURO FUZZY FOR CONTROL APPLICATION

นักศึกษาผู้จัดทำ นายเจษฎา สมใจ รหัสประจำตัว 41013405  
นายเทียนชัย สุขศรี รหัสประจำตัว 41013412  
นายบัญชา มงคลอินทร์ รหัสประจำตัว 41013417

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม  
ปีการศึกษา 2543

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท	ลายมือชื่อ
ผศ. วิริยะ กอรัตน์	
อาจารย์อานันต์ น่วมสำราญ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 9 เมษายน พ.ศ. 2544  
สถานที่สอบ ณ. ห้องสอบปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

ภาควิชารับรองแล้ว  
  
(ผศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์)  
หัวหน้าภาควิชา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	<b>NEURO FUZZY FOR LEVEL CONTROL APPLICATION</b>	
<b>Author</b>	Mr. JASEDA	SOMJAI
	Mr. TIANCHAI	SUKSRI
	Mr. BANCHA	MONGKHONIN
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Prof. VIRIYA	KONGRATANA
	Mr. ARJIN	NOUMSOMRAN
<b>Year</b>	2000	

## ABSTRACT

This thesis proposes the design and implement of fuzzy controller for tuning the fuzzy logic parameter using back-propagation neural network. The controller is implemented to control the unknown system transfer function of real plant . The controller consists of 2 parts witch are fuzzy logic and back - propagation neural network. As the main part , the fuzzy logic components are fuzzification , fuzzy inference , fuzzy rule base and defuzzification . The fuzzy parameters consist of 2 part which are antecedent and consequent part . The fuzzy logic is used for adjusting the center and width of the antecedent part and real value of the consequent part using back-propagation neural network . The output response rise time , overshoot and steady stety error of system are adjusted by scaling factor coresponding to appropriate situation . The controller is implemented to control level.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเพราะได้รับคำปรึกษาและความอนุเคราะห์จาก ผศ. วิริยะ กองรัตน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างและขอกราบ ขอบพระคุณ เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการวิจัย

ขอขอบพระคุณ รศ. วิทยา ทิพย์สุวรรณพร และ อาจารย์ อาจินต์ นวมสำราญ ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยและช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ พร้อมทั้งวิธี แก้ปัญหา

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม ทุกท่านที่เอื้อเฟื้ออุปการณ และเครื่องมือทั้งหมด ตลอดจนสถานที่ จนสามารถทำปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จ

ขอขอบคุณ เพื่อนทุกท่าน ซึ่งคอยเป็นกำลังใจที่ดี ในการทำปริญญาานิพนธ์ครั้งนี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอบแต่ บิดา มารดา

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 แนวความคิดในการนำเสนอปริญญานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	2
1.4 รายละเอียดของปริญญานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 INTERFACE.....	5
2.2.1 การติดต่อสื่อสารแบบอนุกรม.....	6
2.2.2 มาตรฐานการเชื่อมต่อแบบอนุกรม RS-232.....	7
2.2.3 มาตรฐานการเชื่อมต่อแบบ I <sup>2</sup> C.....	8
2.2 DATA CONVERTOR.....	12
2.2.1 ข้อมูลเบื้องต้น IC PCF8591.....	14
2.2.2 การรับและการส่งของ IC PCF8591.....	15
2.3 FINAL CONTROL.....	23
2.4 SENSOR.....	25
2.5 PROCESS PLANT.....	27
2.6 SUPPLY.....	32
บทที่ 3 ทฤษฎีพีซีซีลอจิก.....	34
3.1 พีซีซีเซต.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 ฟังก์ชันลอจิก.....	46
3.3 ความสัมพันธ์ฟังก์ชัน.....	57
3.4 ตัวควบคุมฟังก์ชัน.....	67
<b>บทที่ 4 ทฤษฎีนิเวศวิทยา.....</b>	<b>72</b>
4.1 ความรู้พื้นฐานทางกายภาพของระบบเซลล์ประสาท.....	72
4.2 โครงข่ายที่ป้อนกลับ (Feedback Networks).....	82
<b>บทที่ 5 การออกแบบตัวควบคุมนิวโรฟังก์ชัน.....</b>	<b>84</b>
5.1 โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟังก์ชัน.....	84
5.2 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟังก์ชัน.....	92
5.3 ค่าอัตราขยายของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต (Scaling Factor).....	96
<b>บทที่ 6 ผลการทดลอง.....</b>	<b>97</b>
6.1 การทดลองอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	98
6.2 การใช้ตัวควบคุมควบคุมกระบวนการที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์.....	101
6.3 การใช้ตัวควบคุมกระบวนการจริงที่สร้างขึ้น.....	105
6.4 สรุปผลการทดลอง.....	108
<b>บทที่ 7 สรุปผลวิจัย และข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>109</b>
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>110</b>

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงค่าความจริงของประพจน์ในการปฏิบัติทางตรรกศาสตร์บูลีน.....	50
3.2 แสดงตารางความจริงสำหรับตัวปฏิบัติการพีชคณิตจิกตามนิยาม Zadeh.....	52
3.3 แสดงตารางความจริงสำหรับตัวปฏิบัติการพีชคณิต ตามนิยามของ Baldwin.....	53
3.4 แสดงผลการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลโดยใช้ GMP ด้วยหลักของ Fukami.....	56
3.5 แสดงผลของการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลโดยใช้ GMP ด้วยหลักการ Fukami.....	56
5.1 ตารางแสดงกฎการควบคุม.....	92
6.1 ตารางผลการทดลองที่ได้จากวงจร Pressure Transmitter.....	98
6.2 แสดงผลที่ได้จากวงจร A/D, D/A.....	100



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดง Block Diagram ของระบบ.....	4
2.2 แสดงวงจร Interface.....	5
2.3 แสดงรูปวงจร Interface ที่ทำการสร้างขึ้น.....	6
2.4 แสดงรูปแบบของข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส.....	7
2.5 แสดงการต่อตัวต้านทาน $R_s$ เพื่อลดสัญญาณรบกวนขนาดใหญ่ที่อาจเข้ามาในบัส I <sup>2</sup> C.....	9
2.6 แสดงรูปแบบข้อมูลที่ใช้ในการอ้างถึงอุปกรณ์ระบบบัส I <sup>2</sup> C.....	10
2.7 แสดงการอ้างแอดเดรสของอุปกรณ์แบบ 7 บิต.....	11
2.8 แสดงรูปแบบข้อมูลอนุกรมที่ใช้ในการติดต่อกับอุปกรณ์บนระบบบัส I <sup>2</sup> C แบบ 10 บิต.....	12
2.9 แสดงวงจร Data Converter.....	13
2.10 แสดงรูปวงจร Data Converter ที่ทำการสร้างขึ้น.....	14
2.11 แสดง Address Byte .....	16
2.12 แสดง Control Byte.....	17
2.13 แสดงวงจร Drive Moter.....	24
2.14 แสดงรูปวงจร Drive Moter ที่ทำการสร้างขึ้น.....	25
2.15 แสดงวงจร Pressure Transmitter .....	26
2.16 แสดงรูปวงจร Pressure Transmitter ที่ทำการสร้างขึ้น.....	26
2.17 แสดง Plant ที่ทำการสร้างขึ้น.....	27
2.18 แสดงบล็อกไดแกรมของระบบ.....	31
2.19 แสดงวงจรจ่ายไฟกระแสตรงแบบคงที่.....	32
2.20 แสดงวงจรจ่ายไฟกระแสตรงแบบปรับค่าได้.....	32
2.21 แสดงรูปวงจรจ่ายไฟกระแสตรงแบบคงที่.....	33
2.22 แสดงรูปวงจรจ่ายไฟกระแสตรงแบบปรับค่าได้.....	33
3.1 แสดงตัวอย่างคริซพีเชตของความสูงและระดับการเป็นสมาชิก.....	34
3.2 แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของพีชชีเซต A และระดับการเป็นสมาชิกของความสูง.....	36
3.3 แสดง ซัพพอร์ต, $\alpha$ -Cut ,จุดตรงข้ามและศูนย์กลางพีชชีเซตของฟังก์ชันการเป็นสมาชิก.....	37
3.4 แสดงพีชชีซึ่งเกิดต้นของความสูง.....	38
3.5 แสดงพารามิเตอร์และรูปทรงของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม.....	42
3.6 แสดงพารามิเตอร์และรูปทรงของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู.....	42

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 แสดงพารามิเตอร์และรูปทรงของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียน.....	43
3.8 แสดงรูปทรงของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบระฆัง.....	43
3.9 แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลิงกวิสติก “Probability”.....	47
3.10 แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเทอม “true”(สีแดง) และ “false” (สีน้ำเงิน) ตามนิยาม Zadeh.....	48
3.11 แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลิงกวิสติก “Truth” ตามนิยาม Baldwin.....	49
3.12 แสดงการคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟัชซี.....	59
3.13 แสดงการหาข้อสรุปจากหลักฐาน โดยใช้เงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล.....	61
3.14 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัชซี.....	67
4.1 แสดงการสื่อสารข้อมูลในระบบประสาท.....	73
4.2 แสดงโครงสร้างของเซลล์ประสาทส่งสัญญาณกระแสประสาท.....	74
4.3 แสดงการเกิดศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน.....	75
4.4 แสดงสภาวะต่างๆของเซลล์ประสาท (ก)ขณะพัก, (ข)ขณะกระตุ้น และ(ค)ขณะถูกยับยั้ง.....	76
4.5 แสดงตัวอย่างของนิเวรอนเน็ตเวิร์กอย่างง่าย.....	77
4.6 แสดงฟังก์ชันสร้างเอาต์พุต (Activation Function) แบบชนิดต่างๆ (ก) Thershold logic (ข) Bipolar Binary (ค) Linear Thershold (ง) Sigmoid (จ) Bipolar Continuous.....	79
4.7 แสดงนิเวรอนเน็ตเวิร์กที่มีฮิดเดนเลเยอร์.....	80
4.8 แสดงโครงข่ายที่ส่งสัญญาณ ไปข้างหน้าแบบชั้นเดียว (ก) ลักษณะการเชื่อมโยง (ข) บล็อกไดแกรม.....	81
4.9 แสดงโครงข่ายที่ป้อนกลับแบบเวลาไม่ต่อเนื่องชั้นเดียว (ก) ลักษณะการเชื่อมโยง (ข) บล็อกไอแกรม.....	82
5.1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัชซี.....	84
5.2 แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต e และ $\Delta e$ .....	88
5.3 แสดงโครงข่ายป้อนไปข้างหน้าของตัวควบคุมฟัชซี.....	93
6.1 แสดงกระบวนการที่สร้างขึ้นมา.....	93
6.2 กราฟแสดงผลที่ได้จากวงจร Pressure Transmitter.....	99
6.3 แสดงหน้าจอที่ใช้ในการทดสอบการรับส่งค่ากับวงจร A/D, D/A.....	99
6.4 กราฟแสดงผลที่ได้จากวงจร A/D.....	100

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.5 กราฟแสดงผลที่ได้จากวงจร D/A .....	101
6.6 แสดงหน้าจอหลักที่ใช้ในการควบคุม.....	102
6.7 แสดงหน้าจอที่ใช้ปรับแต่งพารามิเตอร์ต่างๆของตัวควบคุม.....	102
6.8 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50% ในถึงที่ 1 และถึงที่ 2.....	103
6.9 แสดงสมรรถนะของระบบควบคุมกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50% ในถึงที่ 1 และถึงที่ 2.....	104
6.10 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมในการควบคุมกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 80% ในถึงที่ 1 และ 50% ในถึงที่ 2.....	104
6.11 แสดงสมรรถนะของระบบควบคุมในการควบคุมกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 80% ในถึงที่ 1 และ 50% ในถึงที่ 2.....	104
6.12 แสดงผลตอบสนองระบบเปิดของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50%.....	105
6.13 แสดงผลตอบสนองระบบปิดของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50% .....	105
6.14 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50%.....	106
6.15 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50% (ไม่แสดงสัญญาณควบคุม).....	106
6.16 แสดงสมรรถนะของระบบควบคุมในการควบคุมกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50%.....	106
6.17 แสดงผลตอบสนองระบบเปิดของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 75%.....	107
6.18 แสดงผลตอบสนองระบบปิดของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 75% .....	107
6.19 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 75%.....	107
6.20 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 75% (ไม่แสดงสัญญาณควบคุม).....	108
6.21 แสดงสมรรถนะของระบบควบคุมในการควบคุมกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 75%.....	108

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 แนวความคิดในการนำเสนอปริญญาณิพนธ์

แนวความคิดในการนำเสนอปริญญาณิพนธ์นี้ มีจุดเริ่มต้นมาจากความต้องการนำระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ มาใช้แทนระบบควบคุมแบบเดิมซึ่งอาศัยการสั่งงานจากผู้ปฏิบัติการในการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ มักพบว่า โดยส่วนมากแล้วกระบวนการเหล่านั้นจะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear) มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time Varying) ถูกใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา มีการรบกวนจากภายนอก (Disturbance) และ สัญญาณรบกวนนอยส์ (Noise) ทำให้การออกแบบโดยใช้วิธีการประมาณค่าโมเดลทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการทำได้ยาก และ ถ้าการประมาณค่าโมเดลทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผิดพลาดจะทำให้ได้สมรรถนะของระบบควบคุมไม่ดี ซึ่งตามปกติแล้วความรู้และประสบการณ์ในการในการควบคุมกระบวนการนั้น มักจะอยู่ในรูปภาษามนุษย์ ซึ่งง่ายต่อการทำความเข้าใจและปฏิบัติตาม แต่ยากสำหรับการนำไปออกแบบและสร้างเป็นตัวควบคุมอัตโนมัติโดยใช้วิธีการประมาณค่าโมเดลทางคณิตศาสตร์แบบดั้งเดิมทั้งนี้เนื่องมาจากว่าในการควบคุมของผู้ปฏิบัติการจะเป็นกฎซึ่งอยู่ในรูปของเงื่อนไข ถ้า..... แล้ว..... โดยตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมจะถูกนิยามในเชิงคุณภาพและค่าของตัวแปรนี้จะมีความคลุมเครือ (Vagueness)

ด้วยเหตุนี้ ในปริญญาณิพนธ์นี้ จึงได้ศึกษาถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบ ฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) และตัวควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ซึ่งตัวควบคุมทั้ง 2 แบบ นั้นก็มีข้อดีที่แตกต่างกันไป คือ ตัวควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมนั้น มีข้อดีในด้านความสามารถในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimization) ส่วนตัวควบคุมแบบ ฟัซซีลอจิกนั้นมีข้อดีในด้าน การทำงานจะใช้หลักการคิดคล้ายกับการคิดของมนุษย์ ใช้กฎของ If-Then มีความง่ายในการทำความเข้าใจและประยุกต์ใช้กับความรู้จากผู้เชี่ยวชาญเมื่อรวมเอาข้อดีของโครงข่ายประสาทเทียมและฟัซซีลอจิกเข้าด้วยกันทำให้สามารถนำการเรียนรู้ในระดับต่ำและการคำนวณเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดของโครงข่ายประสาทเทียมต่อฟัซซีลอจิกและยังใช้การทำงานในระดับสูงในเรื่องของการคิดแบบมนุษย์ ใช้กฎ If-Then และความเป็นเหตุเป็นผลของฟัซซีลอจิกต่อโครงข่ายประสาทเทียมเป็นการเสริมข้อดีของทั้งสองวิธีการ ในการประยุกต์เป็นตัวควบคุมอัตโนมัติแบบปรับตัวเอง

การรวมกันของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก กับ ตัวควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียม แบ่ง เป็น 2 แบบ คือ Neural Network Base Fuzzy Systems กับ Fuzzy Logic Base Neural Network Models วิธีการแรกส่วนประกอบหลักจะเป็นส่วนของฟัซซีลอจิก คือมีฟัซซิฟิเคชัน (Fuzzification)

ฟัซซีอินเฟอเรนซ์ (Fuzzy Inference) และดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification) ใช้โครงข่ายประสาท  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบแบบ (Back Propagation) ในการปรับปรุงพารามิเตอร์ ส่วนของ antecedent และ พารามิเตอร์ ส่วนของ Consequent ของฟัซซี่ลอจิก ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมในปริภูมิพนธ์นี้ รวมเรียกทั้งสองเข้าด้วยกันว่า Neuro Fuzzy วิธีที่สองมีส่วนประกอบหลักเป็นโครงข่ายประสาทเทียม คือ มีการส่งถ่ายข้อมูลผ่านเลเยอร์การถ่วงน้ำหนักของข้อมูลจากเลเยอร์หนึ่งไปอีกเลเยอร์หนึ่ง การมี Threshold ใช้ฟัซซี่ลอจิกในขบวนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมต่อระหว่างเลเยอร์ซึ่งวิธีนี้เราจะไม่กล่าวถึงในปริภูมิพนธ์นี้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของปริภูมิพนธ์

1. เพื่อศึกษามาตรฐานการเชื่อมต่อและการส่งสัญญาณแบบ I<sup>2</sup>C
2. สามารถนำมามาตรฐานการเชื่อมต่อแบบ I<sup>2</sup>C มาใช้ในการควบคุมกระบวนการได้
3. ออกแบบและสร้าง Plant แบบระดับน้ำเพื่อใช้ในการควบคุมระดับน้ำ
4. ศึกษาทฤษฎี Fuzzy Logic และ Neural Network เพื่อที่จะนำมาใช้เป็น Controller ในการควบคุมระดับน้ำ
5. เขียนโปรแกรมควบคุมเพื่อทำหน้าที่เป็น Controller ในการควบคุมระดับน้ำ

## 1.3 ขอบเขตของปริภูมิพนธ์

1. ออกแบบและสร้าง Plant แบบระดับน้ำ เพื่อใช้ในการควบคุมระดับน้ำ ซึ่งจะทำได้ถึงน้ำ 4 ใบ โดยการควบคุมระดับน้ำนี้สามารถประยุกต์ได้ทั้งการควบคุมแบบ Single Input Single Output และ Multi Input Multi Output
2. ออกแบบและสร้างตัวควบคุมแบบนิวโรฟัซซี่ เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการ โดยที่ไม่ต้องรู้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบ
3. ออกแบบ และสร้างบอร์ด ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรในการแปลงการ ส่งสัญญาณมาตรฐานแบบ RS 232 เป็นการส่งสัญญาณมาตรฐานแบบ I<sup>2</sup>C
4. ออกแบบและสร้างบอร์ดที่ทำหน้าที่เป็น A/D และ D/A โดยใช้มาตรฐานการเชื่อมต่อแบบ I<sup>2</sup>C ทำหน้าที่ติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับบอร์ด โดยบอร์ดที่สร้างขึ้นนี้สามารถ รับอินพุตได้ 4 ช่องรับสัญญาณกระแสขนาด 4-20 ma ส่วนค่านเอาท์พุต สามารถส่งได้ 1 ช่องโดยส่งเป็นสัญญาณ กระแสขนาด 4-20 ma
5. ออกแบบและ สร้างอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นชุดขั้วการทำงานของปั้มน้ำ โดยใช้หลักการทำงานของ Pulse Width Modulation ซึ่งสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการทำงานจะเป็นสัญญาณ กระแสขนาด 4-20 ma

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดระดับน้ำของถังน้ำ โดยใช้หลักการของการวัดความดัน แทนการวัดระดับน้ำโดยตรง วงจรวัดความดันนี้จะส่งสัญญาณที่วัดได้ออกมาในรูปแบบของสัญญาณกระแสขนาด 4-20 ma

### รายละเอียดของปฏิญานิพนธ์

ภายในปฏิญานิพนธ์เล่มนี้แบ่งออกเป็น 7 บทด้วยกัน โดยมีรายละเอียดแต่ละบทดังนี้  
บทที่ 1 เป็นการกล่าวนำและวัตถุประสงค์ในการทำปฏิญานิพนธ์ และขอบเขตของการศึกษา

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการทำงานกับอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ได้ออกแบบมา

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีฟิสิกส์ลจิก

บทที่ 4 กล่าวถึงทฤษฎีของนิรอนเน็ตเวิร์ค

บทที่ 5 กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมแบบนิวโรฟิซซี

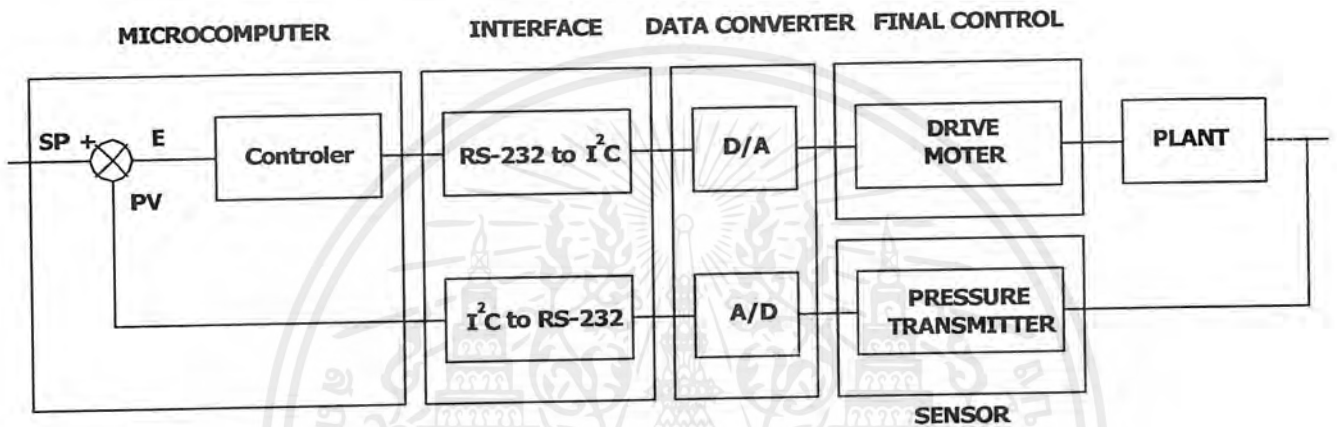
บทที่ 6 กล่าวถึงการนำเอาตัวควบคุมแบบนิวโรฟิซซีที่ได้ออกแบบไปใช้ในการควบคุมกระบวนการทั้งกระบวนการที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ และกระบวนการจริงที่ทำการสร้างขึ้น

บทที่ 7 กล่าวถึงการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในการพัฒนาการออกแบบระบบควบคุมเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

## บทที่ 2

# อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่เราจะกล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ใช้ในโรงงาน ทฤษฎีที่ใช้ในการติดต่อและควบคุมการทำงานกับอุปกรณ์และการออกแบบ Process ที่จะใช้ในการควบคุมซึ่ง Block diagram ของระบบทั้งหมด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงBlock Diagram ของระบบ

จาก Black Diagram ของระบบจะเห็นได้ว่าในระบบจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ 6 ส่วน คือ

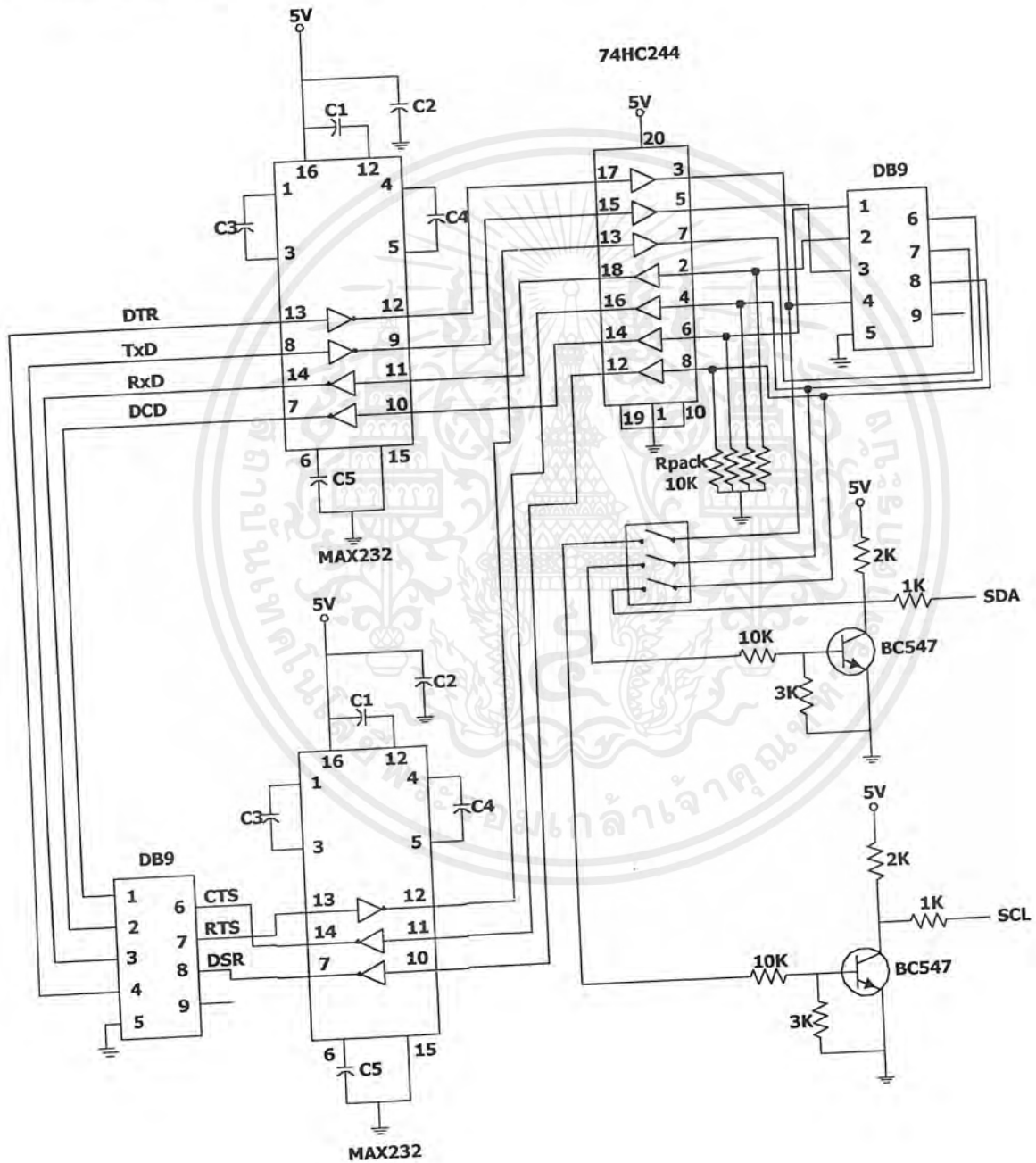
1. Microcomputer ทำหน้าที่เป็น Controller
2. Inter face ทำหน้าที่ในการแปลงมาตรฐานการเชื่อมต่อแบบ RS-232 to I<sup>2</sup>C และ I<sup>2</sup>C to RS-232
3. Data Conveter ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณ D/A และ A/D
4. Final control ทำหน้าที่ในการ Drive Motor Pump
5. Sensor ทำหน้าที่ในการวัดระดับน้ำ
6. Plant

ซึ่งรายละเอียดของส่วน Inter face, Data Converter, Final Control, Sensor, Process Plant และ Supply จะอธิบายในบทนี้ ส่วนการออกแบบตัว Controller นั้นจะอธิบายในบทที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

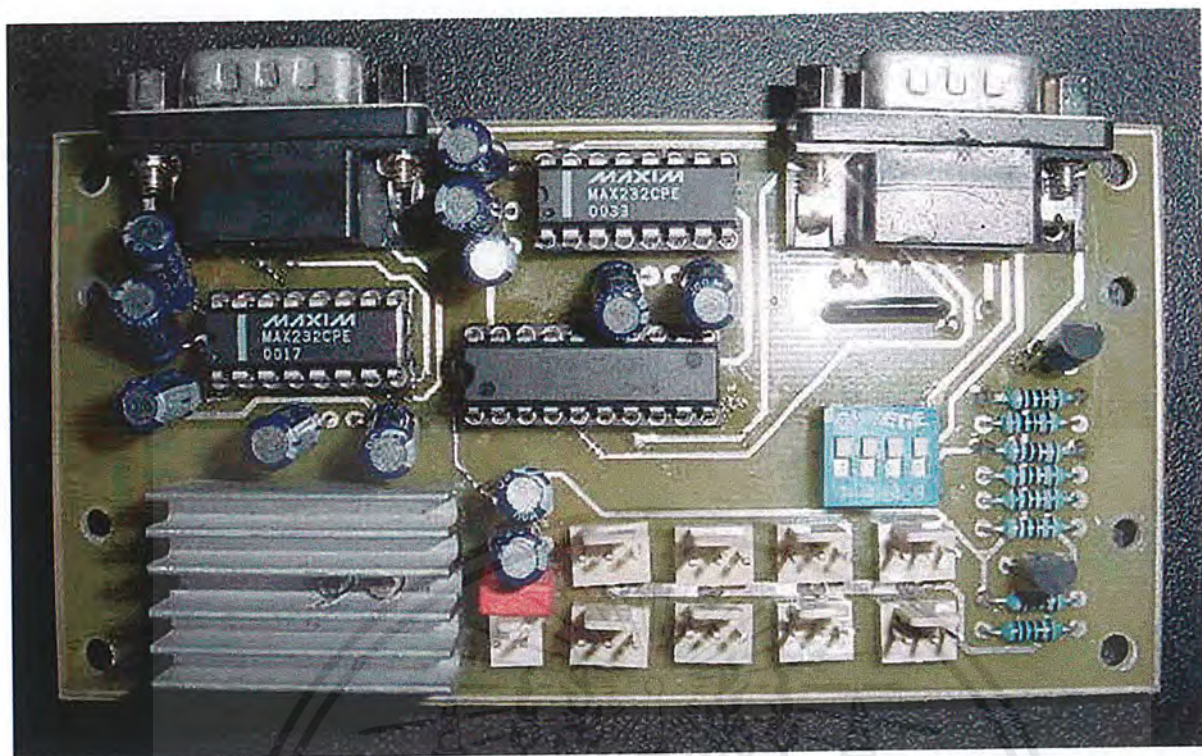
## 2.1 INTERFACE

ส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ซึ่งติดต่อผ่านทาง Serial Port กับ ส่วน Data Converter ในส่วนของ Data Converter นั้นจะใช้ IC PCF8591 ซึ่งทำหน้าที่เป็น D/A, A/D ในตัวเดียวกัน และใช้มาตรฐานในการติดต่อสื่อสารแบบ I<sup>2</sup>C เพราะฉะนั้นในส่วนของ Interface จึง ทำหน้าที่ในการแปลงมาตรฐานในการติดต่อสื่อสารแบบ RS-232 to I<sup>2</sup>C และ I<sup>2</sup>C to RS-232 วงจรที่ใช้ ในการแปลงมาตรฐานนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงวงจร Interface

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงรูปวงจร Interface ที่ทำการสร้างขึ้น

รูปแบบการติดต่อสื่อสารและมาตรฐานในการเชื่อมต่อแบบ RS-232 และมาตรฐานการเชื่อมต่อแบบ I<sup>2</sup>C สามารถอธิบายได้ดังนี้

### 2.1.1 การติดต่อสื่อสารแบบอนุกรม

การสื่อสารแบบอนุกรมแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบซิงโครนัสและแบบอะซิงโครนัส แบบซิงโครนัสจะมีสัญญาณนาฬิกา ร่วมอยู่กับการรับและส่งสัญญาณด้วย ดังนั้นการติดต่อแบบซิงโครนัสนี้ จะต้องใช้สายในการเชื่อมต่ออย่างน้อยที่สุด 3 เส้น คือ สัญญาณนาฬิกา, ข้อมูล และ กราวด์การสื่อสาร ข้อมูลแบบอะซิงโครนัสการรับ และส่งสัญญาณไม่จำเป็นต้องมีสายสัญญาณนาฬิกาแต่จะใช้ การกำหนด ค่าอัตราเร็วในการรับและการส่งข้อมูลให้มีค่าเท่ากัน ซึ่งเรียกอัตรารเร็วนี้ว่า อัตราบรอด หรือ บรอดเรต (Baudrate) มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาที (Bit per second:bps)

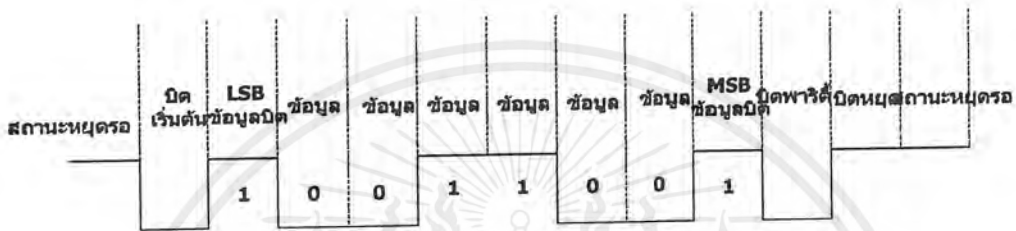
รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการรับส่งแบบอะซิงโครนัสประกอบด้วย 4 ส่วนด้วยกันคือ

1. บิตเริ่มต้น (Start bit)
2. บิตข้อมูลแบบอนุกรม
3. บิตตรวจสอบแบบพาริตี (Parity bit)
4. บิตปิดท้ายหรือบิตหยุด (Stop bit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อไม่มีการส่งข้อมูลขา data จะมีสถานะลอจิก “1” เรียกสถานะนี้ว่าสถานะหยุดรอ (waiting stage) การเริ่มต้นส่งข้อมูลจะเริ่มจากการให้ขา data มีลอจิก “0” ด้วยช่วงเวลา 1 บิตเริ่มต้น จากนั้นบิตข้อมูลจะถูกส่งออกไปโดยเริ่มจากบิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุด หรือ บิต LSB ก่อนจากนั้นตามด้วยบิตพาริตี บิตสุดท้ายที่จะส่งคือ บิตปิดท้ายหรือบิตหยุดโดยจะทำให้ขา data มาสถานะลอจิก“1” อีกครั้งด้วยระยะเวลา 1 บิต, 1.5 บิต, หรือ 2 บิต เพื่อเป็นการแสดงว่าสิ้นสุดข้อมูลแล้ว

อัตราเร็วในการรับและการส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสหรืออัตรารบอด ที่ใช้สำหรับพอร์ต RS-232 มีด้วยกันหลายค่า ได้แก่ 110,150,300,600,1200,2400,4800,9600,และ 19200 บิตต่อวินาที



รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบของข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส

### 2.1.2 มาตรฐานการเชื่อมต่อแบบ RS-232

มาตรฐาน RS-232 ถูกใช้ในการกำหนดรูปแบบการสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์เชื่อมต่อข้อมูล (Data Terminal Equipment : DTE ) กับวงจรข้อมูลปลายทาง (Data Circuit Terminating : DCE ) อุปกรณ์ DTE จะต้องเป็นอุปกรณ์ประมวลผลในตัวเช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์หรือไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีความสามารถในการสร้างบิตข้อมูลอนุกรมได้ ส่วนอุปกรณ์ DCE ทำหน้าที่เป็นเพียงตัวรับส่งข้อมูลที่ส่งมาจาก DTE เท่านั้น

สำหรับการใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ พอร์ตอนุกรม RS-232 ถูกใช้เพื่อต่อกับโมเด็ม เมาส์ และเครื่องพิมพ์ที่สามารถติดต่อทางพอร์ตอนุกรมได้

มาตรฐานการเชื่อมต่อแบบ RS-232 จะใช้คอนเน็กเตอร์แบบ DB-25 ตัวผู้หรือ DB-9 ตัวผู้ ซึ่งคอนเน็กเตอร์แบบ DB-25 จะมีขาต่อใช้งานเพียง 9 เส้นเช่นเดียวกับคอนเน็กเตอร์แบบ DB-9 เนื่องจากขาอื่นๆ ที่เคยมีการใช้งานมาในอดีตไม่ค่อยมีความสำคัญมากนักจึงถูกยกเลิกไป

- ขา Data Carrier Detect : DCD หรืออาจเรียกว่า Carrier Detect : CD ขาที่จะแอกทีฟเมื่อมีการส่งสัญญาณพาหะจากอุปกรณ์สื่อสารข้อมูล เช่น โมเด็มสำหรับการใช้งานปกติขานี้จะไม่ถูกใช้งานมากนัก
- ขา Receiver Data : RD หรือ RXD ขานี้ใช้เพื่อรับสัญญาณอนุกรมเข้ามายังคอมพิวเตอร์ โดยนำข้อมูลที่อ่านได้ไปเก็บไว้ในรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขา Transmitter Data : TD หรือ TXD ขาที่ใช้เพื่อส่งข้อมูลอนุกรมออกจากคอมพิวเตอร์โดยในการนำข้อมูลที่เก็บอยู่ในบัฟเฟอร์ส่งข้อมูลออกไป
- ขา Data Terminal Ready : DTR เป็นขาเอาต์พุตที่ใช้ในการส่งสัญญาณข้อมูลออกจากคอมพิวเตอร์เพื่อให้อุปกรณ์ปลายทางรับรู้ว่าการติดต่อกับอุปกรณ์ปลายทางโดยขา DTR นี้จะต้องเชื่อมต่อกับขา DSR ของอุปกรณ์ปลายทาง และ ขา DTR ของอุปกรณ์ปลายทางจะต้องเชื่อมต่อกับขา DSR ของคอมพิวเตอร์ และถ้าใช้การเชื่อมต่อแบบ 3 สายต้องเชื่อมต่อขา DTR และ DSR ของพอร์ตอนุกรมเข้าด้วยกัน และ จะต้องเชื่อมเข้ากับขา DCD ด้วยในกรณีที่โปรแกรมสื่อสารที่ใช้ในการตรวจสอบสัญญาณพาหะ
- ขา Signal Ground : GND เป็นขากราวด์ของสัญญาณ
- ขา Data Set Ready : DSR ขานี้จะใช้ควบคู่กับขา DTR เพื่อตรวจสอบการเชื่อมต่อระหว่าง คอมพิวเตอร์ กับอุปกรณ์ปลายทาง ซึ่งขา DSR นี้จะเป็นขาสำหรับรับรู้ข้อมูลจากภายนอก
- ขา Request To Sent : RTS เป็นขาเอาต์พุตสำหรับส่งสัญญาณร้องขอให้อุปกรณ์ปลายทางส่ง ข้อมูลมายังคอมพิวเตอร์โดยขาที่รับสัญญาณ RST ก็คือขา CTS ซึ่งในกรณีที่มีการเชื่อมต่อแบบ 3 สายจะต้องเชื่อมต่อขา RTS และ CTS เข้าด้วยกันเพื่อให้การรับและส่งข้อมูลเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา
- ขา Clear To Send : CTS เป็นขาอินพุตทำหน้าที่รอรับสัญญาณที่ส่งเข้ามาเมื่อมีการส่งสัญญาณเข้ามาที่ขา TXD จะถูกส่งออกไป ขาที่ใช้ตรวจสอบอุปกรณ์ต่อพ่วงว่าพร้อมที่จะรับข้อมูลแล้วหรือยัง
- ขา Ring Indicator : RI ใช้แสดงสถานะสัญญาณเรียกจากสายโทรศัพท์ ปกติในการสื่อสารทั่วไปสายนี้จะไม่ถูกใช้งานจะใช้ก็ต่อเมื่อมีการเชื่อมต่อกับโมเด็มแล้วยังมีความต้องการการตรวจสอบสัญญาณเรียกจากสายโทรศัพท์

### 2.1.3 มาตรฐานการเชื่อมต่อแบบ I<sup>2</sup>C

I<sup>2</sup>C (Inter-IC Communication) คือการติดต่อสื่อสารระหว่างไอซีโดยบัส I<sup>2</sup>C โดยมีจุดมุ่งหมายให้ไอซีหรือโมดูลสามารถติดต่อทำงาน และควบคุมภายใต้สัญญาณ 2 เส้นคือ

1. สายข้อมูลอนุกรมหรือ SDA (Serial Data Line)
2. สายสัญญาณนาฬิกาอนุกรมหรือ SCL (Serial Clock Line)

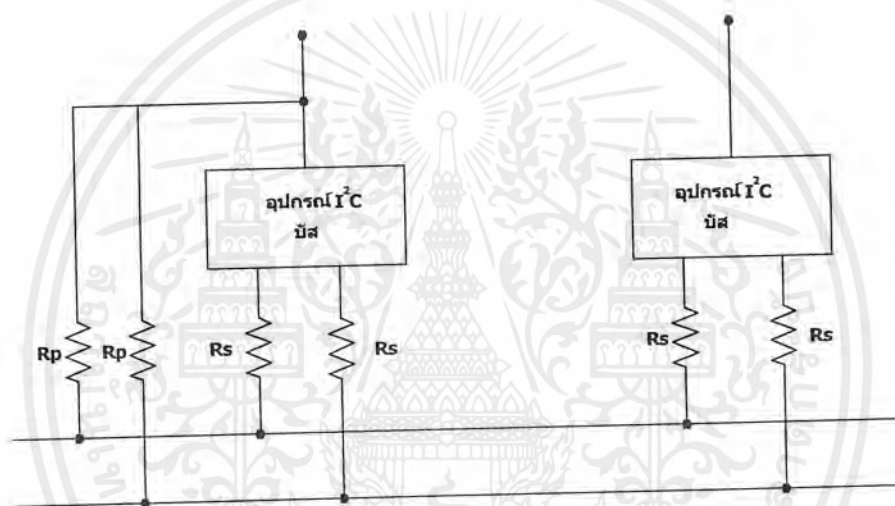
#### คุณสมบัติของ I<sup>2</sup>C

- สาย SDA และสาย SCL เป็นสายสัญญาณสองทิศทาง
- ต่อตัวต้านทานพูลอัป (Rp) กับแรงดัน 5 โวลต์ไว้ตลอดเวลา เพื่อให้สายมีสถานะลอจิกสูงขณะที่ไม่มีการติดต่อใช้งาน และจะช่วยป้องกันสัญญาณรบกวน
- วงจรเอาต์พุตของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่บนบัส I<sup>2</sup>C ต้องมีลักษณะเป็นวงจรทรานเปิด (Standard-Mode) และสูงถึง 400 กิโลบิตต่อวินาที ในโหมดความเร็วสูง (Fast Mode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุปกรณ์ที่ต่อร่วมอยู่บนบัส I<sup>2</sup>C ค่าความจุไฟฟ้ารวมที่เกิดขึ้นระหว่างสาย SDA กับ SCL จะต้องไม่เกิน 400 pF
- การเข้าถึงอุปกรณ์บนบัส I<sup>2</sup>C ใช้ข้อมูลสำหรับการเข้าถึง 2 ค่าคือ 7 บิต (7-Bit Addressing) หรือ 10 บิต (10-Bit Addressing)
- สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้ไฟเลี้ยงไม่เท่ากันตลอดการสื่อสารได้ โดยการต่อสาย SDA และ SCL ของอุปกรณ์ต่อพ่วงเข้าด้วยกัน และ ต้องต่อตัวต้านทานพูลอัป (Rp) เข้ากับแรงดัน +5 Volt ไปด้วยเสมอ

อุปกรณ์และตัวต่อตัวต้านทานอนุกรม (Rs) เข้ากับขา SDA และ SCL ก่อนเข้าสู่บัส I<sup>2</sup>C เพื่อป้องกันไฟกระชากขนาดใหญ่



รูปที่ 2.5 แสดงการต่อตัวต้านทาน Rs เพื่อลดสัญญาณรบกวนขนาดใหญ่ที่อาจเข้ามาในบัส I<sup>2</sup>C

### หลักการของบัส I<sup>2</sup>C

ก่อนอื่นต้องรู้โปรโตคอล (Protocol) ข้อตกลงพื้นฐานในการสื่อสารข้อมูลภายในบัส

- ตัวส่ง (Transmitter) คืออุปกรณ์ที่เป็นผู้สร้างหรือส่งข้อมูล
- ตัวรับ (Receiver) คืออุปกรณ์ที่เป็นผู้รับข้อมูล
- อุปกรณ์บนบัส I<sup>2</sup>C สามารถเป็นได้ทั้งตัวรับและตัวส่ง
- มาสเตอร์ (Master) คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมจังหวะการทำงานหรือการติดต่อบนบัส I<sup>2</sup>C
- สเลฟ (Slave) คืออุปกรณ์ที่ถูกควบคุมหรืออุปกรณ์ที่ต่อพ่วงเข้าไปบนบัส I<sup>2</sup>C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนดที่สำคัญของการติดต่อบนบัส I<sup>2</sup>C คือ

1. การถ่ายทอดข้อมูลจะเกิดขึ้นเมื่อบัสว่างเท่านั้น
2. ในระหว่างการถ่ายทอดข้อมูล เมื่อใดก็ตามที่สาย SCL มีสถานะเป็นลอจิกสูง สายข้อมูลต้องรักษาข้อมูลไว้ อย่าให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นเด็ดขาด มิฉะนั้นสัญญาณที่เกิดขึ้นจะได้รับการแปลความหมายให้เป็นสัญญาณควบคุมแทน

สถานะที่เกิดขึ้นบนบัส I<sup>2</sup>C มีสถานะ

1. บัสว่าง คือสาย SDA และ SCL มีสถานะลอจิกสูง
2. สถานะเริ่มต้น คือสาย SDA เปลี่ยนจากลอจิกสูงไปต่ำ ขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง
3. สถานะหยุด คือสาย SDA เปลี่ยนจากลอจิกต่ำไปสูง ขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง
4. ข้อมูลค้างบนบัส เกิดถัดจากสถานะเริ่มต้น โดยสาย SDA เป็นสายข้อมูลที่จะรับข้อมูลเมื่อขา SCL มีสถานะลอจิกสูง ในขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง สถานะที่สาย SDA จะต้องคงที่
5. รับรู้ข้อมูล เกิดขึ้นหลังจากที่การถ่ายทอดข้อมูลจากตัวส่งมายังตัวรับเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยตัวส่งจะส่งบิตรับรู้ (Acknowledge bit) ที่มีสถานะลอจิกสูง อุปกรณ์มาสเตอร์ก็จะส่งสัญญาณรับรู้พิเศษ ซึ่งสัมพันธ์กับสัญญาณนาฬิกา เพื่อตอบสนองบิตรับรู้กับตัวส่ง ทางด้านตัวรับจะส่งบิตรับรู้ที่มีสถานะลอจิกต่ำลงบนบัสอุปกรณ์สเลฟที่ถูกอ้างถึงในการติดต่อหรือกำลังติดต่ออยู่ในขณะนั้นก็จะกำหนดบิตรับรู้เพื่อตอบสนองให้ทราบว่าได้รับข้อมูลในแต่ละไบต์เรียบร้อยแล้ว การทำงานบนบัส I<sup>2</sup>C สิ่งสำคัญอันดับแรกของการทำงานบนบัส I<sup>2</sup>C คือการอ้างถึงอุปกรณ์แต่ละตัวมี 2 รูปแบบคือ

การอ้างถึงแบบ 7 บิต

ข้อมูลไบต์แรกที่เกิดขึ้นหลังจากสถานะเริ่มต้น คือ ข้อมูลที่ใช้ในการอ้างถึงอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อ โดยมีรูปแบบแสดงในรูปที่ 2.5 ใน 7 บิตบนรวมทั้งบิต MSB ด้วยจะเป็นข้อมูลแอดเดรสคงที่ (Fixed Address Bit) จำนวน 4 บิต ซึ่งข้อมูลนี้ อุปกรณ์แต่ละตัวจะถูกกำหนดมาจากผู้ผลิต ไม่สามารถเปลี่ยนแปลง แก้ไขได้ ถัดมาอีก 3 บิต เป็นบิตกำหนดแอดเดรสที่สามารถโปรแกรมได้ (Programmable Address Bit) โดยผู้ใช้งานต้องกำหนดสถานะลอจิกให้แก่ขา A0-A2 ของอุปกรณ์ที่มีการเชื่อมต่อแบบบัส I<sup>2</sup>C ส่วนในบิต LSB เป็นบิตที่ใช้กำหนดการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับอุปกรณ์ สเลฟตัวนั้นๆ หากบิต LSB เป็น “0” หมายถึงต้องการเขียนข้อมูลไปยังอุปกรณ์นั้น ถ้าเป็น “1” จะเป็นการอ่านข้อมูลจากอุปกรณ์ สเลฟ

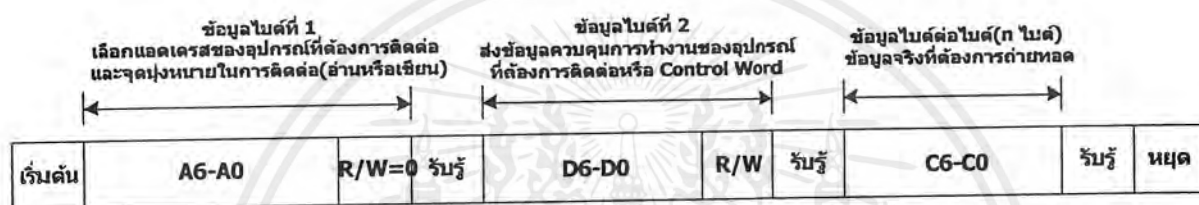
บิต7	บิต6	บิต5	บิต4	บิต3	บิต2	บิต1	บิต0
X	X	X	X	A2	A1	A0	R/W

รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการอ้างถึงอุปกรณ์ระบบบัส I<sup>2</sup>C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลในไบต์ต่อมาคือข้อมูลควบคุม (Control Byte) ในอุปกรณ์แต่ละตัวมีการกำหนดข้อมูลที่แตกต่างกันไป ยกตัวอย่าง ไอซีขยายพอร์ตมีข้อมูลควบคุมที่ใช้กำหนดว่า บิตใดเป็นบิตอินพุตบิตใดเป็นบิตเอาต์พุต ในขณะที่ไอซี ADC/DAC ต้องการข้อมูลควบคุมเพื่อกำหนดให้ทำงานเป็นวงจรร ADC หรือ DAC เป็นต้น ข้อมูลในไบต์ต่อมาคือ ข้อมูลที่ทำการถ่ายทอดจริง (Data)

หลังจากที่มีการถ่ายทอดข้อมูลในแต่ละไบต์ อุปกรณ์สเลฟที่ได้รับการติดต่อต้องส่งสัญญาณรับรู้ตอบกลับมาด้วยทุกครั้ง เพื่อให้กระบวนการถ่ายทอดข้อมูลสามารถดำเนินต่อไปได้ใน รูปที่ 2.6 แสดง รูปแบบข้อมูลอนุกรมที่เกิดขึ้นในการติดต่อบนบัส I<sup>2</sup>C ของการอ้างอิงแบบ 7 บิต

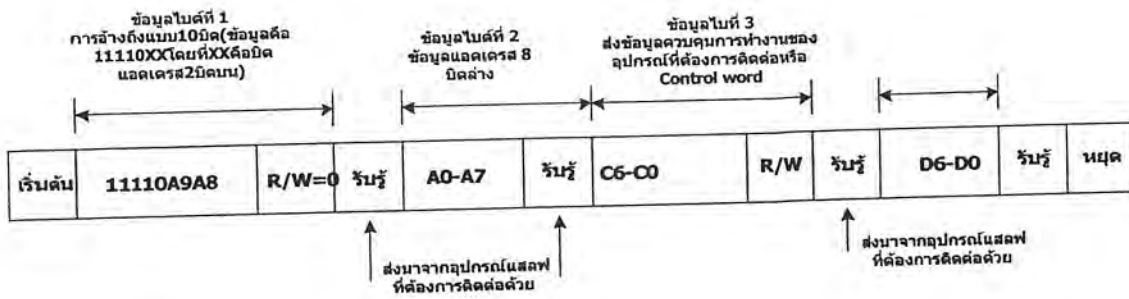


รูปที่ 2.7 แสดงการอ้างอิงแอดเดรสของอุปกรณ์แบบ 7 บิต

### การอ้างอิงแบบ 10 บิต

ในการอ้างอิงแบบนี้ ยังคงใช้รูปแบบข้อมูลอนุกรมที่เหมือนกันแบบ 7 บิตหากแต่จะมีข้อมูลเพิ่มขึ้นมาเล็กน้อย โดยในข้อมูลไบต์แรกหลังเกิดสถานะเริ่มต้น ต้องกำหนดให้ 5 บิตบนมีข้อมูลเป็น 11110 ส่วนอีก 2 บิตถัดมาเป็นบิตแอดเดรสของอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อ ในบิต LSB ของข้อมูลไบต์แรก ยังเป็นการกำหนดว่า ต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับอุปกรณ์สเลฟตัวที่ต้องการติดต่อกับ ข้อมูลไบต์ต่อมาเป็นข้อมูลไบต์ที่ 2 ของอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อกับ ข้อมูลไบต์ถัดไปจึงเป็นข้อมูลควบคุมข้อมูล หลังจากนั้นก็จะจะเป็นข้อมูลจริงที่ใช้ในการติดต่อ

เช่นเดียวกับการอ้างอิงแบบ 7 บิต หลังจากถ่ายทอดข้อมูลครบทุกไบต์ ต้องมีสถานะรับรู้เกิดขึ้น เพื่อให้กระบวนการถ่ายทอดข้อมูลสามารถดำเนินการต่อไปได้ ในรูปที่ 2.7 แสดงรูปแบบข้อมูลอนุกรมของการอ้างอิงแบบ 10 บิต



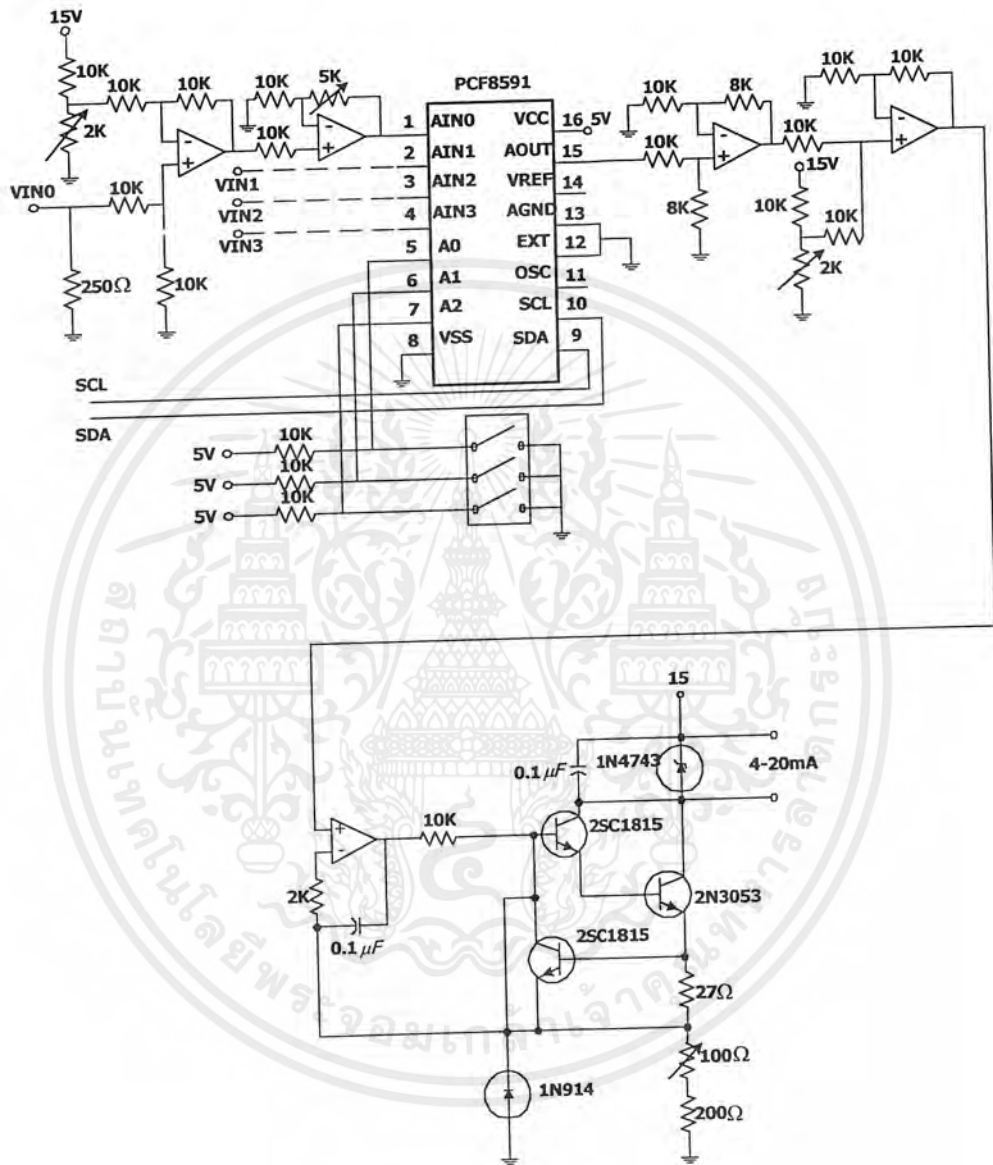
รูปที่ 2.8 แสดงรูปแบบข้อมูลอนุกรมที่ใช้ในการติดต่อกับอุปกรณ์ระบบบัส I<sup>2</sup>C แบบ 10 บิต

### การต่ออุปกรณ์ระบบ I<sup>2</sup>C กับพอร์ตอนุกรม

- ใช้ขา CTS สำหรับข้อมูลที่ป้อนเข้ามายังคอมพิวเตอร์ ผ่านทาง SDA
  - ใช้ขา RTS สำหรับส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ไปยังอุปกรณ์บัส I<sup>2</sup>C ผ่านทางขา SDA
  - ใช้ขา DTR สำหรับส่งสัญญาณนาฬิกาออกจากคอมพิวเตอร์ เข้าไปในระบบบัส I<sup>2</sup>C ทางขา SCL
- การทำงานในส่วนนี้จะใช้สัญญาณของพอร์ตอนุกรมที่ผ่านวงจรบัฟเฟอร์มาแล้ว ร่วมกับทรานซิสเตอร์ เพื่อกำหนดสถานะบนบัสในสถานะปกติ มีสถานะเป็นลอจิกสูงหรือเป็นสถานะบัส ว่างนั่นเอง

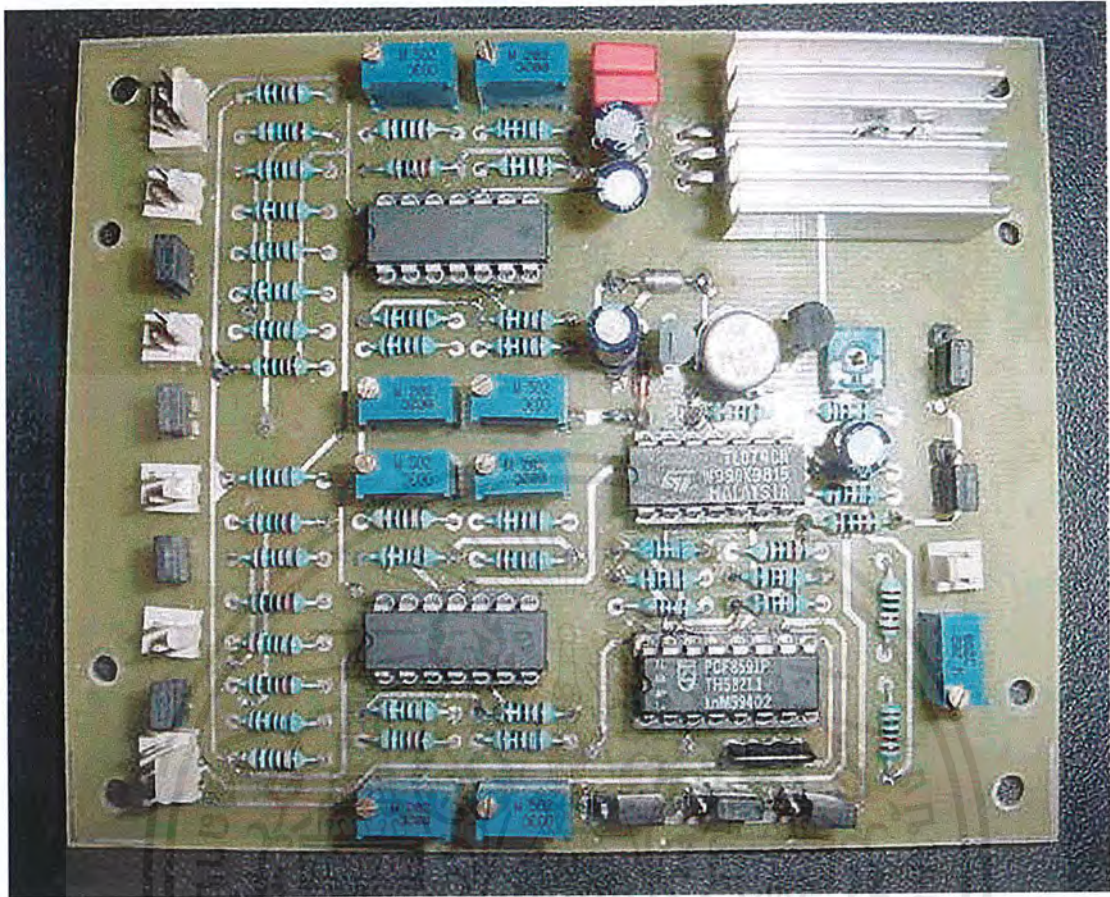
## 2.2 DATA CONVERTER

ในส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณที่วัดได้จากกระบวนการแล้วทำการแปลง A/D เพื่อส่งให้ Computer ละรับสัญญาณจาก Computer แล้วทำการแปลง D/A เพื่อส่งต่อไปยัง Final-control แต่เนื่องจากว่า Input ที่เข้า A/D และ Output ที่ออกจาก D/A นั้นสัญญาณจะอยู่ในช่วง 0-5 V แต่สัญญาณที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารภายในกระบวนการนั้น จะใช้สัญญาณมาตรฐานขนาด 1-5 V หรือ 4-20 mA ดังนั้นจึงต้องมีวงจรแปลงสัญญาณให้เหมาะสมก่อนที่จะนำสัญญาณเข้าสู่ PCF 8591 และก่อนที่จะนำสัญญาณจาก PCF 8591 ส่งไปยังส่วน Final control ซึ่งรูปของวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 จากรูปจะเห็นได้ว่าสัญญาณ Input ที่รับเข้ามานั้นจะเป็น 1-5 V หรือ 4-20 mA ก็ได้ สัญญาณที่รับเข้ามานั้นจะถูกแปลงให้อยู่ในช่วง 0-5 V ก่อนที่จะนำเข้าสู่ PCF 8591 และสัญญาณ Output ขนาด 0-5 V ที่ออกมาจาก PCF 8591 นั้นจะถูกแปลงให้มีขนาด 4-20 mA ก่อนที่จะส่งไปยังส่วน Final Control



รูปที่ 2.9 แสดงวงจร Data Converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงรูปวงจร Data Converter ที่ทำการสร้างขึ้น

### 2.2.1 ข้อมูลเบื้องต้นของ IC PCF 8591

เป็น ไอซีแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัลและแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาลอกในตัวเดียวกันทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางโดยมีรายละเอียดดังนี้

- ทำงานโดยใช้แหล่งจ่ายไฟชุดเดียว
- ทำงานที่แรงดัน 2.5 ถึง 6 โวลท์
- กินกระแสที่ขณะสภาวะสแตนด์บายต่ำ
- ติดต่อกับไมโครคอมพิวเตอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านระบบบัส I<sup>2</sup>C
- สามารถเลือกตำแหน่งแอดเดรสทางฮาร์ดแวร์จากขา ทำให้สามารถต่อพ่วงได้สูงสุดถึง 8 ตัว
- อัตราการสุ่มข้อมูล (Sampling) ขึ้นอยู่กับความเร็วของสัญญาณอะนาลอกได้ 4 ช่องทั้งยังเลือกได้ว่าจะให้ทำงานแบบแยกช่องหรือทำงานแบบดิฟเฟอเรนเชียล
- การอ่านค่าสามารถกำหนดให้เลื่อนช่องอินพุตโดยอัตโนมัติได้
- สัญญาณอะนาลอกมีระดับแรงดันตั้งแต่  $V_{SS}$  ไปจนถึง  $V_{DD}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

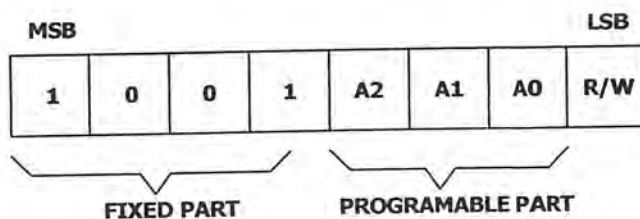
- วงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัลเป็นแบบซีกเซตซีฟ แอปพรีอซิเมชัน 8 บิต
- มีวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอะนาลอกขนาด 8 บิต 1 ช่อง PCF 8591 สามารถทำหน้าที่เป็นไอซีแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัลขนาด 8 บิต 4 ช่องและ สามารถทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาลอกได้ในคราวเดียวกัน ด้วยการ ควบคุมผ่านระบบบัส I<sup>2</sup>C ทำให้สามารถต่อพ่วงไอซี PCF 8591 ได้สูงสุดถึง 8 ตัว รองรับการอ่านค่าสัญญาณ อะนาลอกเอาต์พุตสูงสุดได้ถึง 32 ช่อง และสามารถส่งสัญญาณอะนาลอกเอาต์พุตได้ถึง 8 ช่องด้วย การกำหนดแอดเดรสจากขา A0, A1 และ A2 ข้อมูลควบคุมทั้งหมดจะถูกเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ควบคุม ภายใน PCF 8591 เมื่อจ่ายไฟให้แก่ PCF 8591 ครั้งแรก บิตต่างๆของข้อมูลภายในรีจิสเตอร์ควบคุมจะ เป็น "0"

### ออสซิลเลเตอร์

วงจรรออสซิลเลเตอร์ภายใน PCF 8591 จะสร้างสัญญาณนาฬิกาสำหรับแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล เมื่อต้องการใช้วงจรรออสซิลเลเตอร์ภายใน ขา EXT ต้องต่อลงกราวด์ ถ้าต้องการใช้ออสซิลเลเตอร์จากภายนอกขา EXT ต้องต่อเข้ากับไฟบวก และป้อนสัญญาณนาฬิกาเข้าที่ขา OSC ของ PCF 8591 โดยความถี่ของสัญญาณนาฬิกาสูงสุดที่ป้อนให้กับวงจรรออสซิลเลเตอร์เท่ากับ 1.25MHz

### 2.2.2 การรับและส่งค่าของ IC PCF 8591

ในการรับและการส่งของ IC PCF 8591 นั้นจะต้องอ้างแอดเดรสที่จะทำการติดต่อซึ่งรูปแบบการอ้างแอดเดรสนั้นได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.1.3 IC PCF 8591 นี้จะใช้การอ้างแอดเดรสแบบ 7 บิต ข้อมูลกำหนดแอดเดรส 4 บิตบนจะเป็นค่าแอดเดรสเฉพาะของอุปกรณ์ตัวนั้นๆที่กำหนดมาจากผู้ผลิตเราไปสามารถเปลี่ยนแปลงได้ สำหรับ IC PCF 8591 จะมีค่าเท่ากับ  $1001_2$  ข้อมูล 3 บิตถัดมา A0, A1, A2 จะเป็นค่าของแอดเดรสที่เราสามารถกำหนดได้ทางฮาร์ดแวร์ส่วนบิต LSB ใช้ในการกำหนดว่าต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูลถ้าเป็น 0 หมายถึงต้องการเขียนข้อมูลถ้าเป็น 1 หมายถึงต้องการอ่านข้อมูลรูปแบบการอ้างแอดเดรสแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 2.11 แสดง Address Byte

### ข้อมูลควบคุม

หลังจากส่งข้อมูลกำหนดแอดเดรสให้แก่ IC PCF8591 แล้วต้องส่งข้อมูลควบคุมตาม ไปด้วย เพื่อกำหนดคุณสมบัติของ IC PCF8591 โดยมีรายละเอียดดังนี้

บิต 6 ใช้สำหรับการอินาเบิลขาอะนาล็อกเอาต์พุตเมื่อต้องการอินาเบิลต้องกำหนดให้ขานี้เป็น “1”

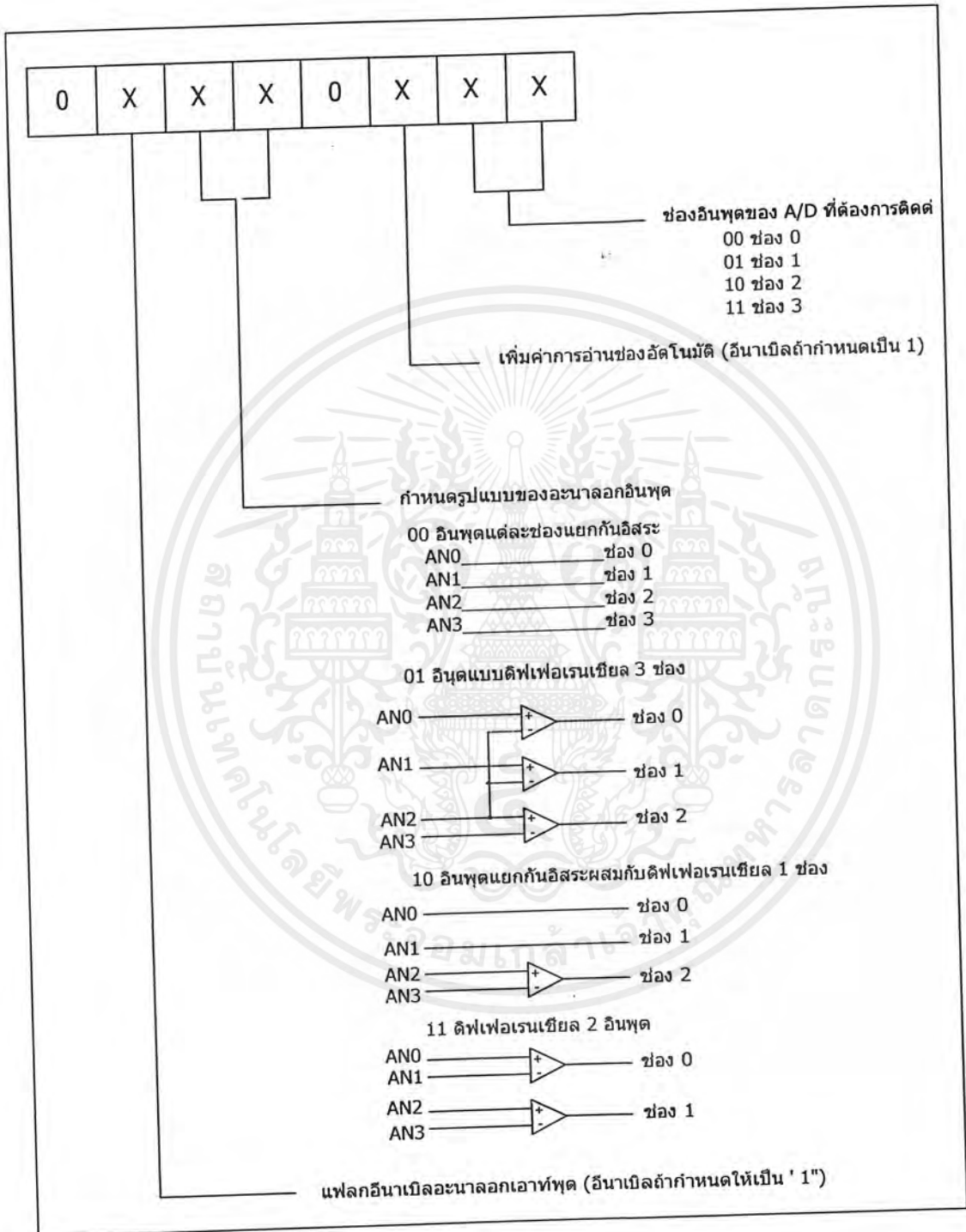
บิต 4 และ บิต 5 ใช้สำหรับกำหนดรูปแบบของสัญญาณอะนาล็อกอินพุตที่ป้อนให้แก่ IC PCF8591

บิต 2 ใช้สำหรับเลือกรูปแบบการอ่านข้อมูลจากขาอินพุตอะนาล็อกว่าจะเป็นการอ่านเพียงอินพุตเดียวหรืออ่านแบบเรียงลำดับทุกอินพุต ถ้าต้องการอ่านแบบเรียงลำดับต้องกำหนดให้บิตนี้เป็น “1”

บิต 0 บิต 1 ใช้สำหรับกำหนดช่องของอะนาล็อกอินพุตที่ต้องการอ่านถ้ากำหนดให้บิต 2 เป็น “1” และที่บิต 0 และบิต 1 เป็น “0” หลังจากอ่านค่าของช่อง 0 แล้ว ต่อไปอ่านค่าจากอะนาล็อกอินพุต ช่องที่ 1 เรียงไปจนถึงช่องที่ 3

ข้อมูลควบคุมทั้งหมดนี้จะถูกเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ควบคุมภายใน IC PCF8591 ครั้งแรกบิตต่างๆ ของข้อมูลภายในรีจิสเตอร์ควบคุมจะถูกกำหนดให้เป็น “0” รูปแบบของข้อมูลควบคุมแสดงได้ดังรูปที่

2.12



รูปที่ 2.12 แสดง Control Byte

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเขียนโปรแกรมติดต่อกับมาตรฐาน I<sup>2</sup>C

- โปรแกรมย่อยการสร้างสัญญาณ Start ให้กับ I<sup>2</sup>C สถานะเริ่มต้นของ I<sup>2</sup>C จะเริ่มจาก
  - 1) ขา SCL และขา SDA ต้องมีลอจิก “1” ก่อนเพื่อกำหนดให้อยู่ในสภาวะบัสว่าง
  - 2) กำหนดให้ขา SDA มีลอจิก “0” ก่อน
  - 3) จากนั้นจึงกำหนดให้ขา SCL มีลอจิก “0” ตามมา

สามารถเขียนโปรแกรมได้ดังนี้

Procedure I2CStart();

begin

ComPort.SetRTSSState(True); //SDA=1

ComPort.SetDTRState(False); //SCL=0

ComPort.SetDTRState(True); //SCL=1

ComPort.SetRTSSState(False); //SDA=0

ComPort.SetDTRState(False); //SCL=1

end;

- โปรแกรมย่อยการสร้างสัญญาณ Stop ให้กับ I<sup>2</sup>C มีขั้นตอนดังนี้

- 1) กำหนดให้ขา SDA มีลอจิก “0” ก่อน
- 2) จากนั้นกำหนดให้ขา SCL มีลอจิกเป็น “1”
- 3) ให้ขา SDA มีสถานะลอจิกเป็น “1”

- เขียนโปรแกรมย่อยได้ดังนี้

Procedure I2CStop();

begin

ComPort.SetRTSSState(False); //SDA=0

ComPort.SetDTRState(True); //SCL=1

ComPort.SetRTSSState(True); //SDA=1

end;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โปรแกรมย่อยเพื่อสร้างสถานะอื่นบนบัส I<sup>2</sup>C

### โปรแกรมย่อยสถานะ ACK

เมื่อมีการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์มาสเตอร์ไปยังอุปกรณ์สเลฟ อุปกรณ์สเลฟจะตอบกลับสัญญาณที่ส่งออกไปนี้ด้วยสัญญาณ รับรู้หรือ Acknowledge (ACK) เพื่อเป็นการบอกให้รู้ว่าได้รับข้อมูลเรียบร้อยแล้ว แต่เมื่อมาเขียนโปรแกรมบน Delphi การทำงานที่มีลักษณะเป็นมัลติเทสทิง (Multi-Tasking) การเขียนโปรแกรมเพื่อให้รอรับสัญญาณ ACK นั้นจะทำให้โปรแกรมหยุดชะงัก จึงต้องเขียนโปรแกรมเสมือนว่าได้รับสัญญาณ ACK โดยทำให้บัสว่างแล้วส่ง SCL เป็น "0" ออกไปเพื่อแสดงว่าได้รับ ACK แล้ว สามารถเขียนโปรแกรมได้ดังนี้

```
Procedure ACK();
```

```
begin
```

```
  ComPort.SetRTSState(True); //SDA=1
```

```
  ComPort.SetDTRState(True); //SCL=1
```

```
  ComPort.SetDTRState(False); //SCL=0
```

```
end;
```

-โปรแกรมย่อยสถานะ MACK

โปรแกรมย่อย MACK เป็นโปรแกรมย่อยที่ใช้ส่งสัญญาณ Acknowledge ซึ่งจะเป็นการส่งสัญญาณ Acknowledge จากตัวมาสเตอร์หรือจากคอมพิวเตอร์นั่นเอง โดยเขียนโปรแกรมย่อย MACK ได้ดังนี้

```
Procedure MACK();
```

```
begin
```

```
  ComPort.SetRTSState(False); //SDA=0
```

```
  ComPort.SetDTRState(True); //SCL=1
```

```
  ComPort.SetDTRState(False); //SCL=0
```

```
  ComPort.SetRTSState(True); //SDA=1
```

```
end;
```

การส่งสัญญาณ MACK จะส่งให้กับตัวลูก (Slave) ของ I<sup>2</sup>C บัสในกรณีที่ตัวแม่ (Master) ทำการอ่านข้อมูลจากตัวลูกเรียบร้อยแล้ว ซึ่งจะตรงกันข้ามกับ ACK ซึ่งจะเป็นการตอบกลับจากตัวลูกเพื่อยืนยันให้ตัวแม่รับรู้ว่าได้รับข้อมูลแล้ว

- โปรแกรมย่อยส่งข้อมูลลอจิก “0”

```

Procedure Send0();
begin
  ComPort.SetRTSState(False); //SDA=0
  ComPort.SetDTRState(True); //SCL=1
  ComPort.SetDTRState(False); //SCL=0
end;

```

- โปรแกรมย่อยส่งข้อมูลลอจิก “1”

```

Procedure Send1();
begin
  ComPort.SetRTSState(True); //SDA=1
  ComPort.SetDTRState(True); //SCL=1
  ComPort.SetDTRState(False); //SCL=0
end;

```

- โปรแกรมย่อยในการส่งข้อมูล 8 บิต

```

Procedure Send8BIT(Add : Integer);
var
  I,J,Binary:Integer;
begin
  Binary:=1;
  For I:=7 Downto 0 Do
    Begin
      If I=0 Then Binary:=1
      Else
        Begin
          For J:=1 Downto 1 Do
            Binary:=2*Binary;
          End;
        If (Add And Binary)=Binary Then
          Send1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Else
    Send0;
    Binary:=1;
End;
end;

```

- ฟังก์ชันที่ใช้ในการอ่านค่าจาก PCF 8591

```

Function Data():Integer;
var
    I,J,Binary:Integer;
    Dat:Integer;
begin
    Dat:=0;
    Binary:=1;
    For I:=7 Downto 0 Do
        Begin
            ComPort.SetRTSSState(True);
            ComPort.SetDTRState(True);
            If I=0 Then Binary:=1;
            If I <> 0 Then
                Begin
                    For J:=I DownTo 1 Do
                        Binary:=2*Binary;
                    End;
                End;
            IfNot (ComPort.CTS) Then
                Dat:=Binary Or Dat;
            ComPort.SetDTRState(False);
            Binary:=1;
        End;
    Data:=Dat;
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การอ่านข้อมูลอะนาล็อกอินพุตจาก IC PCF8591

- 1) ส่งสัญญาณ Start
- 2) ส่งข้อมูลกำหนดแอดเดรส โดยเลือกที่ A0,A1,A2 และให้ทำงานในโหมดเขียนข้อมูล บิตที่ LSB มีค่า "0"
- 3) รอรับสัญญาณ ACK จาก IC PCF8591
- 4) ส่งข้อมูลควบคุมไปที่ IC PCF8591
- 5) รอรับสัญญาณ ACK จาก IC PCF8591
- 6) ส่งสัญญาณ Stop
- 7) ส่งสัญญาณ Start
- 8) ส่งข้อมูลกำหนดแอดเดรสอีกครั้ง โดยครั้งนี้กำหนดให้เป็นโหมดอ่านข้อมูลคือ บิต LSB มีค่า "1"
- 9) รอรับสัญญาณ ACK จาก IC PCF8591
- 10) อ่านค่าจากอะนาล็อกอินพุตที่ได้กำหนดไปตอนส่ง Control Byte ถ้า Control Byte ที่ส่งไป นั้นกำหนดให้บิตที่มีค่า "1" คือเพิ่มค่าการอ่านช่องอัดโนมิติหลังจากที่อ่านค่าจากอะนาล็อกอินพุตช่อง ปัจจุบันแล้ว ต้องส่งสัญญาณ MACK (MASTER ACK) ไปยัง IC PCF8591 ก่อน จึงจะสามารถอ่านค่าจากอะนาล็อกอินพุตช่องต่อไปได้
- 11) รอรับสัญญาณ ACK จาก IC PCF8591
- 12) ส่งสัญญาณ Stop

ตัวอย่างการรับข้อมูลที่ Address 000 และอ่านค่า 4 Channel โดยเริ่มอ่านจาก Channel 0

```

I2CStart;
Send8Bit(144);
ACK();
Send8Bit(69);
ACK();
I2CStop();
I2CStart();
Send8Bit(145);
ACK();
AbhBarTestChannel1.Value:=Data*5/255;
MACK();
AbHBarTestChannel2.Value:=Data*5/255;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MACK();
AbHBarTestChannel3.Value:=Data*5/255;
MACK();
AbHBarTestChannel4.Value:=Data*5/255;
Ack();
I2CStop();

```

### การเขียนข้อมูลไปยังอะนาล็อกเอาต์พุทของ IC PCF8591

- 1) ส่งสัญญาณ Start
- 2) ส่งข้อมูลกำหนดแอดเดรสโดยให้ทำงานในโหมดเขียนข้อมูลคือ บิต LSB มีค่า "0"
- 3) รอรับสัญญาณ ACK จาก IC PCF8591
- 4) ส่งข้อมูลควบคุมไปที่ IC PCF8591 โดยข้อมูลควบคุมจะมีค่า 01000100<sub>2</sub> หรือ 44H เพื่อ  
เปิด ขาอะนาล็อกเอาต์พุท
- 5) รอรับสัญญาณจาก IC PCF8591
- 6) ส่งข้อมูลไปยังอะนาล็อกเอาต์พุทโดยค่าที่ส่งไปต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0-255
- 7) รอรับสัญญาณ ACK จาก IC PCF8591
- 8) ส่งสัญญาณ Stop

ตัวอย่างการเขียนข้อมูลสู่ PCF8591 ที่ Address 000

```

I2CStart();
Send8Bit(144);
Ack();
Send8Bit(68);
Ack();
Send8Bit(255);
ACK();
I2CStop();

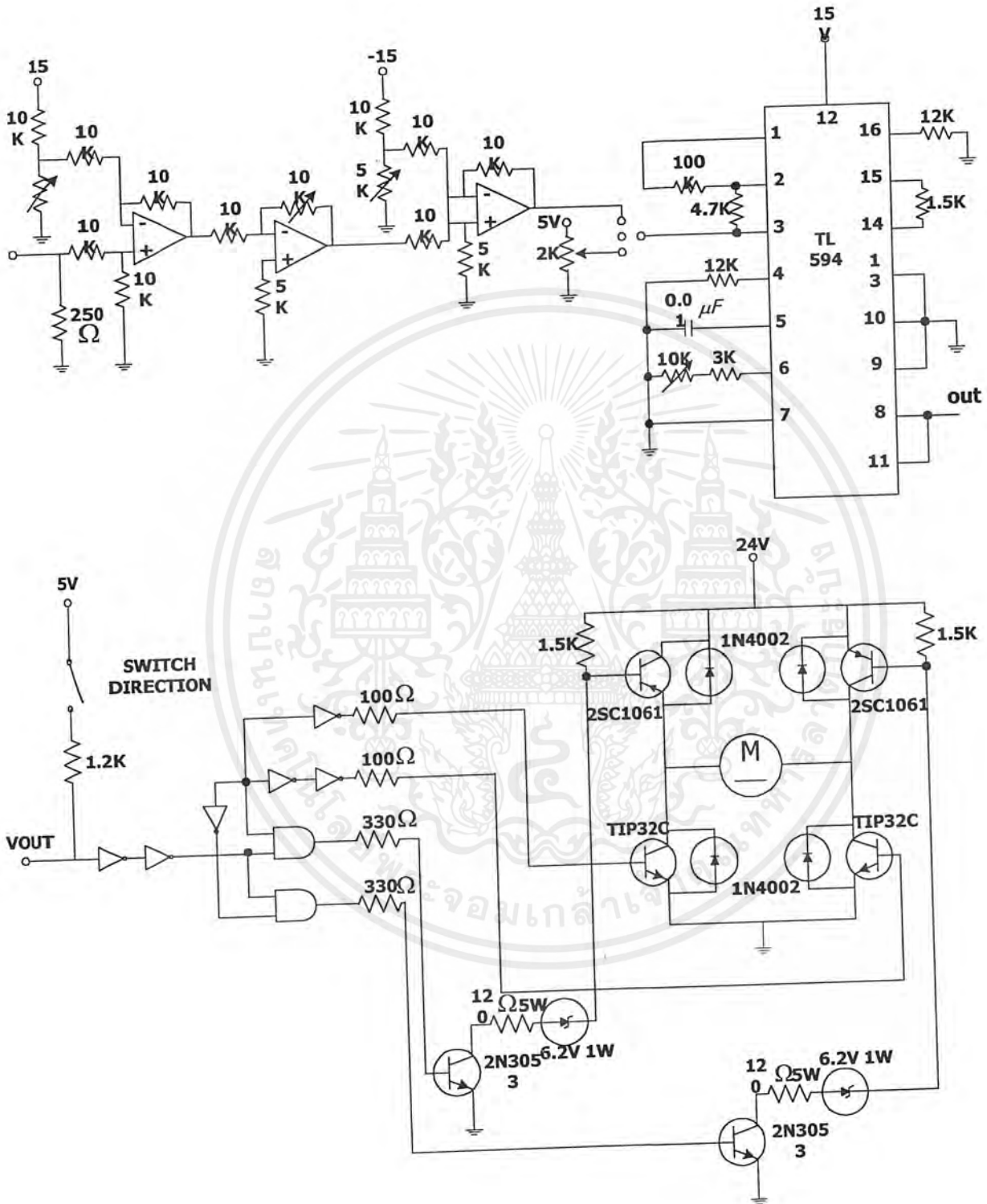
```

### 2.3 FINAL CONTROL

ส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณขนาด 4-20 mA ที่ส่งมาจากส่วน Data Convertor แล้วนำสัญญาณที่ได้นี้ไปแปลงให้อยู่ในช่วง 0-5 V แล้วส่งสัญญาณขนาด 0-5 V นี้ไปยัง IC MC33033 ซึ่งที่ IC MC33033 นี้จะทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณให้ Moter Pump ทำงานโดยใช้หลักการของ Pulse Width Modulation รูปวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 2.13

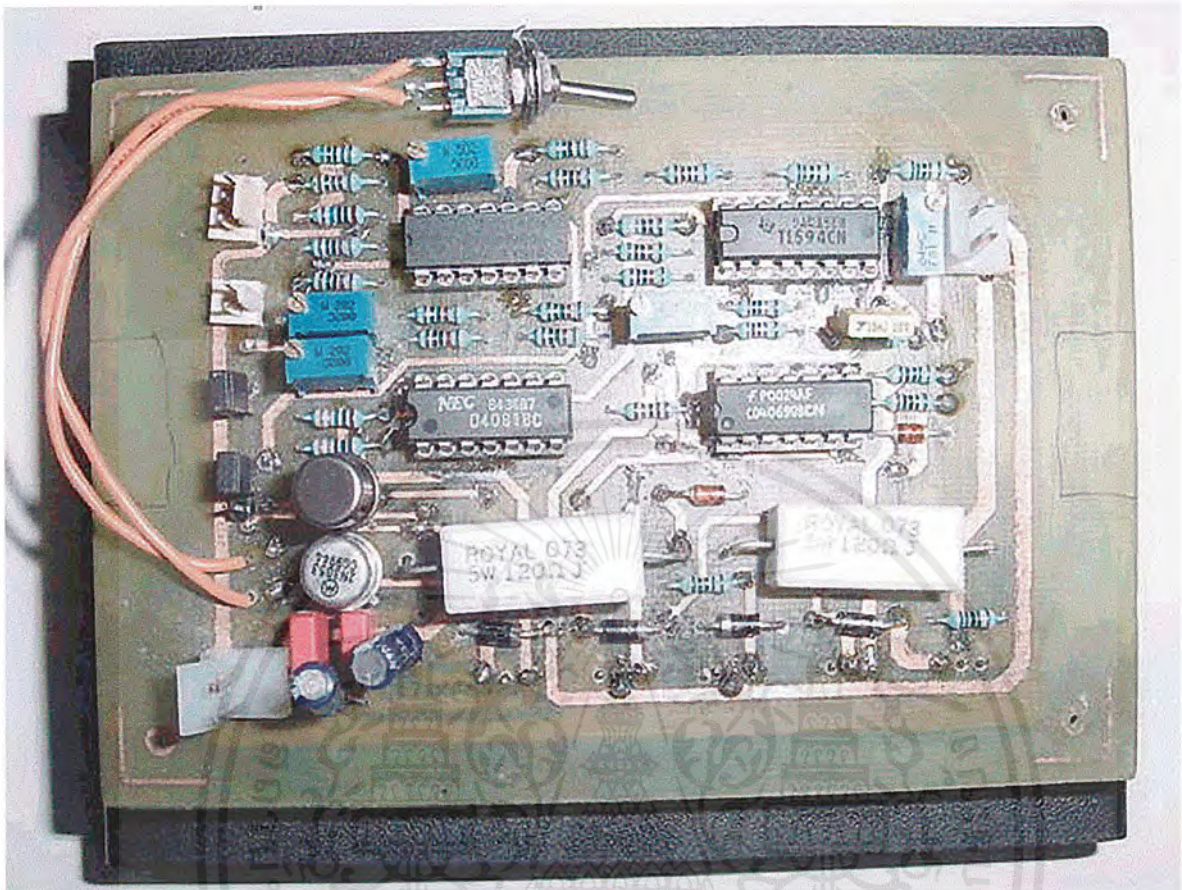
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งที่ IC MC33033 นี้จะทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณให้ Motor Pump ทำงาน โดยใช้หลักการของ Pulse Width Modulation รูปวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงวงจร Drive Motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงรูปวงจร Drive Motor ที่ทำการสร้างขึ้น

## 2.4 SENSOR

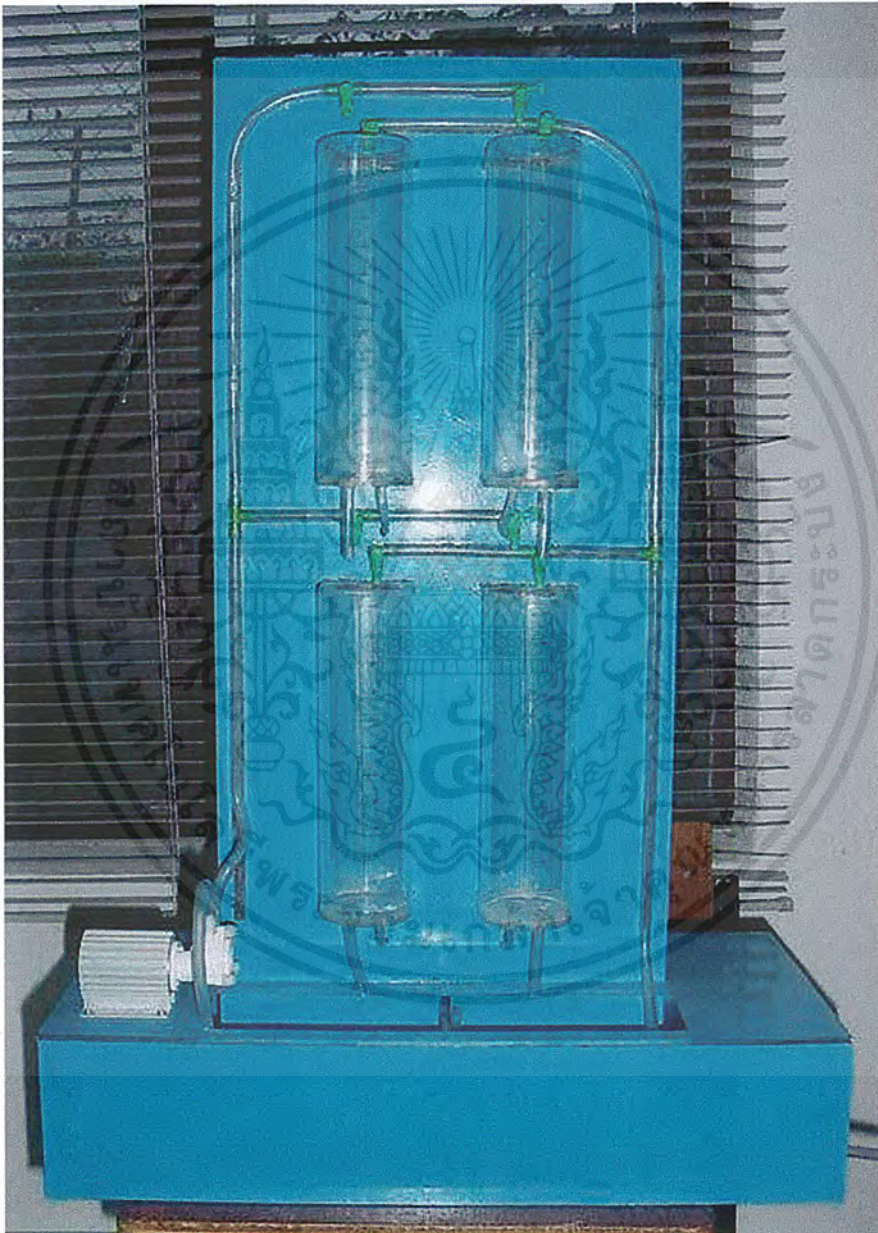
ส่วนที่จะทำหน้าที่ในการวัดระดับน้ำของกระบวนการโดยใช้หลักการของ Differential Pressure แทงค์ที่วัดระดับน้ำเป็นแบบเปิดจึงใช้ความดันบรรยากาศเป็นความดันอ้างอิง เมื่อระดับน้ำในแทงค์เปลี่ยนแปลงไปก็จะทำให้ความดันที่ได้เปลี่ยนแปลงไปด้วยตัว Sensor ที่ใช้วัดความดันนี้คือ MPX 2010 DP Rang ของการวัดอยู่ที่ช่วง 0-10 Kpa และความดันที่ได้นี้จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของ Voltage ความไวในการวัดเท่ากับ 2.5 mV/Kpa ค่าแรงดันที่ได้จาก MPX 2010DP จะถูกขยายและแปลงสัญญาณให้มีขนาด 4-20 mA ก่อนที่จะส่งไปยังส่วนDataConvertor รูปวงจรแสดงได้รูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 2.5 PROCESS PLANT

Plant ที่ทำการสร้างขึ้นนี้เป็นแบบระดับน้ำโดยที่ด้านฐานของ Plant นั้นจะมีป้อพักน้ำ สำหรับใช้ป้อนน้ำขึ้นสู่แท่งค้ำน้ำโดยแท่งค้ำน้ำนั้นจะมีอยู่ 4 ใบสามารถต่อถึงกับแบบ Non Interact รูปของ กระบวนการแสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.17 แสดง Plant ที่ทำการสร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### คุณลักษณะของ Plant

1. มีขนาดเล็ก
2. ควบคุมอัตราไหลของน้ำโดยปรับอัตราการจ่ายแรงดันให้กับปั๊มน้ำ
3. วัดระดับน้ำโดยใช้หลักการความดันแตกต่างกัน
4. แทงค์ 2 ใบ สามารถต่อถึงกันได้แบบ Non Interact

### การประยุกต์ใช้งาน

Plant ที่ทำการสร้างขึ้นนี้สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในการควบคุมได้มากมายหลายแบบซึ่งลักษณะที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานมีดังนี้

1. First Order
2. Second Order
3. PID Controller Design
4. Fuzzy Logic Control
5. Multiinput Multioutput
6. System Modelling

รูปของ Plant แสดงได้ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งเป้าหมายในการควบคุมคือระดับน้ำที่ ถึงที่ 1 และถึงที่ 2 ด้วยปั๊มน้ำ 2 ตัว โดยอินพุตที่เข้าสู่กระบวนการคือ  $V_1$  และ  $V_2$  (แรงดันที่จ่ายให้กับปั๊มน้ำแต่ละตัว) และเอาต์พุต คือ  $h_1$  และ  $h_2$  (ระดับน้ำที่วัดได้) จากสมการสมดุลมวลและกฎของเบอร์นูลีจะได้ว่า

$$A \frac{dh}{dt} = q_{in} - q_{out}$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{q_{in} - q_{out}}{A}$$

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{-a_1\sqrt{2gh_1}}{A_1} + \frac{a_3\sqrt{2gh_3}}{A_1} + \frac{\gamma_{11}k_1}{A_1}V_1 + \frac{\gamma_{21}k_2}{A_1}V_2 \quad (2.1)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{-a_2\sqrt{2gh_2}}{A_2} + \frac{a_4\sqrt{2gh_4}}{A_2} + \frac{\gamma_{12}k_1}{A_2}V_1 + \frac{\gamma_{22}k_2}{A_2}V_2 \quad (2.2)$$

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{-a_3\sqrt{2gh_3}}{A_3} + \frac{\gamma_{13}k_1}{A_3}V_1 + \frac{\gamma_{23}k_2}{A_3}V_2 \quad (2.3)$$

$$\frac{dh_4}{dt} = \frac{-a_4\sqrt{2gh_4}}{A_4} + \frac{\gamma_{14}k_1}{A_4}V_1 + \frac{\gamma_{24}k_2}{A_4}V_2 \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้อยู่ในรูปเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\text{ให้ } H_i = h_i(t) - \bar{h}_i \quad i = 1, \dots, 4 \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial h_i(t)} &= \frac{\partial}{\partial h_i} \left( \frac{a_i \sqrt{2gh_i(t)}}{A_i} \right) \quad i = 1, \dots, 4 \\ &= \frac{a_i}{A_i} \times \frac{1}{2} \times \frac{2g}{\sqrt{2gh_i}} \\ &= \frac{a_i}{A_i} \times \sqrt{\frac{g}{2h_i}} \end{aligned}$$

$$\text{ให้ } \pi_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2h_i}{g}} \quad i = 1, \dots, 4 \quad (2.6)$$

แทน สมการ (2.5) และ (2.6) ในสมการ (2.1), (2.2), (2.3) และ (2.4) จะได้เป็น

$$\frac{dH_1}{dt} = \frac{-H_1(t)}{T_1} + \frac{A_3}{A_1 T_3} H_3(t) + \frac{\gamma_{11} k_1}{A_1} V_1 + \frac{\gamma_{12} k_2}{A_1} V_2 \quad (2.7)$$

$$\frac{dH_2}{dt} = \frac{-H_2(t)}{T_2} + \frac{A_4}{A_2 T_4} H_4(t) + \frac{\gamma_{22} k_2}{A_2} V_2 \quad (2.8)$$

$$\frac{dH_3}{dt} = \frac{-H_3(t)}{T_3} + \frac{\gamma_{13} k_1}{A_3} V_1 + \frac{\gamma_{23} k_2}{A_3} V_2 \quad (2.9)$$

$$\frac{dH_4}{dt} = \frac{H_4(t)}{T_4} + \frac{\gamma_{14} k_1}{A_4} V_1 + \frac{\gamma_{24} k_2}{A_4} V_2 \quad (2.10)$$

$$(1 + T_1 s) H_1(s) = \frac{A_3 T_1}{A_1 T_3} H_3(s) + \frac{\gamma_{11} T_1 k_1}{A_1} V_1(s) + \frac{\gamma_{12} T_1 k_2}{A_1} V_2(s) \quad (2.11)$$

$$(1 + T_2 s) H_2(s) = \frac{A_4 T_2}{A_2 T_4} H_4(s) + \frac{\gamma_{22} T_2 k_2}{A_2} V_2(s) \quad (2.12)$$

$$(1 + T_3 s) H_3(s) = \frac{\gamma_{13} T_3 k_1}{A_3} V_1(s) + \frac{\gamma_{23} T_3 k_2}{A_3} V_2(s) \quad (2.13)$$

$$(1 + T_4 s) H_4(s) = \frac{\gamma_{14} T_4 k_1}{A_4} V_1(s) + \frac{\gamma_{24} T_4 k_2}{A_4} V_2(s) \quad (2.14)$$

$$\text{ให้ } B_1 = \frac{A_3 T_1}{A_1 T_3}, B_2 = \frac{A_4 T_2}{A_2 T_4}$$

$$C_{11} = \frac{T_1 k_1}{A_1}, C_{12} = \frac{T_1 k_2}{A_1}$$

$$C_{13} = \frac{T_3 k_1}{A_3}, C_{14} = \frac{T_3 k_2}{A_3}$$

$$C_{21} = \frac{T_2 k_1}{A_2}, C_{22} = \frac{T_2 k_2}{A_2}$$

$$C_{31} = \frac{T_4 k_1}{A_4}, C_{32} = \frac{T_4 k_2}{A_4}$$

จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H1(s) = \frac{B1}{(1+T1s)} H3(s) + \frac{\gamma11C11}{(1+T1s)} V1(s) + \frac{\gamma21C21}{(1+T1s)} V2(s) \quad (2.15)$$

$$H2(s) = \frac{B2}{(1+T2s)} H4(s) + \frac{\gamma12C12}{(1+T2s)} V1(s) + \frac{\gamma22C22}{(1+T2s)} V2(s) \quad (2.16)$$

$$H3(s) = \frac{\gamma13C13}{(1+T3s)} V1(s) + \frac{\gamma23C23}{(1+T3s)} V2(s) \quad (2.17)$$

$$H4(s) = \frac{\gamma14C14}{(1+T4s)} V1(s) + \frac{\gamma24C24}{(1+T4s)} V2(s) \quad (2.18)$$

$$H1(s) = \frac{B1}{(1+T1s)} \left[ \frac{\gamma13C13}{(1+T3s)} V1(s) + \frac{\gamma23C23}{(1+T3s)} V2(s) \right] + \frac{\gamma11C11}{(1+T1s)} V1(s) + \frac{\gamma21C21}{(1+T1s)} V2(s)$$

$$H2(s) = \frac{B2}{(1+T2s)} \left[ \frac{\gamma14C14}{(1+T4s)} V1(s) + \frac{\gamma24C24}{(1+T4s)} V2(s) \right] + \frac{\gamma12C12}{(1+T2s)} V1(s) + \frac{\gamma22C22}{(1+T2s)} V2(s)$$

จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$H1(s) = \left[ \frac{\gamma13B1C13}{(1+T1s)(1+T3s)} + \frac{\gamma11C11}{(1+T1s)} \right] V1(s) + \left[ \frac{\gamma23B1C23}{(1+T1s)(1+T3s)} + \frac{\gamma21C21}{(1+T1s)} \right] V2(s) \quad (2.19)$$

$$H2(s) = \left[ \frac{\gamma14B2C14}{(1+T2s)(1+T4s)} + \frac{\gamma12C12}{(1+T2s)} \right] V1(s) + \left[ \frac{\gamma24B2C24}{(1+T2s)(1+T4s)} + \frac{\gamma22C22}{(1+T2s)} \right] V2(s) \quad (2.20)$$

โดย

$A_i$  = พื้นที่หน้าตัดของแท่งค้ำน้ำแต่ละใบ ( $cm^2$ )  $i = 1, \dots, 4$

$a_i$  = พื้นที่หน้าตัดของรูน้ำที่ไหลออกของแต่ละแท่งค้ำ ( $cm^2$ )  $i = 1, \dots, 4$

$\bar{h}_i$  = ระดับน้ำที่ Steady State ของแต่ละแท่งค้ำ ( $cm$ )  $i = 1, \dots, 4$

$V_i$  = แรงดันที่จ่ายให้กับปั้มน้ำ ( $v$ )  $i = 1, 2$

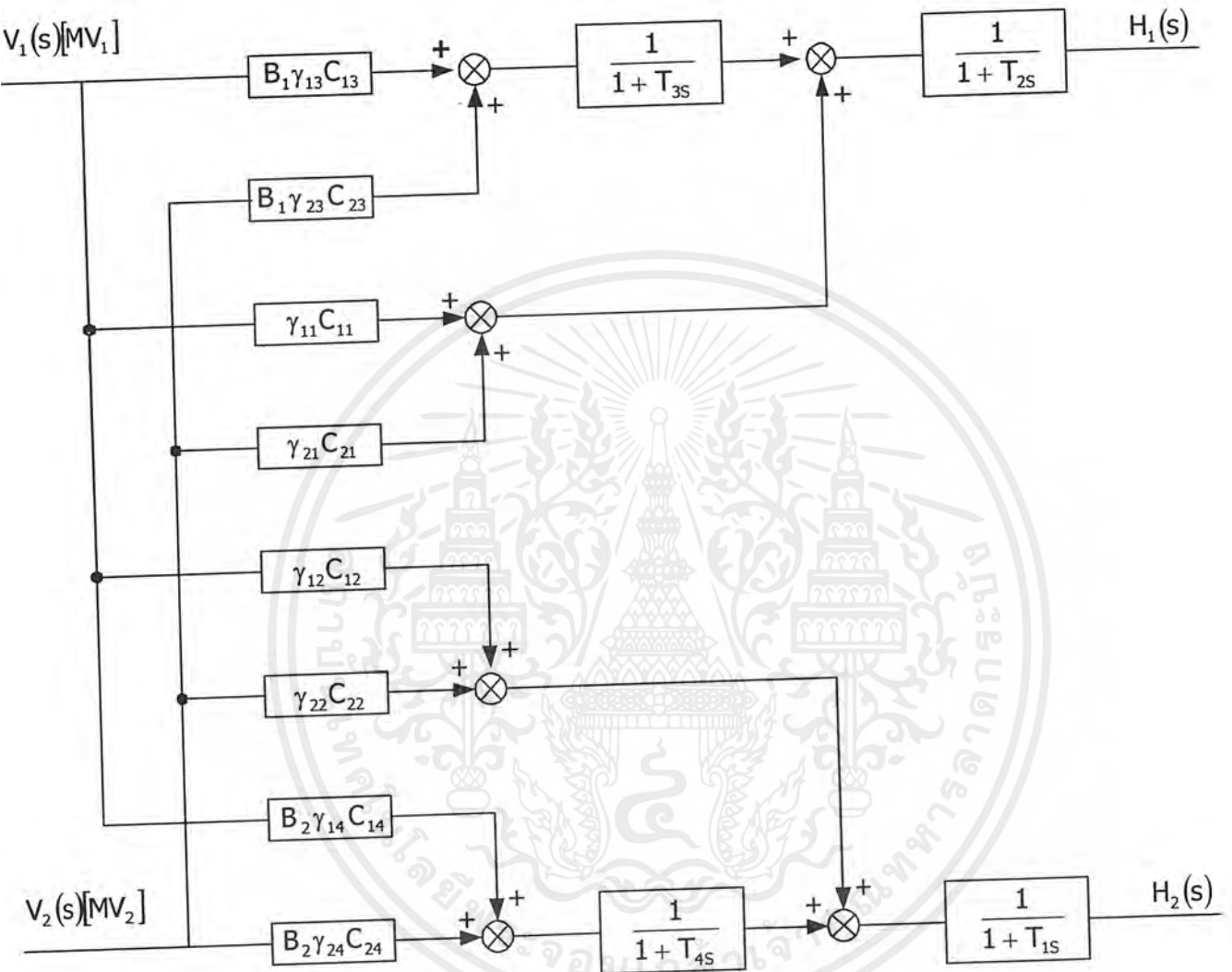
$k_i$  = อัตราการไหลของน้ำที่จ่ายโดยปั้มน้ำ ( $\frac{cm^3}{v \cdot s}$ )  $i = 1, 2$

$\gamma_{ij}$  = อัตราการเปิดวาล์วที่จ่ายน้ำเข้าแท่งค้ำที่  $j$  โดยปั้มน้ำที่  $i$   $i = 1, 2 \quad j = 1, \dots, 4$

$H_i$  = ระดับน้ำที่วัดได้ ( $cm$ )  $i = 1, 2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถวาด Black Diagram ของระบบได้ดังนี้



รูปที่ 2.18 แสดงบล็อกไดแกรมของระบบ

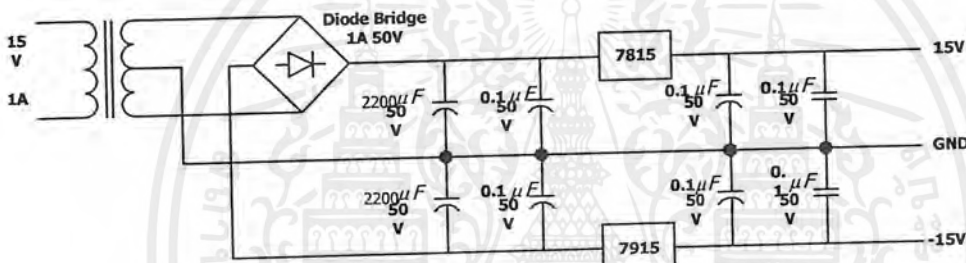
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 SUPPLY

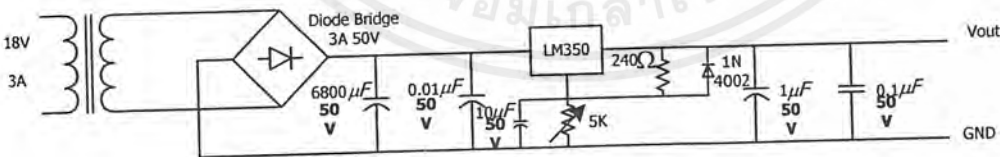
ในส่วนนี้ทำหน้าที่ในการจ่ายไฟให้กับวงจรต่างๆที่ใช้ในโครงการ โดย Supply ที่ใช้นี้จะแยกออกเป็น 4 ชุด

- 1) ส่วนที่จ่ายให้กับ ชุด Interface และชุด Data Converter
- 2) ส่วนที่จ่ายให้กับ ชุด Final Control และชุด Sensor
- 3) ส่วนที่จ่ายให้กับชุด Sesor
- 4) ส่วนที่ให้กับ ปั๊มน้ำ

โดยวงจรจ่ายไฟให้กับชุดที่ 1, 2 และ 3 จะใช้ในวงจรจากรูปที่ 2.15 และชุดที่ 4 จะใช้ในวงจรจ่ายไฟจะเห็นว่า จากรูปที่ 2.14 จะใช้ IC Regulate แบบ Fix ขนาด +15V และ -15V ส่วนวงจรรูปที่ 2.16 จะใช้ IC Regulate แบบ Adjustable ซึ่งสามารถปรับค่าได้สูงสุด 24 โวลต์

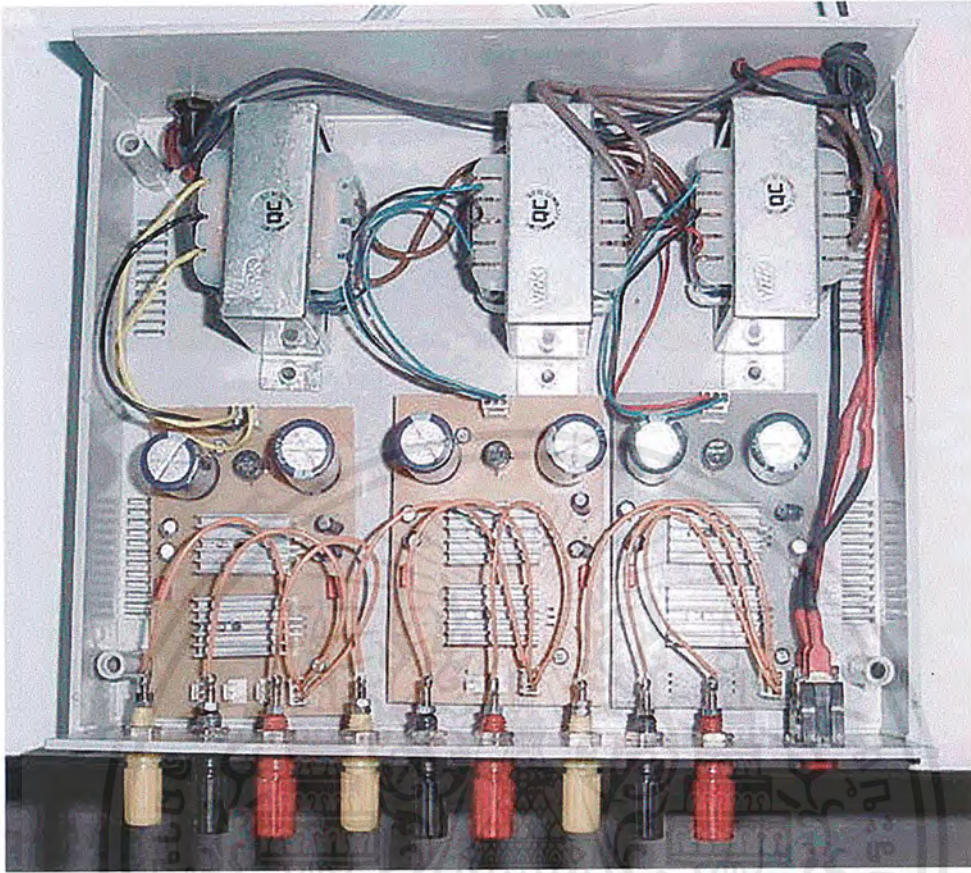


รูปที่ 2.19 แสดงวงจรจ่ายไฟกระแสตรงแบบคงที่

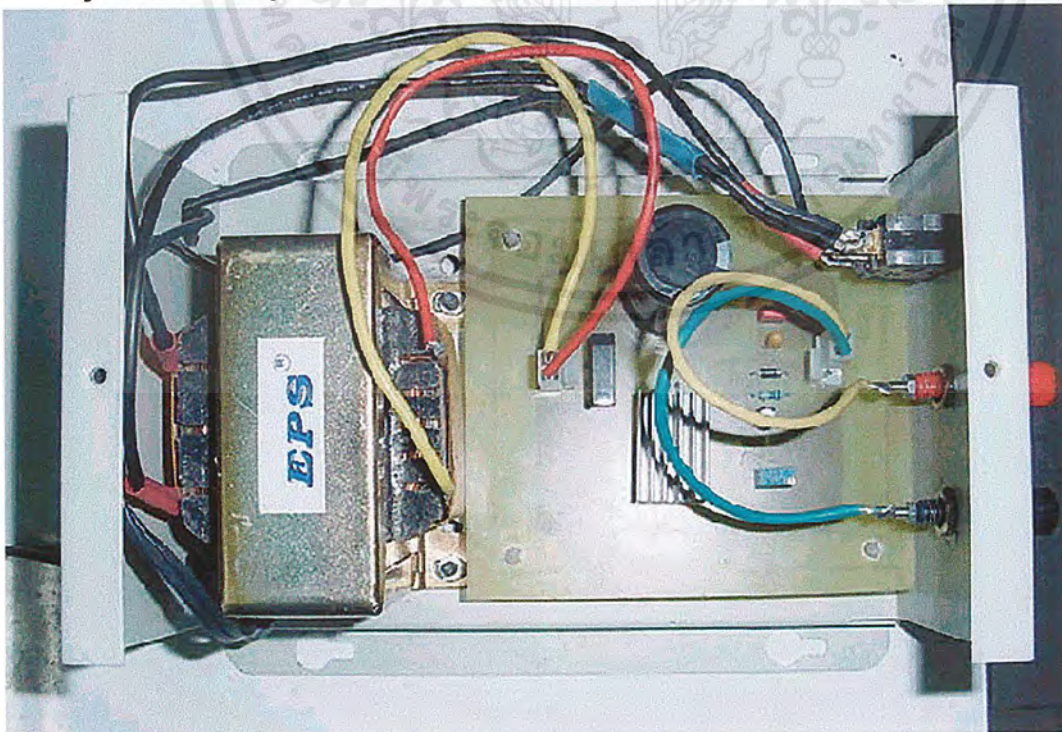


รูปที่ 2.20 แสดงวงจรจ่ายไฟกระแสตรงแบบปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แสดงรูปวงจรจ่ายไฟกระแสตรงแบบคงที่ ที่ทำการสร้างขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ทฤษฎีฟัซซีลอจิก

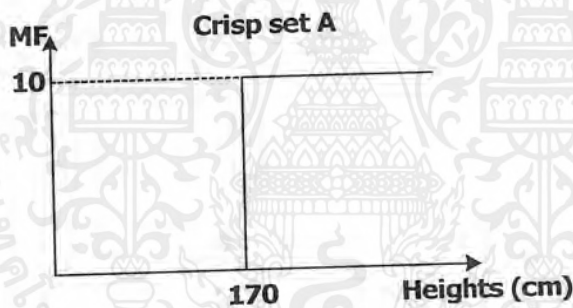
ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี จะต้องอาศัยความรู้ทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับฟัซซี เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจ โครงสร้างและหลักการทำงานของตัวควบคุมฟัซซี และเพื่อใช้ในการกำหนดโครงสร้างและวิธีการออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ เกี่ยวกับฟัซซี ตัวควบคุมฟัซซี ตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตัวเอง การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงสถิติของตัวควบคุมฟัซซี ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 ฟัซซีเซต(Fuzzy Set)

##### ทฤษฎีแบบเดิม

##### นิยามที่ 1 คลิซป์เซต(Crisp Set)

คลิซป์เซต คือ กลุ่มของสมาชิกที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนด ซึ่งอาจจะมีจำนวนจำกัดหรือไม่จำกัดก็ได้



รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างคริซป์เซตของความสูงและระดับการเป็นสมาชิก

##### นิยามที่ 2 เอกภพสัมพัทธ์ ( Universe of Discouse : $U$ )

เอกภพสัมพัทธ์ คือ เซตที่มีสมาชิกเป็นสมาชิกทั้งหมดของขอบเขตที่ทำการพิจารณา กำหนดให้  $u$  กำหนดให้  $u$  เป็นสมาชิกใดๆของ  $U$  เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $u \in U$

##### นิยามที่ 3 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก (Membership function : $\mu$ )

ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเซต เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $\mu$  ถูกนิยามดังนี้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า  $\mu_A(u) : U \in \{0,1\}$

$$\mu_A(u) = \begin{cases} 1 : u \in A \\ 0 : u \notin A \end{cases}$$

**นิยามที่ 4** การเท่ากันของเซต

เซต  $A$  จะเท่ากับเซต  $B$  ก็ต่อเมื่อสมาชิกของเซต  $A$  เป็นสมาชิกทุกตัวของเซต  $B$  และสมาชิกทุกตัวของเซต  $B$  เป็นสมาชิกทุกตัวของเซต  $A$  ด้วย เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $A=B$

$$(A=B) \leftrightarrow \{(\forall a \in B) \wedge (\forall b \in A)\}$$

โดยที่  $a \in A, b \in B$  ตามลำดับ

**นิยามที่ 5** การเป็นสับเซต (Subset)

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

$$(A \subseteq B) \leftrightarrow (\forall a \in B)$$

โดยที่  $a \in A$

เซต  $A$  จะเป็นสับเซตแท้ของเซต  $B$  ก็ต่อเมื่อสมาชิกทุกตัวของเซต  $A$  เป็นสมาชิกทุกตัวของเซต  $B$  และเซต  $A$  ไม่เท่ากับเซต  $B$  เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $A \subset B$

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

โดยที่  $a \in A$

**ทฤษฎีเซต (Fuzzy set Theory)**

**นิยามที่ 6** ปฏิบัติการพื้นฐานของเซต

คอมพลีเมนต์ คือ ตัวปฏิบัติในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม โดยที่สมาชิกใหม่คือสมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์  $U$  ที่ไม่เป็นสมาชิกของเซตเดิม เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$\square = \{u \mid (u \in U) \wedge (u \notin A)\}$$

ยูเนียน คือ ตัวปฏิบัติการในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม 2 เซต โดยที่สมาชิกของเซตใหม่ได้จากการรวมสมาชิกทั้งหมดที่เป็นสมาชิกของเซตใดเซตหนึ่งหรือทั้ง 2 เซต เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A \cup B = \{u \mid (u \in A) \wedge (u \in B)\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเตอร์เซกชัน คือ ตัวปฏิบัติการในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม 2 เซต โดยที่สมาชิกใหม่ได้จากการรวมของสมาชิกทั้งหมดที่เป็นสมาชิกของเซตเดิมทั้ง 2 เซตเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A \cap B = \{u \mid (u \in A) \vee (u \in B)\}$$

**นิยามที่ 7** ฟัชซีเซต (Fuzzy Set)

ฟัชซีเซต คือ เซตของคู่อันดับ และฟังก์ชันการเป็นสมาชิก  $\mu_A(u)$  โดยที่  $u$  เป็นสมาชิกใด ๆ ของเอกภพสัมพัทธ์  $U$  เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ของฟัชซีเซต  $A$  อยู่ภายใน  $U$  ได้ดังนี้

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

**นิยามที่ 8** ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัชซีเซต ( Membership Function of Fuzzy Set :  $\mu_A(u)$  )

ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัชซีเซต ถูกนิยามให้มีค่าอยู่ภายในช่วง 0 ถึง 1 เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $\mu_A(u)$  เป็นค่าที่ระบุถึงระดับความเป็นสมาชิกของฟัชซีเซต  $A$  ตัวอย่างเช่น

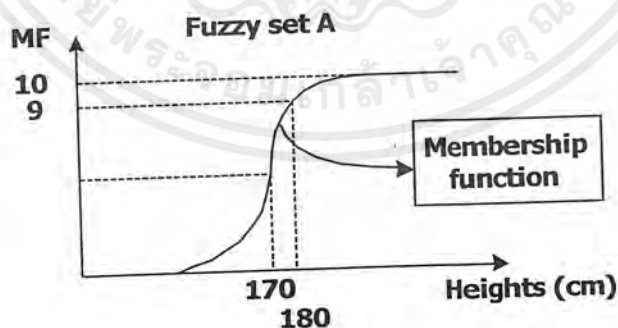
ถ้า  $\mu_A(u)$  มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่า  $u$  ไม่มีความเป็นสมาชิกของฟัชซีเซต  $A$

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

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

ถ้า  $\mu_A(u)$  มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่า  $u$  มีความเป็นสมาชิกของฟัชซีเซต  $A$  อย่างสมบูรณ์จะได้ว่า

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



รูปที่ 3.2 แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัชซีเซต A และระดับการเป็นสมาชิกของความสูง

**นิยามที่ 9** การเท่ากันของฟัซซีเซต

ฟัซซีเซต  $A$  จะเท่าฟัซซีเซต  $B$  ก็ต่อเมื่อสมาชิก  $u$  ทุกตัวในเอกภพสัมพัทธ์ มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต  $A$  เท่ากับค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต  $B$  เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์

$$A=B$$

$$(A=B) \leftrightarrow \mu_A(x) = \mu_B(x)$$

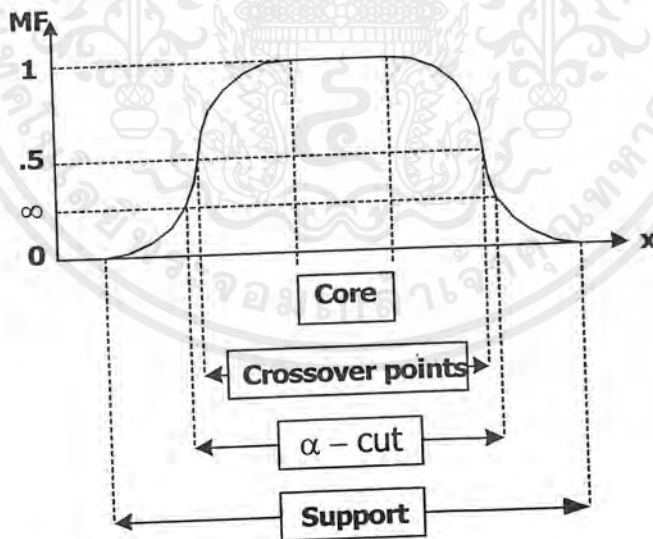
โดยที่  $\forall u \in U$

**นิยามที่ 10** การเป็นสับเซตของฟัซซีเซต

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

$$(A \subset B) \leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$$

โดยที่  $\forall u \in U$



รูปที่ 3.3 แสดงซัพพอร์ต,  $\alpha$ -Cut, จุดตัดข้ามและศูนย์กลางฟัซซีเซต ของฟังก์ชันการเป็นสมาชิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**นิยามที่ 11** ซัพพอร์ตของฟัซซีเซต (Support :  $S(A)$ )

ซัพพอร์ตของฟัซซีเซต  $A$  คือเซตของสมาชิกทุกตัวของ  $u$  ในเอกภพสัมพัทธ์  $U$  ซึ่งมีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตมากกว่า 0 เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$S(A) = \{u \in U \mid \mu_A(u) > 0\} \text{ หรือ } Support(A) = \{u \mid \mu_A(u) > 0\}$$

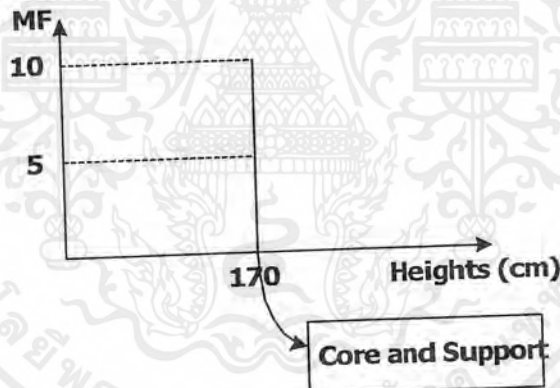
**นิยามที่ 12** ศูนย์กลางของฟัซซีเซต (Center) หรือ (Core :  $Core(A)$ )

ศูนย์กลางของฟัซซีเซต  $A$  คือ เซตของสมาชิกทุกตัวของ  $u$  ในเอกภพสัมพัทธ์  $U$  ซึ่งมีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตเท่ากับ 1 เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$Core(A) = \{u \mid \mu_A(u) = 1\}$$

**นิยามที่ 13** ฟัซซีซิงเกิลตัน (Fuzzy Singleton)

ฟัซซีซิงเกิลตัน คือ ฟัซซีเซตที่มีซัพพอร์ตของเซตที่สมาชิกเพียงตัวเดียว และมีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเท่ากับ 1



รูปที่ 3.4 แสดงฟัซซีซิงเกิลตันของความสูง

**นิยามที่ 14** เซต  $\alpha$ -Level หรือ  $\alpha$ -Cut ของฟัซซีเซต ( $A_\alpha$ )

เซต  $\alpha$ -Level ของฟัซซีเซต  $A$  คือ เซตของสมาชิก  $u$  ในเอกภพสัมพัทธ์  $U$  มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต  $A$  มากกว่าหรือเท่ากับ  $\alpha$  เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A_\alpha = \{u \mid \mu_A(u) \geq \alpha\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**นิยามที่ 15** ความสูงของฟัซซีเซต (Height of Fuzzy Set)

ความสูงของฟัซซีเซต  $A$  คือค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดของฟัซซีเซต  $A$  เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์

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

**นิยามที่ 16** คุณสมบัติการนอมอลไลซ์ของฟัซซีเซต (Normalization หรือ Normality)

ฟัซซีเซต  $A$  จะมีคุณสมบัติการนอมอลไลซ์ก็ต่อเมื่อ ฟัซซีเซต  $A$  มีความสูงเท่ากับ 1

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

**นิยามที่ 17** คุณสมบัติการคอนเวกซ์ของฟัซซีเซต (Convexity)

ฟัซซีเซต  $A$  จะมีคุณสมบัติการคอนเวกซ์ก็ต่อเมื่อ ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ  $A$  สอดคล้องตามเงื่อนไขต่อไปนี้

$$A \text{ is convex} \leftrightarrow \mu_A(u) = (\lambda u_1 + (1-\lambda)u_2) \geq \min\{\mu_A(u_1), \mu_A(u_2)\}$$

โดยที่  $u_1, u_2 \in U$  และ  $\lambda \in [0,1]$  ตามลำดับ

**นิยามที่ 18** ฟัซซีนัมเบอร์ (Fuzzy Number)

ฟัซซีนัมเบอร์ของฟัซซีเซต  $A$  คือฟัซซีเซตที่เป็นจำนวนจริงที่มีคุณสมบัติการนอมอลไลซ์และการคอนเวกซ์

**นิยามที่ 19** จุดตัดข้าม (Crossover point)

จุดตัดข้ามของฟัซซีเซต  $A$  คือจุดที่สมาชิก  $u$  ในเอกภพสัมพัทธ์  $U$  ที่มีฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต เท่ากับ 0.5 เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$\text{crossover}(A) = \{u \mid \mu_A(u) = 0.5\}$$

**นิยามที่ 20** แบนวิคท์ (Bandwidth หรือ Width)

ฟัซซีเซตที่มีคุณสมบัติการนอมอลไลซ์และการคอนเวกซ์ มีแบนวิคท์คือระยะทางระหว่างจุดตัดที่ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสองจุดเท่ากับ 0.5 (Crossover point) ( $\mu_A(u_1) = \mu_A(u_2) = 0.5$ )

$$\text{Bandwidth}(A) = |u_1 - u_2|$$

**นิยามที่ 21** การสมมาตร (Symmetric)

ฟังก์ชันเซต  $A$  สมมาตรเมื่อ เซตของสมาชิก  $u$  ในเอกภพสัมพัทธ์  $U$  มีฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟังก์ชันเซต  $A$  รอบจุดใดๆสมมาตรกัน เช่น จุดที่  $u=c$

$$\mu_A(c+u) = \mu_A(c-u)$$

**นิยามที่ 22** เปิดซ้าย (Open left), เปิดขวา (Open right), ปิด (Closed)

ฟังก์ชันเซต  $A$  เปิดซ้าย (Open left) ตามเงื่อนไขต่อไปนี้

$$\text{ถ้า } \lim_{u \rightarrow -\infty} \mu_A(u) = 1 \text{ และ } \lim_{u \rightarrow +\infty} \mu_A(u) = 0$$

ฟังก์ชันเซต  $A$  เปิดขวา (Open right) ตามเงื่อนไขต่อไปนี้

$$\text{ถ้า } \lim_{u \rightarrow -\infty} \mu_A(u) = 0 \text{ และ } \lim_{u \rightarrow +\infty} \mu_A(u) = 1$$

ฟังก์ชันเซต  $A$  ปิด (closed) ตามเงื่อนไขต่อไปนี้

$$\text{ถ้า } \lim_{u \rightarrow -\infty} \mu_A(u) = \lim_{u \rightarrow +\infty} \mu_A(u) = 0$$

**นิยามที่ 23** คาร์ดินาลิตีของฟังก์ชันเซต (Cardinality)

สกาลาร์คาร์ดินาลิตี (Scalar Cardinality) ของฟังก์ชันเซต  $A$  บนเอกภพสัมพัทธ์  $U$  คือผลบวกของค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ  $u$  ทุกตัวในฟังก์ชันเซต  $A$  เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

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

คาร์ดินาลิตีสัมพัทธ์ (Relative Cardinality) ของฟังก์ชันเซต  $A$  บนเอกภพสัมพัทธ์  $U$  คืออัตราส่วนระหว่างค่าสกาลาร์คาร์ดินาลิตีของฟังก์ชันเซต  $A$  กับค่าสกาลาร์คาร์ดินาลิตีของเอกภพสัมพัทธ์  $U$  เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

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

คาร์ดินาลิตีสัมพัทธ์ (Relative Cardinality) ของฟังก์ชันเซต  $A$  บนเอกภพสัมพัทธ์  $U$  คืออัตราส่วนระหว่างค่าสกาลาร์คาร์ดินาลิตีฟังก์ชันเซต  $A$  กับค่าสกาลาร์คาร์ดินาลิตีของเอกภพสัมพัทธ์  $U$

เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$\|A\| = \frac{|A|}{U}$$

**นิยามที่ 24** ปฏิบัติการพื้นฐานของฟัซซีเซต

การคอมพลิเมนต์ของฟัซซีเซต  $A$  เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $\bar{A}$  ( $-A$ ,  $NOT A$ ) ถูกนิยามในรูปฟังก์ชันการเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u)$$

การยูเนียนของฟัซซีเซต  $A$  กับฟัซซีเซต  $B$  เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $A \cup B$  หรือ  $A OR B$  ถูกนิยามในรูปของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{A \cup B}(u) = \max(\mu_A(u), \mu_B(u)) = \mu_A(u) \vee \mu_B(u)$$

อินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต  $A$  กับฟัซซีเซต  $B$  เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $A \cap B$  หรือ  $A AND B$  ถูกนิยามในรูปของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min(\mu_A(u), \mu_B(u)) = \mu_A(u) \wedge \mu_B(u)$$

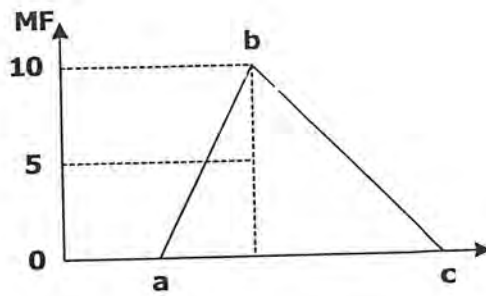
โดยที่  $\vee, \wedge$  เป็นตัวกระทำ  $\max$  และ  $\min$  ตามลำดับ  
สูตรและพารามิเตอร์ของฟังก์ชันการเป็นสมาชิก

ในส่วนนี้อธิบายสูตรและพารามิเตอร์ของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกโดยทั่วไป  
**นิยามที่ 25** ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม (Triangular membership function) ถูกกำหนดโดย 3 พารามิเตอร์  $\{a, b, c\}$  แสดงได้ดังนี้

$$\text{triangle}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$$

โดยที่  $a \leq b \leq c$  พารามิเตอร์  $\{a, b, c\}$  เป็นตัวตัดสินใจฟังก์ชันการเป็นสมาชิกจากค่า  $x$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

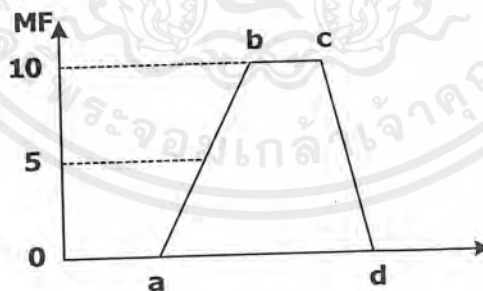


รูปที่ 3.5 แสดงพารามิเตอร์และรูปทรงของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม

**นิยามที่ 26** ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal membership function) ถูกกำหนดโดย 4 พารามิเตอร์  $\{a, b, c, d\}$  แสดงได้ดังนี้

$$\text{trapezoid}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}$$

โดยที่  $a \leq b \leq c \leq d$  พารามิเตอร์  $\{a, b, c, d\}$  เป็นตัวตัดสินค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกจากค่า  $x$



รูปที่ 3.6 แสดงพารามิเตอร์และรูปทรงของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

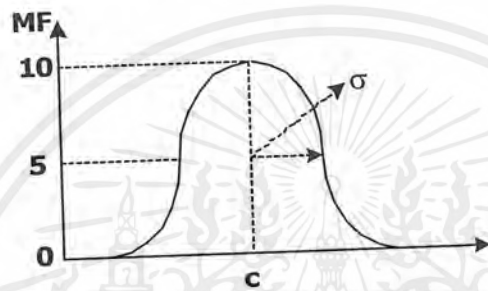
ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยมและฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู เป็นสูตรที่ง่ายและการคำนวณไม่ยาก ซึ่งมีการใช้อย่างกว้างขวางแต่มีข้อเสียของการเป็นเส้นตรงคือ ไม่มีความราบเรียบจุดที่เป็นมุมของเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามที่ 27 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียน (gaussian membership function) ถูกกำหนดโดย 2 พารามิเตอร์  $\{c, \sigma\}$

$$\text{gaussian}(x; c, \sigma) = \exp\left[-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2\right]$$

โดยที่  $c$  เป็นศูนย์กลางและ  $\sigma$  เป็นความกว้างของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกตามลำดับ

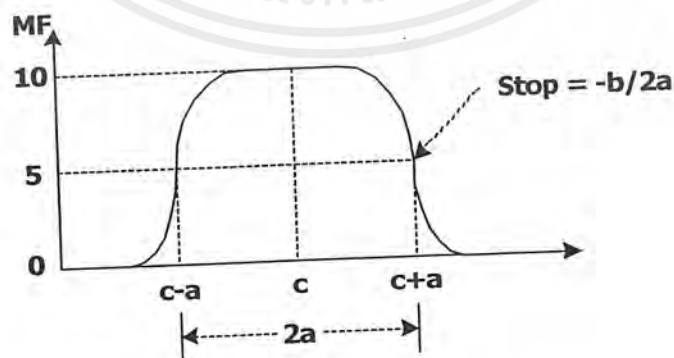


รูปที่ 3.7 แสดงพารามิเตอร์และรูปทรงของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียน

นิยามที่ 28 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบระฆัง (bell membership function) ถูกกำหนดโดย 3 พารามิเตอร์  $\{a, b, c\}$

$$\text{bell}(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}}$$

โดยที่  $b$  ต้องเป็นบวก



รูปที่ 3.8 แสดงรูปทรงของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบระฆัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**นิยามที่ 29** ตัวปฏิบัติการ Triangular norms หรือ  $T$ -norms คือ การอินเตอร์เซกชันของฟังก์ชันเซตสองตัวเช่นฟังก์ชันเซต  $A$  อินเตอร์เซกชันกับ  $B$  แสดงอยู่ในรูปของ  $T: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$  โดยสามารถหาระดับของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกได้จากสูตร

$$\mu_{A \cap B}(u) = T(\mu_A(u), \mu_B(u)) = \mu_A(u) \tilde{*} \mu_B(u)$$

โดยที่  $\tilde{*}$  เป็นตัวปฏิบัติแบบไบนารีสำหรับฟังก์ชัน  $T$ -norms โดยฟังก์ชัน  $T$ -norms มีคุณสมบัติดังนี้

1. คุณสมบัติ boundary condition แสดงได้ดังสมการ  

$$T(\mu_A(u), 0) = 0, T(\mu_A(u), 1) = T(1, \mu_A(u)) = \mu_A(u)$$
2. คุณสมบัติ commutativity แสดงได้ดังสมการ  

$$T(\mu_A(u), \mu_B(u)) = T(\mu_B(u), \mu_A(u))$$
3. คุณสมบัติ associativity แสดงได้ดังสมการ  

$$T(\mu_A(u), (\mu_B(u), \mu_C(u))) = T(T(\mu_A(u), \mu_B(u)), \mu_C(u))$$
4. คุณสมบัติ monotonicity แสดงได้ดังสมการ  
 ถ้า  $\mu_A(u) \leq \mu_C(u)$  และ  $\mu_B(u) \leq \mu_D(u)$   
 แล้ว  $T(\mu_A(u), \mu_B(u)) \leq T(\mu_C(u), \mu_D(u))$

ตัวปฏิบัติการ  $T$ -norms ที่ใช้งานบ่อยๆมี 4 แบบดังนี้

Minimum :

$$T_{\min}(\mu_A(u), \mu_B(u)) = \min(\mu_A(u), \mu_B(u)) = (\mu_A(u) \wedge \mu_B(u))$$

Algebraic product :

$$T_{ap}(\mu_A(u), \mu_B(u)) = \mu_A(u) \cdot \mu_B(u)$$

Bounded product :

$$T_{bp}(\mu_A(u), \mu_B(u)) = 0 \vee (\mu_A(u) + \mu_B(u) - 1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Drastic product :

$$T_{dp}(\mu_A(u), \mu_B(u)) = \begin{cases} \mu_A(u) & \text{ถ้า } \mu_B(u) = 1 \\ \mu_B(u) & \text{ถ้า } \mu_A(u) = 1 \\ 0, & \text{ถ้า } \mu_A(u), \mu_B(u) < 1 \end{cases}$$

**นิยามที่ 30** ตัวปฏิบัติการ Triangular conorms หรือ S-norms คือ การยูเนียนของฟังก์ชันเซตสองตัว เช่น ฟังก์ชันเซต  $A$  อินเตอร์เซกชันกับ  $B$  แสดงอยู่ในรูปของ  $S: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$  โดยสามารถหาระดับของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกได้จากสูตร

$$\mu_{A \cup B}(u) = S(\mu_A(u), \mu_B(u)) = \mu_A(u) \tilde{\vee} \mu_B(u)$$

โดยที่  $\tilde{\vee}$  เป็นตัวปฏิบัติแบบไบนารีสำหรับฟังก์ชัน S-norms โดยฟังก์ชัน S-norms มีคุณสมบัติดังนี้

1. คุณสมบัติ boundary condition แสดงได้ดังสมการ

$$S(1,1) = 1, S(\mu_A(u), 0) = T(0, \mu_A(u)) = \mu_A(u)$$

2. คุณสมบัติ commutativity แสดงได้ดังสมการ

$$S(\mu_A(u), \mu_B(u)) = S(\mu_B(u), \mu_A(u))$$

3. คุณสมบัติ associativity แสดงได้ดังสมการ

$$S(\mu_A(u), S(\mu_B(u), \mu_C(u))) = S(S(\mu_A(u), \mu_B(u)), \mu_C(u))$$

5. คุณสมบัติ monotonicity แสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{ถ้า } & \mu_A(u) < \mu_C(u) \text{ และ } \mu_B(u) < \mu_D(u) \\ \text{แล้ว } & S(\mu_A(u), \mu_B(u)) \leq S(\mu_C(u), \mu_D(u)) \end{aligned}$$

ตัวปฏิบัติการ S-norms ที่ใช้งานบ่อยๆมี 4 แบบดังนี้

Minimum :

$$S_{\min}(\mu_A(u), \mu_B(u)) = \max(\mu_B(u), \mu_A(u)) = (\mu_B(u) \vee \mu_A(u))$$

Algebraic product :

$$S_{ap}(\mu_A(u), \mu_B(u)) = \mu_A(u) + \mu_B(u) - \mu_A(u) \cdot \mu_B(u)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bounded product :

$$S_{bp}(\mu_A(u), \mu_B(u)) = 1 \wedge (\mu_A(u) + \mu_B(u))$$

Drastic product :

$$S_{dp}(\mu_A(u), \mu_B(u)) = \begin{cases} \mu_A(u), & \text{ถ้า } \mu_B(u) = 0 \\ \mu_B(u), & \text{ถ้า } \mu_A(u) = 0 \\ 1, & \text{ถ้า } \mu_A(u), \mu_B(u) > 0 \end{cases}$$

### 3.2 ฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic)

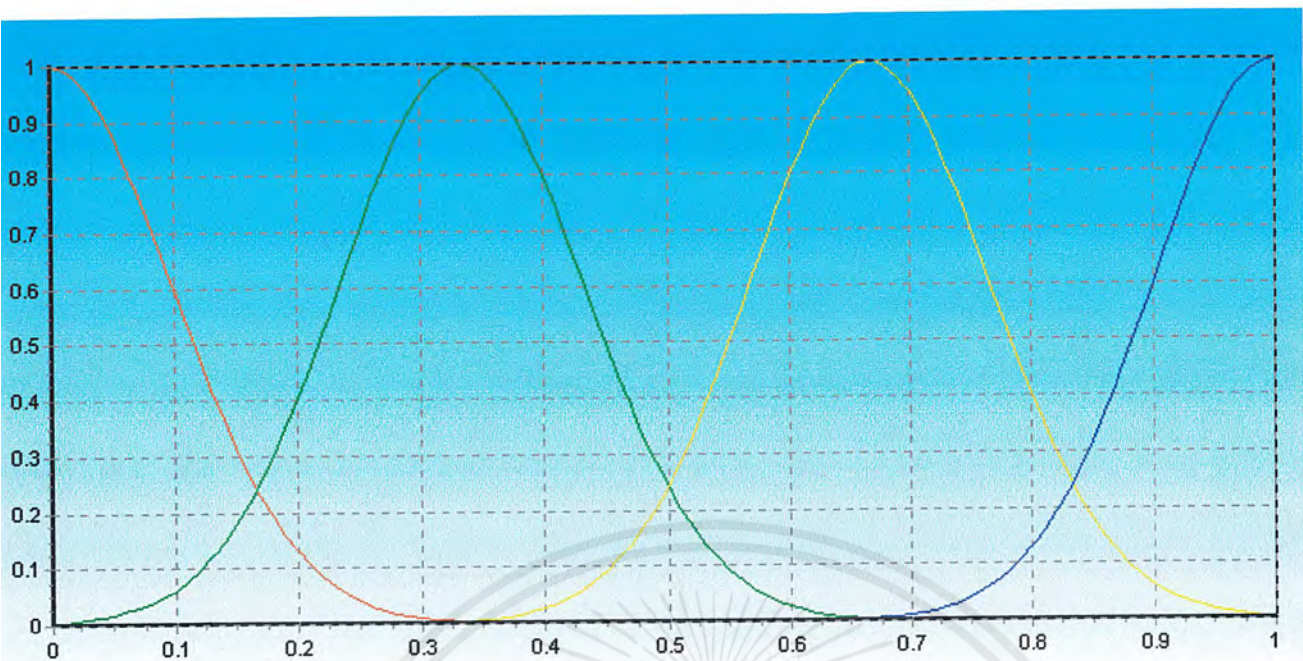
ตัวแปรลึงกวิสติก (Linguistic Variable)

นิยามที่ 31 ตัวแปรลึงกวิสติก

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

- โดยที่
- $x$  คือ ชื่อของตัวแปร (Label)
  - $T(x)$  คือ เซตของค่าลึงกวิสติกของ  $x$
  - $U$  คือ เอกภพสัมพัทธ์ โดยที่  $u \in U$
  - $X$  คือ ชื่อของลึงกวิสติกของ  $x$  ที่ถูกสร้างตามกฎ  $G$  เรียกว่า เทอม (Term)
  - $G$  คือ Syntactic rule ในการกำหนดชื่อของเทอม  $X$
  - $M$  คือ Semantic rule ในการนิยามคุณสมบัติของเทอม  $X$
  - $M(X)$  คือ ฟัซซีสับเซตของเอกภพสัมพัทธ์  $U$

ตัวแปรลึงกวิสติกที่สำคัญในฟัซซีลอจิก ได้แก่ ตัวแปร “Probability” และ “Truth” ซึ่งตัวอย่างการนิยามค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเทอมของตัวแปรลึงกวิสติก “Probability” แสดงในรูปแบบที่ 3.9 สีแดงแทน almost improbable, สีเขียวแทน not very probable, สีเหลืองแทน very probable, สีนํ้าเงินแทน almost certain



รูปที่ 3.9 แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเชิงวิสตติค “Probility”

ในการนิยามตัวแปรเชิงวิสตติค “Truth” ได้มีผู้นำเสนอไว้ต่างกักันดังนี้ ในปี ค.ศ. 1973 Zadeh ได้นิยาม เซตของเทอมของตัวแปรเชิงวิสตติค “Truth” ดังสมการ

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

โดยได้นิยามเทอมปฐม (primary term) ของตัวแปรเชิงวิสตติค “Truth” คือ “true” และ “false” และกำหนดค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของแต่ละเทอมตามสมการ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 และได้นิยามเทอมอื่นๆจากการขยายเทอมปฐมโดยการเติม modifier หรือ hedge ที่เหมาะสมในเทอม “true” และ “false”

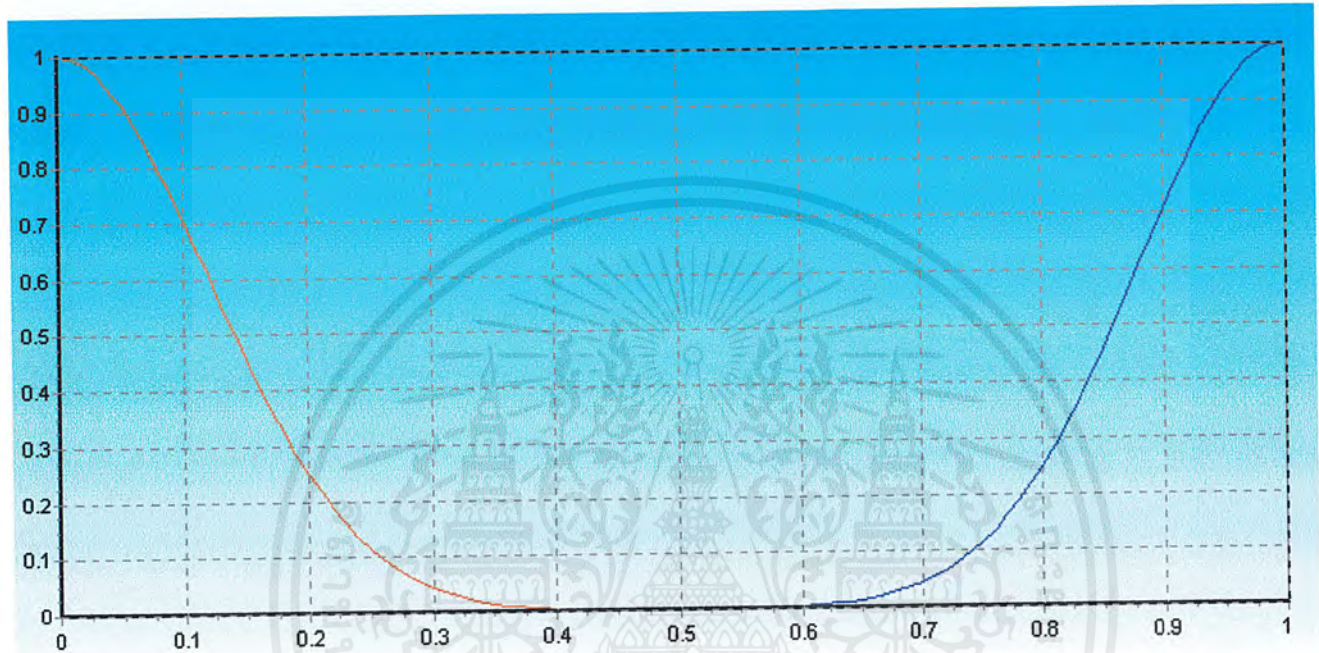
$$\mu_{\text{true}}(v) = \begin{cases} 0 & ; 0 \leq v \leq a \\ 2\left(\frac{v-a}{1-a}\right)^2 & ; a \leq v \leq \frac{a+1}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{v-1}{1-a}\right)^2 & ; \frac{a+1}{2} \leq v \leq 1 \end{cases}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$a \in [0,1]$  คือ ค่าพารามิเตอร์บอกถึงค่าต่ำสุดของ  $v$  ในการตัดสินใจความต้องการของ  
ประพจน์



รูปที่ 3.10 แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเทอม “true” (สีแดง) และ “false” (สีน้ำเงิน) ตาม  
นิยามของ Zadeh

ต่อมาในปี ค.ศ. 1979 Baldwin ได้นิยามเซตของเทอมของตัวแปรลิงกวิสติก “Truth” ตาม  
สมการ

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

โดยกำหนดให้ค่าการเป็นสมาชิกของแต่ละเทอมเป็นไปตามสมการ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่

3.11

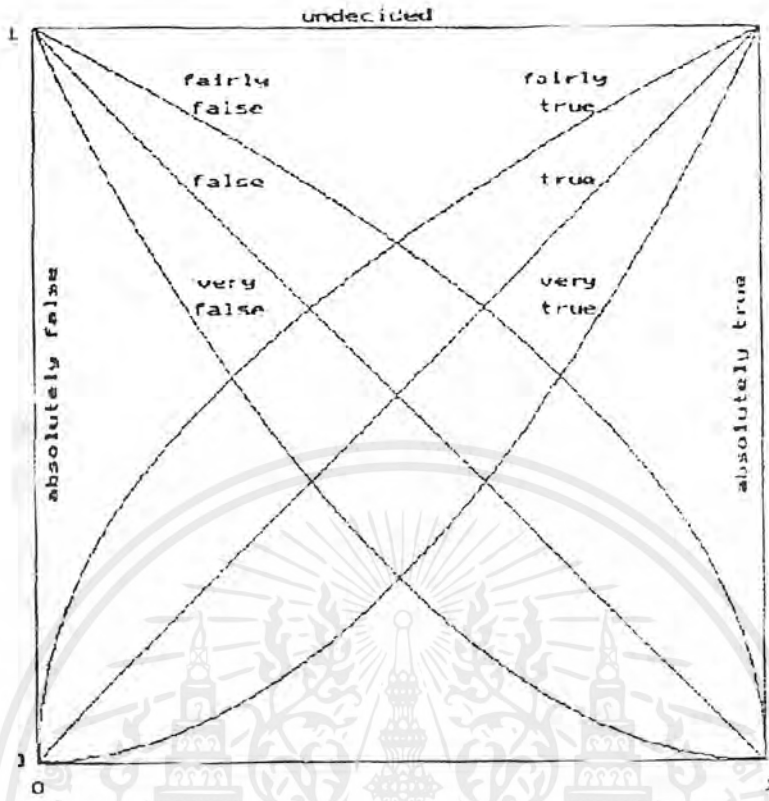
$$\mu_{\text{very true}}(v) = (\mu_{\text{true}}(v))^2 \quad ; \quad v \in [0,1]$$

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลึงกิวสติก “Truth” ตามนิยาม Baldwin

### นิยามที่ 32 ตัวปฏิบัติการ Linguistic Hedge หรือ Modifier

Linguistic Hedge หรือ Modifier คือ ตัวปฏิบัติการในการแปลงหรือขยายขอบเขตของความหมายของฟัซซีเซต ซึ่งในที่นี้คือเทอมของตัวแปรลึงกิวสติก

กำหนดให้  $A$  เป็นฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์  $U$  โดยที่  $u \in U$

ตัวปฏิบัติการ Modifier :  $m$  บนฟัซซีเซต  $A$  เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $m(A)$  ดังนี้

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

$$\text{dilation} : \mu_{\text{di}(A)}(u) = (\mu_A(u))^{1/2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จะได้ว่า	very A	=	con (A)
	more or less A	=	dil (A)
	plus A	=	A <sup>1.25</sup>
	slightly A	=	int [ plus A and not ( very (A) ) ]

### นิยามที่ 33 ตัวแปรลิงกวิสติกบูลีน (Boolean Linguistic Variable)

ตัวแปรลิงกวิสติกบูลีน คือ ตัวแปรลิงกวิสติกที่มีเทอมเป็นค่าบูลีน ซึ่งมีเทอมปฐม 2 ตัว โดยที่เทอมทั้งหมด จะอยู่ในรูป  $X_p$  และ  $m(X_p)$

เมื่อ  $X_p$  คือ เทอมปฐม

$m(X_p)$  คือ เทอมที่ได้จากการปฏิบัติงาน modifier บนเทอมปฐม  $X_p$

### ทฤษฎีตรรกศาสตร์แบบเดิม

ทฤษฎีตรรกศาสตร์ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของการหาข้อสรุปโดยใช้เหตุผล ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ค่าความจริง (truth value) การปฏิบัติการ (vocabulary) และวิธีการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล (reasonning procedure) ในตรรกศาสตร์บูลีน ได้นิยามส่วนประกอบแต่ละส่วนดังนี้

### นิยามที่ 34 ค่าความเป็นจริงของพจน์ในตรรกศาสตร์บูลีน

ประพจน์ในตรรกศาสตร์บูลีน จะมีค่าความเป็นจริงเท่ากับ 0 เมื่อประพจน์เป็นเท็จ และมีค่าความเป็นจริงเท่ากับ 1 เมื่อประพจน์เป็นจริง

### นิยามที่ 35 ปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์บูลีน

ปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์บูลีนถูกนิยามด้วยค่าความจริงของพจน์ ดังแสดงในตารางตารางที่ 3.1 แสดงค่าความจริงของประพจน์ในการปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์บูลีน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### นิยามที่ 36 การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล

การหาข้อสรุปตามหลักการและเหตุผลโดยใช้ทฤษฎีตรรกศาสตร์แบบเดิมจะใช้สังจนิรันคร์ (tautology) สำหรับเป็นพื้นฐานในการหาข้อสรุป ตัวอย่างสังจนิรันคร์ที่ใช้เป็นพื้นฐานในการหาข้อสรุปตามหลักการและเหตุผล แสดงดังนี้

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

### ทฤษฎีฟัซซีลอจิก

ฟัซซีลอจิกเป็นทฤษฎีทางตรรกศาสตร์ที่ขยายมาจากทฤษฎีตรรกศาสตร์หลายค่า (multivalued logic) โดยนิยามค่าความเป็นจริงของประพจน์เป็นตัวแปรลิงกวิสติก ได้มีการนิยามการปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์สำหรับฟัซซีลอจิกไว้ต่าง ๆ กัน ในปริภูมยานิพนธ์ จะอ้างอิงจากนิยามดั้งเดิมของ Zadeh ดังต่อไปนี้

### นิยามที่ 37 ค่าความเป็นจริงของประพจน์ในทฤษฎีฟัซซีลอจิก

กำหนดให้  $V(A)$  เป็น ฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์  $V = [0,1]$  ซึ่งแทนค่าความเป็นจริงของประพจน์ A

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

### นิยามที่ 38 การปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์ในทฤษฎีฟัซซีลอจิก

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

จะได้ว่า  $V(A) \wedge V(B) = V(A \text{ and } B) = \{(v, \min \{\mu_A(v), \mu_B(v)\})\}$   
 $V(A) \vee V(B) = V(A \text{ or } B) = \{(v, \max \{\mu_A(v), \mu_B(v)\})\}$   
 $\neg V(A) = \text{not}(V(A)) = \{(v, 1 - \mu_A(v))\}$   
 $V(A) \rightarrow V(B) = V(A \rightarrow B) = \neg V(A) \vee V(B)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \{ (v, \max\{(1-\mu_A(v)), \mu_B(v)\}) \}$$

ในกรณีนี้

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

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

จะได้ว่า  $V(A) \wedge V(B) = V(A \text{ and } B) = \{(\min\{v_i, \omega_i\}, \max_{\min\{v_i, \omega_i\}} \min\{\alpha_i, \beta_i\})\}$

$$V(A) \vee V(B) = V(A \text{ or } B) = \{(\max\{v_i, \omega_i\}, \max_{\max\{v_i, \omega_i\}} \min\{\alpha_i, \beta_i\})\}$$

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

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

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

ตารางที่ 3.2 แสดงตารางความจริงสำหรับตัวปฏิบัติการฟัซซีลอจิก ตามนิยาม Zadeh

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Baldwin ได้เสนอการสร้างตารางความจริงสำหรับฟัซซีลอจิก โดยทำการนิยามเทอมและฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลึงกวิสติก “Truth” ซึ่งแสดง ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{true} &= \{(v, \mu_{\text{true}}(v) = v) | v \in [0,1]\} \\
 \text{false} &= \{(v, \mu_{\text{false}}(v) = 1 - \mu_{\text{true}}(v)) | v \in [0,1]\} \\
 \text{very true} &= \{(v, (\mu_{\text{true}}(v))^2) | v \in [0,1]\} \\
 \text{very false} &= \{(v, (1 - \mu_{\text{true}}(v))^2) | v \in [0,1]\} \\
 \text{fairly true} &= \{(v, (\mu_{\text{true}}(v))^{1/2}) | v \in [0,1]\} \\
 \text{fairly false} &= \{(v, (1 - \mu_{\text{true}}(v))^{1/2}) | v \in [0,1]\} \\
 \text{undecided} &= \{(v, 1) | v \in [0,1]\} \\
 \text{absolutely true} &= \{(v, \mu_{\text{at}}(v)) | v \in [0,1]\} ; \mu_{\text{at}}(v) = \begin{cases} 1 ; v = 1 \\ 0 ; v \neq 1 \end{cases} \\
 \text{absolutely false} &= \{(v, \mu_{\text{af}}(v)) | v \in [0,1]\} ; \mu_{\text{af}}(v) = \begin{cases} 1 ; v = 1 \\ 0 ; v \neq 1 \end{cases}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 (\text{very})^k \text{ true} &\rightarrow \text{absolutely true} && \text{เมื่อ } k \rightarrow \infty \\
 (\text{very})^k \text{ false} &\rightarrow \text{absolutely false} && \text{เมื่อ } k \rightarrow \infty \\
 (\text{fairly})^k \text{ true} &\rightarrow \text{undecided} && \text{เมื่อ } k \rightarrow \infty \\
 (\text{fairly})^k \text{ false} &\rightarrow \text{undecided} && \text{เมื่อ } k \rightarrow \infty
 \end{aligned}$$

นอกจากนี้ Baldwin ได้นิยามตัวปฏิบัติการ “and” และ “or” ด้วย minimum และ maximum ตามลำดับ และสร้างตารางความจริงของการปฏิบัติฟัซซีลอจิก ได้ผลลัพธ์แสดงในตาราง

ตารางที่ 3.3 แสดงตารางความจริงสำหรับตัวปฏิบัติการฟัซซีเซต ตามนิยามของ Baldwin

V	V	V	V
false	false	false	false
true	false	false	true
true	true	true	true
undecided	false	false	undecided
undecided	true	undecided	true
undecided	undecided	undecided	undecided

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

true	very true	true	very true
true	fairly true	fairly true	true

### การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลโดยใช้ทฤษฎีฟัซซีลอจิก

การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล โดยใช้ทฤษฎีฟัซซีลอจิก จะเป็นการขยายนิยามของ สัจนิรันดร์ที่ใช้ในตรรกศาสตร์แบบเดิม เพื่อใช้หาข้อสรุปหลักการเหตุผลของประพจน์ที่เป็น ฟัซซีลอจิก เรียกว่า Generalized Modus Ponens : GMP และ Generalized Modus Tollena : GMT ดังแสดงในนิยามที่ 30 และนิยามที่ 31 ตามลำดับ

#### นิยามที่ 39 Generalized Modus Ponens : GMP

Generalized Modus Ponens คือ การหาข้อสรุปจากเหตุไปหาผล (forward data-driven)

GMP :	Premise	$u \text{ is } A'$
	Implication	If $u \text{ is } A$ then $v \text{ is } B$
	Conclusion	$v \text{ is } B'$

โดยที่ GMP Implication ถูกนิยามดังสมการ

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

#### นิยามที่ 40 Generalized Modus Tollena : GMT

Generalized Modus Tollena : GMT คือ การหาข้อสรุปจากผลไปหาเหตุ (backward goal-driven)

GMT :	Primise	$v \text{ is } B'$
	Implication	If $u \text{ is } A$ then $v \text{ is } B$
	Conclusion	$u \text{ is } A'$

โดยที่ GMT Implication ถูกนิยามดังสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### นิยามที่ 41 ฟัชซีอิมพลิเคชัน (Fuzzy Implication)

ฟัชซีอิมพลิเคชัน คือ เงื่อนไขความสัมพันธ์แบบฟัชซีระหว่างส่วนเหตุ (antecedent) และ ส่วนผล (consequence) ที่ใช้ในการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล

จากนิยามของ GMP Implication ตามนิยามที่ 39 และนิยามที่ 40 GMT Implication ตามนิยามที่ 31 จะเห็นว่าฟัชซีอิมพลิเคชันจะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ตัวปฏิบัติการ t-norms และ s-norms ซึ่งมีผู้เสนอวิธีการทำฟัชซีอิมพลิเคชันแบบต่างๆกัน ตามตัวปฏิบัติการ t-norms และ s-norms ที่เลือกใช้ ดังแสดงในตัวอย่างต่อไปนี้

#### Momdiani's Implication

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

#### Larsen's Implication

$$R_L = A \times B = \{((u, v), \{ \mu_A(u), \mu_B(u) \})\}$$

#### Zadeh's Arithmetic Rule of Fuzzy Implication

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

#### Boolean Fuzzy Implication

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

#### Zadeh's Max-Min Rule of Fuzzy Implication

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

#### Standard Sequence Fuzzy Implication

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ. 1980 Fukami et al ได้พิสูจน์ถึงหลักการเลือกฟังก์ชันสำหรับการอิมพลีเม้นต์ของ GMP และ GMT และทำการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 แสดงผลของการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลโดยใช้ GMP ด้วยหลักการของ Fukami

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

ตารางที่ 3.5 แสดงผลของการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล โดยใช้ GMP ด้วยหลักการ Fukami

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ความสัมพันธ์ฟัซซี ( Fuzzy Relation )

#### นิยามที่ 42 ผลคูณคาร์ทีเซียน ( Cartesian Product )

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

โดยที่  $u_1, \dots, u_n \in U_1, \dots, U_n$  ตามลำดับ

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

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

#### นิยามที่ 43 ความสัมพันธ์ฟัซซี

กำหนดให้  $R$  เป็นความสัมพันธ์ฟัซซีจากฟัซซีเซต  $A$  ไปยังฟัซซีเซต  $B$

โดยที่  $A$  เป็นฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์  $U$  ;  $u \in U$

และ  $B$  เป็นฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์  $V$  ;  $v \in V$

จะได้ว่า

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

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

ความสัมพันธ์ฟัซซีขนาด  $n$  มิติของฟัซซีเซต  $A_1, \dots, A_n$  (เมื่อ  $A_1, \dots, A_n$  เป็นฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์  $U_1, \dots, U_n$  ตามลำดับ) คือ ฟัซซีสับเซตในเอกภพสัมพัทธ์  $U_1 \times \dots \times U_n$  ที่ถูกกำหนดดังนี้

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

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

#### นิยามที่ 44 การปฏิบัติการของความสัมพันธ์ฟัซซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**นิยามที่ 44** การปฏิบัติการของความสัมพันธ์ฟัซซี

กำหนดให้  $R_1$  และ  $R_2$  เป็นความสัมพันธ์ฟัซซีบนระนาบเดียวกัน คือ  $U_1 \times \dots \times U_n$   
ยูเนียน นิยามโดยใช้ตัวปฏิบัติการ maximum ได้ดังนี้

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

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

อินเตอร์เซกชัน นิยามโดยใช้ตัวปฏิบัติการ minimum ได้ดังนี้

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

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

**นิยามที่ 45** คุณสมบัติของความสัมพันธ์ฟัซซี

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

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

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

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

Antisymmetry  $R$  จะมีคุณสมบัติเป็น antisymmetry ก็ต่อเมื่อ

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

Perfecty Antisymmetry  $R$  จะมีคุณสมบัติเป็น antisymmetry อย่างสมบูรณ์ ก็ต่อเมื่อ

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

Transitivity  $R$  จะมีคุณสมบัติเป็น transitivity ก็ต่อเมื่อ

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

**นิยามที่ 46** โปรเจกชันของความสัมพันธ์ฟัซซี (Fuzzy Relation Projection)

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

โปรเจกชันของความสัมพันธ์ฟัซซี  $R$  ถูกนิยามดังนี้

$$\text{first proection : } R^{(1)} = \{ (u, \max_v \mu_R(u, v)) \mid (u, v) \in U \times V \}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

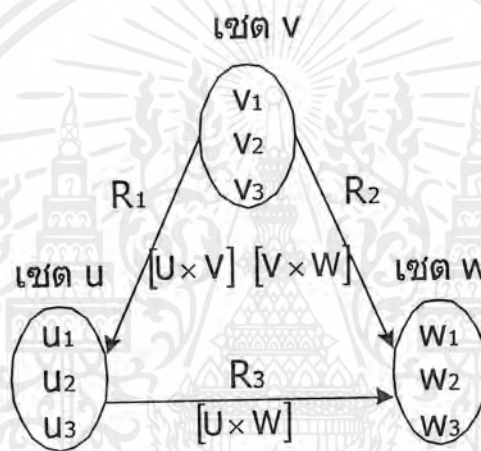
second projection :  $R^{(2)} = \{(u, \max_u \mu_R(u, v)) \mid (u, v) \in U \times V\}$

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

### การคอมโพสิชันแบบฟัซซี (Fuzzy Composition)

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

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



รูปที่ 3.12 แสดงการคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟัซซี

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

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

การคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟัซซี ถูกนิยามดังนี้

#### นิยามที่ 47 Max-Min Composition

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

#### นิยามที่ 48 Max-Product Composition

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### นิยามที่ 49 Max-Average Composition

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

### นิยามที่ 50 Min-Max composition

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

วิธีการ max-min composition เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด มีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

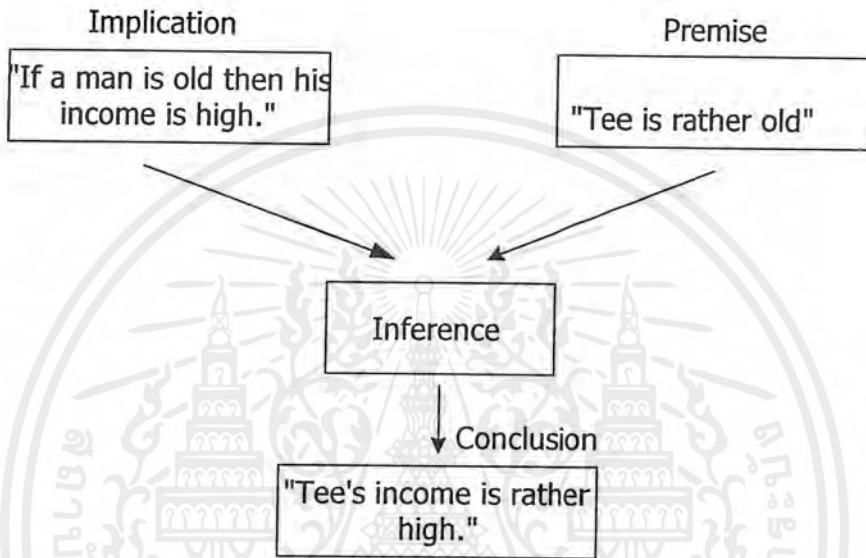
1.  $(R_1 \cup R_2) \circ R_3 = (R_1 \circ R_3) \cup (R_2 \circ R_3)$  distributed w.r.t. union
2.  $(R_1 \cap R_2) \circ R_3 \subset (R_1 \circ R_3) \cap (R_2 \circ R_3)$  non-distributed w.r.t intersection
3.  $(R_1 \circ R_2) \circ R_3 = R_1 \circ (R_2 \circ R_3)$  association property
4. ถ้า  $R_1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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การอินเฟอร์เรนซ์แบบฟัซซี (Fuzzy Inference)

### นิยามที่ 51 การอินเฟอร์เรนซ์

การอินเฟอร์เรนซ์ คือ กระบวนการในการหาข้อสรุป (conclusion) จากหลักฐาน (premise) โดยใช้เงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล (implication) ดังแสดงในตัวอย่างในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงการหาข้อสรุปจากหลักฐาน โดยใช้เงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล

### นิยามที่ 52 กฎการคอมโพสิชันของการอินเฟอร์เรนซ์ (Compositional Rule of Inference : CRI)

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการแก้ปัญหาทั้งสองนี้ จะต้องใช้ตัวปฏิบัติการผกผัน (inverse) ของการคอมโพสิชัน จึงมีการนิยามตัวปฏิบัติการ  $\oslash$ -composition สำหรับการคอมโพสิชันผกผันดังนี้ นิยามที่ 53 ตัวปฏิบัติการ  $\oslash$ -composition

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

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

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

$$\mu_{(R \oslash B')}(u) = \min_{v \in B'} [\mu_R(u, v) \oslash \mu_{B'}(v)]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**นิยามที่ 54** คุณสมบัติของตัวปฏิบัติการ  $\circ$  - composition

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

### การฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification)

**นิยามที่ 55** การฟัซซีเคชัน

การฟัซซีเคชัน คือ กระบวนการหาค่าฟัซซีเซตบนเอกภพสัมพัทธ์  $U$  ของอินพุต เพื่อเป็นตัวแทนของอินพุตซึ่งมีค่าเป็นตัวเลข สำหรับใช้เป็นอินพุตของระบบฟัซซี

การฟัซซีฟิเคชัน สามารถทำได้ 3 วิธี

1. การฟัซซีฟิเคชันโดยใช้ฟัซซีซิงเกิลตัน จะได้ว่า fuzzification  $(u_0) = A$

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

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

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

โดยที่  $A$  เป็นฟัซซีนัมเบอร์

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

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

ตัวอย่างของฟัซซีฟิเคชัน โดยใช้ฟัซซีนัมเบอร์เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยที่  $\sigma$  เป็นพารามิเตอร์ในการกำหนดรูปร่างของ  $\mu_A(u)$

### 3. การฟัซซีฟิเคชัน โดยใช้บริดจ์เบอร์ (hybrid number)

จะได้ว่า fuzzification  $(u_0) = A$

โดยที่  $A$  เป็น ไฮบริดจ์เบอร์ (ไฮบริดจ์เบอร์ คือ ฟัซซีเบอร์ที่สมาชิกในเอกภพ สัมพัทธ์เป็น random number)

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

การดีฟัซซีฟิเคชัน

#### นิยามที่ 56 การดีฟัซซีฟิเคชัน

การดีฟัซซีฟิเคชัน คือ กระบวนการหาค่าเอาต์พุตเพียงค่าเดียว (ซึ่งเกิดต้น) ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อเป็นตัวแทนของฟัซซีเอาต์พุตที่มีค่าความเป็นไปได้กระจายอยู่บนเอกภพสัมพัทธ์  $V$  ของเอาต์พุต

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

ในการคอมโพสิชันระหว่างฟัซซีซึ่งเกิดต้น  $u_0$  กับความสัมพันธ์ฟัซซี  $R$  จะได้ผลลัพธ์เป็นฟัซซีเซต  $B$  ซึ่งเป็นซับเซตของเอกภพสัมพัทธ์  $V$  และเมื่อทำดีฟัซซีฟิเคชัน จะหาฟัซซีซึ่งเกิดต้น  $v_0$  ซึ่งเป็นตัวแทนของฟัซซีเอาต์พุต  $B$  เพื่อใช้เป็นเอาต์พุตที่แท้จริงของระบบได้

ตัวอย่างวิธีการดีฟัซซีฟิเคชัน ที่นิยมใช้มีดังนี้

Max Procedure เป็นวิธีการดีฟัซซีฟิเคชัน โดยเลือกค่าเอาต์พุตที่มีฟังก์ชันการเป็นสมาชิกมากที่สุด เพื่อใช้เป็นตัวแทนของฟัซซีเอาต์พุต สามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

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

1. Mean of Maxima (MOM) เป็นวิธีที่ขยายมาจากวิธี max procedure เพื่อใช้ในกรณีที่มีค่าเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากันหลายค่า ให้ทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน โดยใช้สมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ  $v_j$  คือ ค่าเอาต์พุตแต่ละค่าที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน  
 $J$  คือ จำนวนเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน

## 2. Centre of Area (COA) / Centre of Gravity (COG)

วิธี COA เป็นวิธีหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่ที่ได้กราฟของการเป็นสมการ เพื่อใช้เป็นตัวแทนของฟังก์ชันเอาต์พุต ซึ่งทำได้โดยการแบ่งพื้นที่ที่ได้กราฟของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆกัน และค่า  $v_0$  จะหาได้จากค่า  $v$  ที่ตำแหน่งของเส้นแบ่งครึ่ง สามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

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

ในทางปฏิบัติ การคำนวณโดยใช้สมการด้านบนนี้ ทำได้ยาก จำเพาะการคำนวณของวิธี COA โดยใช้วิธี COG ซึ่งเป็นการหาจุดศูนย์กลางถ่วงน้ำหนักแทนการหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่ที่ได้กราฟ สมการของการดีฟัซซิฟิเคชัน โดยใช้วิธี COG สามารถแสดงดังนี้

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

ในกรณีที่เอกภพสัมพัทธ์  $V$  มีสมาชิกเป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่อง (discrete) สามารถหาค่า  $v_0$  ได้จากสมการดังนี้

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

เมื่อ  $N_q$  คือ ระดับการควอนไทซ์

$v_i$  คือ ค่าเอาต์พุตของแต่ละค่าในควอนไทซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. fuzz Mean Method (FM) เป็นวิธีที่ปรับปรุงมาจากวิธี COG ตลอดเวลาในการคำนวณ โดยการลดระดับการควอนไดซ์ลงให้เท่ากับจำนวนเทอมของตัวแปรเอาต์พุตในเอกภพสัมพัทธ์  $V$  และใช้ค่าเฉลี่ยของแต่ละเทอมเป็นตัวแทนของค่าเอาต์พุตของแต่ละค่าของควอนไดซ์สมการของการดีฟัซซิฟิเคชัน โดยใช้วิธี FM สามารถแสดงได้ดังนี้

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

เมื่อ  $N_v$  คือ จำนวนฟังก์ชันเซตของตัวแปรเอาต์พุตในเอกภพสัมพัทธ์  $V$

$\gamma_k$  คือ ค่า เฉลี่ยที่ใช้เป็นตัวแทนของฟังก์ชันเซตของตัวแปรเอาต์พุตแต่ละเทอมบนเอกภพสัมพัทธ์  $V$

$v_k$  คือ ค่า ระดับการเป็นสมาชิกของฟังก์ชันเซตของตัวแปรเอาต์พุตแต่ละเทอมบนเอกภพสัมพัทธ์  $V$

4. Weighted Fuzzy Mean Method (WFM) เป็นวิธีที่ขยายมาจากวิธี FM โดยเพิ่มการคูณสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักของตัวแปรเอาต์พุตในแต่ละเทอมสมการของการดีฟัซซิฟิเคชัน โดยใช้วิธี WFM สามารถแสดงได้ดังนี้

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

เมื่อ  $\omega_k$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของแต่ละเทอมของตัวแปรเอาต์พุต ภายในเอกภพสัมพัทธ์  $V$

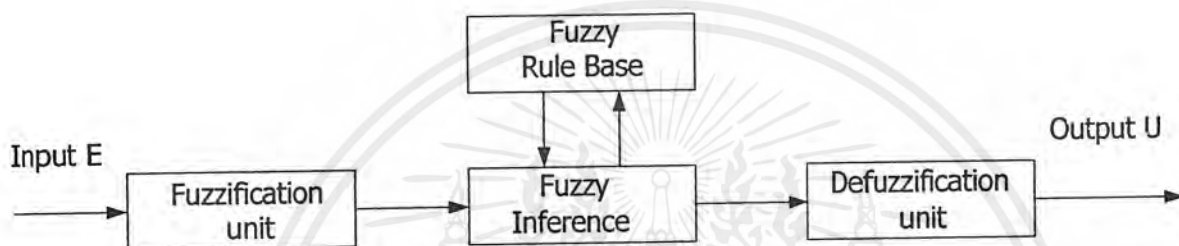
5. Indexed Defuzzification Method (IDFZ) เป็นวิธีการที่ขยายมาจากการดีฟัซซิฟิเคชันแบบเดิม โดยตัดเอาต์พุตบางส่วนที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกลดกว่าค่าเทรชโฮลด์(threshold)ที่กำหนด โดยจะคำนวณเฉพาะค่าเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกมากกว่าค่าเทรชโฮลด์ดังสมการต่อไปนี้

$$IDFZ ( B, \alpha_i ) = DFZ ( \alpha - cut ( B, \alpha_i ) )$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ตัวควบคุมฟัซซี

โครงสร้างหลักของตัวควบคุมฟัซซี ประกอบด้วย 4 หน่วย คือ หน่วยฟัซซีฟิเคชัน หน่วยอินเฟอร์เรนซ์ หน่วยดีฟัซซีฟิเคชัน และฐานกฎการควบคุมฟัซซี (Fuzzy rule base) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 การทำงานของแต่ละหน่วยสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.14 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซี

#### หน่วยฟัซซีฟิเคชัน

หน่วยฟัซซีฟิเคชันทำหน้าที่นอมอลไลซ์ตัวแปรสถานะของระบบ  $x = [x_1, \dots, x_m]^T$  ที่จะใช้เป็นตัวอินพุตของตัวควบคุมให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด และทำการแปลงตัวแปรอินพุต  $x$  ให้เป็นตัวแปรฟัซซี  $X'$  โดยใช้ฟัซซีซิงเกิลตัน ฟัซซีนัมเบอร์ หรือ ไอบริดนัมเบอร์

#### ฐานกฎการควบคุมฟัซซี

ฐานกฎการควบคุมฟัซซี เป็นหน่วยที่รวบรวมกฎการควบคุมแบบฟัซซีซึ่งอยู่ในรูปแบบ IF ... THEN ...

กำหนดให้ กฎการควบคุมอยู่ในรูปแบบดังนี้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $x$  คือ ตัวแปรสถานะของกระบวนการ ซึ่งใช้เป็นอินพุตของตัวควบคุมฟัซซี

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

$X^k$  คือ ฟัซซีเซตของตัวแปรอินพุต ในส่วนของกฎการควบคุม

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

$m$  คือ จำนวนตัวแปรอินพุตของตัวควบคุม

$y$  คือ ตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี

$Y^k$  คือ ฟัซซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตในส่วนผลของกฎการควบคุมที่  $k$

$M$  คือ จำนวนกฎการควบคุมทั้งหมดในฐานกฎการควบคุม

### หน่วยอินเฟอร์เรนซ์

หน่วยอินเฟอร์เรนซ์ ทำหน้าที่หาค่าเอาต์พุตของระบบฟัซซีจากค่าตัวแปรอินพุตแบบฟัซซี  $X'$  โดยใช้วิธี GMP Implication หาค่าระดับการเป็นสมาชิก (fine strength) ของแต่ละกฎจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวอินพุตแบบฟัซซี  $X'$  กับฟัซซีเซตในส่วนเหตุของแต่ละกฎ  $X^k$  แล้วจึงคำนวณหาค่าเอาต์พุตแบบฟัซซีจาก ระดับ การเป็นสมาชิกกับฟัซซีเซตในส่วนผลของแต่ละกฎ  $Y^k$  ตัวอย่างการอินเฟอร์เรนซ์ โดยใช้ CRI ของ Zadeh แสดงด้วยสมการดังนี้

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

### หน่วยดีฟัซซิฟิเคชัน

หน่วยดีฟัซซิฟิเคชัน ทำหน้าที่แปลงตัวแปรฟัซซีเอาต์พุตให้เป็นค่าเชิงเกิดตัน และทำการดีนอมอลไลต์ให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่ต้องการ เพื่อใช้เป็นค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม โดยใช้วิธีการที่ได้กล่าวถึงในเรื่องการดีฟัซซิฟิเคชัน

ตัวอย่างของการดีฟัซซิฟิเคชัน โดยใช้วิธี FM แสดงดังสมการ

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

เมื่อ  $\bar{y}^k$  คือ ค่าเฉลี่ยที่ใช้เป็นตัวแทนของฟัซซีเซตของเอาต์พุต  $Y^k$  ในส่วนผลของกฎที่  $k$

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

## การวิเคราะห์ระบบควบคุมพีชชี

การวิเคราะห์ระบบควบคุมพีชชี จะวิเคราะห์จากคุณสมบัติเชิงสถิตย์ (Static Property) และคุณสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic Property) ของตัวควบคุม โดยที่คุณสมบัติเชิงสถิตย์จะถูกวิเคราะห์ในรูปแบบของความสมบูรณ์ (Completeness) ของฐานกฎการควบคุมการเกิดกิริยาระหว่างกัน (Interaction) ของกฎการควบคุมความสอดคล้อง (Consistency) ของกฎการควบคุมและความคงทน (Robustness) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์และการรบกวนจากภายนอก ส่วนคุณสมบัติเชิงพลวัตจะวิเคราะห์จากเสถียรภาพ (Stability) ของระบบการควบคุม

## การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงสถิตย์ของระบบควบคุมพีชชี

1. ความสมบูรณ์ของฐานกฎการควบคุม คือ ความสามารถของตัวควบคุมในการที่มีกฎการควบคุมรองรับในการสร้างสัญญาณควบคุม สำหรับทุกๆสถานะของอินพุต

ฐานกฎการควบคุมจะมีความสมบูรณ์ ก็ต่อเมื่อ “ สำหรับทุกๆสถานะของอินพุต  $x$  จะต้องมีการควบคุมอย่างน้อย 1 กฎที่มีค่าระดับการเป็นสมาชิกมากกว่า 0 เพื่อใช้ในการคำนวณ หาสัญญาณควบคุม” สามารถแสดงด้วยเงื่อนไขข้างนี้

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

2. การเกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุม คือ การที่เอาต์พุตของตัวควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเอาต์พุตที่เกิดจากกฎการควบคุมแต่ละกฎซึ่งเป็นผลกระทบจากการทำงานของกฎอื่นๆ สามารถแสดงด้วยเงื่อนไขข้างนี้

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

โดยที่  $R$  คือ ความสัมพันธ์พีชชีที่ใช้แทนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุต และตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชชีในฐานกฎการควบคุม  
ปัจจัยที่ทำให้เกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุม คือ

- โครงสร้างของกฎการควบคุม
- การนิยามพีชชีเซตและฟังก์ชันการเป็นสมาชิก
- การเลือกวิธีการอินเฟอร์เรนซ์และการตีพีชชีฟิแลชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหลักการของการควบคุมแบบพีชชีจะต้องออกแบบตัวควบคุมให้มีการเกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุมเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากว่า ถ้าค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมเกิดจากกฎเดียวแล้วค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจะขึ้นกับระดับการเป็นสมาชิกของกฎการควบคุม โดยค่าเอาต์พุตจะเท่ากับจุดศูนย์กลางของพีชชีในส่วนผลของกฎการควบคุมนั้นเสมอ ดังนั้นในการออกแบบตัวควบคุมจะต้องมีการซ้อนทับกันของพีชชีเซต เพื่อให้สัญญาณควบคุมในแต่ละกรณีเกิดจากกฎการควบคุมอย่างน้อย 2 กฎเสมอ

3. ความสอดคล้องกันของกฎการควบคุม จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อไม่มีการขัดแย้งกันระหว่างกฎการควบคุมที่จะทำให้เกิดเอาต์พุตของตัวควบคุมผิดพลาด กล่าวคือ ค่าอินพุตที่เหมือนกัน หรือ โกล้เคียงกัน จะต้องนำมาซึ่งค่าเอาต์พุตหรือสัญญาณควบคุมที่เหมือนกัน หรือ โกล้เคียงกันความขัดแย้ง หรือ ความไม่สอดคล้องกันของกฎการควบคุม มักจะเกิดความผิดพลาดในการออกแบบกฎการควบคุม ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ดังนี้

กำหนดให้ ฐานกฎการควบคุมมีรูปแบบดังแสดงในสมการที่

ดัชนีแสดงความไม่สอดคล้องกัน (Index of Inconsistency) ระหว่างกฎที่  $i$  และ  $j$  หาได้ดังนี้

ถ้า  $X^i = X^j$  และ

แล้ว  $c_{ij}$  จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 กล่าวคือกฎทั้งสองมีความขัดแย้งกันโดยสิ้นเชิง

ถ้า  $X^i = X^j$  และ

แล้ว  $c_{ij}$  จะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 กล่าวคือกฎทั้งสองมีความสอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์  
ดัชนีของความไม่สอดคล้องของกฎที่  $I$  ในฐานกฎการควบคุม หาได้ดังนี้

โดยที่  $M$  คือ จำนวนกฎการควบคุมทั้งหมดในฐานกฎการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบกฎการควบคุมของตัวควบคุมพีซีซี จะต้องกำจัดกฎที่มีความไม่สอดคล้อง ออกจากฐานกฎการควบคุม และในการสร้างกฎการควบคุมใหม่ จะต้องหลีกเลี่ยงการเกิดความไม่ สอดคล้องกันของกฎ

4. ความคงทนในการควบคุม หมายถึง ความสามารถของตัวควบคุมในการลดผลกระทบที่ เกิดจากการรบกวนจากภายนอกจากสัญญาณรบกวนหรือจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระ – บวนการป้อนกลับในการออกแบบตัวควบคุมพีซีซีที่มีผลต่อความคงทนของระบบควบคุม ได้แก่ การ กำหนดความละเอียดในการควอนไทซ์การกำหนดเอกภพสัมพัทธ์ของอินพุต การกำหนดฟังก์ชัน การเป็นสมาชิกของพีซีซีเซต และการกำหนดคกฎการควบคุม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# ทฤษฎีนิเวรอนเน็ตเวิร์ค

หลายทศวรรษมาแล้ว ที่มนุษย์ได้ประดิษฐ์พัฒนาเครื่องจักรขึ้นมา เราจะเห็นว่าเครื่องจักรเหล่านี้จะถูกใช้สำหรับงานที่มีความยุ่งยากซับซ้อนและเป็นงานที่ซ้ำๆ ซากๆ ซึ่งถ้าใช้คนทำงานอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้ง่าย ในสมัยแรกอาจจะเกิดจากเครื่องจักรที่มีการทำงานที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เช่น คาน, รอก เป็นต้นและต่อมาได้ประดิษฐ์สิ่งที่มีความซับซ้อนขึ้นมาเรื่อยๆ เช่น เครื่องจักรกล, หุ่นยนต์ และคอมพิวเตอร์ เป็นต้น จนกระทั่งปัจจุบันวิศวกรและนักวิทยาศาสตร์แขนงต่างๆ ได้พยายามที่จะพัฒนาเครื่องคอมพิวเตอร์ให้มีความฉลาดยิ่งขึ้น โดยพัฒนาให้คอมพิวเตอร์มีการเรียนรู้ และสามารถตัดสินใจได้เองหรือเป็นส่วนช่วยในการตัดสินใจขั้นต้น ได้ระบบแบบจำลองโครงสร้างเซลล์ประสาทหรือระบบจำลองนิเวรอนเน็ตเวิร์ค (Artificial Neural Network System : ANNS) เป็นต้น อย่างหนึ่งที่จะทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ต่างๆ มีศักยภาพเพิ่มขึ้น

เมื่อเราพิจารณาถึงมนุษย์และสัตว์จะเห็นว่าสามารถรู้จักภาพและวิเคราะห์แยกแยะเสียได้ดีกว่าคอมพิวเตอร์ที่ทันสมัยที่สุด แม้จะเป็นคอมพิวเตอร์ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่องานด้านนี้โดยเฉพาะก็ตาม และนักวิจัยในสาขานี้ได้คาดหวังกกันว่าระบบแบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาทหรือระบบแบบจำลองนิเวรอนเน็ตเวิร์ค จะเป็นคลื่นลูกใหม่ที่ใช้ในการประมวลผลข่าวสารสำหรับใช้แทนหรือสนับสนุนการคำนวณแบบเคมระบบแบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาทหรือระบบจำลองนิเวรอนเน็ตเวิร์ค จะช่วยเสริมความสามารถของคอมพิวเตอร์สำหรับการประมวลผลในระบบใหญ่ๆ ซึ่งระบบนี้สามารถ เรียนรู้และตัดสินใจสำหรับกระบวนการของระบบนั้นๆ ได้

สำหรับการทำงานของระบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาทหรือระบบแบบจำลองนิเวรอนเน็ตเวิร์ค จะถอดแบบการทำงานมาจากการทำงานของระบบสมองมนุษย์ คือมีการส่งผ่านข้อมูลกัน โดยการเชื่อมต่อข้อมูลระหว่างโหนดกันเป็นโครงข่ายร่างแหกันอย่างหนาแน่น และมีการทำงานในลักษณะขนาน ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะอธิบายลักษณะการทำงานของระบบเซลล์ประสาทของมนุษย์เพื่อที่จะได้เทียบเคียงการทำงานและทำให้สามารถเข้าใจการทำงานของระบบแบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาทหรือระบบแบบจำลองนิเวรอนเน็ตเวิร์ค ได้ดียิ่งขึ้น

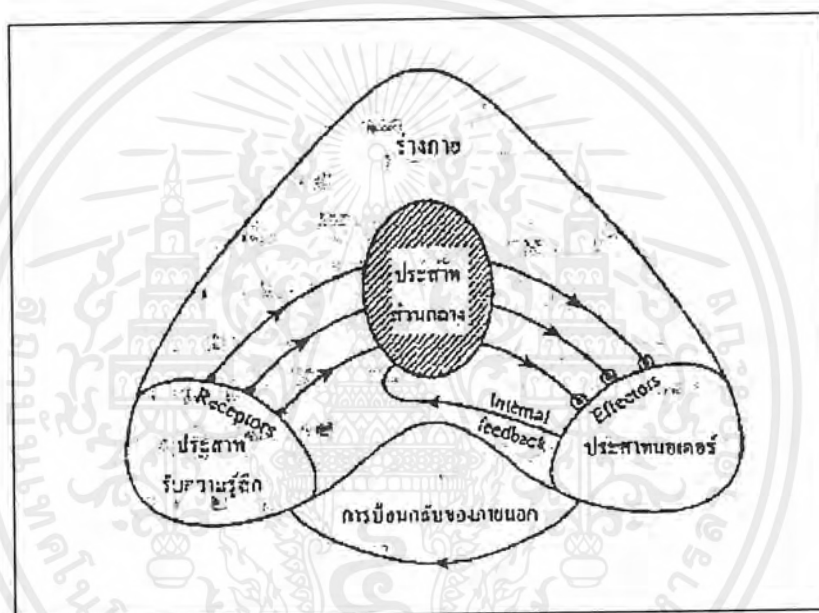
### 4.1 ความรู้พื้นฐานทางกายภาพของระบบเซลล์ประสาท

ระบบเซลล์ประสาทมีหน้าที่ควบคุมรักษาสมดุลภายในร่างกายให้คงที่ ระบบประสาทของมนุษย์เป็นระบบที่มีโครงสร้างซับซ้อนจะประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neurons) ประมาณ  $10^{11}$  เซลล์ และเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์เชื่อมต่อกับเซลล์ประสาทตัวอื่นอีกประมาณ  $10^4$  เซลล์ ระบบประสาทมีอยู่ด้วยกัน 3 ส่วน(รูปที่4.1) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ระบบประสาทส่วนกลาง (Central Nervous System)
2. ระบบประสาทรับความรู้สึก (Sensory System)
3. ระบบประสาทมอเตอร์ (Moter System)

จาก รูปที่ 4.1 ระบบประสาทส่วนกลางจะทำหน้าที่วิเคราะห์ข้อมูลต่างๆที่รับสาจากระบบประสาท รับความรู้สึกที่ประกอบด้วยเซลล์ประสาทรับความรู้สึก (Sensory Receptor) ซึ่งจะรับข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมรอบตัว และ จะส่งข่าวสารไปยังระบบประสาทส่วนกลาง เมื่อประสาทส่วนกลางประมวลผลแล้วก็จะส่งสัญญาณไปควบคุมสั่งการระบบประสาทมอเตอร์ของอวัยวะแสดงผลให้ทำงาน (Effector) ให้ทำงาน ซึ่งจะทำให้เกิดการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทั้งภายในและภายนอกร่างกาย



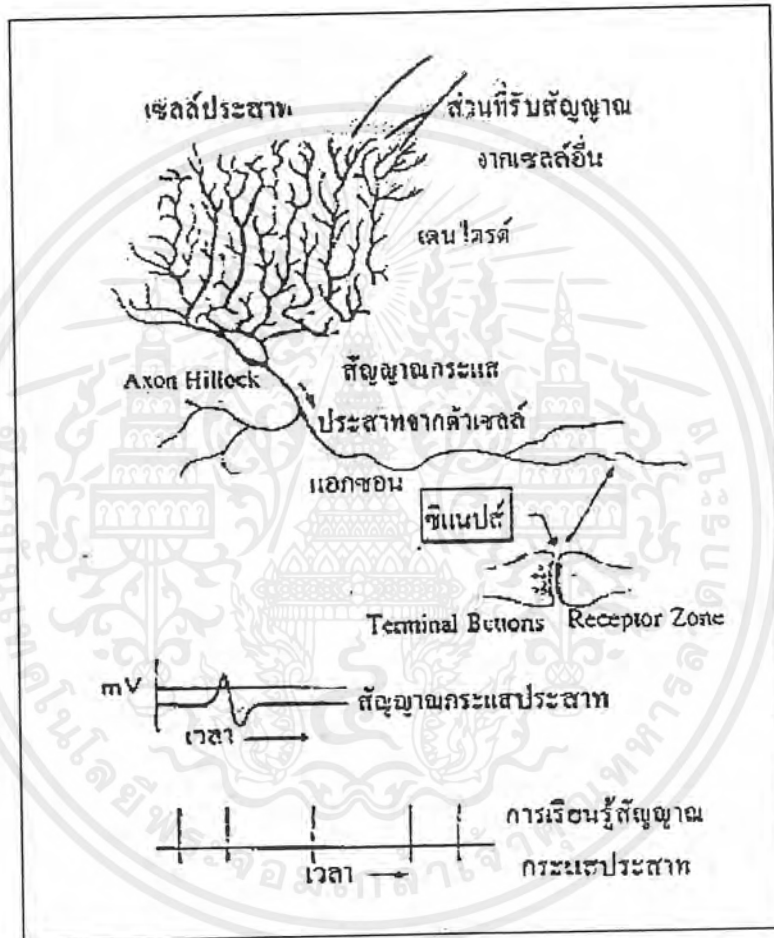
รูปที่ 4.1 แสดงการสื่อสารข้อมูลในระบบประสาท

เซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะประกอบด้วย (Cell Body) และแขนงที่แยกออกจากตัวเซลล์ซึ่งได้แก่ แอกซอน (Axon) และเดนไดรต์ (Dendrite) (รูปที่ 4.2) แอกซอนมีจุดเริ่มต้นจากบริเวณส่วนที่หนาที่สุดของเซลล์ประสาทเรียกว่า Axon Hillock เซลล์ประสาทแต่ละเซลล์มีแอกซอนเพียงหนึ่งอัน ปลายของแอกซอนแยกเป็นแขนงหลายเส้นและไปสิ้นสุดที่ปลาย (Terminal Bottoms) และที่จุดสิ้นสุดนี้จะมีตัวรับกระแสประสาท (Nerve Impulse) ที่เรียกว่ารีเซปเตอร์โซน (Receptor Zone) ซึ่งต่ออยู่กับเดนไดรต์ของเซลล์ประสาทตัวอื่น กระแสประสาท หรือข้อมูลที่อยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าเคมีจะไปกระตุ้นให้ตัวเซลล์ส่งสัญญาณไปตามแอกซอน ดังนั้นแอกซอนจะทำหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่นำสัญญาณกระแสประสาทออกจากตัวเซลล์ไปสู่เซลล์ประสาทตัวอื่น และแคว้นไดรต์จะทำหน้าที่รับกระแสประสาทจากเซลล์อื่นเข้าสู่ตัวเซลล์

คุณสมบัติของเซลล์ประสาทโดยทั่วไป คือ มีความไวต่อการถูกกระตุ้นเมื่อเซลล์ประสาทถูกกระตุ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมมูลย์ของไอออนบริเวณรีเซ็ปเตอร์ ซึ่งจะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้น และเมื่อความต่างศักย์ของจุดนี้สูงกว่าค่าเทรชโฮลด์ก็ทำให้เกิดการส่งสัญญาณกระแสประสาทไปยังเซลล์อื่น



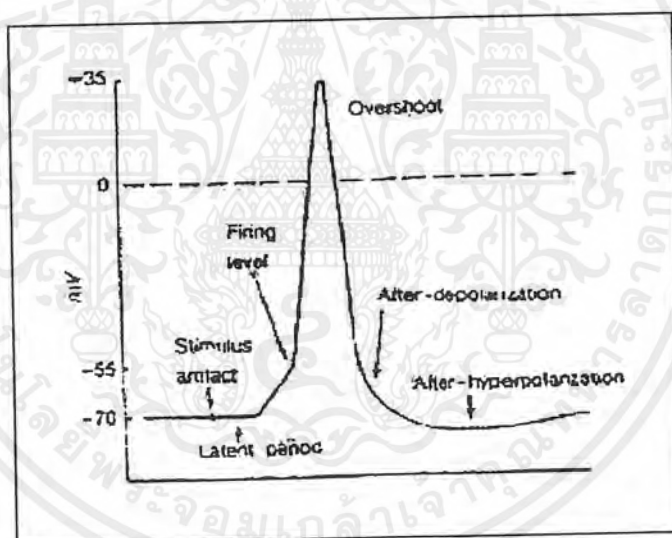
รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างของเซลล์ประสาทการส่งสัญญาณกระแสประสาท

ความต่างศักย์ของเยื่อหุ้มเซลล์ประสาทขณะพักประมาณ  $-60$  ถึง  $-90$  มิลลิโวลต์ ถ้ามีการกระตุ้นเซลล์ประสาทจะมีการแก้โพลาไรซ์ (Depolarization) ของเยื่อหุ้มเซลล์ และหลังเกิดการแก้โพลาไรซ์จนความต่างศักย์เพิ่มขึ้นเป็น  $15$  มิลลิโวลต์แล้ว จะทำให้อัตราการแก้โพลาไรซ์เพิ่มขึ้นอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวดเร็ว ซึ่งจุดนี้เรียกว่า Firing Level (รูปที่ 4.3) เมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด (ประมาณ 35 มิลลิโวลท์) จะทำให้อัตราการแก้โพลาไรซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว (ประมาณ 70 %) และค่อยๆ ลดลงกลับเข้าสู่ภาวะปกติ หลังจากเข้าสู่ภาวะปกติแล้วความต่างศักย์จะลดลงต่ำกว่าระดับปกติ ซึ่งจะเรียกช่วงนี้ว่า “After Hyperpolarization” ลำดับของการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ทั้งหมดนี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน (Action Potential)

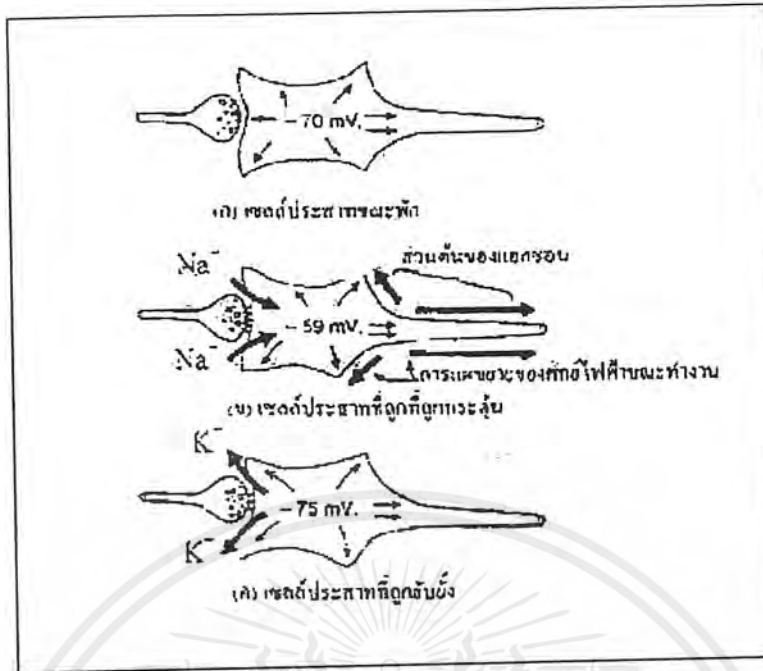
กระแสประสาทที่ส่งผ่านเซลล์หนึ่งไปยังอีกเซลล์หนึ่ง จะต้องผ่านรอยต่อระหว่างปลายและบริเวณรีเซพเตอร์ ซึ่งจะเรียกรอยต่อนี้ว่าซินแนปส์ (Synapse) การส่งกระแสประสาทกันระหว่างเซลล์ (Neurotransmission) ซินแนปส์จะปล่อยสารเคมีเพื่อไปกระตุ้นสำหรับสำหรับบางกรณี และบางกรณีก็ปล่อยสารเคมีเพื่อยับยั้ง (Inhibitory) และในขณะใดขณะหนึ่งซินแนปส์จะยอมให้เกิดขึ้นเพียงกรณีเดียวเท่านั้น คือถ้าไม่กระตุ้นก็จะปล่อยสารเพื่อที่ยังยั้งการส่งผ่านกระแสประสาท ในรูปที่ 4-4 แสดงสภาวะต่างๆของเซลล์ประสาท



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการเกิดศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน

ในกรณีที่ซินแนปส์เกิดสภาวะกระตุ้นความต่างศักย์ระหว่างผนังเซลล์จะลดลงเป็น -58 มิลลิโวลท์จะทำให้เกิดการแก้โพลาไรซ์ขึ้นซึ่งถ้าสูงพอถึงสภาวะ Firing Level ก็จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานขึ้น และการที่เกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นได้จะต้องอาศัยซินแนปส์ 10 ถึงหลายร้อยตัวในเวลาเดียวกัน โดยขบวนการซั้มเมชัน (Summation) ซึ่งซินแนปส์เพียงตัวเดียวไม่สามารถกระตุ้นประสาทให้ถึงสภาวะ Firing Level ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงสภาวะต่างๆของเซลล์ประสาท (ก) ขณะพัก, (ข) ขณะกระตุ้น, และ (ค) ขณะถูกยับยั้ง

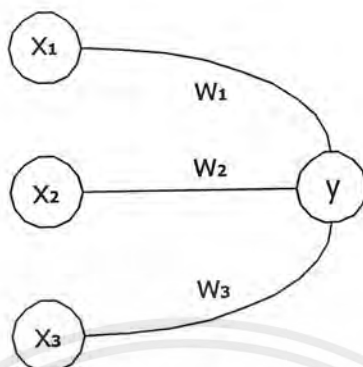
ในสภาวะกระตุ้นจะทำให้เกิดการส่งผ่านกระแสประสาท ไอออนโซเดียม ( $\text{Na}^+$ ), โปรตัสเซียม ( $\text{K}^+$ ) และคลอไรด์ ( $\text{Cl}^-$ ) จะซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้มากขึ้น ส่วนในสภาวะยับยั้งโปรตัสเซียมและคลอไรด์จะไหลออกจากเซลล์ และโซเดียมไม่มีการไหลเข้าเซลล์ ซึ่งเป็นเหตุให้ประจุบวกภายในเซลล์ลดลง ทำให้ความต่างศักย์ภายในเซลล์เป็นลบมากขึ้น (ประมาณ  $-75$  มิลลิโวลต์) ซึ่งจะส่งผลให้เซลล์ประสาทถูกกระตุ้นยากขึ้นกว่าปกติคือต้องใช้ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นเป็น  $16$  มิลลิโวลต์ จึงจะสามารถกระตุ้นเซลล์ประสาทได้ถึง Firing Level ซึ่งระยะนี้จะเรียกว่าระยะการคือ (Refractory Peroid)

### โครงสร้างของนิวรอนเน็ตเวิร์ก

นิวรอนเน็ตเวิร์กประกอบด้วยหน่วยจำนวนมาก เรียก นิวรอน, ยูนิต, เซลล์ หรือ โหนด แต่ละนิวรอนจะมีการเชื่อมต่อกันโดยแต่ละการเชื่อมต่อจะมีค่าถ่วงน้ำหนักของมัน โดยค่าถ่วงน้ำหนักจะแสดงรายละเอียดที่เน็ตใช้ในการแก้ปัญหา โดยนิวรอนเน็ตเวิร์กถูกใช้ในการแก้ปัญหาย่างกว้างขวาง เช่น เกียและเรียกข้อมูล, แยกประเภทของข้อมูล, แมปอินพุตแพทเทิลไปเป็นเอาต์พุตแพทเทิล เป็นต้น แต่ละนิวรอนมีสถานะภายใน (Internal state) เรียกแเอ็คทิฟเวชัน ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอินพุตที่นิวรอนได้รับ เช่น หนึ่งนิวรอนส่งแเอ็คทิฟเวชันของมันซึ่งเหมือนกับสัญญาณไปยังนิวรอนอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่นิวรอนหนึ่งสามารถส่งเพียงหนึ่งสัญญาณ ในเวลาหนึ่งๆ โดยสัญญาณนั้นจะถูกกระจายไปยังนิวรอนอื่นๆ เช่น



รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างของนิวรอนเน็ตเวิร์กอย่างง่าย

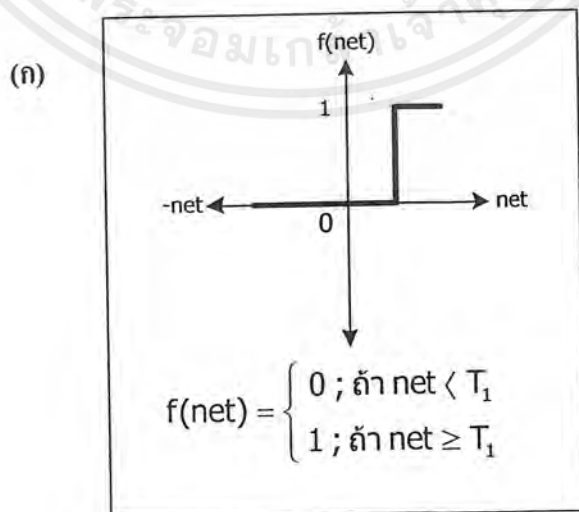
พิจารณานิวรอน Y ได้รับความรู้จากนิวรอน X1, X2, X3 โดยมีแอกทีฟเวจัน (สัญญาณเอาทพุต) ของอินพุตยูนิต (นิวรอน) คือ X1, X2, X3 ตามลำดับ มีค่าถ่วงน้ำหนักคือ  $w_1, w_2, w_3$  และ net อินพุต ( $y_{in}$ ) ที่ไปยังนิวรอน Y คือ

$$y_{in} = w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3$$

แอกทีฟเวจัน  $y$  ของนิวรอน Y หาได้โดยใช้ฟังก์ชันของ net อินพุต ของนิวรอน Y เอง  $y = f(y_{in})$  เช่น ฟังก์ชันรูปตัวเอสที่มีค่าเป็นลอจิก (Logistic sigmoid function)

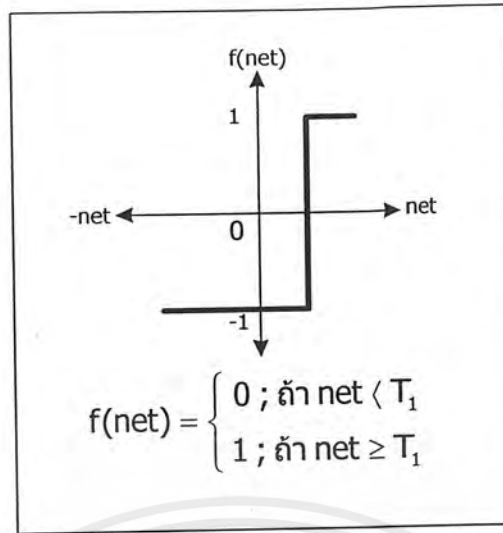
$$f(x) = 1/(1+\exp(-x))$$

ซึ่งประเภทของแอกทีฟเวจันฟังก์ชันได้แสดงไว้ในรูปที่ 4-6

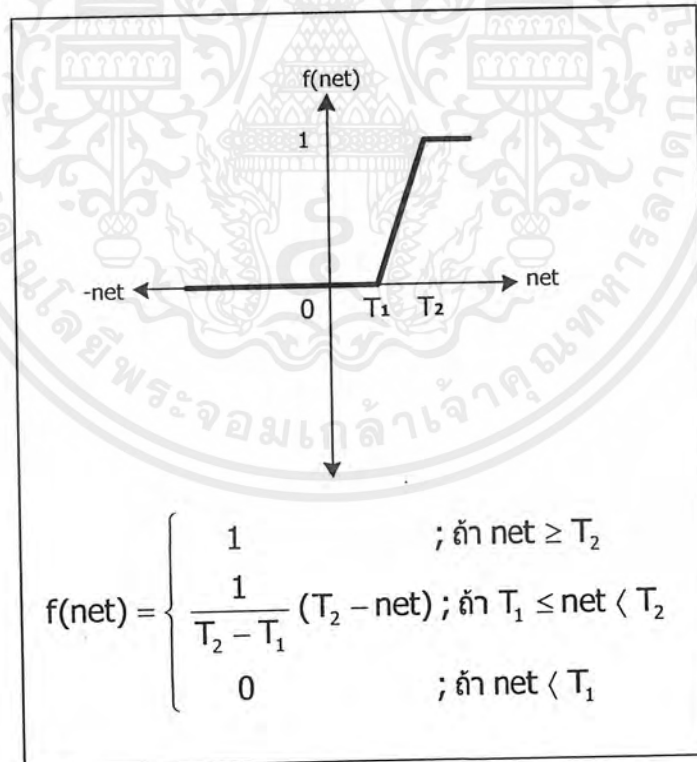


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข)

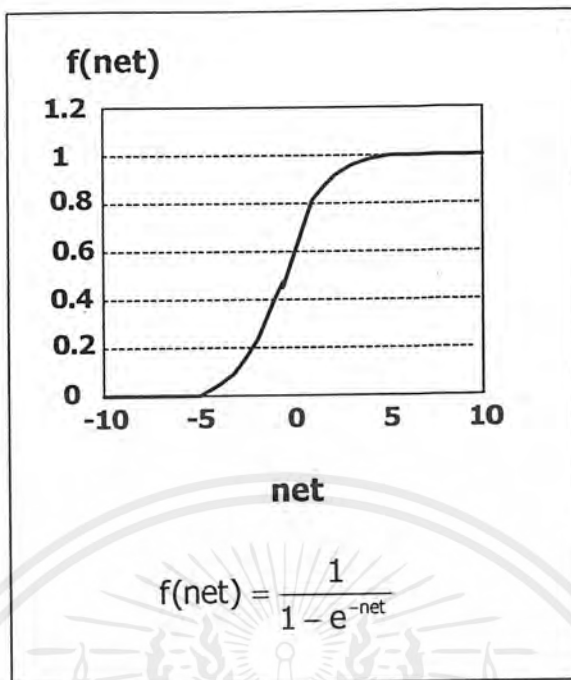


(ค)

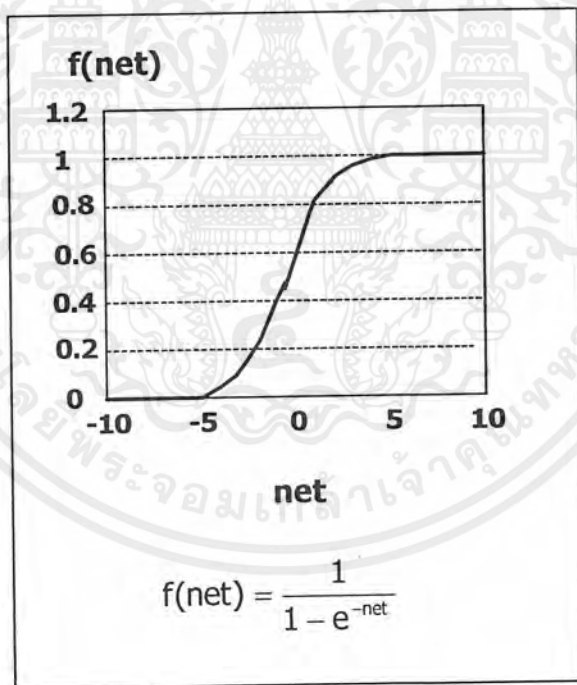


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ง)



(จ)



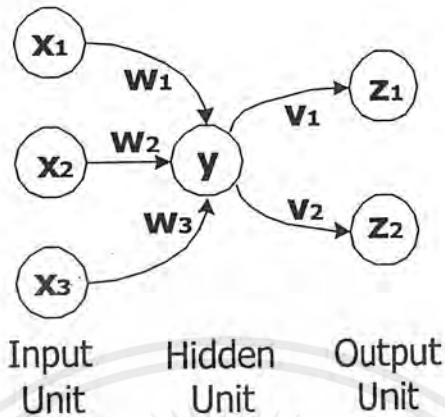
รูปที่ 4.6 แสดงฟังก์ชันสร้างเอาต์พุต (Activation Function) แบบชนิดต่างๆ (ก) Thershold Logic

(ข) Bipolar Binary (ค) Linear Thershold (ง) Sigmoid (จ) Bipolar Continuous

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อมาสมมุตินิวรอน Y ติดต่อกับนิวรอน Z1 และ Z2 โคนมี ค่าถ่วงน้ำหนัก  $v_1$  และ  $v_2$  ดัง

รูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงนิวรอนเน็ตเวิร์คที่มีฮิดเดนเลเยอร์

นิวรอน Y ส่งสัญญาณ  $y$  ไปแต่ละยูนิตของ Z ค่าที่  $Z_1$  และ  $Z_2$  ได้จะต่างกัน เพราะค่าสัญญาณที่ได้ต้องมีค่าถ่วงน้ำหนักร่วมในการคำนวณ

ถึงแม้นิวรอนเน็ตเวิร์คในรูปจะดูง่าย แต่การที่มีฮิดเดนยูนิต และแอสคที่ฟเวชันฟังก์ชันที่มีกราฟไม่เป็นเส้นตรง ทำให้มีสามารถในการแก้ปัญหา มากกว่าเน็ตที่มีเพียงอินพุตและเอาต์พุต มองอีกด้านหนึ่งคือ ยากที่จะทำการเทรน (หาค่าถ่วงจำเพาะที่เหมาะสม) ด้วยฮิดเดนยูนิต

### แบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาทหรือระบบจำลองนิวรอนเน็ตเวิร์ค

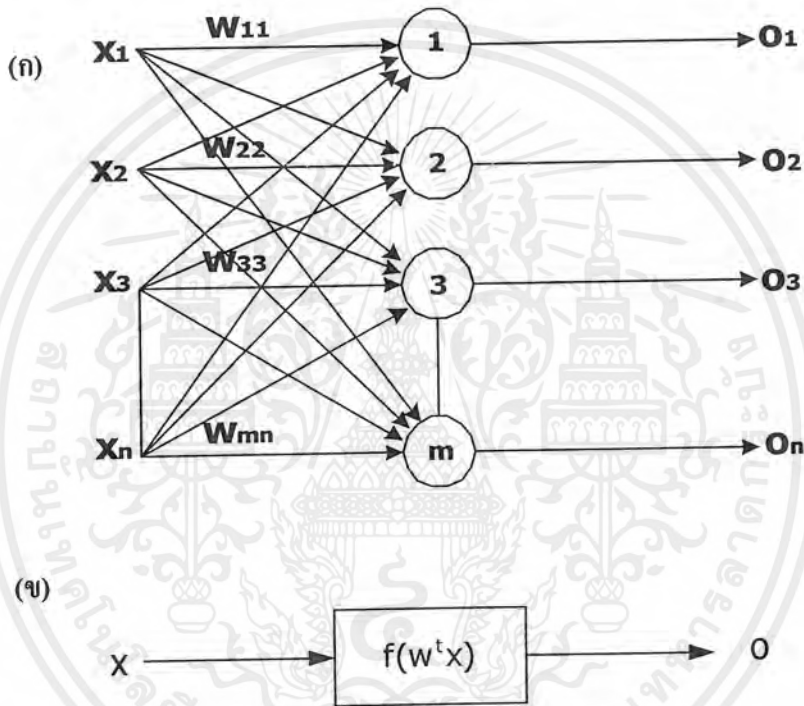
จากที่ได้กล่าวมาแล้วเกี่ยวกับโครงข่ายเซลล์ประสาท ทั้งที่เป็นแบบจำลองและเป็นแบบโครงข่ายของเซลล์ประสาทจริงของมนุษย์ จะมีการเชื่อมต่อกีชั้นของโหนดในลักษณะโครงข่ายอย่างหนาแน่น เพื่อให้โครงข่ายสามารถเรียนรู้และสามารถจดจำสิ่งที่เรียนรู้มาได้แล้วได้ ซึ่งการเชื่อมโยงของโครงข่ายจะมีสองลักษณะด้วยกันคือ

#### 1. โครงข่ายที่ส่งสัญญาณไปข้างหน้า (Feedforward Networks)

โครงข่ายชนิดนี้จะประกอบด้วยชั้นต่างๆของโครงข่าย โดยชั้นแรกจะเป็นอินพุตและชั้นสุดท้ายจะเป็นชั้นของเอาต์พุต ส่วนระหว่างชั้นของอินพุตกับเอาต์พุตจะมีหรือไม่มีชั้นที่แทรกอยู่ภายในอีกก็ได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ อัลกอริทึมที่ใช้ในการสอนโครงข่ายเช่น ถ้าเป็นโครงข่ายเพอร์เซปตรอน (Perceptron) แบบหลายชั้น (Multilayer Perceptron) ก็จะมีชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นอินพุตกับชั้นของเอาต์พุตอีก ซึ่งอาจจะมีมากกว่าหนึ่งชั้นก็ได้ ส่วนโครงข่าย Self-Organizing Map ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

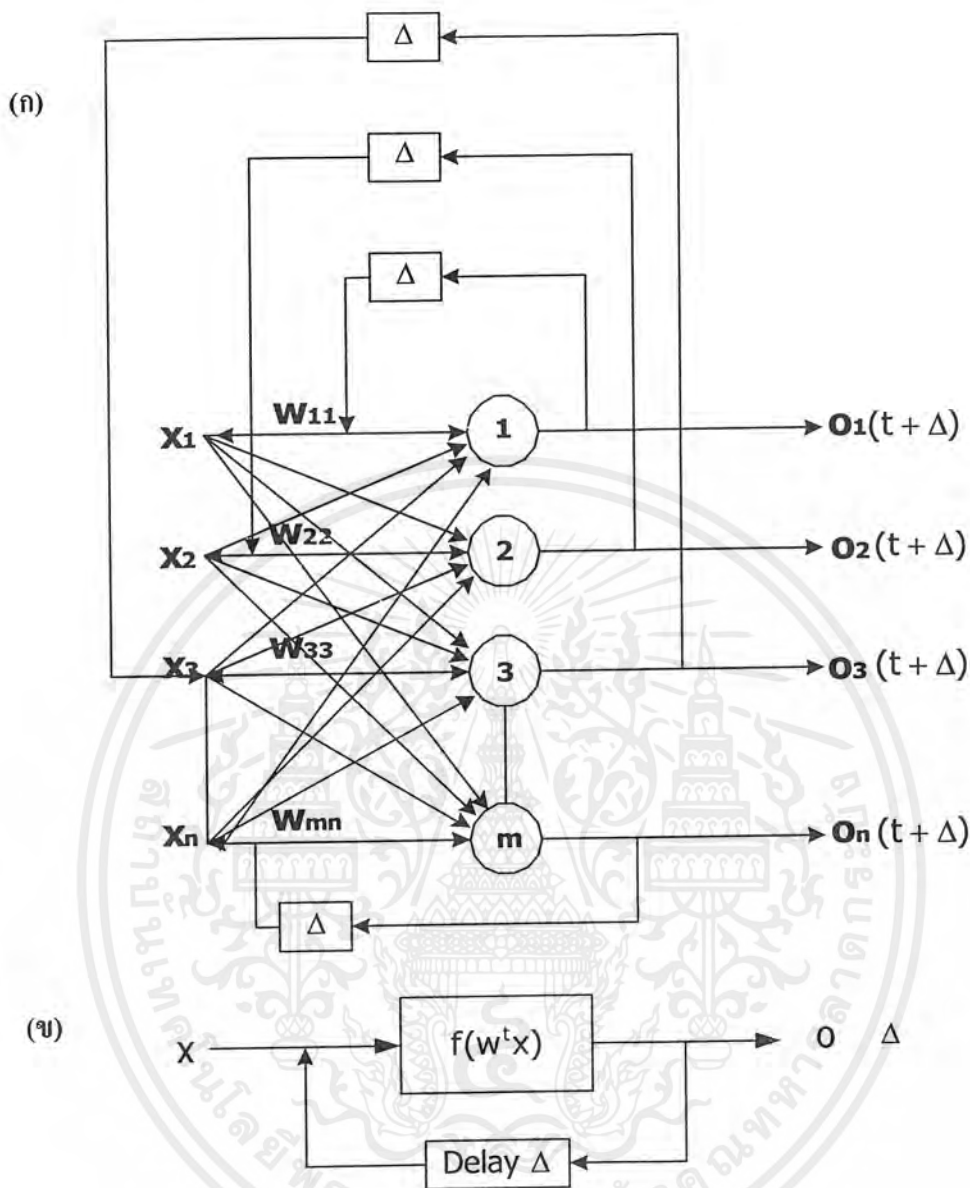
Kohonen จะมีเพียงชั้นของอินพุตกับชั้นของเอาต์พุตเท่านั้น การเชื่อมต่อระหว่างชั้นของโครงข่ายแบบโครงข่ายที่ส่งสัญญาณไปข้างหน้าจะมีค่าน้ำหนักเป็นตัวเชื่อม และสัญญาณอินพุตที่เข้ามาจะถูกส่งไปตามทิศทางของลูกศรจนถึงชั้นของเอาต์พุต โดยไม่มีการป้อนกลับดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงโครงข่ายที่ส่งสัญญาณไปข้างหน้า แบบชั้นเดียว

(ก) ลักษณะการเชื่อมโยง (ข) บล็อก ไดอะแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงโครงข่ายป้อนกลับแบบเวลาไม่ต่อเนื่องชั้นเดียว

(ก) ลักษณะการเชื่อมโยง (ข) บล็อกไดอะแกรม

2. โครงข่ายที่มีการป้อนกลับ (Feedback Networks)

ในส่วนแรกของโครงข่ายนี้จะเป็นโครงข่ายที่ ส่งสัญญาณไปข้างหน้าเหมือนกับบทแรก และส่วนที่เพิ่มเข้ามาคือส่วนของการป้อนกลับดังแสดงในรูปที่ และการป้อนกลับจะมีการหน่วงเวลาไปจากเดิมเท่ากับ ซึ่งโครงข่ายในรูปที่ จะเรียกว่า โครงข่ายรีเคอร์เรนต์ (Recurrent Network)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเรียนรู้โครงข่าย

การเรียนรู้โครงข่ายของระบบแบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาทหรือระบบแบบจำลองนิวรอนเน็ตเวิร์คจะมีประสิทธิภาพเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่าย ซึ่งการเรียนรู้ (Training) โครงข่ายก็คือการหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมให้แก่โครงข่ายนั้นๆ วิธีการสอนระบบแบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาทหรือระบบแบบจำลองนิวรอนเน็ตเวิร์คมีอยู่สองแบบด้วยกัน คือ

### 1. การสอนแบบชี้นำหรือดูแล (Supervised Learning)

การสอนโดยวิธีนี้จะกำหนดเซตของการสอนให้กับโครงข่าย ซึ่งเซตนี้ประกอบด้วยอินพุตและเอาต์พุตที่ต้องการ (Output Desired) เมื่อป้อนอินพุตให้กับโครงข่ายโครงข่ายก็จะทำการประมวลผลจนได้คำตอบและค่าถ่วงน้ำหนักขึ้นมาชุดหนึ่ง สำหรับคำตอบที่ได้จากโครงข่ายจะถูกนำมาคำนวณค่าผิดพลาด โดยวัดที่ระยะทางว่ามีคำตอบที่ต้องการของอินพุตที่ต้องการมากน้อยเพียงใด ถ้ายังมีความผิดพลาดสูงอยู่ก็จะมี การปรับค่าถ่วงน้ำหนัก และ ทำการสอนต่อไปจนกว่าค่าผิดพลาดระหว่างคำตอบของโครงข่ายกับเอาต์พุตที่ต้องการมีค่าน้อยพอที่จะยอมรับได้จึงจะหยุดการสอน และค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้ก็จะเป็นเหมือนฟังก์ชันที่ใช้ในการแปลงข้อมูล

### 2. การสอนแบบไม่มีการชี้นำหรือไม่มีการดูแล (Unsupervised Learning)

การสอนโดยวิธีนี้จะป้อนอินพุตเข้าสู่โครงข่าย และภายในโครงข่ายจะมีเอาต์พุตโหนดอยู่หลายโหนดด้วยกัน โดยแต่ละโหนดจะแทนกลุ่มของข้อมูลที่มีคุณสมบัติเหมือนกันเมื่อป้อนอินพุตเข้าสู่โครงข่าย โครงข่ายจะคำนวณค่าความสัมพันธ์ที่มีอยู่ภายในเซตของอินพุต โดยอาศัยค่าถ่วงน้ำหนักเป็นตัวแยกความแตกต่างของอินพุตไปเก็บไว้ในโหนดเอาต์พุตของโครงข่าย การสอนโดยวิธีนี้จะไม่สามารถระบุได้ว่าเอาต์พุตโหนดใดเป็นของข้อมูลกลุ่มไหน ผู้ใช้จะต้องกำหนดเอง ซึ่งต่างจากการสอนแบบชี้นำที่โครงข่ายสามารถระบุกลุ่มของเอาต์พุตได้อย่างแน่นอน

การสอนโครงข่ายเซลล์ประสาทแบบจำลองเป็นการหาฟังก์ชันการแปลงที่ได้ มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งฟังก์ชันการแปลงของแบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาทหรือระบบแบบจำลองนิวรอนเน็ตเวิร์คในที่นี้ คือ เซตของค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่าย ดังนั้นฟังก์ชันการแปลงจะมีศักยภาพน้อยเพียงใดนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่ายนั้นๆว่ามีเสถียรภาพมากน้อยเพียงใด และค่าถ่วงน้ำหนักคำนวณได้จากโครงข่าย ซึ่งการสอนโครงข่ายมีหลายแบบด้วยกัน เช่น กฎการสอนแบบเฮบบ์(Hebb),กฎการสอนแบบเพอร์เซปตรอน (Perceptron) ของโรเซนเบทท์ (Rosenblatt), กฎการสอนแบบเคลด้า, กฎการสอนแบบวินโดว์ฮอฟ (Windrow-Hoff), กฎการสอนโดยใช้สหสัมพันธ์,กฎการสอนแบบวินเนอร์เทคออร์(Winner-Take\_All),และกฎการสอนแบบเอาต์สตาร์ (Outstar) ของกรอสเบิร์ก(Gossberg)

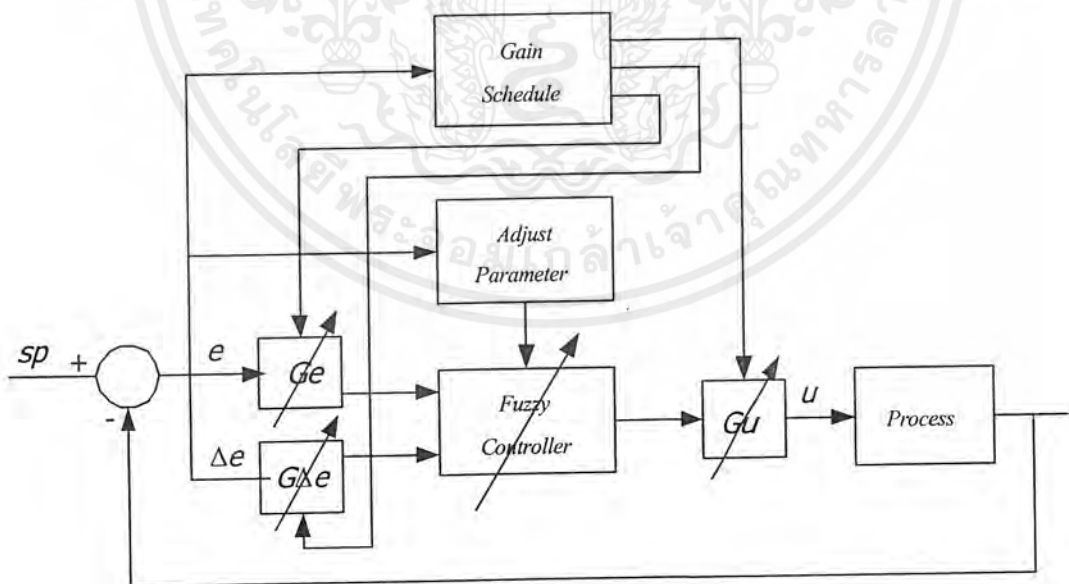
## บทที่ 5

### การออกแบบตัวควบคุมนิวโรฟัซซี

ตัวควบคุมที่นำเสนอในปริญญาณิพนธ์นี้เป็นตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตัวเองโดยใช้วิธีการของ (Gradient Descent) ซึ่งมีโครงสร้างหลักแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนของตัวควบคุมฟัซซี และส่วนการปรับแต่งพารามิเตอร์ ซึ่งรายละเอียดขั้นตอนและวิธีการในการออกแบบจะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

#### 5.1 โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซี

โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซี แสดงดังรูปที่ 5.1 ประกอบด้วยตัวควบคุมฟัซซีทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม รับสัญญาณป้อนกลับจากระบบการแล้วทำการคำนวณค่าสัญญาณควบคุมส่งไปควบคุมกระบวนการ Gain Schedule เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการตรวจสอบสัญญาณที่ได้รับมาจากกระบวนการและทำการปรับเปลี่ยนค่า Scaling Factor  $G_e, G_{\Delta e}$  และ  $G_u$  ให้ถูกต้องตามช่วงที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อเป็นการลดหรือเพิ่มความไวของสัญญาณ  $e, \Delta e$  และ  $u$  ซึ่งค่า  $G_e, G_{\Delta e}$  และ  $G_u$  นี้ได้มาจากการลองผิดลองถูก การออกแบบโครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซีประกอบด้วยขั้นตอนในการออกแบบดังนี้



รูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.1 การกำหนดตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุม

ประกอบด้วย ตัวแปรอินพุต สองตัวและตัวแปรเอาต์พุตหนึ่งตัว โดยตัวแปรอินพุตของตัวควบคุมคือ ตัวแปรค่าผิดพลาด  $e(\text{error})$  ต่อ ไปจะเรียกว่าตัวแปรอินพุต  $e$  กับตัวแปรค่าเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด  $\Delta e$  (change of error) ต่อไปจะเรียกว่าตัวแปรอินพุต  $\Delta e$  ของระบบควบคุมและตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุมคือ สัญญาณควบคุม  $u$  (control output)

### 5.1.2 การนอมอลไลซ์ตัวแปรอินพุตของตัวควบคุม

ให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่แท้จริงของตัวแปรอินพุต ซึ่งได้จากระดับสัญญาณที่วัดได้ของกระบวนการซึ่งจากคุณลักษณะของกระบวนการที่ใช้ในการทดลองสัญญาณป้อนกลับ ได้จากการวัดค่าเอาต์พุตของกระบวนการ จากอุปกรณ์เซ็นเซอร์แบบความดันแล้วแปลงเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้าขนาด 4-20 mA และแปลงสัญญาณกระแสไฟฟ้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้า โดยใช้ความต้านทาน 250 โอห์ม และแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็น สัญญาณดิจิทัล โดย IC PCF 8591 ขนาด 8 bit ซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้ง A/D และ D/A ในตัวเองซึ่งค่าดิจิทัลที่แปลงได้จะอยู่ในช่วง 0-255จากการคำนวณเพื่อหาค่าของตัวอินพุต  $e$  และ  $\Delta e$  ของระบบได้ดังนี้

$$e(nt) = sp - y(nt) \quad (5.1)$$

$$\Delta e(nt) = e(nt) - e(nt-t) \quad (5.2)$$

โดย

$sp$  = สัญญาณอ้างอิง

$y(nt)$  = สัญญาณป้อนกลับที่ได้จากการตรวจสอบสถานะของกระบวนการที่เวลา  $(nt)$

$e(nt)$  = ค่าผิดพลาดของระบบที่เวลา  $nt$

$e(nt-t)$  = ค่าผิดพลาดของระบบที่เวลา  $nt-t$

$\Delta e(nt-t)$  = ค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดของระบบที่เวลา  $nt$

ค่าสัญญาณอ้างอิง  $sp$  มีช่วงอยู่ระหว่าง 0-100 เปอร์เซ็นต์ ค่าตัวแปรอินพุต  $e$  และตัวแปรอินพุต  $de$  จะอยู่ในช่วง  $\pm 150$  หรือกล่าวได้ว่ามีเอกภพสัมพัทธ์ อยู่ในช่วง  $\pm 150$  โดยการนอมอลไลซ์ ตัวแปรอินพุต ให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์  $e(nt) = [-150, 150]$  ดังนี้

$$e(nt) = \left[ \frac{e(nt) - 0}{255 - 0} \right] \times 150 \quad (5.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.3 การเลือกพีชชีฟิเคชัน

ขึ้นอยู่กับลักษณะ ของสัญญาณอินพุตของตัวควบคุม ในที่นี้สัญญาณป้อนกลับจากกระบวนการที่ได้จากอุปกรณ์เซ็นเซอร์มีระดับของสัญญาณรบกวนไม่สูงมากนัก จึงเลือกใช้วิธีพีชชีฟิเคชันแบบ พีชชีซิงเกิลตัน ดังสมการ 5.4

$$U_{A(U)} = \begin{cases} 1; u = u_0 \\ 0; u \neq u_0 \end{cases} \quad (5.4)$$

### 5.1.4 การกำหนดจำนวนพีชชีเซตของตัวแปรอินพุต

จะเป็นการกำหนดความซับซ้อนของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์-พุต โดยจำนวนพีชชีเซตของตัวแปรอินพุตแต่ละตัวจะมีผลต่อขนาดของฐานกฎการควบคุม ดังสมการต่อไปนี

$$M = Ne * N\Delta e \quad (5.5)$$

โดย

M คือ ขนาดของกฎการควบคุม

Ne คือจำนวนเทอมของตัวแปรอินพุต e

NΔe คือ จำนวนเทอมของตัวแปรอินพุต Δe

ในการกำหนดจำนวนพีชชีเซตของตัวแปรนั้นควรกำหนดให้เป็นจำนวนคี่ เพื่อให้มีพีชชีเซตหนึ่งเซตอยู่ตรงกลางของ เอกภพสัมพัทธ์ ซึ่ง โยปกติใช้ 5 ถึง 7 เซต ซึ่งในปริภูมิปริพันธ์นี้ ได้ ออกแบบตัวควบคุมให้มีจำนวนพีชชีเซตของตัวแปรอินพุต e และ Δe เท่ากับ 7 เซต ดังนั้นจำนวนของกฎการควบคุมทั้งหมดเท่ากับ  $M = 7 * 7 = 49$  เซต

### 5.1.5 การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต

เป็นการกำหนดความสัมพันธ์ในการแม่ปิ้งค่าอินพุตในเอกภพสัมพัทธ์กับพีชชีเซตของตัวแปรอินพุต ถ้าต้องการให้ความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น ควรจะกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบเชิงเส้น เช่น รูปประฆังคว่ำ หรือ เก้าอี้เขียน

การกำหนดการกระจายของพีชชีเซตบนเอกภพสัมพัทธ์ สามารถกำหนดได้ทั้งแบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบ โดยบริเวณที่มีความหนาแน่นของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูง จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตที่มีความซับซ้อนมากกว่าบริเวณที่มีความหนาแน่นของฟังก์ชัน การเป็นสมาชิกต่ำ

การซ้อนทับกัน (Overlap) ของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของตัวควบคุมพีชชี เนื่องจากในการอินเฟอเรนซ์แบบพีชชีต้องการให้เกิดกิริยากันระหว่างกันของ

กฎการควบคุมมากกว่า 1 กฎ การกำหนดเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับกันขึ้นอยู่กับความคลุมเครือหรือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความซับซ้อนของระบบและการออกแบบใช้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตที่มีการซ้อนทับกันมากกว่า 2 เซต จะทำให้ Control Hyper Surface มีความราบเรียบมากขึ้น แต่ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของกฎการควบคุมใดๆจะมีผลกระทบต่อการควบคุม ดังนั้นในการออกแบบฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตจึงไม่ควรให้มีการซ้อนทับกันของฟังก์ชันเซตมากกว่า 2 เซต

การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตมีแนวทางที่สามารถสรุปได้ดังนี้

- กรณีต้องการใช้เวลาในการคำนวณน้อยควรกำหนดให้รูปร่างฟังก์ชันการเป็นสมาชิก เป็นรูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมคางหมู

- การกำหนดการกระจายของฟังก์ชันเซตบนเอกภพสัมพัทธ์ควรกำหนดให้สมมาตรกัน
- การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต ควรกำหนดให้มีการทับซ้อนกันของฟังก์ชันเซตที่อยู่ติดกัน เพื่อให้มีการเกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุมในทุกสถานะของสัญญาณอินพุตซึ่งจะแสดงถึงความสมบูรณ์ของกฎการควบคุมโดยปกติจะออกแบบให้มีเปอร์เซ็นต์การทับซ้อนกันของฟังก์ชันเซตประมาณ 15-25 เปอร์เซ็นต์

ในปริภูมิพหุนิพจน์นี้ได้ออกแบบตัวควบคุม โดยกำหนดให้รูปร่างของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟังก์ชันเซตของตัวแปรอินพุต  $e$  และ  $\Delta e$  เป็นรูปเกาส์เซียน เนื่องจากมีความต่อเนื่องของรูปทรงและเหมาะสมกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากการทดลองใช้ตัวควบคุมไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นปั๊มน้ำ ซึ่งมีความไม่เป็นเชิงเส้น ในรูปที่ 5.2 แสดงรูปร่างของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกกับค่ากลางและตัวแปรลิงกวิสติกแต่ละตัวสมการ 4.6 เป็นสมการของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกที่ใช้

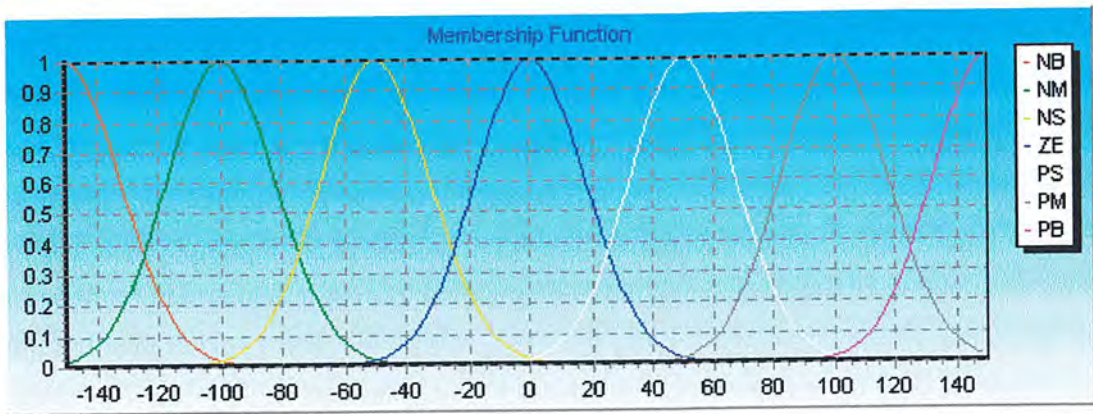
$$u_{Fi}(xi) = \exp\left(\frac{xi - \bar{xi}}{\sigma i}\right) \quad (5.6)$$

โดยที่  $\bar{xi}$  คือ ค่ากลาง (mean)

$\sigma i$  คือ ความกว้าง (width)

$xi$  คือ อินพุต

$u_{Fi}(xi)$  คือ ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟังก์ชันเซตโดยมีอินพุตเป็น  $xi$   $F_i$  เป็นฟังก์ชันเซตในส่วน antecedent  $i$  เป็นจำนวนตัวแปรอินพุต 1 เป็นจำนวนกฎการควบคุม



รูปที่ 5.2 แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต  $e$  และ  $\Delta e$

จากรูปที่ การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบเกาส์เซียนนั้น จะสามารถควบคุมระบบได้ทุกระบบแต่จะมีค่าผิดพลาดเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบในแต่ละระบบ ซึ่งจะใช้ส่วนการปรับแต่งพารามิเตอร์ของฟัซซี ทำให้ผลตอบสนองเข้าสู่สัญญาณอ้างอิง

#### 5.1.6 การกำหนดตัวแปรลิงกวิสติก

จากการกำหนดจำนวนฟัซซีเซตของตัวแปรอินพุตคั้งที่ได้กล่าวมาแล้วว่าใช้จำนวนฟัซซีเซตทางอินพุตแต่ละตัวเป็น 7 เซต ตัวแปรลิงกวิสติกได้กำหนดเป็น ชื่อ และค่ากลาง (Mean) ของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกคั้งนี้

โดย

NB = Negative Big = -150

NM = Negative Mediem = -100

NS = Negative Small = - 50

ZE = Zero Equal =0

PS = Positive Small = 50

PM = Positive Mediem = 100

PB = Positive Big = 150

และความกว้าง (Width) หรือ  $\sigma$  มีค่าเริ่มต้นเท่ากันคือ 25 ในการปรับค่าความกว้างนี้มีเงื่อนไขว่าถ้าน้อยกว่า 0 ให้เริ่มต้นใหม่ที่ค่า 25

#### 5.1.7 การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุต

จะมีแนวทางคล้ายกับการกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต โดยกำหนดให้ฟัซซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตเป็นฟัซซีซิงเกิลตัน

### 5.1.8 การกำหนดรูปแบบของกฎการควบคุม

รูปแบบของกฎการควบคุมที่ใช้ในปฏิญานิพนธ์นี้อยู่ในรูปแบบเงื่อนไข If-Then โดยใน ส่วนของ antecedent หรือส่วนของ If เป็นการกำหนดเงื่อนไขของค่าตัวแปรอินพุตในรูปแบบฟัซซีเซต และส่วน consequent หรือส่วนของ Then แสดงถึงผลลัพธ์ของตัวแปรเอาต์พุตในรูปแบบฟัซซีเซต เมื่อ ตัวแปรอินพุตเป็นไปตามเงื่อนไขส่วน antecedent กฎการควบคุมที่ใช้ในปฏิญานิพนธ์นี้มีรูปแบบ ดังนี้

$$R' : \text{If } Xi \text{ is } Fi' \text{ AND } \dots \text{AND, } Xi \text{ is } Fi \quad (5.7)$$

Then y is  $Gi$

โดยที่ 1 เป็นจำนวนของกฎการควบคุมเท่ากับ 1 ถึง 49 กฎ ดังได้กล่าวมาแล้ว n เป็นจำนวน อินพุต ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 2  $Ri$  เป็นกฎการควบคุมลำดับที่ i

$F_1', \dots, F_n'$  เป็นฟัซซีเซตของส่วน Antecedent ในเอกภพสัมพัทธ์  $U_i$  ซึ่งเป็นสับเซต ของจำนวนจริง เขียนแทนด้วย  $U_i \subset R$  จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อตัวแปรอินพุตเอกภพสัมพัทธ์ ของอินพุตจะเป็น  $U_i = [-150, 150]$   $G'$  เป็นฟัซซีเซตของส่วน consequent ในเอกภพสัมพัทธ์  $V$  ซึ่งเป็นสับเซตของจำนวนจริงเขียนแทนด้วย  $V \subset R$  ในทำนองเดียวกัน เอกภพสัมพัทธ์ตัวแปร เอาต์พุตจะเป็น  $V = [-150, 150]$  สามารถแทนด้วยตัวแปรอินพุตเอาต์พุตที่กำหนดในปฏิญานิพนธ์ นี้ดังสมการที่ (5.8)

$$Ri : \text{If } e \text{ is } F_1' \text{ And } \Delta e \text{ is } F_2' \text{ Then } y \text{ is } G' \quad (5.8)$$

โดยที่  $F_1', F_2'$  คือตัวแปรลิงกวิสติกดังได้กล่าวมาแล้วโดยที่จะเป็นได้คือ NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB ขึ้นอยู่กับค่าของอินพุตในฟังก์ชันการเป็นสมาชิกใดหรือฟัซซีเซตใด

### 5.1.9 การอินเฟอเรนซ์ของฟัซซี

เป็นกระบวนการประมวลผลข้อมูลอินพุตที่อยู่ในรูปตัวแปรฟัซซีโดยใช้กฎการควบคุม If-Then ในการหาค่าเอาต์พุตในรูปของตัวแปรฟัซซี จากสมการที่ (4.7) เพื่อความสะดวกในการ คำนวณ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการดังนี้

$$R' : F_1' \times \dots \times F_n' \longrightarrow G' \quad (5.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานเดียวกันเมื่อแทนตัวแปรอินพุตจะได้ดังสมการ 5.10

$$R': F_1' \times F_2' \longrightarrow G' \quad (5.10)$$

ซึ่งอยู่ในระนาบ  $U \times V$  อินพุตเวกเตอร์  $\underline{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$  เป็นสมาชิกในเอกภพสัมพัทธ์ อยู่ในรูปผลคูณคาร์ทีเซียน  $u_1 x \dots x u_n$  แทนด้วย  $\underline{x} = (x_1, \dots, x_n)^T \in U_1 x \dots x U_n$  และเอาต์พุต  $y$  เป็นสมาชิกในเอกภพสัมพัทธ์  $V$  แทนด้วย  $y \in V$  ต่อไปจะแทนด้วยตัวแปรลิงกวิสติกกำหนดให้  $A'$  อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์  $U$  เป็นอินพุต อินเฟอร์เรนซ์ของฟัชซี ในการประมวลผลฟัชซีเซต  $B'$  ในเอกภพสัมพัทธ์  $V$  ซึ่งเป็นเอาต์พุตของฟัชซีในปริภูมิพจน์นี้ เลือกใช้แบบ sup-star composition ดังสมการ 5.11

$$\mu_{B'}(\bar{y}') = \sup_{x \in U} [\mu_{F_1' \times \dots \times F_n' \rightarrow G'}(\underline{x}, \bar{y}') * \mu_{A'}(x)] \quad (5.11)$$

\* แทนตัวกระทำที่ใช้ในการอินเฟอร์เรนซ์ ซึ่งใช้การอินเฟอร์เรนซ์แบบ Product inference ดังสมการที่ 5.12

$$\mu_{F_1' \times \dots \times F_n' \rightarrow G'}(\underline{x}) = \mu_{F_1'}(x_1) \dots \mu_{F_n'}(x_n) \cdot \mu_{G'}(\bar{y}') \quad (5.12)$$

แทนสมการ 5.12 ในสมการที่ 5.11 จะได้

$$\mu_{B'}(\bar{y}') = \sup_{x \in U} [\mu_{F_1'}(x_1) \dots \mu_{F_n'}(x_n) \cdot \mu_{G'}(\bar{y}') \cdot \mu_{A'}(x)] \quad (5.13)$$

โดยที่  $\mu_{A'}(x)$  ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกที่ได้จากเอาต์พุตของฟัชซีพีเคชันการที่ปริภูมิพจน์นี้ เลือกใช้วิธีการฟัชซีซึ่งเกิดขึ้นตามเงื่อนไขที่กล่าวไว้ในตอนต้นสามารถแทนด้วย 1 ในทำงานเดียวกัน  $\mu_{G'}(\bar{y}')$  เป็นฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตเลือกใช้วิธีการฟัชซีซึ่งเกิดขึ้นเหมือนกัน และเป็นจุดที่ทำให้ค่า  $\bar{y}'$  มีค่าสูงสุดซึ่งสามารถแทน  $\mu_{G'}(\bar{y}')$  ด้วย 1 ฉะนั้นสามารถเขียนสมการที่ 5.12 ใหม่ได้ดังนี้

$$\mu_{B'}(\bar{y}') = \sup_{x \in U} [\mu_{F_1'}(x) \dots \mu_{F_n'}(x_n)] \quad (5.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ สามารถเขียนอยู่ให้รูปสมการที่ 5.15

$$\mu_{B'}(\bar{y}') = \prod_{i=1}^2 \mu_{F'_i}(x_i) \quad (5.15)$$

เมื่อแทนตัวแปรอินพุตจะได้สมการ

$$\mu_{B'}(\bar{y}') = \prod_{i=1}^2 \mu_{F'_i}(x_i) \quad (5.16)$$

### 5.1.10 การดีฟัซซิฟิเคชัน

เป็นกระบวนการหาค่าเอาต์พุตเพียงค่าเดียวที่เหมาะสมที่สุด เพื่อเป็นตัวแทนของฟัซซีเอาต์พุตที่มีความเป็นไปได้กระจายอยู่บนเอกภพสัมพัทธ์ของเอาต์พุตในปริภูมิพหุนิพจน์นี้เลือกใช้ วิธี FM ซึ่งวิธี FM นี้เป็นวิธีที่คัดแปลงมาจากวิธี COG เพื่อลดเวลาในการคำนวณ การดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธีนี้ จะได้ผลเช่นเดียวกับการใช้วิธี COG ดังสมการ

$$f_{(x)} = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}'(u_{B'}(\bar{y}'))}{\sum_{l=1}^M (u_{B'}(\bar{y}'))} \quad (5.17)$$

โดย

$\bar{y}'$  คือ ศูนย์กลางของฟัซซีเซตของ  $G'$  ซึ่งเป็นจุดที่ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก

$\mu_{G'}(y)$  มีค่าสูงสุด

จากสมการที่ 5.6, 5.16 แทนในสมการที่ 5.17 จะแทนการดีฟัซซิฟิเคชัน ได้ดังสมการ 5.18

$$f_{(x)} = \frac{\sum_{l=1}^{49} \bar{y}' \left( \prod_{i=1}^2 \exp\left(-\left(\frac{x_i - \bar{x}_i}{\sigma_i'}\right)^2\right) \right)}{\sum_{l=1}^{49} \left( \prod_{i=1}^2 \exp\left(-\left(\frac{x_i - \bar{x}_i}{\sigma_i'}\right)^2\right) \right)} \quad (5.18)$$

ในปริภูมิพหุนิพจน์นี้ ได้กำหนดศูนย์กลางของฟัซซีเซต  $\bar{y}'$  เป็นตารางตามตัวแปรอินพุตที่

ใช้ในปริภูมิพหุนิพจน์นี้ ซึ่งเป็นตารางของกฎการควบคุม ดังแสดงในตารางของกฎการควบคุมที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงกฎการควบคุม

$e/\Delta e$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	-150	-150	-112	-43	-7	30	55
NM	-150	-129	-64	-31	16	54	63
NS	-112	-78	-46	-22	33	63	87
ZE	-45	-16	-7	7	52	90	130
PS	-22	3	22	57	106	117	150
PM	7	30	64	85	129	142	150
PB	30	54	112	133	138	150	150

### 5.1.11 การดัดแปลงลอจิกตัวแปรเอาต์พุตให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด

เอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีมีค่าระหว่าง  $u = [-150, 150]$  แต่จากโปรแกรมจะส่งค่าให้ระหว่าง  $u = [0, 100]$  การดัดแปลงลอจิกค่าเอาต์พุตให้อยู่ในช่วงสัญญาณควบคุมในปริภูมิพันธ์นี้คือค่าสัญญาณ MV (Manipulate Value) ดังสมการ 5.19

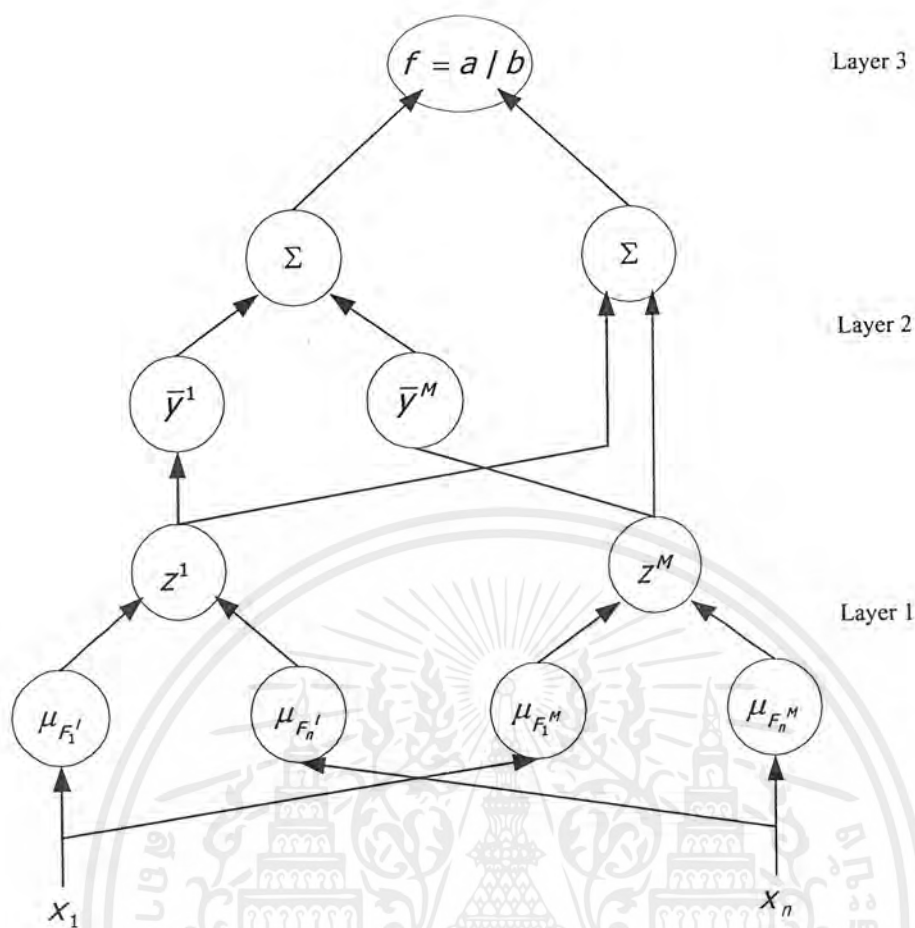
$$MV = (\text{NeuroFuzzy Output}/150) \times 255 \quad (5.19)$$

สัญญาณ MV ที่ได้จะถูกส่งต่อไปให้วงจร A/D เพื่อแปลงแรงดันให้ได้ค่า 0-5 V และแปลงเป็นกระแสขนาด 4-20 ma เพื่อส่งต่อไปควบคุมการทำงานของปั๊มน้ำ

## 5.2 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซี

จากสมการที่ 5.18 สามารถแทนด้วย โครงข่ายแบบป้อนไปด้านหน้า (Feedforward - network) 3 เลเยอร์ดังรูปที่ 5.3 โดยการทำงานแบ่งเป็น 2 ส่วนคือส่วนป้อนไปด้านหน้า (Feedforward) และส่วนป้อนกลับจากด้านหลัง (Backward) ในส่วนป้อนไปด้านหน้า มีการทำงานในแต่ละเลเยอร์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แสดงโครงข่ายป้อนไปด้านหน้าของตัวควบคุมฟuzzy

เลเยอร์ที่ 1 เป็นการรวมฟuzzyพีเคชันและอินเฟอร์เรนซ์ไว้ในเลเยอร์นี้มีการทำงานคือการเปลี่ยนค่าอินพุตของตัวควบคุมให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรฟuzzyด้วยสมการที่ 5.6 ผลที่ได้เป็นระดับของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของแต่ละตัวแปรลิงกวิสติกและอินเฟอร์เรนซ์ด้วยสมการที่ 5.18 เป็นการนำค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลิงกวิสติกแต่ละตัวมาคูณกัน ผลที่ได้แทนด้วยตัวแปรรวมสมการ 5.15 และ 5.6 เข้าด้วยกันจะได้ดังสมการที่ 5.20

$$z^l = \prod_{i=1}^n \exp\left(-\left(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right) \quad (5.20)$$

เลเยอร์ที่ 2 ผลที่ได้จากเลเยอร์ที่ 1 แบ่งเป็น 2 ทางคือด้านตัวแปร a นำผลการอินเฟอร์เรนซ์ ค่า คูณกับค่า ซึ่งเป็นจำนวนจริงของส่วน consequent แล้วมารวมกันแทนด้วยสมการที่ 5.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a = \sum_{l=1}^M (\bar{y}' z^l) \quad (5.21)$$

และทางด้านตัวแปร  $b$  เกิดจากการรวมกันของค่า แทนด้วยสมการที่ 5.22

$$b = \sum_{l=1}^M z^l \quad (5.22)$$

เลขอร์ที่ 3 เป็นเอาต์พุตของระบบคือการนำค่า  $a$  หารด้วย  $b$  จะได้  $f = a/b$  ซึ่งเมื่อแทนค่าสมการทั้งหมดจะได้เอาต์พุตของระบบดังสมการที่ 5.18

ส่วนป้อนกลับจากด้านหลังเป็นการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของพีชชี โดยใช้วิธีการ Gradient Descent จากสมการที่ 5.18 มีพารามิเตอร์ที่สามารถปรับแต่งได้ ระบบการปรับแต่งพารามิเตอร์จะปรับแต่งในเลขอร์ที่ 1 และ 2 นำคู่ของอินพุต-เอาต์พุตในสถานะปัจจุบันป้อนให้กับโครงข่ายโดยมีค่าอินพุต-เอาต์พุตที่ต้องการแทนด้วย  $(x^p, d^p)$  โดยทำการหาค่าผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square Error) สมการที่ 5.23 ของระบบพีชชีลอคัลในสมการ 5.18 กับค่าเอาต์พุตที่ต้องการ  $d^p$

$$e^p = 1/2[f(x^p) - d^p]^2 \quad (5.23)$$

เพื่อความสะดวกในการคำนวณแทน  $e^p f(x^p)$  และ  $d^p$  ด้วย  $e, f$  และ  $d$  ตามลำดับอัลกอริทึมทำการปรับแต่งพารามิเตอร์ มีการทำงานดังนี้ในการปรับแต่งค่าของ ใช้

$$\bar{y}'(k+1) = \bar{y}'(k) - \alpha_1 \frac{\partial e}{\partial \bar{y}'} \Big|_k \quad (5.24)$$

แทนค่าสมการ 5.25 ในสมการ 5.24 จะได้อัลกอริทึมในการปรับแต่งค่า เป็นค่าที่อยู่ในเลขอร์ที่ 2 จากรูปที่ แสดงสมการที่ 5.26 ดังนี้

$$\frac{\partial e}{\partial \bar{y}'} = (f - d) \frac{\partial f}{\partial a} \frac{\partial a}{\partial \bar{y}'} = (f - d) \frac{1}{b} z^l \quad (5.25)$$

ในการปรับแต่งค่าในเลขอร์ที่ 1 มีสองตัวแปรคือ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{y}'(k+1) = \bar{y}'(k) - \alpha_1 \frac{f-d}{b} z' \quad (5.26)$$

ในการปรับแต่งค่าในเลขอร์ที่ 1 มีสองตัวแปรคือ  $\bar{x}'$  และ  $\sigma'_i$  โดย

$$\bar{x}'_i(k+1) = \bar{x}'_i(k) - \alpha_2 \frac{\partial e}{\partial \bar{x}'_i} \Big|_k \quad (5.27)$$

โดย ที่  $i = 1, 2, \dots, n$ , จากรูปที่ ๑ ค่า  $f$  ขึ้นอยู่กับ  $\bar{x}'$  ใช้กฎลูกโซ่จะได้สมการที่ 5.28

$$\frac{\partial e}{\partial \bar{x}'_i} = (f-d) \frac{\partial f}{\partial z'} \frac{\partial z'}{\partial \bar{x}'_i} \quad (5.28)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \bar{x}'_i} = (f-d) \frac{\bar{y}' - f}{b} z' \frac{2(x_i^p - \bar{x}'_i)}{\sigma_i'^2} \quad (5.29)$$

แทนค่าสมการที่ 5.28 ในสมการที่ 5.26 จะได้อัลกอริทึมในการปรับแต่งค่า  $\bar{x}'$  ดังนี้

$$\bar{x}'(k+1) = \bar{x}'(k) - \alpha_2 \frac{f-d}{b} (\bar{y}' - f) z' \frac{2(x_i^p - \bar{x}'_i(k))}{\sigma_i'^2(k)} \quad (5.30)$$

ใช้วิธีการเดียวกันในการปรับแต่งค่าของ  $\sigma'_i$  ดังสมการที่ 5.32

$$\sigma'_i(k+1) = \sigma'_i(k) - \alpha_3 \frac{\partial e}{\partial \sigma'_i} \Big|_k \quad (5.31)$$

$$\sigma'_i(k+1) = \sigma'_i(k) \alpha_3 \frac{f-k}{b} (\bar{y}' - f) z' \frac{2(x_i^p - \bar{x}'_i(k))^2}{\sigma_i'^3(k)} \quad (5.32)$$

ในปริณญาณิพนธ์นี้กำหนดค่า Learning Rate เป็นค่าคงที่โดย  $\alpha_1$  เท่ากับ 0.5  $\alpha_2$  เท่ากับ 0.01  $\alpha_3$  เท่ากับ 0.001 ตามลำดับ ซึ่งได้จากการลองผิดลองถูกซ้ำหลายๆครั้ง จน ได้ค่าที่เหมาะสม ส่วนของจำนวนครั้งในการปรับค่านั้นขึ้นอยู่กับผลต่างของค่าเอาต์พุตกับค่าอ้างอิง ถ้ายังมากกว่า 25 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์ของค่าสัญญาณอ้างอิง ก็ให้ทำการคำนวณต่อไปเรื่อยๆ ส่วนผลจากการปรับแต่งพารามิเตอร์แล้วจะไม่นำมาใช้อีกในการเปลี่ยนค่า อ้างอิงในครั้งต่อไปเนื่องจากระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นไม่สามารถใช้ค่าพารามิเตอร์เก่ามาคำนวณได้

### 5.3 ค่าอัตราขยายของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต (Scaling Factor)

สัญญาณ  $e$  และ  $\Delta e$  จากรูปที่ สัญญาณทั้งสองจะคูณด้วย Scaling Factor  $G_e$  และ  $G_{\Delta e}$  ตามลำดับ การที่นอมอลไลซ์ค่า  $e$  และ  $\Delta e$  หลังจากที่ได้คูณค่า Scaling Factor จะช่วยในการลดหรือเพิ่มความไวต่อสัญญาณอินพุตทั้งสอง ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบการเพิ่ม  $G_e$  จะช่วยเพิ่มผลตอบสนองต่อค่าอ้างอิงเร็วขึ้นแต่อาจทำให้เกิดโอเวอร์ชูทสูงและออสซิลเลทที่สภาวะคงตัวมาก การเพิ่มค่า  $G_{\Delta e}$  จะช่วยลดโอเวอร์ชูทและออสซิลเลทที่สภาวะคงตัว แต่ถ้าค่า  $G_{\Delta e}$  มากเกินไปก็อาจทำให้ค่า Steady State Error เพิ่มมากขึ้นได้ ดังนั้นการใช้งาน  $G_e$  และ  $G_{\Delta e}$  จะต้องสัมพันธ์กัน ซึ่งจะทำให้ระบบทำงานมีประสิทธิภาพ สัญญาณทั้งสองเป็นอินพุตของพีซีซี ดังรูปที่ โดย  $x=[x_1, x_2]=[e, \Delta e]$  ตามลำดับส่วนของ ส่วนสัญญาณ  $u$  ซึ่งเป็นเอาต์พุตจะถูกนำไปคูณค่า Scaling Factor  $G_u$  ด้วยเช่นกัน เพื่อเป็นการเพิ่มค่าของสัญญาณควบคุม ส่วนของ Gain Schedule เป็นส่วนที่ทำการ ตรวจสอบค่าสัญญาณที่ได้รับมาจากกระบวนการ แล้วทำการปรับเปลี่ยนค่า Scaling Factor ให้อยู่ในช่วงที่ออกแบบไว้ การเกิดโอเวอร์ชูท ไรส์ไทม์ เซตติงไทม์ ความถี่ในการออสซิลเลทของสถานะ ทรานเซียน เกิดจากการกำหนดค่า  $G_e, G_{\Delta e}, G_u, \alpha_1, \alpha_2$  และ  $\alpha_3$  ไม่เหมาะสม จะเห็นได้ว่ามีตัวแปรในระบบหลายตัวจากการทดลองให้ค่า  $\alpha_1, \alpha_2$  และ  $\alpha_3$  เป็นค่าคงที่ดังที่ได้กำหนดมาแล้ว ค่า Scaling Factor ที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้มาจากการลองผิดลองถูกหลายๆครั้ง และมีเงื่อนไขของค่า Scaling Factor ที่ใช้ในการทดลองดังนี้

#### 5.3.1 ช่วงของสัญญาณป้อนกลับระหว่าง 0-75 % ของสัญญาณอ้างอิง

กำหนดให้  $G_e = 2$   $G_{\Delta e} = 1$  และ  $G_u = 3$  การกำหนดช่วงดังกล่าว จะทำให้ค่าไรส์ไทม์ต่ำ ผลตอบสนองเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงเร็ว

#### 5.3.2 ช่วงของสัญญาณป้อนกลับระหว่าง 75-95% ของสัญญาณอ้างอิง

กำหนดให้  $G_e = 2G_{\Delta e} = 5$  และ  $G_u = 1$  การกำหนดค่าดังกล่าวเป็นการลดโอเวอร์ชูทและลดการเข้าหาสัญญาณอ้างอิงที่สภาวะคงตัว ซึ่ง ถ้า  $G_{\Delta e}$  ยิ่งมากขึ้นเท่าไรก็จะทำให้การเกิดโอเวอร์ชูทน้อยลงเท่านั้น แต่จะทำให้การเข้าสู่สภาวะคงตัวช้าลงไปด้วย

#### 5.3.3 ช่วงของสัญญาณป้อนกลับระหว่าง 95-105% ของสัญญาณอ้างอิง

กำหนดให้  $G_e = 1$   $G_{\Delta e} = 1$  และ  $G_u = 1$  การกำหนดให้ค่า  $G_e$   $G_{\Delta e}$  และ  $G_u$  เป็น 1 ทั้งหมดนั้นจะช่วยในการไม่ให้เกิด ออสซิลเลท และค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว

## บทที่ 6

### ผลการทดลอง

กระบวนการที่ทำการสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดลองนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า มีถังน้ำอยู่ 4 ใบ โดยจะอยู่ทางซ้าย 2 ใบ และทางขวา 2 ใบ และมีปั๊มน้ำทางด้านซ้าย 1 อัน ซึ่งในที่นี้จะขอเรียกถังน้ำด้านซ้าย, ถังน้ำด้านขวา, ถังน้ำด้านบนซ้าย, และถังน้ำด้านบนขวา ว่าถังที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 6.1 แสดงกระบวนการที่สร้างขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งวัตถุประสงค์ในการสร้างกระบวนการนี้ขึ้นมา ก็เพื่อที่จะทำการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 1 และถังที่ 2 โดยจะมีปั้มน้ำทางด้านซ้ายและด้านขวาอย่างละตัว ในที่นี้เรียกปั้มน้ำทางด้านซ้ายว่า ปั้มน้ำที่ 1 และปั้มน้ำทางด้านขวาว่าปั้มน้ำที่ 2 ซึ่งปั้มน้ำที่ 1 นั้นจะทำการจ่ายน้ำเข้าถังที่ 1 และถังที่ 4 ส่วนปั้มน้ำที่ 2 จะทำการจ่ายน้ำเข้าถังที่ 2 และถังที่ 3 ซึ่งจะเป็นการควบคุมกระบวนการแบบ Multi Input Muti Output (MIMO) แต่เนื่องจากว่าติดปัญหาด้านงบประมาณในการซื้อปั้มน้ำอีก 1 ตัว จึงทำให้ไม่สามารถทำการควบคุมกระบวนการตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้แต่แรกได้ จึงทำการเปลี่ยนรูปแบบการควบคุม โดยให้ปั้มน้ำที่ 1 ปั้มน้ำเข้าถังที่ 3 เพียงถังเดียว และทำการควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1 แทน

ในบทนี้จะแบ่งผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ การทดลองของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง การใช้ตัวควบคุมควบคุมกระบวนการที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ และการใช้ตัวควบคุมควบคุมกระบวนการจริง

### 6.1 การทดลองอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

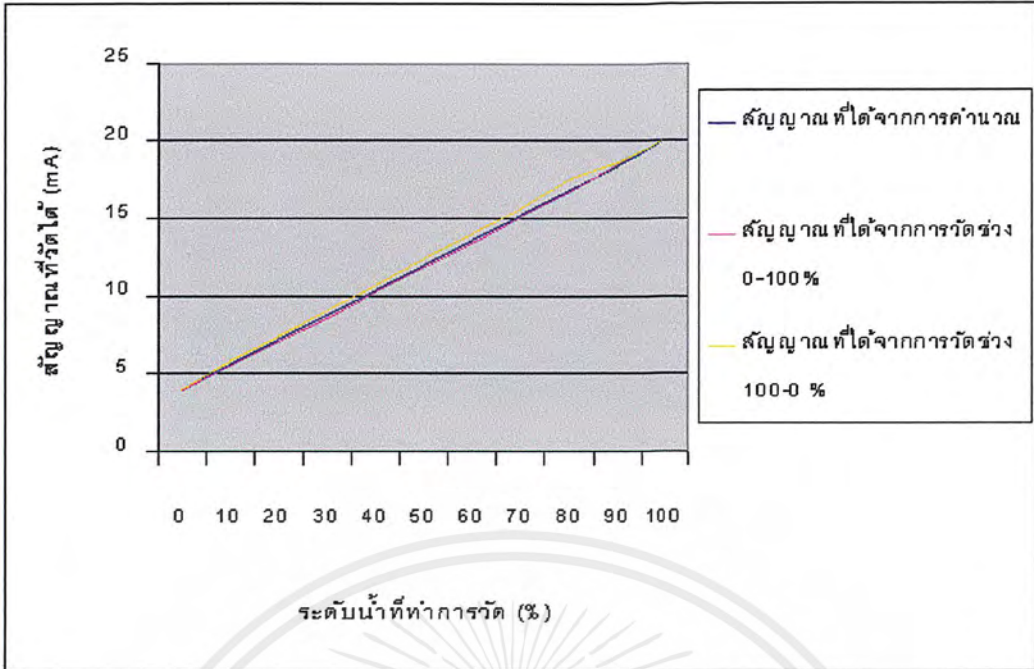
ในส่วนนี้จะแสดงผลการทดลองที่ได้จากอุปกรณ์ 2 ชุดด้วยกันคือ ผลการทดลองที่ได้จากวงจร Pressure Transmitter และวงจร A/D, D/A

#### ผลการทดลองที่ได้จากวงจร Pressure Transmitter

ตารางที่ 6.1 แสดงผลการทดลองที่ได้จากวงจร Pressure Transmitter

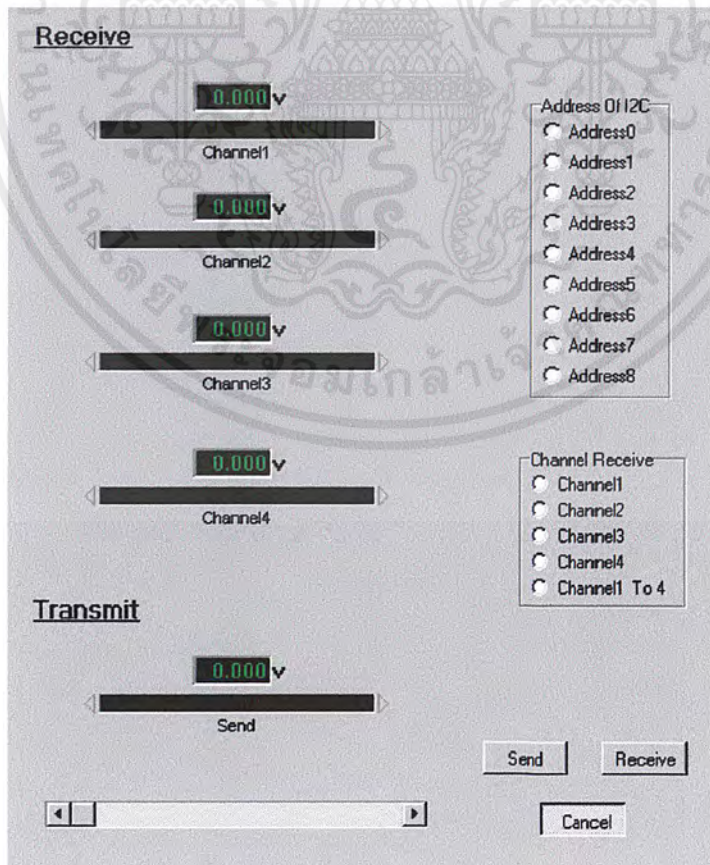
ระดับน้ำที่ทำการวัด(%)	สัญญาณกระแส(mA)		
	ได้จากการคำนวณ	ได้จากการวัดช่วงขาขึ้น 0-100 %	ได้จากการวัดช่วงขาลง 100-0 %
0	4	4	4
10	5.6	5.55	5.73
20	7.2	7.07	7.4
30	8.8	8.6	9.04
40	10.4	10.23	10.72
50	12	11.84	12.41
60	13.6	13.45	14.03
70	15.2	15.13	15.64
80	16.8	16.77	17.72
90	18.4	18.54	18.65
100	20	20	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 กราฟแสดงผลที่ได้จากวงจร Pressure Transmitter

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากวงจร Pressure Transmitter มีความเป็น Linear สูง ซึ่งค่าผิดพลาดสูงสุดที่เกิดจากการวัดมีค่าเพียง 4.46 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับสัญญาณอ้างอิง ผลการทดลองที่ได้จากวงจร A/D, D/A

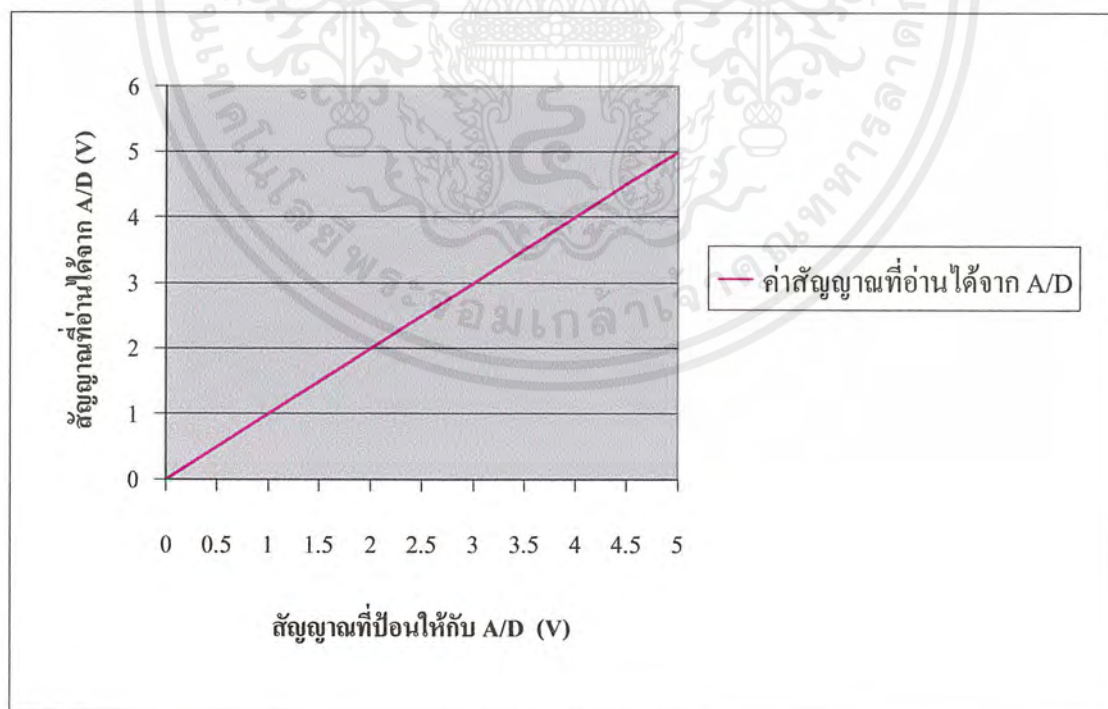


รูปที่ 6.3 แสดงหน้าจอที่ในการทดสอบการรับส่งค่ากับวงจร A/D, D/A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

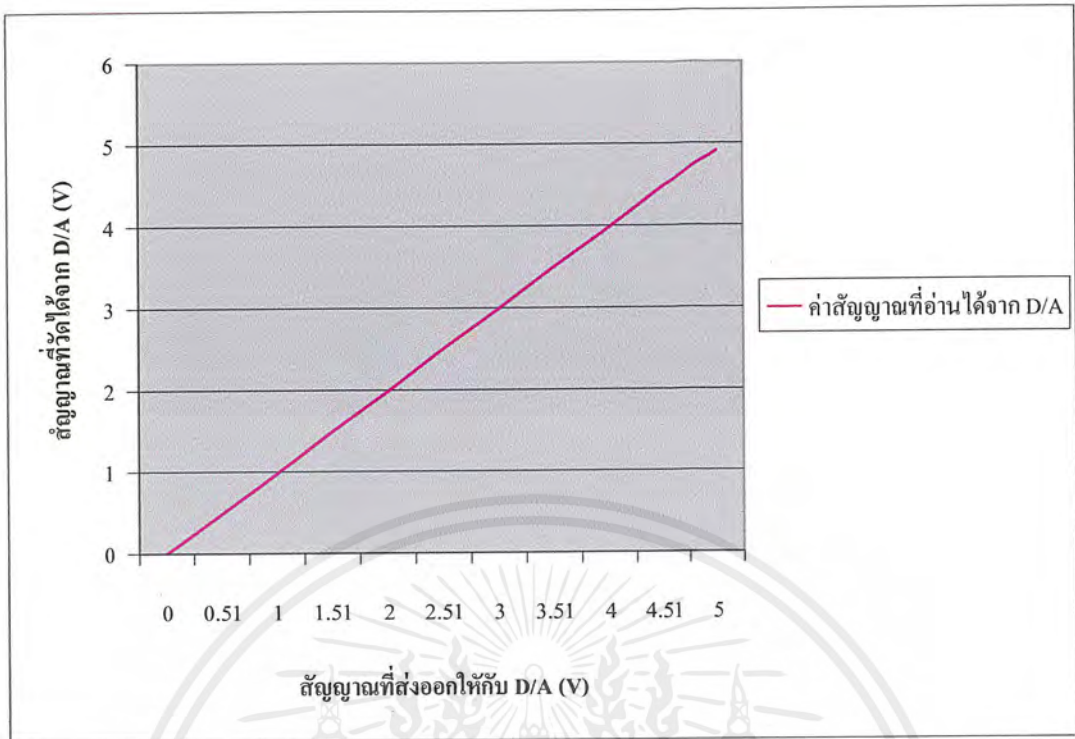
ตารางที่ 6.2 แสดงผลที่ได้จากวงจร A/D, D/A

ผลการทดลองที่ได้จากวงจร A/D		ผลที่การทดลองได้จากวงจร D/A	
สัญญาณอินพุต ที่รับเข้ามา	ค่าที่อ่านได้	สัญญาณเอาต์พุต ที่ส่งออกไป	ค่าที่วัดได้
0	0	0	0
0.5	0.49	0.51	0.49
1	1	1	0.978
1.5	1.49	1.51	1.49
2	2	2	1.983
2.5	2.49	2.51	2.497
3	3	3	2.985
3.5	3.51	3.51	3.49
4	4	4	3.98
4.5	4.51	4.51	4.49
5	5	5	4.92



รูปที่ 6.4 กราฟแสดงผลที่ได้จากวงจร A/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

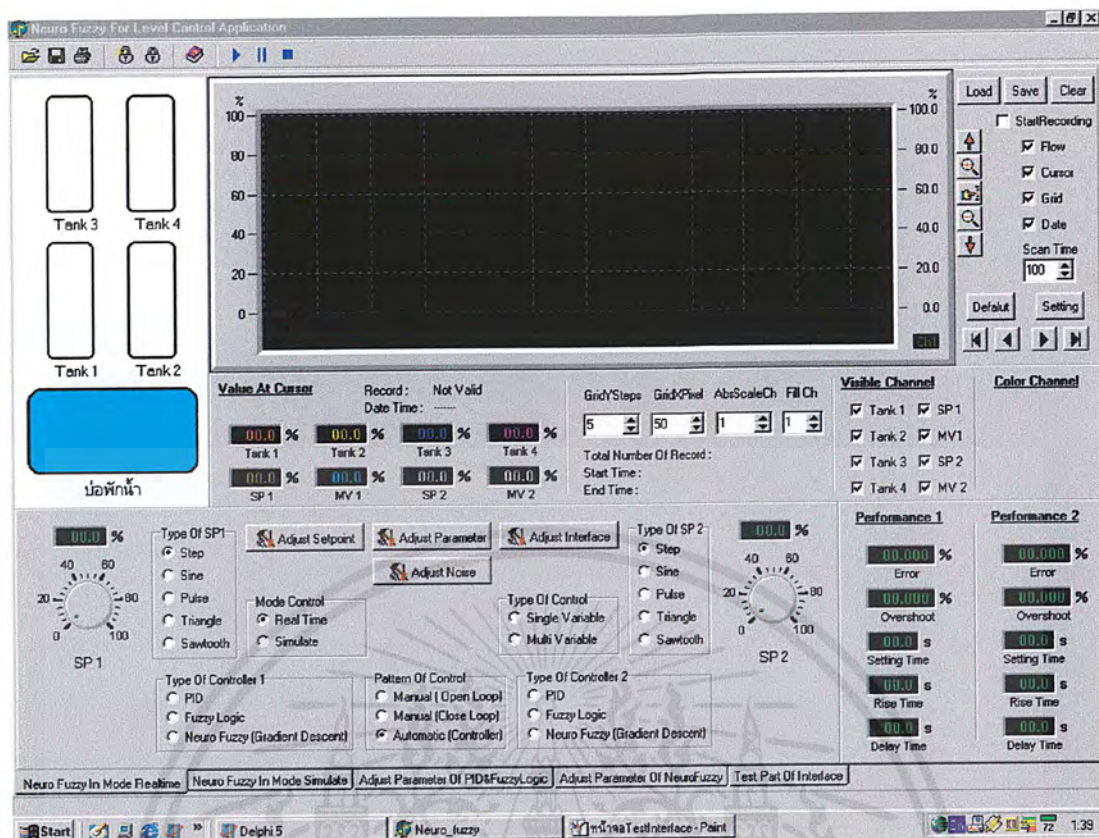


รูปที่ 6.5 กราฟแสดงผลที่ได้จากวงจร D/A

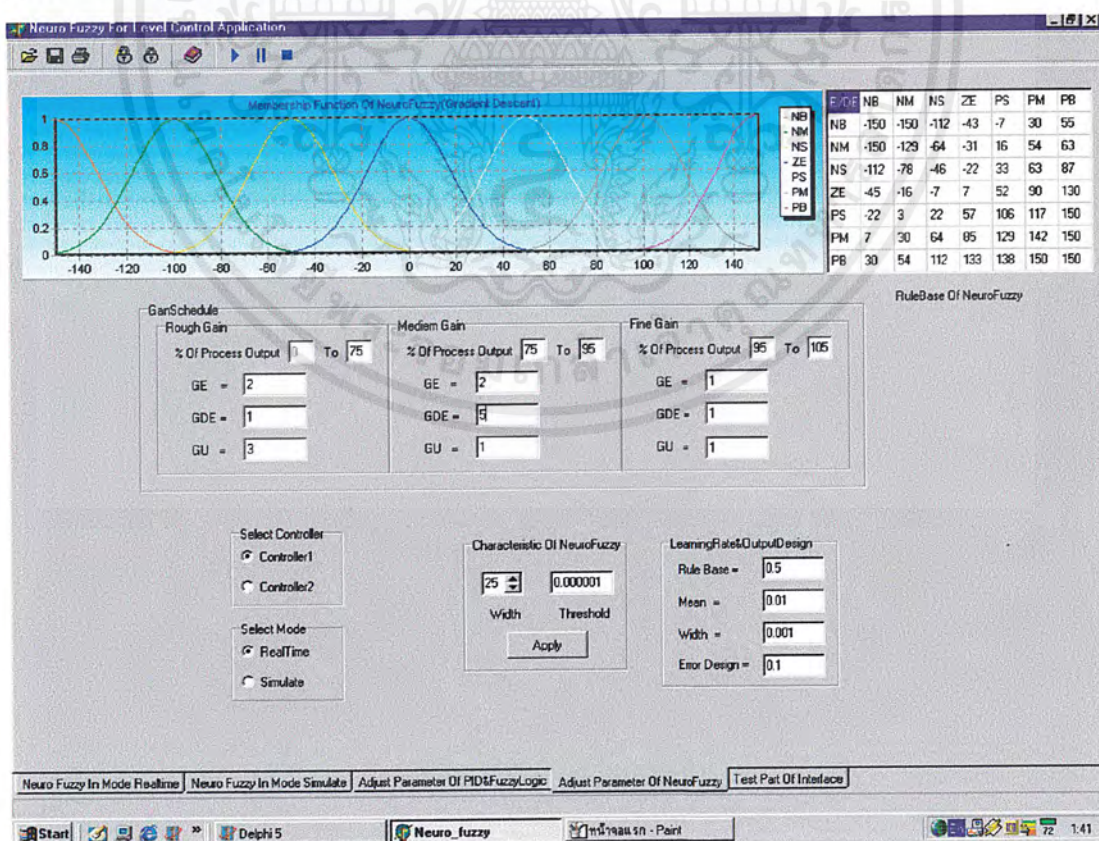
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ผลที่ได้จากวงจร A/D, D/A มีความเป็น Linear สูงมากค่าผิดพลาดสูงสุดที่ได้จากวงจร A/D มีค่าเท่ากับ 2% และค่าผิดพลาดสูงสุดที่ได้จากวงจร D/A มีค่าเท่ากับ 3.92% เมื่อเทียบกับสัญญาณอ้างอิง

## 6.2 การใช้ตัวควบคุมควบคุมกระบวนการที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์

การใช้ตัวควบคุม ควบคุมกระบวนการที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ก็เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานของตัวควบคุมก่อนที่จะนำไปใช้ควบคุมกระบวนการจริง โดยหน้าจอที่ใช้ในการควบคุมกับหน้าจอที่ใช้ในการปรับแต่งพารามิเตอร์ต่างๆของตัวควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.5 และรูปที่ 6.6 ตามลำดับ



รูปที่ 6.6 แสดงหน้าจอหลักที่ใช้ในการควบคุม



รูปที่ 6.7 แสดงหน้าจอที่ใช้ปรับแต่งพารามิเตอร์ต่างๆของตัวควบคุม

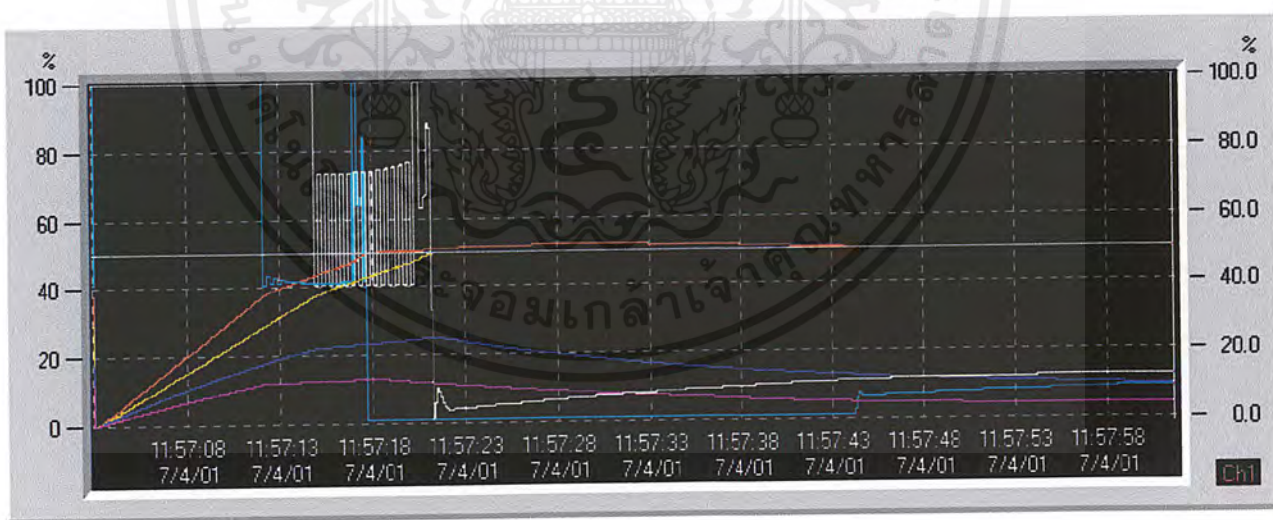
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกระบวนการที่จะทำการจำลองการควบคุมนี้จะเป็นกระบวนการแบบ 4 ถึง ทำการควบคุมระดับน้ำที่ถังที่ 1 และถังที่ 2 ด้วยวัตถุประสงค์ที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการสามารถแสดงได้ดังนี้

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{2.6}{(1+625)s} & \frac{1.5}{(1+235)s(1+625)s} \\ \frac{\gamma}{(1+305)s(1+905)s} & \frac{2.8}{(1+905)s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

โดยที่  $u_1$  และ  $u_2$  เป็นสัญญาณควบคุมที่จ่ายให้กับปั้มน้ำ

ผลการทดลองที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.7 และ รูปที่ 6.8 โดยรูปที่ 6.7 จะทำการตั้งค่าเป้าหมายถังที่ 1 และค่าเป้าหมายถังที่ 2 อยู่ที่ 50% ส่วนรูปที่ 6.8 จะทำการตั้งค่าเป้าหมายถังที่ 1 ไว้ที่ 80% และค่าเป้าหมายถังที่ 2 ไว้ที่ 50% โดยเส้นสีน้ำตาลแทนค่าเป้าหมายของถังที่ 1 เส้นสีเทาแทนค่าเป้าหมายของถังที่ 2 เส้นสีแดงแทนค่าระดับน้ำในถังที่ 1 เส้นสีเหลืองแทนระดับน้ำในถังที่ 2 เส้นสีน้ำเงินแทนระดับน้ำในถังที่ 3 เส้นสีม่วงแทนระดับน้ำในถังที่ 4 เส้นสีฟ้าแทนสัญญาณควบคุมที่จ่ายให้ปั้มน้ำตัวที่ 1 และเส้นสีเขียวแทนสัญญาณควบคุมที่จ่ายให้ปั้มน้ำตัวที่ 2

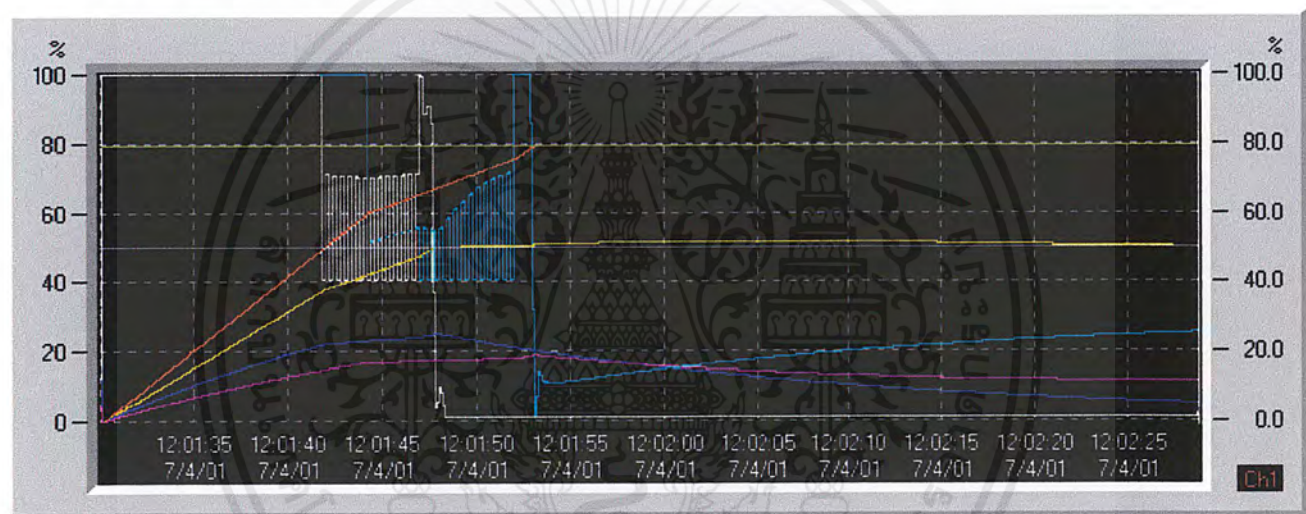


รูปที่ 6.8 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50% ในถังที่ 1 และถังที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Performance 1	Performance 2
-00.095 % Error	00.039 % Error
02.095 % Overshoot	00.187 % Overshoot
13.9 s Setting Time	17.2 s Setting Time
11.3 s Rise Time	14.1 s Rise Time
05.0 s Delay Time	05.5 s Delay Time

รูปที่ 6.9 แสดงสมรรถนะของระบบควบคุมกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50% ในถังที่ 1 และถังที่ 2



รูปที่ 6.10 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมในการควบคุมกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 80% ในถังที่ 1 และ 50% ในถังที่ 2

Performance 1	Performance 2
00.142 % Error	-00.207 % Error
00.034 % Overshoot	02.156 % Overshoot
21.9 s Setting Time	16.9 s Setting Time
18.0 s Rise Time	13.9 s Rise Time
07.9 s Delay Time	05.3 s Delay Time

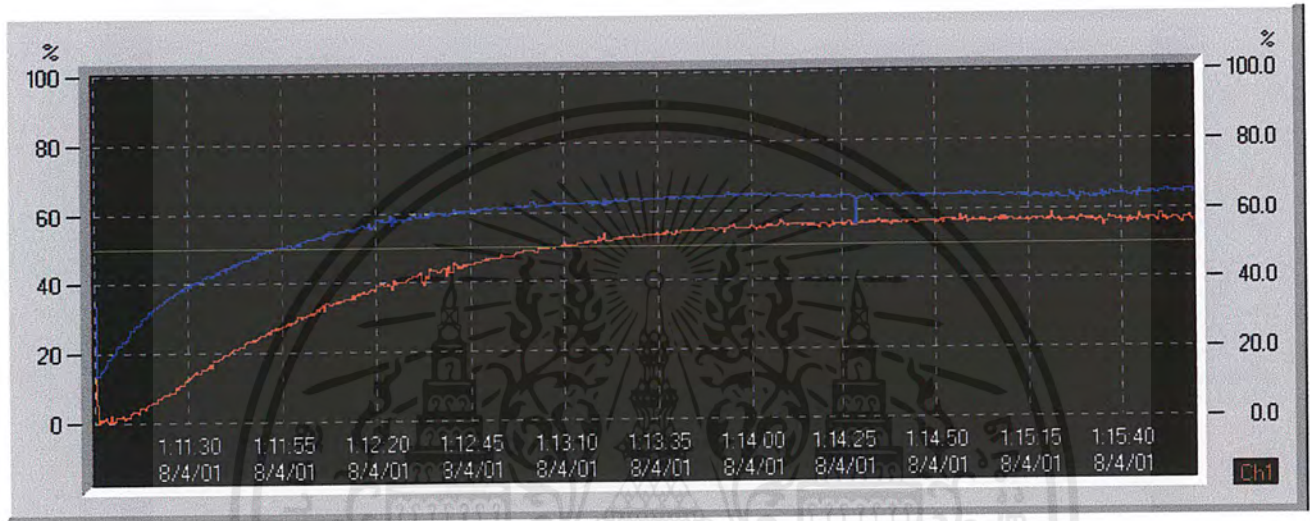
รูปที่ 6.11 แสดงสมรรถนะของระบบควบคุมในการควบคุมกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 80% ในถังที่ 1 และ 50% ในถังที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

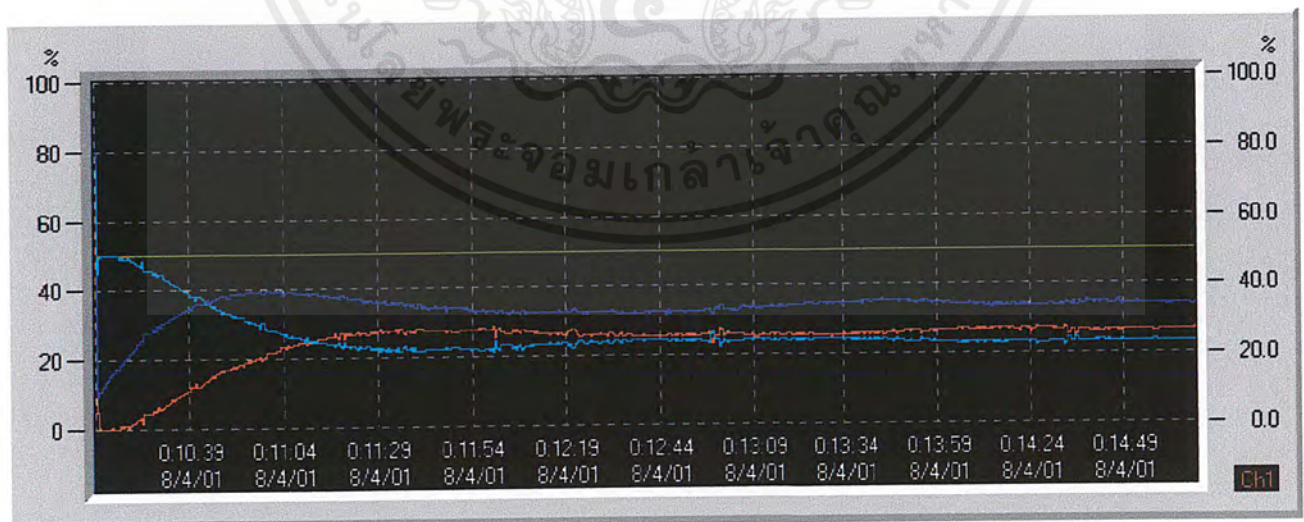
### 6.3 การใช้ตัวควบคุมควบคุมกระบวนการจริงที่สร้างขึ้น

ในการควบคุมกระบวนการจริงนี้จะทำการควบคุมกระบวนการตั้งที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นคือ ป้อนน้ำจะทำการจ่ายน้ำเข้าถังที่ 3 แล้วน้ำจากถังที่ 3 จะถูกจ่ายเข้าถังที่ 1 โดยการควบคุมระดับน้ำนั้นจะทำการควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1

ซึ่งในการทดลองนั้นจะทำการตั้งค่าเป้าหมายไว้ที่ 50% และ 75% โดยเส้นสีน้ำตาลแทนค่าเป้าหมายของถังที่ 1 เส้นสีแดงแทนระดับน้ำในถังที่ 1 เส้นสีน้ำเงินแทนระดับน้ำในถังที่ 3

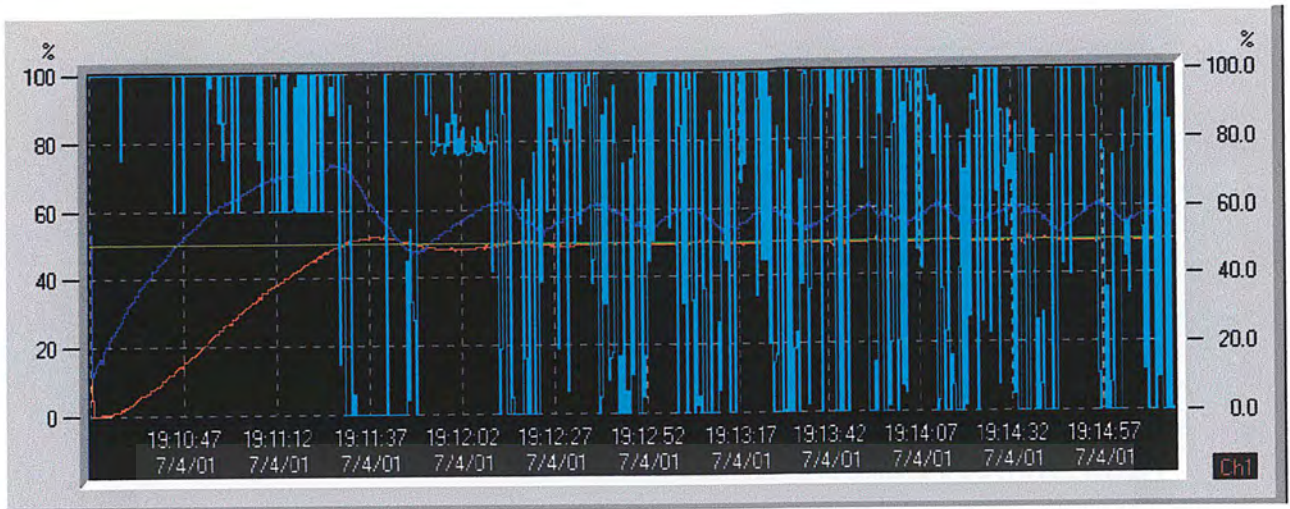


รูปที่ 6.12 แสดงผลตอบสนองระบบเปิดของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50%

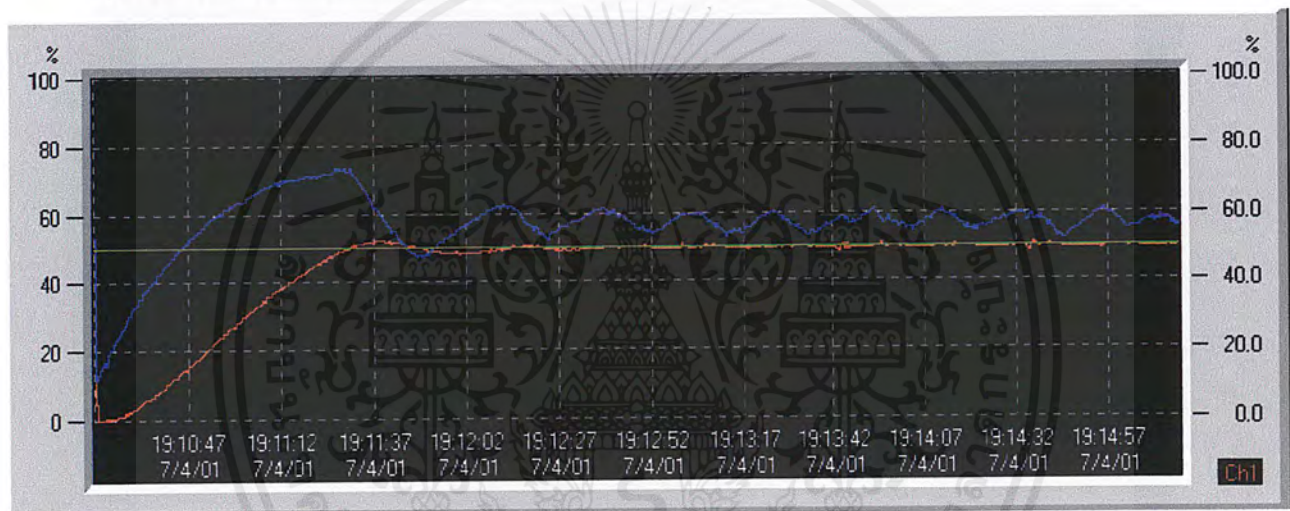


รูปที่ 6.13 แสดงผลตอบสนองระบบปิดของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.14 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50%

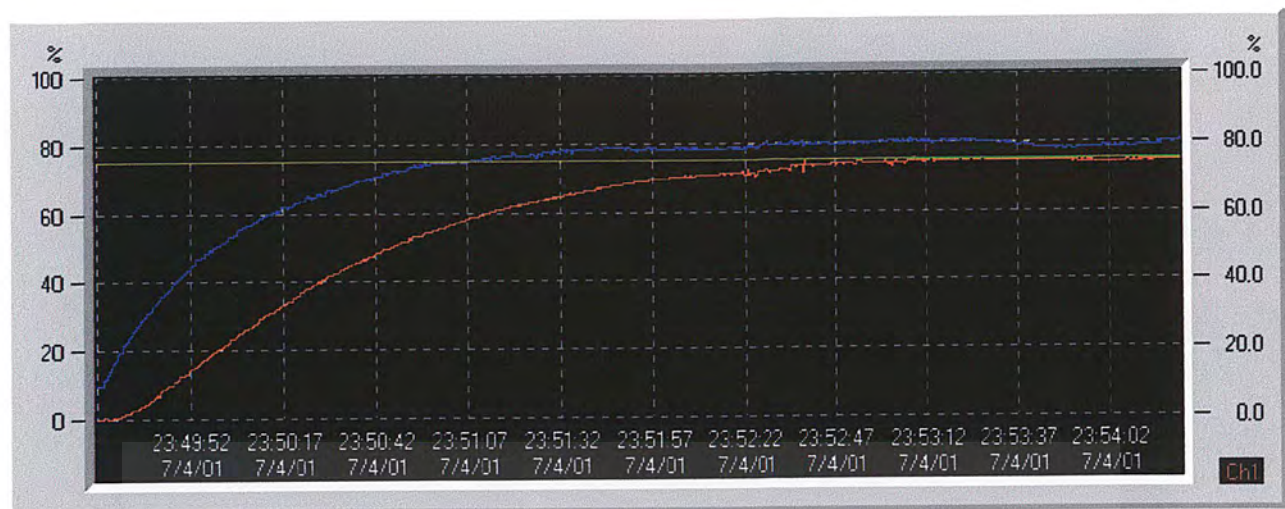


รูปที่ 6.15 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50% (ไม่แสดงสัญญาณควบคุม)

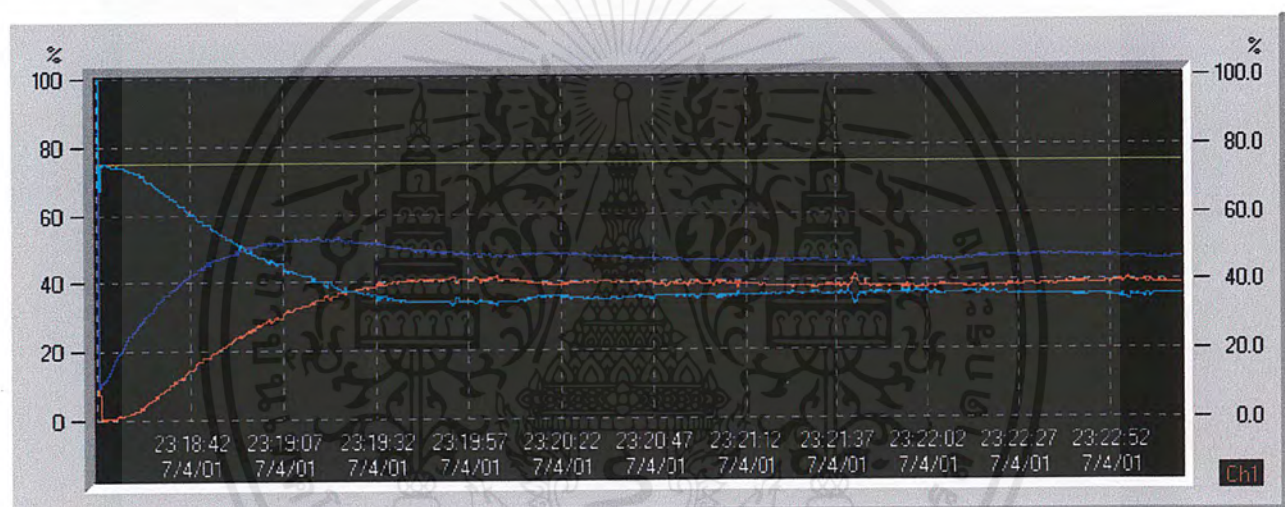
Performance 1	
00.627 %	Error
02.353 %	Overshoot
62.5 s	Settling Time
47.0 s	Rise Time
14.5 s	Delay Time

รูปที่ 6.16 แสดงสมรรถนะของระบบควบคุมในการควบคุมกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50%

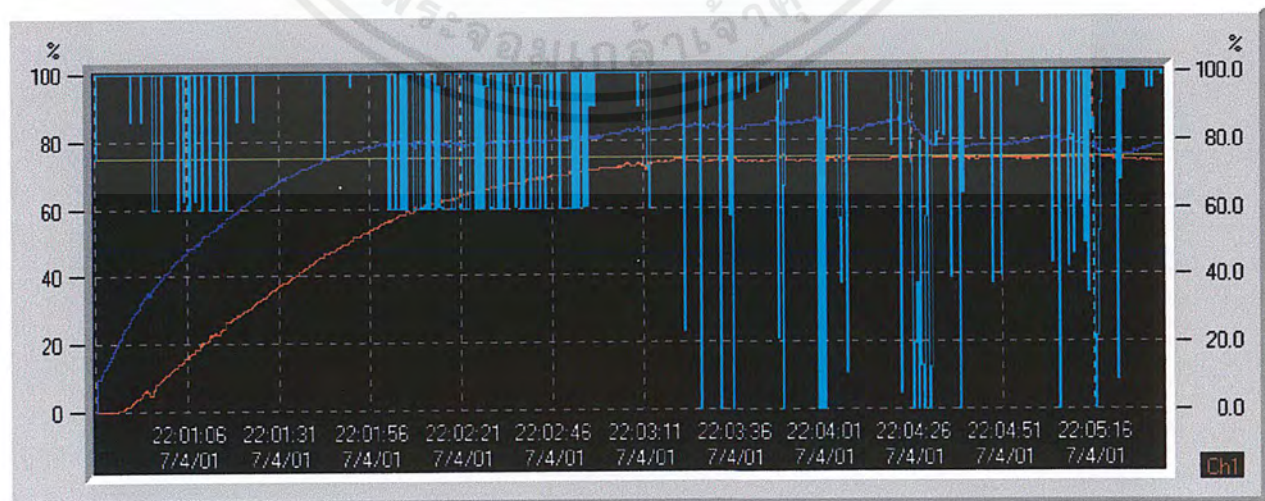
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.17 แสดงผลตอบสนองของระบบเปิดของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 75%

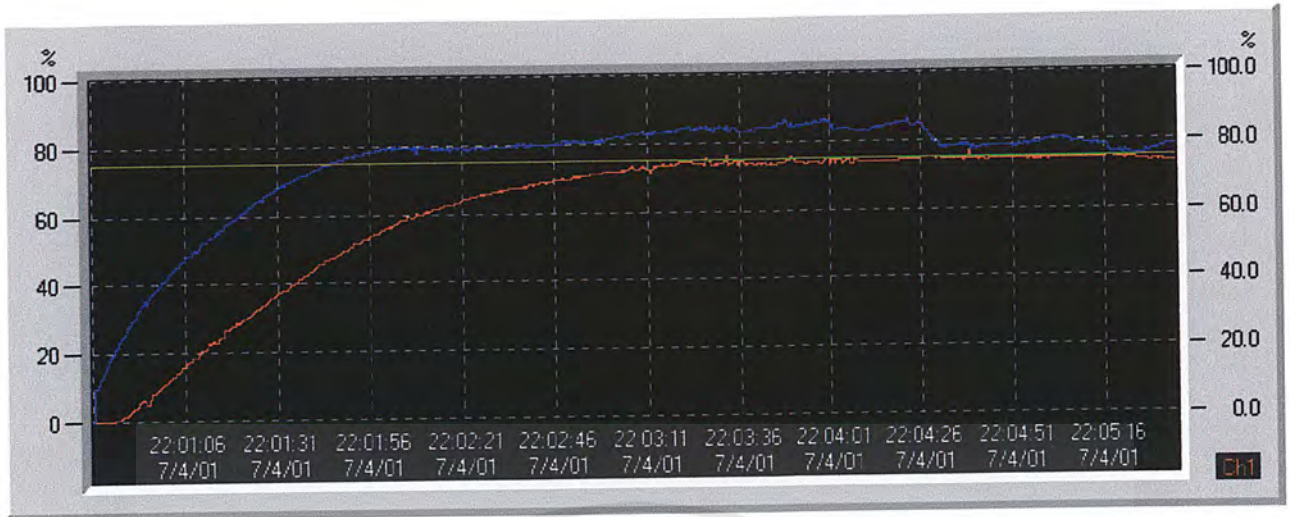


รูปที่ 6.18 แสดงผลตอบสนองของระบบปิดของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 75%

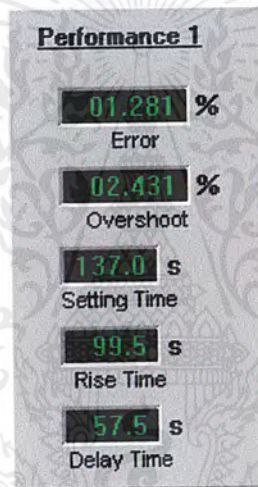


รูปที่ 6.19 แสดงผลตอบสนองของของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 75%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.20 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 75% (ไม่แสดงสัญญาณควบคุม)



รูปที่ 6.21 แสดงสมรรถนะของระบบควบคุมในการควบคุมกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 75%

### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการใช้ตัวควบคุมควบคุมกระบวนการที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์นั้น แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบนิวโรฟัซซีที่ออกแบบนั้นสามารถควบคุมระบบได้ดี ค่าเอาต์พุตของระบบสามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว ค่าโอเวอร์ชูตที่ได้ต่ำกว่า 5% ไม่เกิดค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวและไม่เกิดการแกว่งของค่าเอาต์พุตรอบค่าเป้าหมายส่วนการทดลองการใช้ตัวควบคุมกระบวนการจริงที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นมานั้น ตัวควบคุมแบบนิวโรฟัซซีที่ออกแบบก็สามารถควบคุมระบบได้ดีเช่นกัน ค่าเอาต์พุตของระบบสามารถเข้าสู่เป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว ค่าโอเวอร์ชูตที่ได้ต่ำกว่า 5% เกิดค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวและเกิดการแกว่งของค่าเอาต์พุตรอบค่าเป้าหมายบ้างไม่มากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

# สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

### สรุป

ปริญญาณิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบนิเวศพีชชีโดยใช้วิธีการแบบ Gradient Descent ในการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีชชี และใช้ Gain Schedule ในการปรับแต่งค่าเกน ในช่วงต่างๆตามที่ได้ออกแบบไว้ เอทำการควบคุมกระบวนการ โดยที่ไม่ต้องรู้ฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบ ซึ่งในการทดลองจะทำการทดลองควบคุมกระบวนการที่จะลงด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อดูความถูกต้องในการทำงานของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบและการควบคุมกระบวนการจริงที่ได้ทำการสร้างขึ้น

จากผลการทดลองการควบคุมกระบวนการที่จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ และการควบคุมกระบวนการจริงที่ได้ทำการสร้างขึ้นมาจะเห็นได้ว่า ผลการทดลองที่ได้นั้นเป็นที่น่าพอใจ แม้ว่าในการควบคุมกระบวนการจริงจะเกิดการแขวงของสัญญาณเอาท์พุท รอบค่าเป้าหมายแต่ไม่มากเกินไปนัก อยู่ที่ช่วงยอมรับได้ ดังนั้นตัวควบคุมที่ได้ทำการออกแบบนั้นสามารถนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการได้จริง

### ข้อเสนอแนะ

ตัวควบคุมนิเวศพีชชีที่ออกแบบนั้นยังต้องอาศัยการลองผิดลองถูกเพื่อปรับพารามิเตอร์หลายๆตัวอยู่ ไม่ว่าจะเป็นอัตราการเรียนรู้และค่าเกนในช่วงต่างๆ ซึ่งการปรับแต่งพารามิเตอร์ต่างๆเหล่านี้ต้องใช้เวลานานและยังขึ้นกับระบบที่จะทำการควบคุมด้วย แนวทางการพัฒนาคือควรพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของพีชชีลอจิกการปรับแต่งพารามิเตอร์และค่าเกนให้สามารถปรับแต่งพารามิเตอร์ทุกตัวของตัวควบคุมได้ในขณะที่ทำการควบคุม โดยที่ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวของตัวควบคุมที่ต้องการปรับแต่งกับค่าสมรรถนะของระบบควบคุมเพื่อนำมาใช้เป็นค่าดัชนีในการปรับแต่ง นอกจากนี้ในการทดลองยังมีได้ทดลองกับกระบวนการที่มีเวลาไร้ผลตอบสนองและความคงทนต่อสัญญาณภายนอกซึ่งเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจในการออกแบบสำหรับกระบวนการต่อไป

## บรรณานุกรม

- [1] ธิดาพร พิทักษ์พรพันธุ์ , ตัวควบคุมฟัซซี่แบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง . วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง . 2539
- [2] จักรพงษ์ เกาเทียน , การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี่ในการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม . วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง . 2543
- [3] ปิยะมาศ คำไทรแก้ว, ศรีรัตน์ พิทักษ์วัชรระ , ดาต้าไมนิ่ง.ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง . 2541
- [4] กรรณิการ์ เมฆศิขริน, สุนทรี รัชยาบัณฑิต , เหมืองข้อมูล.ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร บัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง . 2541
- [5] L.X. Wang , **Aduptive Fuzzy Systems and Control** , International Edition . New Jersey : Prentice-Hall , Int . 1994
- [6] C.T. Lin, C.S.G. Lee , **Neural Fuzzy Systems** , International Edition .New Jersey :Prentice-Hall , Int . 1996
- [7] J.S.R Jang, C.T. Sun and E. Mizutani , **Neuro-Fuzzy and Computing** , Internationnal Edition . New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 1997
- [8] L.X. Wang , **A Course in Fuzzy Systems and Control** , International Edition .New Jersey :Prentice Hall , Inc. 1997
- [9] M. Brown, C. Harris , **Neurofuzzy Adaptive Modelling and Control** ,International Edition . New Jersey :Prentice Hall , Inc. 1994