

ชุดทดลองการควบคุมระดับน้ำในถังทรงกระบอกแนวนอนโดยใช้
ไมโครคอนโทรลเลอร์

THE QUADRUPLE HORIZONTAL TANK LEVEL PROCESS
CONTROL LABORATORY BY MICROCONTROLLER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
.....
.....
.....

**THE QUADRUPLE HORIZONTAL TANK LEVEL PROCESS
CONTROL LABORATORY BY MICROCONTROLLER**



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

2003


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท ชดทลดองการควบคุมระดับน้ำในถังทรงกระบอกแนวนอนโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

THE QUADRUPLE HORIZONTAL TANK LEVEL PROCESS CONTROL LABORATORY BY MICROCONTROLLER

นักศึกษาผู้จัดทำ นายณรงค์เดช เพ็ชรโต รหัสประจำตัว 44015468
นายพนัส เพ็งกลิ่น รหัสประจำตัว 44015476
นายอัสวเทพ ชันโบราณ รหัสประจำตัว 44015501
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2546

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท	ลายมือชื่อ
รศ.วิริยะ กองรัตน์	
อ.อาจินต์ น่วมสำราญ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 23 มีนาคม พ.ศ. 2547
สถานที่สอบ ณ ห้องสอบปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชารับรองแล้ว



(รศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	ชุดทดลองการควบคุมระดับน้ำในถังทรงกระบอกแนวนอนโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์
	THE QUADURPLE HORIZONTAL TANK LEVEL PROCESS CONTROL LABORATORY BY MICROCONTROLLER
นักศึกษาคณะผู้จัดทำ	นายณรงค์เดช เพ็ชรโต นายพนัส เพียงลิ้ม นายอัสวเทพ ชันโบราณ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.วิริยะ กองรัตน์ อ.อาจินต์ น่วมสำราญ
ปีการศึกษา	2546

บทคัดย่อ

กระบวนการผลิตของระบบอุตสาหกรรมภายในประเทศในปัจจุบันนี้ โดยส่วนใหญ่จะมีการควบคุมในลักษณะอัตโนมัติ กล่าวคือ ในการควบคุมกระบวนการผลิตต่างๆ จะใช้เครื่องควบคุม (Controller) ควบคุมกระบวนการแทนมนุษย์ซึ่งจะทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพมากขึ้น ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ เราได้นำเสนอการออกแบบชุดทดลองการควบคุมระดับน้ำแบบหลายถังซึ่งประกอบไปด้วยการออกแบบตัวควบคุม (Controller) การออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) การออกแบบชุดแปลงสัญญาณ (Data Converter) โดยใช้ Differential Pressure Transmitter การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมขั้นสุดท้าย (Final Control Element) การออกแบบชุดปรับแต่งสัญญาณ (Signal Condition) และการออกแบบ Plant ที่สามารถใช้ทดลองได้ทั้งแบบ First Order และ Second Order

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title The Quadruple Horizontal Tank Level Process Control Laboratory
By Microcontroller

Authors Mr. Narongdesh Phetto
Mr. Panus Pienglim
Mr. Aussawathep Khunboran

Thesis Advisor Assoc.Prof. Viriya Kongratana
Mr. Arjin Numsomran

Year 2003

ABSTRACT

In the process production of industrial in Thailand. The most industrial used automation control to say that in process production control used controller instead of a human that will be have efficiency very much. This thesis presentation design of multi tank level process control composed controller, data converter, sensor on principle of differential pressure transmitter, final control element, signal condition and plant design. That can tested both first order and second order.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความเมตตาจาก รองศาสตราจารย์ วิริยะ กองรัตน์ และ อาจารย์อจินต์ น่วมสำราญ ที่ได้ให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมา อีกทั้งยังเอื้อเพื่อ อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ตลอดจนสถานที่ในการทำการทดลอง ในการทำปริญญาบัตรนี้ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่านที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้การทดลองและทุกๆ ความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกคนที่ช่วยกันทำงานกันอย่างขยันขันแข็ง ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้คำปรึกษาดีๆ และอยู่ทำงานเป็นเพื่อนกันจนศึก ขอขอบคุณพี่เอ้ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาที่ดีมาโดยตลอด

และที่ลืมเสียไม่ได้คือขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ พี่ ๆ และน้องทุกคนอันเป็นที่รักอย่างยิ่ง ที่คอยให้กำลังใจยามอ่อนล้าและให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ตลอดจนเพื่อน ๆ ที่มาช่วยกันทำงาน คอยให้คำปรึกษาตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาบัตรฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับฟัซซี่.....	3
2.1 ฟัซซี่เซต (Fuzzy Set).....	3
2.2 ฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic).....	9
2.3 ตัวควบคุมฟัซซี่.....	30
2.4 การวิเคราะห์ระบบควบคุมฟัซซี่.....	32
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ.....	35
3.1 กล่าวนำ.....	35
3.2 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่.....	35
3.2.1 การกำหนดจำนวนตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม.....	36
3.2.2 การนอมอลไลซ์ตัวแปรอินพุตให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด.....	36
3.2.3 การคืนนอมอลไลซ์ตัวแปรเอาต์พุตให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด.....	37
3.2.4 การกำหนดค่าเกณฑ์ของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IV และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.5. การเลือกวิธีและระดับการควอนไทซ์.....	38
3.2.6. การเลือกวิธีการพีชชีพีเคชัน	38
3.2.7. การกำหนดจำนวนพีชชีเซตของตัวแปรอินพุต.....	39
3.2.8. การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต.....	40
3.2.9. การกำหนดจำนวนพีชชีเซตของตัวแปรเอาต์พุตบนเอกภพสัมพัทธ์.....	41
3.2.10. การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุต.....	41
3.2.11. การกำหนดรูปแบบของกฎการควบคุม.....	41
3.2.12. การเลือกวิธีการอินเฟอร์เรนซ์.....	42
3.2.13. การเลือกวิธีการดีพีชชีพีเคชัน.....	43
3.3 ทฤษฎี Signal Condition.....	44
3.3.1 วงจร Zero.....	44
3.3.2 Voltage to Current Circuit.....	47
3.3.3 Current to Voltage Circuit.....	47
3.4 ลักษณะรูปแบบของกระบวนการ.....	48
3.4.1 แบบจำลองของกระบวนการ.....	49
3.4.2 กระบวนการอันดับหนึ่ง.....	50
3.4.3 กระบวนการอันดับสอง.....	50
3.4.4 กระบวนการที่มีหลายตัวแปรอินพุตหลายตัวแปรเอาต์พุต.....	51
3.4.2 สรุปรูปแบบของกระบวนการ.....	51
บทที่ 4 การออกแบบและการสร้างเครื่องควบคุมระดับน้ำในถังทรงกระบอกแนวนอนโดยใช้	
ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	49
4.1 กล่าวนำ.....	49
4.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ADuC812	49
4.2.1 คุณสมบัติ	49
4.2.2 ลักษณะทั่วไป.....	50
4.2.3 รายละเอียดของ ADC.....	52
4.2.4 รายละเอียดของ DAC.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์.....	53
4.3.1 การออกแบบไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก.....	53
4.3.2 การออกแบบและสร้างวงจรในการปรับระดับและตั้งค่า Setpoint Variable จากชุดไมโครคอนโทรลเลอร์.....	54
4.3.3 การออกแบบและสร้างวงจรในการรับค่า Process variable และปรับระดับสัญญาณเพื่อเข้าสู่ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์.....	55
4.3.4 SENSOR และ TRANSMITTER.....	55
4.3.5 คุณสมบัติของ Differential Pressure Transmitter เบอร์ MPX2010DP....	56
4.3.6 FINAL CONTROL ELEMENT.....	57
4.3.7 ชุดภาคจ่ายไฟ.....	58
4.4 การออกแบบและสร้าง Plant ทดลอง.....	58
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	63
5.1 การทดลองอุปกรณ์ที่ใช้ในชุดทดลอง.....	63
5.1.1 วงจร Pressure Transmitter.....	63
5.1.2 วงจรแปลงสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA เป็นแรงดัน 0-5 V	64
5.1.3 วงจรขับมอเตอร์.....	65
5.2 การทดลองการนำตัวควบคุมไปควบคุมกระบวนการจริง.....	66
5.2.1 การควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่ง.....	69
5.2.2 การควบคุมกระบวนการอันดับสอง.....	70
5.2.3 การควบคุมกระบวนการแบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต.....	71
5.3 สรุปผลการทดลอง.....	72
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ.....	73
บรรณานุกรม.....	74
ภาคผนวก.....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าความจริงของประพจน์ในการปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์บูลีน.....	13
2.2 แสดงตารางความจริงสำหรับตัวปฏิบัติการพีชคณิตลอจิกตามนิยามของ Zadeh.....	15
2.3 แสดงตารางความจริงสำหรับตัวปฏิบัติการพีชคณิตลอจิก ตามนิยามของ Baldwin.....	17
2.4 แสดงผลของการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลโดยใช้ GMP ด้วยหลักการของFukami ...	19
2.5 แสดงผลของการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลโดยใช้ GMT ด้วยหลักการของ Fukami.....	19
5.1 แสดงผลการทดลองวงจร Pressure Transmitter.....	66
5.2 แสดงผลการทดลองวงจรแปลงสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA เป็นแรงดัน 0-5 V.....	67
5.3 แสดงผลการทดลองวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์.....	68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลิงกวิสติก “Probability”.....	9
2.2 แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเทอม “true” และ “false” ตามนิยามของ Zadeh.....	10
2.3 แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลิงกวิสติก “Truth” ตามนิยามของ Baldwin.....	11
2.4 แสดงการคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟัซซี่.....	22
2.5 แสดงการหาข้อสรุปจากหลักฐาน โดยใช้เงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล.....	24
2.6 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซี่.....	30
3.1 แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซี่.....	35
3.2 แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซตของตัวแปรอินพุต e และ Δe	41
3.3 แสดงสมการเส้นตรงที่ใช้คำนวณ.....	44
3.4 แสดงวงจรเปลี่ยนระดับแรงดัน.....	45
3.5 แสดงวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส.....	47
3.6 แสดงการต่อวงจรแปลงกระแสเป็นแรงดันโดยใช้ IC RCV420.....	48
3.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	49
3.8 แสดงอุปกรณ์ที่ประกอบอยู่ในกระบวนการจำลองและไดอะแกรมของกระบวนการ.....	49
3.9 แสดงรูปแบบของกระบวนการอันดับหนึ่ง.....	50
3.10 แสดงกระบวนการจำลองอันดับสอง.....	50
3.11 แสดงกระบวนการแบบ 4 ถัง (Quadruple Tank Process).....	51
4.1 แสดงไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ร่วมกับบอร์ดทดลอง.....	53
4.2 แสดงโครงสร้างการทำงานภายใน.....	54
4.3 แสดงโครงสร้างภายนอก.....	54
4.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม.....	56
4.5 แสดงการต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับวงจรภายนอก.....	57
4.6 แสดงการต่อวงจรชุดปรับระดับสัญญาณและส่งกระแส.....	57
4.7 แสดงการต่อวงจรชุดขับมอเตอร์.....	58
4.8 แสดงชุด Sensor และ Transmitter.....	58
4.9 แสดง Differential Pressure Transmitter เบอร์ MPX2010DP.....	59
4.10 แสดงวงจรชุด Signal condition and transmitt.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.11 แสดงวงจรชุดขับมอเตอร์.....	60
4.12 แสดงวงจรชุดจ่ายไฟ บวก-ลบ 15 โวลท์.....	61
4.13 แสดงถึงน้ำทรงกระบอกแนวนอนที่สร้างขึ้นพร้อมกับสเกลบอกระดับ.....	61
4.14 แสดงชุดทดลองที่ประกอบสมบูรณ์ (ด้านหน้า).....	61
4.15 แสดงการต่อวงจรทางด้านหลังของชุดทดลอง.....	59
5.1 แสดงการอ่านค่า PV ในรูปของกราฟ.....	66
5.2 แสดงการแกว่งของค่า PV.....	66
5.3 แสดงผลการทดลองหลังจากทำการแก้ไขเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนแล้ว.....	67
5.4 แสดงการปรับ SPAN-ZERO.....	67
5.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเอาท์พุท.....	68
5.6 แสดงการทดลองการควบคุมระดับน้ำแบบระบบเปิด.....	68
5.7 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่ง.....	69
5.8 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการควบคุมกระบวนการอันดับสอง.....	70
5.9 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการควบคุมกระบวนการแบบ MIMO.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและเหตุผลใจของการวิจัย

กระบวนการผลิตของระบบอุตสาหกรรมในปัจจุบันนั้น โดยส่วนใหญ่มักจะมีลักษณะการควบคุมแบบอัตโนมัติ กล่าวคือ ในการควบคุมกระบวนการผลิตหรือกระบวนการอื่น ๆ จะใช้เครื่องควบคุม (Controller) ควบคุมกระบวนการนั้น ๆ แทนมนุษย์ เนื่องจากเหตุผลบางประการ เช่น ในงานบางประเภทอาจมีความเสี่ยงที่จะเกิดอันตรายแก่ผู้ปฏิบัติงานสูงและไม่สามารถใช้คนเข้าไปปฏิบัติงานโดยตรงได้ การปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงานบางครั้งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดหรือความไม่แน่นอนในการปฏิบัติงานแต่ละครั้ง ดังนั้นเราจึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำเอาระบบควบคุมแบบอัตโนมัติเข้ามาใช้ในการควบคุมกระบวนการ และในการสร้างระบบควบคุมจะต้องมีการศึกษาส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องควบคุมที่ใช้ก่อน โดยที่เครื่องควบคุมแบบอัตโนมัติหรือระบบควบคุมแบบอัตโนมัติมีส่วนประกอบหลักอยู่ 4 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ 1.ตัวควบคุม (Controller) 2.กระบวนการ (Process) 3.อุปกรณ์ควบคุมขั้นสุดท้าย (Final Control Element) และ 4.อุปกรณ์ตรวจวัด (Measuring Instruments)

ชุดทดลองการควบคุมระดับในถังทรงกระบอกแนวนอน โดยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ จึงถูกสร้างขึ้นมา เพื่อเป็นกระบวนการตัวอย่างที่จะทำการศึกษาและเรียนรู้การควบคุมกระบวนการที่เป็นกระบวนการควบคุมแบบอัตโนมัติ และยังเป็นสื่อการเรียนการสอนที่จะทำให้เข้าใจเกี่ยวกับการควบคุมเบื้องต้นไม่ว่าจะเป็นระบบ First order , Second order หรือระบบอื่นๆ ตามที่เราต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์ของปริิณญาณิพนธ์

ปริิณญาณิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาและออกแบบสร้างชุดทดลองการควบคุมระดับน้ำในถังทรงกระบอกแนวนอน โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งมีการควบคุมกระบวนการ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีซซี เพื่อที่จะควบคุมกระบวนการให้มีความแม่นยำเที่ยงตรงและเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างเร็วเมื่อใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งมีขนาดเล็ก จึงทำให้มีความสะดวกรวดเร็วและง่ายต่อการศึกษาระบวนการควบคุมมากยิ่งขึ้น จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสื่อในการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมกระบวนการ

1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

ปริญญาโทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาการออกแบบ และสร้างชุดทดลองเพื่อนำมาสร้างชุดควบคุมกระบวนการที่สร้างขึ้นและสามารถควบคุมกระบวนการที่สร้างขึ้น โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีซี ซึ่งมีขั้นตอนการควบคุมหลายแบบทั้ง First order Second order ตลอดจนการควบคุมแบบมัลติอินพุตมัลติเอาพุต และนำเอาผลของการทดลองมาทำการศึกษาและวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงตัวควบคุมกระบวนการให้สามารถควบคุมกระบวนการได้ดียิ่งขึ้น

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

การทำโครงการวิจัยในปริญญาโทนี้มีขั้นตอนการศึกษาเริ่มจาก ศึกษาการทำงานของตัวควบคุมแบบพีซี การหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ต้องใช้เกี่ยวกับการควบคุมแบบพีซี การหา กฎที่เหมาะสมกับชุดทดลองที่สร้างขึ้น โดยมีการศึกษาพร้อม ๆ กับการสร้างชุดทดลองนี้ขึ้นมา เมื่อชุดทดลองที่ถูกสร้างขึ้นเสร็จสมบูรณ์และมีการทดลองควบคุมกระบวนการที่สร้างขึ้นแล้ว ก็จะนำผลที่ได้มาปรับปรุงเพื่อปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับกระบวนการให้มากที่สุด และมีการนำการควบคุมแบบอื่นมาใช้ควบคุมกระบวนการ และนำผลลัพธ์ที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีซีที่ทำการสร้างขึ้นมา

บทที่ 2

ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับฟัซซี่

ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ จะต้องอาศัยความรู้ทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับฟัซซี่ เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจโครงสร้างและหลักการการทำงานของตัวควบคุมฟัซซี่ และเพื่อใช้ในการกำหนดโครงสร้างและวิธีการออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน ดังนั้น เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับฟัซซี่ (11-15) ตัวควบคุมฟัซซี่ (11-14) ตัวควบคุมฟัซซี่แบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง (11-13) การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงสถิติของตัวควบคุมฟัซซี่ (11-13) และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมฟัซซี่ (13, 16, 17) ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

ฟัซซี่เซต (Fuzzy Set)

ทฤษฎีเซตแบบเดิม (Crisp Set Theory)

นิยาม 1 คลิซป์เซต (Crisp Set)

คลิซป์เซต คือ กลุ่มของสมาชิกที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนด ซึ่งอาจจะมีจำนวนจำกัดหรือไม่จำกัดก็ได้

นิยาม 2 เอกภพสัมพัทธ์ (Universe of Discourse : U)

เอกภพสัมพัทธ์ คือ เซตที่มีสมาชิกเป็นสมาชิกทั้งหมดของขอบเขตที่ทำการพิจารณา กำหนดให้ u เป็นสมาชิกใด ๆ ของ U เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $u \in U$

นิยาม 3 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก (Membership Function : μ)

ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเซต เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ μ ถูกระบุดังนี้

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

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

จะได้ว่า

$$\mu_A(u) : U \in (0,1)$$

$$\mu_A(u) = \begin{cases} 1; u \in A \\ (2.2) 0; u \end{cases} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 4 การเท่ากันของเซต

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

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

นิยาม 5 การเป็นสับเซต (Subset)

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

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

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

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

นิยาม 6 ปฏิบัติการพื้นฐานของเซต

คอมพลีเมนต์ คือ ตัวปฏิบัติการในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม โดยที่สมาชิกของเซตใหม่คือสมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์ U ที่ไม่เป็นสมาชิกของเซตเดิม เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ดังนี้

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

ยูเนียน คือ ตัวปฏิบัติการในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม 2 เซต โดยที่สมาชิกของเซตใหม่ได้จากการรวมสมาชิกทั้งหมดที่เป็นสมาชิกของเซตใดเซตหนึ่ง หรือทั้ง 2 เซต เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

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

อินเตอร์เซกชัน คือ ตัวปฏิบัติการในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม 2 เซต โดยที่สมาชิกของเซตใหม่ได้มาจากการรวมสมาชิกทั้งหมดที่เป็นสมาชิกของเซตเดิมทั้ง 2 เซต เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีฟัซซีเซต (Fuzzy Set Theory)

นิยาม 7 ฟัซซีเซต (Fuzzy Set)

ฟัซซีเซต คือ เซตคู่อันดับ u และฟังก์ชันการเป็นสมาชิก $\mu_A(u)$ โดยที่ u เป็นสมาชิกใด ๆ ของเอกภพสัมพัทธ์ U เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ดังนี้

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\mu_A(u) : U \longrightarrow (0,1) \quad (2.9)$$

นิยาม 9 การเท่ากันของฟัซซีเซต

ฟัซซีเซต A จะเท่ากับฟัซซีเซต B ก็ต่อเมื่อ สมาชิก u ทุกตัวในเอกภพสัมพัทธ์ U มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A เท่ากับค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต B เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A = B$

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

นิยาม 10 การเป็นสับเซตของฟัซซีเซต

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ซัพพอร์ตของฟัซซี่เซต คือ เซตของสมาชิก u ในเอกภพสัมพัทธ์ U ที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซตมากกว่า 0 เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ดังนี้

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

นิยาม 12 ฟัซซี่ซิงเกิลตัน (Fussy Singleton)

ฟัซซี่ซิงเกิลตัน คือ ฟัซซี่เซตที่มีซัพพอร์ตของเซตมีสมาชิกเพียงตัวเดียว และมีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเท่ากับ 1

นิยาม 13 เซต α - Level ของฟัซซี่เซต (A_α)

เซต α - Level ของฟัซซี่เซต A คือ เซตของสมาชิก u ในเอกภพสัมพัทธ์ U ที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต A มากกว่าหรือเท่ากับ α เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

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

นิยาม 14 ความสูงของฟัซซี่เซต (Height of Fuzzy Set)

ความสูงของฟัซซี่เซต A คือ ค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดของฟัซซี่เซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $\text{hgt}(A)$

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

นิยาม 15 คุณสมบัติการนอมอลไลซ์ของฟัซซี่เซต (Normalization)

ฟัซซี่เซต A จะมีคุณสมบัติการนอมอลไลซ์ก็ต่อเมื่อ ฟัซซี่เซต A มีความสูงเท่ากับ 1

$$A \text{ is normalized.} \iff \text{Hgt}(A) = 1 \quad (2.15)$$

นิยาม 16 คุณสมบัติการคอนเวกซ์ของฟัซซี่เซต (Convexity)

ฟัซซี่เซต A จะมีคุณสมบัติการคอนเวกซ์ ก็ต่อเมื่อ ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ A สอดคล้องตามเงื่อนไขต่อไปนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 17 ฟัชซี้นัมเบอร์ (Fuzzy number)

ฟัชซี้นัมเบอร์ คือ ฟัชซีเซตที่มีคุณสมบัติการนอมอลไลซ์ และการคอนเวกซ์

นิยาม 18 คาร์ดินาลิตีของฟัชซีเซต (Cardinality)

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

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

คาร์ดินาลิตีสัมพันธ์ (Relative Cardinality) ของฟัชซีเซต A บนเอกภพสัมพัทธ์ U คืออัตราส่วนระหว่างค่าสกาลาร์คาร์ดินาลิตี ของฟัชซีเซต A กับค่าสกาลาร์คาร์ดินาลิตีของเอกภพสัมพัทธ์ U เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ดังนี้

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

นิยาม 19 ปฏิบัติการพื้นฐานของฟัชซีเซต

คอมพลีเมนต์ของฟัชซีเซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ A' ถูกนิยามในรูปฟังก์ชันการเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{A'}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad (2.19)$$

ยูเนียนของฟัชซีเซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A \cup B$ ถูกนิยามในรูปฟังก์ชันการเป็นสมาชิก ดังนี้

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

โดยที่ s คือ ตัวปฏิบัติการ Triangular co-norms ตามนิยาม 21

อินเตอร์เซกชันของฟัชซีเซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A \cap B$ ถูกนิยามในรูปฟังก์ชันการเป็นสมาชิกดังนี้

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

โดยที่ t คือ ตัวปฏิบัติการ Triangular norms ตามนิยาม 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 20 ตัวปฏิบัติการ Triangular norms หรือ t-norms

t-norms คือ ฟังก์ชัน $(0,1) \times (0,1) \rightarrow (0,1)$ ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

$$1. t(\mu_A(u), 0) = 0, t(\mu_A(u), 1) = t(1, \mu_A(u)) = \mu_A(u) \quad (\text{boundary condition})$$

$$2. t(\mu_A(u), \mu_B(u)) = t(\mu_B(u), \mu_A(u)) \quad (\text{commutativity})$$

$$3. t(\mu_A(u), t(\mu_B(u), \mu_C(u))) = t(t(\mu_A(u), \mu_B(u)), \mu_C(u)) \quad (\text{associativity})$$

$$4. \text{ ถ้า } \mu_A(u) \leq \mu_C(u) \text{ และ } \mu_B(u) \leq \mu_D(u)$$

$$\text{แล้ว } t(\mu_A(u), \mu_B(u)) \leq t(\mu_C(u), \mu_D(u)) \quad (\text{monotonicity})$$

ตัวอย่างปฏิบัติการ t-norms

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

$$\text{algebraic product} \quad : \quad t(\mu_A(u), \mu_B(u)) = \mu_A(u) \cdot \mu_B(u) \quad (2.23)$$

นิยาม 21 ตัวปฏิบัติการ Triangular co-norms หรือ s-norms

s-norms คือ ฟังก์ชัน $(0,1) \times (0,1) \rightarrow (0,1)$ ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

$$1. s(\mu_A(u), 1) = 1, s(\mu_A(u), 0) = s(0, \mu_A(u)) = \mu_A(u) \quad (\text{boundary condition})$$

$$2. s(\mu_A(u), \mu_B(u)) = s(\mu_B(u), \mu_A(u)) \quad (\text{commutativity})$$

$$3. s(\mu_A(u), s(\mu_B(u), \mu_C(u))) = s(s(\mu_A(u), \mu_B(u)), \mu_C(u)) \quad (\text{associativity})$$

$$4. \text{ ถ้า } \mu_A(u) \leq \mu_C(u) \text{ และ } \mu_B(u) \leq \mu_D(u)$$

$$\text{แล้ว } s(\mu_A(u), \mu_B(u)) \leq s(\mu_C(u), \mu_D(u)) \quad (\text{monotonicity})$$

ตัวอย่างปฏิบัติการ s-norms

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พีชชีลอจิก (Fuzzy Logic)

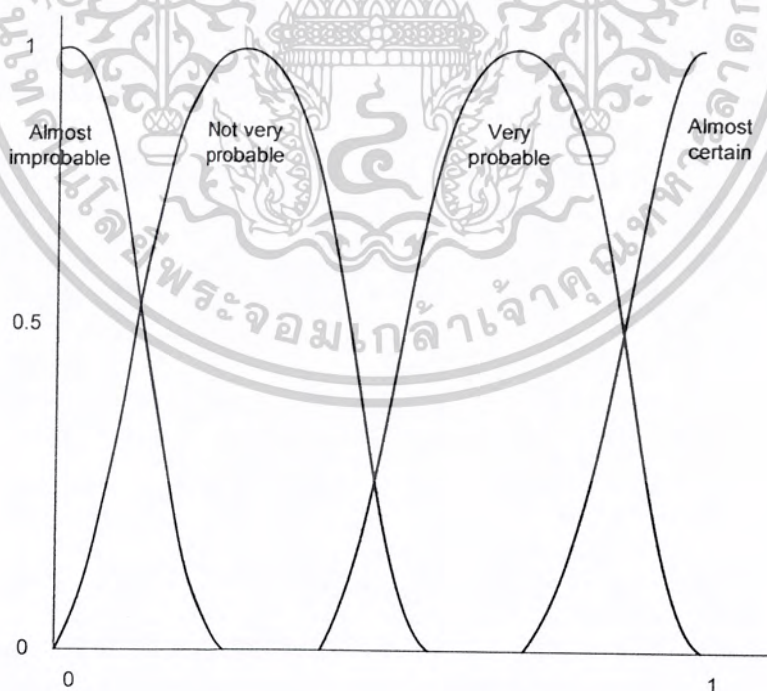
ตัวแปรลึงกวิสติก (Linguistic Variable)

นิยาม 22 ตัวแปรลึงกวิสติก

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

โดยที่ x	คือ	ชื่อของตัวแปร (label)
$T(x)$	คือ	เซตของค่าลึงกวิสติกของ x
U	คือ	เอกภพสัมพัทธ์ โดยที่ $u \in U$
X	คือ	ชื่อของค่าลึงกวิสติกของ x ที่ถูกสร้างตามกฎ G เรียกว่า เทอม (term)
G	คือ	Syntactic rule ในการกำหนดชื่อของเทอม X
M	คือ	Semantic rule ในการนิยามคุณสมบัติของเทอม X
$M(X)$	คือ	พีชชีสับเซตของเอกภพสัมพัทธ์ U

ตัวแปรลึงกวิสติกที่สำคัญในพีชชีลอจิก ได้แก่ ตัวแปร “Probability” และ “Truth” ซึ่งตัวอย่างการนิยามค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิก ของเทอมของตัวแปรลึงกวิสติก “Probability” แสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 2.1 แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลึงกวิสติก “Probability”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการนิยามตัวแปรลึงกวิสติก “Truth” ได้มีผู้นำเสนอไว้ต่าง ๆ กันดังนี้ ในปี ค.ศ.1973 Zadeh ได้นิยาม เซตของเทอมของตัวแปรลึงกวิสติก “Truth” ดังสมการที่ (2.26)

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

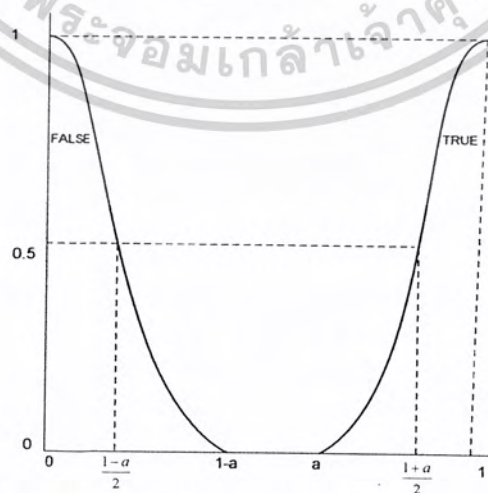
โดยได้นิยามเทอมปฐม (primary term) ของตัวแปรลึงกวิสติก “Truth” คือ “true” และ “false” และกำหนดค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของแต่ละเทอมตามสมการที่ (2.27) – (2.28) ซึ่งสามารถแสดงได้ในภาพที่ 2 และได้นิยามเทอมอื่น ๆ จากการขยายเทอมปฐม โดยการเติม modifier หรือ hedge ที่เหมาะสมในเทอม “true” และ “false”

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

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

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

$a \in (0,1)$ คือ ค่าพารามิเตอร์ที่บอกถึงค่าต่ำสุดของ V ในการตัดสินใจ
ถูกต้องของประพจน์



ภาพที่ 2.2 แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเทอม “true” และ “false” ตามนิยามของ Zadeh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

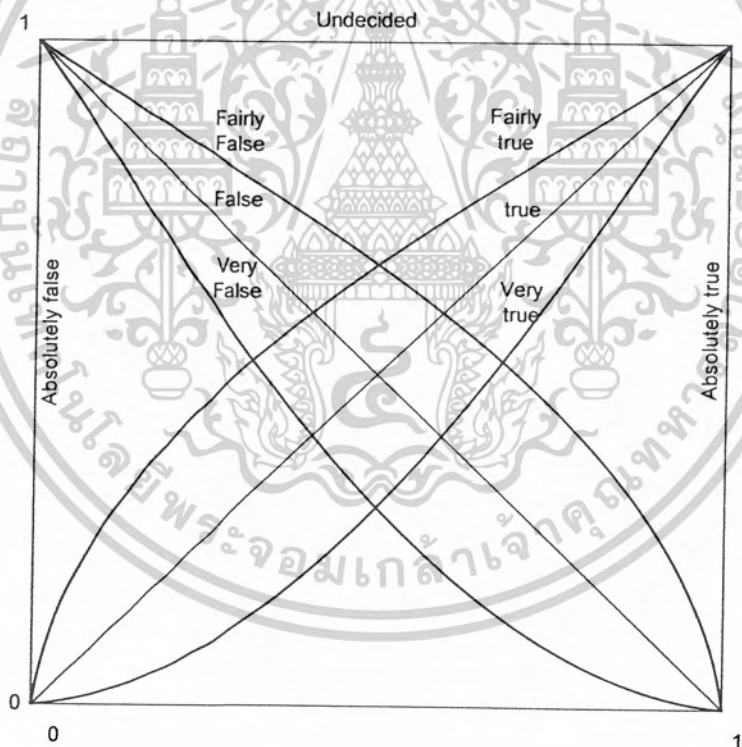
โดยกำหนดให้ค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของแต่ละเทอมเป็นไปตามสมการที่(2.30)– (2.33) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3

$$\mu_{\text{very true}}(V) = (\mu_{\text{true}}(V))^2 ; V \in (0,1) \quad (2.30)$$

$$\mu_{\text{fairly true}}(V) = (\mu_{\text{true}}(V))^{1/2} ; V \in (0,1) \quad (2.31)$$

$$\mu_{\text{very false}}(V) = (\mu_{\text{false}}(V))^2 ; V \in (0,1) \quad (2.32)$$

$$\mu_{\text{fairly false}}(V) = (\mu_{\text{false}}(V))^{1/2} ; V \in (0,1) \quad (2.33)$$



ภาพที่ 2.3 แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลึงกิวสติก “Truth” ตามนิยามของ Baldwin

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 23 ตัวปฏิบัติการ Linguistic Hedge หรือ Modifier

Linguistic Hedge หรือ Modifier คือ ตัวปฏิบัติการในการแปลงหรือขยายขอบเขตของความหมายของฟัซซี่เซต ซึ่งในที่นี้คือเทอมของตัวแปรลึงกวิสติก

กำหนดให้ A เป็นฟัซซี่เซตในเอกภพสัมพัทธ์ U โดยที่ $u \in U$

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

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

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

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

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

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

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

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

นิยาม 24 ตัวแปรลึงกวิสติกบูลีน (Boolean Linguistic Variable)

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

เมื่อ X_p คือ เทอมปฐม

$m(X_p)$ คือ เทอมที่ได้จากการทำปฏิบัติการ modifier บนเทอมปฐม X_p

ทฤษฎีตรรกศาสตร์แบบเดิม

ทฤษฎีตรรกศาสตร์ ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของการหาข้อสรุปโดยใช้เหตุผล ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ค่าความจริง (truth value) การปฏิบัติการ (vocabulary) และวิธีการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล (reasoning procedure) ในตรรกศาสตร์บูลีน ได้นิยามส่วนประกอบแต่ละส่วนดังนี้

นิยาม 25 ค่าความจริงของประพจน์ในตรรกศาสตร์บูลีน

ประพจน์ในตรรกศาสตร์บูลีน จะมีค่าความจริงเท่ากับ 0 เมื่อประพจน์เป็นเท็จ และจะมีค่าความจริงเท่ากับ 1 เมื่อประพจน์เป็นจริง

นิยาม 26 ปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์บูลีน

ปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์บูลีนถูกนิยามด้วยค่าความจริงของประพจน์แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความจริงของประพจน์ในการปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์บูลีน

A	B	\wedge	\vee	XV	\rightarrow	\leftrightarrow
1	1	1	1	0	1	1
1	0	0	1	1	0	0
0	1	0	1	1	1	0
0	0	0	0	0	1	1

นิยาม 27 การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล

การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล โดยใช้ทฤษฎีตรรกศาสตร์แบบเดิม จะใช้สัจนิรันดร์ (tautology) สำหรับเป็นพื้นฐานในการหาข้อสรุป ตัวอย่างสัจนิรันดร์ที่ใช้เป็นพื้นฐานในการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล แสดงดังนี้

$$\text{modus ponens} : (A \wedge (A \rightarrow B)) \rightarrow B$$

$$\text{modus tollens} : ((A \rightarrow B) \wedge (\neg B)) \rightarrow (\neg A)$$

$$\text{syllogism} : ((A \rightarrow B) \wedge (B \rightarrow C)) \rightarrow (A \rightarrow C)$$

$$\text{contraposition} : (A \rightarrow B) \rightarrow ((\neg B) \rightarrow (\neg A))$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีฟัซซีลอจิก

ฟัซซีลอจิกที่กล่าวถึง เป็นทฤษฎีทางตรรกศาสตร์ที่ขยายมาจากทฤษฎีตรรกศาสตร์หลายค่า (multivalued logic) โดยนิยามค่าความจริงของประพจน์เป็นตัวแปรลิงกวิสติก ได้มีการนิยามการปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์สำหรับฟัซซีลอจิกไว้ต่าง ๆ กัน ในปริภูมิพหุนัยนี้ จะอ้างอิงจากนิยามดั้งเดิมของ Zadeh ดังต่อไปนี้

นิยาม 28 ค่าความจริงของประพจน์ในทฤษฎีฟัซซีลอจิก

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

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

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

นิยาม 29 การปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์ในทฤษฎีฟัซซีลอจิก

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

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

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

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

$$V(A) \vee V(B) = V(A \text{ or } B) = V(A \rightarrow B) = \neg V(A) \vee V(B)$$

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

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

ตารางที่ 2.2 แสดงตารางความจริงสำหรับตัวปฏิบัติการฟัซซี่ลอจิกตามนิยามของ 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Baldwin ได้เสนอการสร้างตารางความจริงสำหรับพีชชีลอจิก โดยทำกรนิยามเทอมและฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลิกวีสติก “Truth” ซึ่งแสดงในภาพที่ 3 ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{true} &= \{(v, \mu_{\text{true}}(v) = v) \mid v \in (0,1)\} \\
 \text{false} &= \{(v, \mu_{\text{false}}(v) = 1 - \mu_{\text{true}}(v)) \mid v \in (0,1)\} \\
 \text{very true} &= \{(v, (\mu_{\text{true}}(v))^2) \mid v \in (0,1)\} \\
 \text{very false} &= \{(v, (1 - \mu_{\text{true}}(v))^2) \mid v \in (0,1)\} \\
 \text{fairly true} &= \{(v, (\mu_{\text{true}}(v))^{1/2}) \mid v \in (0,1)\} \\
 \text{fairly false} &= \{(v, (1 - \mu_{\text{true}}(v))^{1/2}) \mid v \in (0,1)\} \\
 \text{undecided} &= \{(v, 1) \mid v \in (0,1)\} \\
 \text{absolutely true} &= \{(v, \mu_{\text{at}}(v)) \mid v \in (0,1)\}; \mu_{\text{at}}(v) = \begin{cases} 1; & v = 1 \\ 0; & v \neq 1 \end{cases} \\
 \text{absolutely false} &= \{(v, \mu_{\text{af}}(v)) \mid v \in (0,1)\}; \mu_{\text{af}}(v) = \begin{cases} 1; & v = 0 \\ 0; & v \neq 0 \end{cases} \\
 \text{ดังนั้น} & \begin{aligned}
 (\text{very})^k \text{ true} &\rightarrow \text{absolutely true} \quad \text{เมื่อ } k \rightarrow \infty \\
 (\text{very})^k \text{ false} &\rightarrow \text{absolutely false} \quad \text{เมื่อ } k \rightarrow \infty \\
 (\text{fairly})^k \text{ true} &\rightarrow \text{undecided} \quad \text{เมื่อ } k \rightarrow \infty \\
 (\text{fairly})^k \text{ false} &\rightarrow \text{undecided} \quad \text{เมื่อ } k \rightarrow \infty
 \end{aligned}
 \end{aligned}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงตารางความจริงสำหรับตัวปฏิบัติการพีชชีลลอจิก ตามนิยามของ Baldwin

V(P)	V(Q)	V(P and Q)	V(P or Q)
false	False	false	false
true	False	false	true
true	true	true	true
undecided	false	false	undecided
undecided	true	undecided	true
undecided	undecided	undecided	undecided
true	very true	true	very true
true	fairly true	fairly true	true

การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลโดยใช้ทฤษฎีพีชชีลลอจิก

การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล โดยใช้ทฤษฎีพีชชีลลอจิก จะเป็นการขยายนิยามของ สัจนิรันดร์ที่ใช้ในตรรกศาสตร์แบบเดิม เพื่อใช้หาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลของประพจน์ที่เป็น พีชชีลเซต โดยทำการขยายนิยามของ Modus Ponens และ Modus Tollens สำหรับพีชชีลลอจิก เรียกว่า Generalized Modus Ponens : GMP และ Generalized Modus Tollens : GMT ดังแสดงในนิยาม 30 และนิยาม 31 ตามลำดับ

นิยาม 30 Generalized Modus Ponens : GMP

Generalized Modus Ponens คือ การหาข้อสรุปจากเหตุไปหาผล (forward data – driven)

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

โดยที่ GMP Implication ถูกนิยามดังสมการ

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

นิยาม 31 Generalized Modus Tollens : GMT

Generalized Modus Tollens คือ การหาข้อสรุปจากผลไปหาเหตุ (backward goal – driven)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ GMT Implication ถูกนิยามดังสมการ

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

นิยาม 32 ฟัชซีอิมพลีเคชัน (Fuzzy Implication)

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

จากนิยามของ GMP Implication ตามนิยาม 30 และนิยามของ GMT Implication ตามนิยาม 31 จะเห็นว่าฟัชซีอิมพลีเคชันจะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ตัวปฏิบัติการ t-norms และ s-norms ซึ่งมีผู้เสนอวิธีการทำฟัชซีอิมพลีเคชันแบบต่างๆ กัน ตามตัวปฏิบัติการ t-norms และ s-norms ที่เลือกใช้ ดังแสดงในตัวอย่างต่อไปนี้

Mamdani's Implication

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

Larsen's Implication

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

Zadeh's Arithmetic Rule of Fuzzy Implication

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

Boolean Fuzzy Implication

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

Zadeh's Max-Min Rule of Fuzzy Implication

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

Standard Sequence Fuzzy Implication

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ตารางที่ 2.4 แสดงผลของการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล โดยใช้ GMP ด้วยหลักการของFukami

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

ตารางที่ 2.5 แสดงผลของการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล โดยใช้ GMT ด้วยหลักการของ Fukami

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

ความสัมพันธ์ฟัซซี (Fuzzy Relation)

นิยาม 33 ผลคูณคาร์ทีเซียน (Cartesian Product)

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

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

ผลคูณคาร์ทีเซียนของ A_1, \dots, A_n คือ ฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ U_1, \dots, U_n ที่มีฟังก์ชันการเป็นสมาชิกดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 34 ความสัมพันธ์ฟัซซี่

กำหนดให้	R	เป็นความสัมพันธ์ฟัซซี่จากฟัซซี่เซต A ไปยังฟัซซี่เซต B
โดยที่	A	เป็นฟัซซี่เซตในเอกภพสัมพัทธ์ U ; $u \in U$
และ	B	เป็นฟัซซี่เซตในเอกภพสัมพัทธ์ V ; $v \in V$

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

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

ความสัมพันธ์ฟัซซี่ขนาด n มิติของฟัซซี่เซต A_1, \dots, A_n (เมื่อ A_1, \dots, A_n เป็นฟัซซี่เซตในเอกภพสัมพัทธ์ U_1, \dots, U_n ตามลำดับ) คือ ฟัซซี่สับเซตในเอกภพสัมพัทธ์ $U_1 \times \dots \times U_n$ ที่ถูกกำหนดดังนี้

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

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

นิยาม 35 การปฏิบัติการของความสัมพันธ์ฟัซซี่

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

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

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

อินเตอร์เซกชัน นิยามโดยใช้ตัวปฏิบัติการ minimum ได้ดังนี้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 36 คุณสมบัติของความสัมพันธ์ฟัซซี่

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

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

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

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

Antisymmetry R จะมีคุณสมบัติเป็น antisymmetry ก็ต่อเมื่อ

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

Perfectly 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

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

นิยาม 37 โปรเจกชันของความสัมพันธ์ฟัซซี่ (Fuzzy Relation Projection)

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

โปรเจกชันของความสัมพันธ์ฟัซซี่ R ถูกนิยาม ดังนี้

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

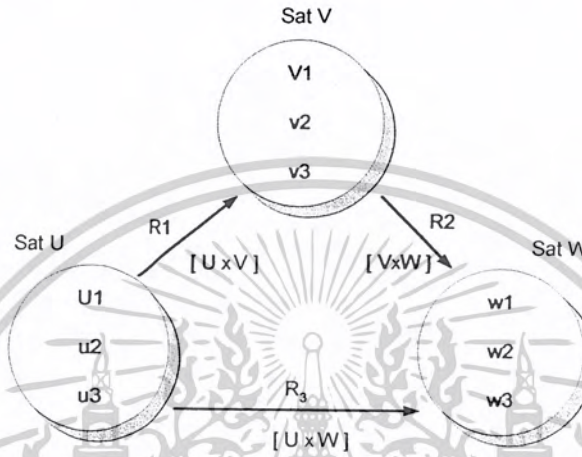
$$\text{second projection: } R^{(2)} = \left\{ (v, \max_u \mu_R(u,v)) \mid (u,v) \in U \times V \right\} \quad (2.66)$$

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

การคอมโพสิชันแบบฟัซซี่ (Fuzzy Composition)

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

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



ภาพที่ 2.4 แสดงการคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟัซซี่

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

การคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟัซซี่ ถูกนิยามดังนี้

นิยาม 38 Max-Min Composition

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

นิยาม 39 Max-Product Composition

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

นิยาม 40 Max-Average Composition

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 41 Min-Max Composition

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

วิธีการ max-min composition เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด มีคุณสมบัติที่สำคัญ ดังนี้

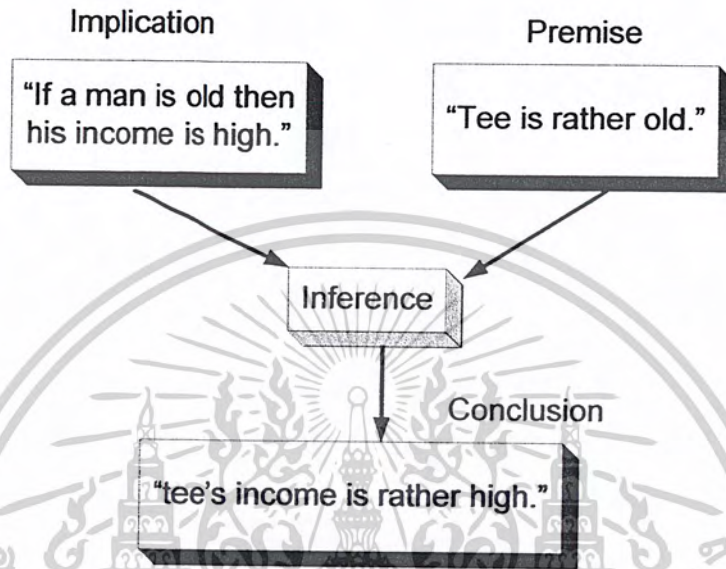
1. $(R_1 \cup R_2) \circ R_3 = (R_1 \circ R_3) \cup (R_2 \circ R_3)$ distributed w.r.t. union
2. $(R_1 \cap R_2) \circ R_3 \subset (R_1 \circ R_3) \cap (R_2 \circ R_3)$ non - distributed w.r.t. intersection
3. $(R_1 \circ R_2) \circ R_3 = R_1 \circ (R_2 \circ R_3)$ association property
4. ถ้า $R_1 \subset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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอินเฟอร์เรนซ์แบบฟัซซี่ (Fuzzy Inference)

นิยาม 42 การอินเฟอร์เรนซ์

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



ภาพที่ 2.5 แสดงการหาข้อสรุปจากหลักฐาน โดยใช้เงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล

นิยาม 43 กฎการคอมโพสิชันของการอินเฟอร์เรนซ์ (Compositional Rule of Inference : CRI)

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

Set B

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

นิยาม 44 ตัวปฏิบัติการ \oslash -Composition

\oslash -composition คือตัวปฏิบัติการผกผันของการคอมโพสิชัน เป็นฟังก์ชันจาก $(0,1) \times (0,1)$ ไปยัง $(0,1)$ ซึ่งถูกนิยามดังนี้

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

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

$$\mu_{(R \oslash B')}(u) = \min_{v \in B} [\mu_R(u,v) \oslash \mu_{B'}(v)] \quad (2.75)$$

นิยาม 45 คุณสมบัติของตัวปฏิบัติการ \oslash -composition

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การฟัซซิเคชัน (Fuzzification)

นิยาม 46 การฟัซซิเคชัน

การฟัซซิเคชัน คือ กระบวนการหาค่าฟัซซีเซตบนเอกภพสัมพัทธ์ U ของอินพุต เพื่อเป็นตัวแทนของอินพุต ซึ่งมีค่าเป็นตัวเลข สำหรับใช้เป็นอินพุตของระบบฟัซซี

การฟัซซิเคชัน สามารถทำได้ 3 วิธี ดังนี้

1. การฟัซซิเคชัน โดยใช้ฟัซซีซิงเกิลตัน จะได้ว่า fuzzification $(u_0) = A$ โดยที่ A เป็นฟัซซีซิงเกิลตันซึ่งมี $S(A) = \{u_0\}$

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

2. การฟัซซิเคชัน โดยใช้ฟัซซีนัมเบอร์ จะได้ว่า fuzzification $(u_0) = A$ โดยที่ A เป็นฟัซซีนัมเบอร์

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

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

ตัวอย่างของการฟัซซิเคชัน โดยใช้ฟัซซีนัมเบอร์ เช่น

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

โดยที่ σ เป็นพารามิเตอร์ในการกำหนดรูปร่างของ $\mu_A(u)$

3. การฟัซซิเคชัน โดยใช้ไฮบริดนัมเบอร์ (hybrid number) จะได้ว่า fuzzification $(u_0) = A$

โดยที่ A เป็น ไฮบริดนัมเบอร์ (ไฮบริดนัมเบอร์ คือ ฟัซซีนัมเบอร์ ที่สมาชิกเอกภพสัมพัทธ์เป็น random number)

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

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

การดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification)

นิยาม 47 การดีฟัซซิฟิเคชัน

การดีฟัซซิฟิเคชัน คือ กระบวนการหาค่าเอาต์พุตเพียงค่าเดียว (ซึ่งเกิดต้น) ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อเป็นตัวแทนของฟัซซีเซตเอาต์พุตที่มีค่าความเป็นไปได้กระจายอยู่บนเอกภพสัมพัทธ์ 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 ซึ่งเป็นสับเซตของเอกภพสัมพัทธ์ V และเมื่อทำดีฟัซซิฟิเคชัน จะหาฟัซซีซึ่งเกิดต้น v_0 ซึ่งเป็นตัวแทนของฟัซซีเซตเอาต์พุต B เพื่อใช้เป็นเอาต์พุตที่แท้จริงของระบบได้

ตัวอย่างวิธีการดีฟัซซิฟิเคชัน ที่นิยมใช้มีดังนี้

1. Max Procedure เป็นวิธีการดีฟัซซิฟิเคชัน โดยเลือกค่าเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกมากที่สุด เพื่อใช้เป็นตัวแทนของฟัซซีเซตเอาต์พุต สามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

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

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

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

เมื่อ v_j คือ ค่าเอาต์พุตแต่ละค่าที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน

J คือ จำนวนเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน

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

วิธี COA เป็นวิธีหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่ที่ได้กราฟของฟังก์ชันการเป็นสมาชิก เพื่อใช้เป็นตัวแทนของฟัซซีเซตเอาต์พุต ซึ่งทำได้โดยการแบ่งพื้นที่ที่ได้กราฟของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน และค่า v_0 จะหาได้จากค่าของ v ที่ตำแหน่งของเส้นแบ่งครึ่ง สามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

ในกรณีที่เอกภพสัมพัทธ์ V มีสมาชิกเป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่อง (discrete) สามารถหาค่า v_0 ได้จากสมการดังนี้

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

เมื่อ N_q คือ ระดับการควอนไทซ์
 v_i คือ ค่าเอาต์พุตของแต่ละค่าในการควอนไทซ์

4. Fuzzy Mean Method (FM) เป็นวิธีที่ปรับปรุงมาจากวิธี COG เพื่อลดเวลาในการคำนวณ โดยการลดระดับการควอนไทซ์ลง ให้เท่ากับจำนวนเทอมของตัวแปรเอาต์พุตในเอกภพสัมพัทธ์ V และใช้ค่าเฉลี่ยของแต่ละเทอม เป็นตัวแทนของค่าเอาต์พุตของแต่ละค่าการควอนไทซ์สมการของการคิฟซซิฟเคชัน โดยใช้วิธี FM สามารถแสดงได้ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	N_v	คือ	จำนวนฟัซซี่เซตของตัวแปรเอาต์พุตในเอกภพสัมพัทธ์ V
	γ_k	คือ	ค่าเฉลี่ยที่ใช้เป็นตัวแทนของฟัซซี่เซตของตัวแปรเอาต์พุตแต่ละเทอม บนเอกภพสัมพัทธ์ V
	V_k	คือ	ค่าระดับการเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซตของตัวแปรเอาต์พุตแต่ละเทอม บนเอกภพสัมพัทธ์ V

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

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

เมื่อ ω_k คือ สัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักของแต่ละเทอมของตัวแปรเอาต์พุต ภายในเอกภพสัมพัทธ์ V

v_i คือ ค่าเอาต์พุตของแต่ละค่าในการควอนไทซ์

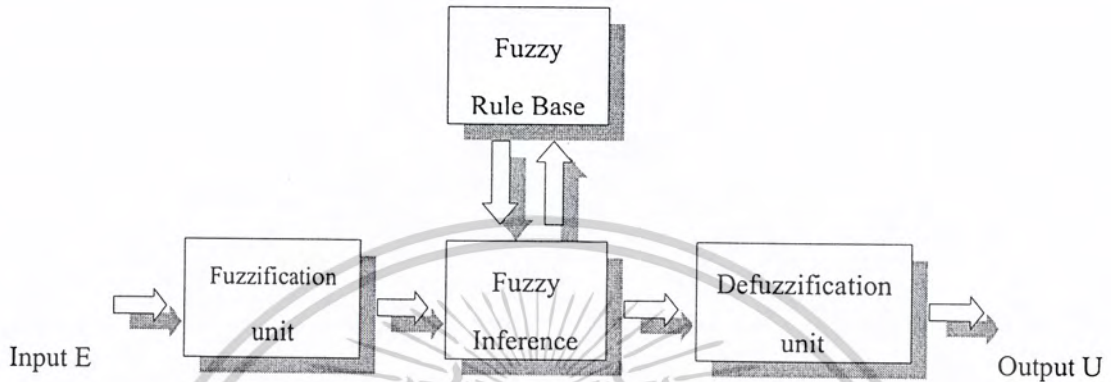
6. Indexed Defuzzification Method (IDFZ) เป็นวิธีการที่ขยายมาจาก การดีฟัซซิฟิเคชันแบบเดิม โดยตัดเอาต์พุตบางส่วน ที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกลดกว่าค่าเทรชโฮลด์ (threshold) ที่กำหนด โดยจะคำนวณเฉพาะค่าเอาต์พุต ที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิก มากกว่าค่าเทรชโฮลด์ ดังสมการต่อไปนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวควบคุมฟัซซี่

โครงสร้างหลักของตัวควบคุมฟัซซี่ ประกอบด้วย 4 หน่วย 4 หน่วย คือ หน่วยฟัซซิฟิเคชัน หน่วยอินเฟอเรนซ์ หน่วยดีฟัซซิฟิเคชัน และฐานกฎการควบคุมฟัซซี่ (fuzzy rule base) ดังแสดงในภาพที่ 6 การทำงานของแต่ละหน่วยสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2.6 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซี่

หน่วยฟัซซิฟิเคชัน

หน่วยฟัซซิฟิเคชันทำหน้าที่นอมอลไลซ์ตัวแปรสถานะของระบบ $x = [x_1, \dots, x_m]^T$ ที่จะใช้เป็นอินพุตของตัวควบคุมให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด และทำการแปลงตัวแปรอินพุต x ให้เป็นตัวแปรฟัซซี่ X' โดยใช้ฟัซซี่ซิงเกิลตัน ฟัซซี่นัมเบอร์ หรือไฮบริดนัมเบอร์

ฐานกฎการควบคุมฟัซซี่

ฐานกฎการควบคุมฟัซซี่ เป็นหน่วยที่รวบรวมกฎการควบคุมแบบฟัซซี่ ซึ่งอยู่ในรูปแบบ IF... THEN....

กำหนดให้ กฎการควบคุมอยู่ในรูปแบบดังนี้

IF x_1 is X_1^k and x_m is X_m^k THEN y is Y^k หรือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ x คือ ตัวแปรสถานะของกระบวนการ ซึ่งใช้เป็นอินพุตของตัวควบคุมฟัซซี่

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

X^k คือ ฟัซซี่เซตของตัวแปรอินพุต ในส่วนเหตุของกฎการควบคุม

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

m คือ จำนวนตัวแปรอินพุตของตัวควบคุม

y คือ ตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่

Y_k คือ ฟัซซี่เซตของตัวแปรเอาต์พุตในส่วนผลสมของกฎของการควบคุมที่ k

M คือ จำนวนกฎการควบคุมทั้งหมดในฐานกฎการควบคุม

หน่วยอินเฟอร์เรนซ์

หน่วยอินเฟอร์เรนซ์ ทำหน้าที่หาค่าเอาต์พุต ของระบบฟัซซี่เซตจากค่าตัวแปรอินพุตแบบฟัซซี่ X' โดยวิธี GMP Implication หาค่าระดับการเป็นสมาชิก (fire strength) ของแต่ละกฎจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตแบบฟัซซี่ X' กับฟัซซี่เซตในส่วนเหตุของแต่ละกฎ X^k แล้วจึงคำนวณหาค่าเอาต์พุตแบบฟัซซี่จาก ระดับการเป็นสมาชิกกับฟัซซี่เซตในส่วนผลสมของแต่ละกฎ Y^k ตัวอย่างการอินเฟอร์เรนซ์ โดยใช้ CRI ของ Zadeh แสดงด้วยสมการดังนี้

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

หน่วยดีฟัซซิฟิเคชัน

หน่วยดีฟัซซิฟิเคชัน ทำหน้าที่แปลงตัวแปรฟัซซี่เอาต์พุตให้เป็นค่าเชิงเกิตตัน และทำการดีนอมอลไลซ์ ให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่ต้องการ เพื่อใช้เป็นค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม โดยใช้วิธีการที่ได้กล่าวถึงในเรื่องการดีฟัซซิฟิเคชัน

ตัวอย่างของการดีฟัซซิฟิเคชัน โดยใช้วิธี FM แสดงดังสมการ

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

เมื่อ \bar{y}^k คือ ค่าเฉลี่ยที่ใช้เป็นตัวแทนของฟัซซี่เซตของเอาต์พุต Y^k ในส่วนผลของกฎที่ k

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยวัดสมรรถนะ

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

หน่วยปรับแต่งกฎการควบคุม

หน่วยปรับแต่งกฎการควบคุมทำหน้าที่ปรับแต่งกฎการควบคุม ทำการหากฎการควบคุมที่มีระดับการเป็นสมาชิกสูงสุด โดยใช้ค่าระดับการเป็นสมาชิกของแต่ละกฎที่ได้จากการทำงานของหน่วยอินเฟอร์เรนซ์ และใช้ค่า PM ที่ได้จากหน่วยวัดสมรรถนะทำการแก้ไขส่วนผลของกฎนั้น แต่ถ้าไม่มีกฎการควบคุมที่สถานะนั้น ให้สร้างกฎใหม่ขึ้นในฐานกฎการควบคุม

การวิเคราะห์ระบบควบคุมฟัซซี่

การวิเคราะห์ระบบควบคุมฟัซซี่ จะวิเคราะห์จากคุณสมบัติเชิงสถิตย์ (static property) และคุณสมบัติเชิงพลวัต (dynamic property) ของตัวควบคุม โดยที่คุณสมบัติเชิงสถิตย์จะถูกวิเคราะห์ในรูปแบบของความสมบูรณ์ (completeness) ของฐานการควบคุม การเกิดกิริยาระหว่างกัน (interaction) ของกฎการควบคุม ความสอดคล้อง (consistency) ของกฎการควบคุม และความคงทน (robustness) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ และการรบกวนจากภายนอก ส่วนคุณสมบัติเชิงพลวัตจะวิเคราะห์จากเสถียรภาพ (stability) ของระบบควบคุม

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงสถิตย์ของระบบควบคุมฟัซซี่

1. ความสมบูรณ์ของฐานกฎการควบคุม คือ ความสามารถของตัวควบคุมในการที่มีกฎการควบคุมรองรับในการสร้างสัญญาณควบคุม สำหรับทุก ๆ สถานะของอินพุต

กำหนดให้ ฐานกฎการควบคุมมีรูปแบบดังแสดงในสมการที่ (2.86)

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุม คือ การที่ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม จะมีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเอาต์พุตที่เกิดจากกฎการควบคุมแต่ละกฎ ซึ่งเป็นผลกระทบจากการทำงานของกฎอื่น สามารถแสดงด้วยเงื่อนไขดังนี้

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

โดยที่ R คือ ความสัมพันธ์ฟัซซีที่ใช้แทนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุต และตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีในฐานะกฎการควบคุม

ปัจจัยที่ทำให้เกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุม คือ

- โครงสร้างของกฎการควบคุม
- การนิยามฟัซซีเซตและฟังก์ชันการเป็นสมาชิก
- การเลือกวิธีการอินฟิอเรนซ์และการดีฟัซซิฟิเคชัน

ในหลักการของการควบคุมฟัซซีจะต้องออกแบบตัวควบคุม ให้มีการเกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุมเสมอ ทั้งนี้เนื่องจาก ถ้าค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมเกิดจากกฎเดียวแล้วค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม จะไม่ขึ้นกับค่าระดับการเป็นสมาชิกของกฎการควบคุม โดยค่าเอาต์พุตจะเท่ากับจุดศูนย์กลางของฟัซซีเซต ในส่วนผลของกฎการควบคุมนั้นเสมอ ดังนั้นในการออกแบบตัวควบคุมจะต้องมีการซ้อนทับกันของฟัซซีเซต เพื่อให้สัญญาณควบคุมในแต่ละกรณีเกิดจากกฎการควบคุมอย่างน้อย 2 กฎเสมอ

3. ความสอดคล้องกันของกฎการควบคุม จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อไม่มีการขัดแย้งกันระหว่างกฎการควบคุมที่จะทำให้เกิดเอาต์พุตของตัวควบคุมผิดพลาด กล่าวคือ ค่าอินพุตที่เหมือนกัน หรือใกล้เคียงกัน จะต้องนำมาซึ่งค่าเอาต์พุต หรือสัญญาณควบคุมที่เหมือนกัน หรือใกล้เคียงกัน ความขัดแย้งหรือความไม่สอดคล้องกันของกฎการควบคุม มักจะเกิดจากความผิดพลาดในการออกแบบกฎการควบคุม ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ดังนี้

กำหนดให้ ฐานกฎการควบคุมมีรูปแบบดังแสดงในสมการที่ (2.86)

ดัชนีแสดงความไม่สอดคล้องกัน (index of inconsistency) ระหว่างกฎที่ i และ j หาได้ดังนี้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้ว c_{ij} จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 กล่าวคือกฎทั้งสองมีความขัดแย้งกัน โดยสิ้นเชิง

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

แล้ว c_{ij} จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0 กล่าวคือกฎทั้งสองมีความสอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์

ดัชนีของความไม่สอดคล้องของกฎที่ 1 ในฐานกฎการควบคุม หาได้ดังนี้

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

โดยที่ M คือจำนวนกฎการควบคุมทั้งหมดในฐานกฎการควบคุม

ในการออกแบบกฎการควบคุมของตัวควบคุมพีซี จะต้องกำจัดกฎที่มีความไม่สอดคล้องออกจากกฎการควบคุม และในการสร้างกฎการควบคุมใหม่ จะต้องหลีกเลี่ยงการเกิดความไม่สอดคล้องกันของกฎ

4. ความคงทนในการควบคุม หมายถึง ความสามารถของตัวควบคุมในการลดผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนจากภายนอก จากสัญญาณนอยล์ หรือจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ ปัจจัยในการออกแบบตัวควบคุมพีซีที่มีผลต่อความคงทนของระบบควบคุม ได้แก่ การกำหนดความละเอียดในการควอนไทซ์ การกำหนดเอกภพสัมพัทธ์ของอินพุต การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของพีซีเซต และการกำหนดจำนวนกฎการควบคุม

บทที่ 3

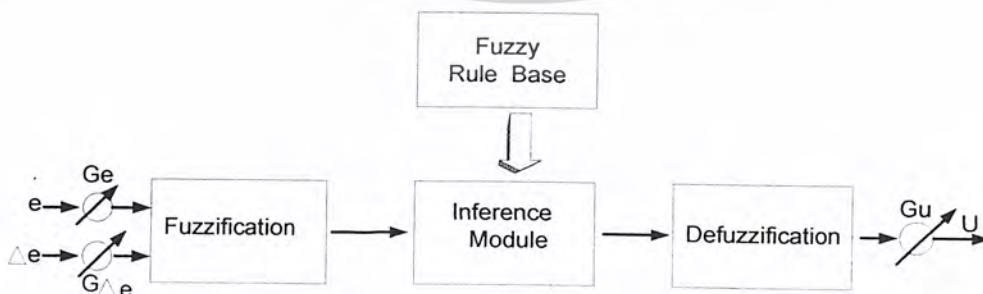
หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

3.1 กล่าวนำ

ในการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ สำหรับควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรมการผลิตแบบที่ใช้อยู่เดิมจะใช้วิธีการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ สำหรับในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน จะควบคุมให้ระบบมีการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพได้ยาก โดยเฉพาะการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะมีความผิดพลาดได้ง่าย เป็นผลให้กระบวนการผลิตเกิดผิดพลาดและสมรรถนะของการควบคุมไม่ดี จึงได้มีการนำเอาหลักการของฟัซซีมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมโดยอาศัยประสบการณ์ในการควบคุมจริงของผู้เชี่ยวชาญ มาพัฒนาเป็นตัวควบคุมแบบฟัซซีประสบการณ์ความรู้ของผู้เชี่ยวชาญจะถูกนำมาสร้างเป็นกฎ เพื่อที่จะควบคุมกระบวนการให้มีความแม่นยำเที่ยงตรงและเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็ว โดยปกติตัวควบคุมแบบฟัซซีจะถูกสร้างขึ้น โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เป็นหลัก ซึ่งทำให้มีขนาดใหญ่และมีความสิ้นเปลืองสูงมากกว่า จึงได้เสนอตัวควบคุมแบบฟัซซีที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งมีขนาดเล็กและซับซ้อนน้อยกว่าเครื่องคอมพิวเตอร์ตลอดจนมีการทำงานที่ถูกต้องและรวดเร็ว

3.2 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี

ในการควบคุมมีจุดประสงค์หลัก คือต้องการให้ค่าเอาต์พุตของระบบลู่เข้าสู่ค่าอ้างอิงเร็วที่สุด และไม่ส่งผลให้เกิดโอเวอร์ชูตที่สูงเกินไป จึงเลือกใช้โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซี ซึ่งสามารถควบคุมเอาต์พุตของกระบวนการให้เป็นไปตามจุดประสงค์ที่ต้องการ และมีโครงสร้างของตัวควบคุมไม่ซับซ้อนคือมีสองอินพุต และหนึ่งเอาต์พุต ทำให้สามารถคำนวณได้รวดเร็วและใช้หน่วยความจำน้อย โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซี แสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบโครงสร้างของตัวควบคุมพีซซี ที่ใช้สำหรับควบคุม ประกอบด้วยขั้นตอนการออกแบบ ดังนี้

3.2.1 การกำหนดจำนวนตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม

กำหนดตามโครงสร้างของตัวควบคุมพีซซีแบบ PD ซึ่งประกอบด้วยสองอินพุต และหนึ่งเอาต์พุต โดยที่ตัวแปรอินพุตของตัวควบคุม คือตัวแปร สถานะที่อยู่ในรูปค่าผิดพลาด e (error) และค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด Δe (change of error) ของระบบควบคุม และตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุม คือสัญญาณควบคุม u (control output)

3.2.2. การนอมอลไลซ์ตัวแปรอินพุตของตัวควบคุมให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด

จะต้องรู้ช่วง หรือ เอกภพสัมพัทธ์ที่แท้จริงของตัวแปรอินพุต ซึ่งได้จากระดับสัญญาณป้อนกลับที่ได้จากการตรวจวัดสถานะของกระบวนการ

จากคุณลักษณะของกระบวนการที่ใช้ในการทดลองสัญญาณป้อนกลับที่ได้มาซึ่ง จากการตรวจวัดค่าเอาต์พุตของกระบวนการอุปกรณ์เซ็นเซอร์เป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้า 4-20 มิลลิแอมป์ เมื่อแปลงกระแสไฟฟ้าให้เป็นศักดาไฟฟ้า โดยใช้ความต้านทาน 250 โอห์ม และแปลงสัญญาณอนาลอกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล โดยใช้ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Converter : A/D) ขนาด 12 บิต จะได้ค่าดิจิทัลอยู่ภายในช่วง 2457-4095 จากการคำนวณเพื่อหาค่าของตัวแปรสถานะ e และ Δe ของระบบดังสมการ

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

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

เมื่อ REF คือ สัญญาณอ้างอิง

$y(nT)$ คือ สัญญาณป้อนกลับที่ได้จากการตรวจสอบสถานะของกระบวนการที่เวลา nT

$e(nT)$ คือ ค่าผิดพลาดของระบบ ที่เวลา nT

$e(nT-T)$ คือ ค่าผิดพลาดของระบบ ที่เวลา $nT-T$

$\Delta e(nT)$ คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดของระบบ ที่เวลา nT

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

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

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

3.2.3. การคืนนอมอลไลซ์ตัวแปรเอาต์พุตให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด

จะต้องรู้ช่วง หรือเอกภพสัมพัทธ์ที่แท้จริงของตัวแปรเอาต์พุต ซึ่งสามารถหาได้จากระดับสัญญาณควบคุมที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ

จากคุณลักษณะของกระบวนการที่ใช้ในการทดลอง สัญญาณควบคุมที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้า 4-20 มิลลิแอมป์ เนื่องจากในการทดลองนี้ใช้ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก (Digital to Analog Converter : D/A) ขนาด 12 บิต สำหรับสร้างสัญญาณควบคุม ดังนั้นค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจึงเป็นสัญญาณดิจิทัลค่า 0-4095 ในการออกแบบได้กำหนดเอกภพสัมพัทธ์ของตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุม U ให้อยู่ในช่วง (0,100) จึงต้องทำการคืนนอมอลไลซ์ตัวแปรเอาต์พุตอยู่ในช่วง (0,4095) โดยใช้สมการที่ (3.4) แล้วจึงส่งออกไปเป็นสัญญาณควบคุมที่แท้จริง

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

เมื่อ u คือ ตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุม
 U_{denorm} คือ ค่าที่ได้จากการคืนนอมอลไลซ์ตัวแปรเอาต์พุตให้อยู่ในช่วง (0,4095)

3.2.4. การกำหนดค่าเกนของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต

ค่าเกนของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต คือสัมประสิทธิ์ในการถ่วงน้ำหนัก เพื่อกำหนดความสำคัญของตัวแปรสถานะแต่ละตัวของกระบวนการ โดยจะใช้เป็นตัวกำหนดขอบเขตสูงสุดของตัวแปรสถานะแต่ละตัว

หลักเกณฑ์ทั่วไปในการกำหนดค่าเกนของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต มีดังนี้

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ q	คือ	ระดับการควอนไทล์
α, β, δ	คือ	ค่าพารามิเตอร์ในการปรับแต่งค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม
e_{\max}	คือ	ค่า e สูงสุดที่ยอมรับได้ ในการควบคุม
Δe_{\max}	คือ	ค่า Δe สูงสุดที่ยอมรับได้ ในการควบคุม
$P_{i \max}$	คือ	ค่าอินพุตสูงสุดของกระบวนการ
Co_{\max}	คือ	ค่าเอาต์พุตสูงสุดของตัวควบคุม

ในปฏิญญาฉบับนี้ ต้องการออกแบบให้ตัวควบคุมสามารถปรับแต่งค่าเกณฑ์ของตัวแปรอินพุต และเอาต์พุตด้วยตนเอง โดยการเรียนรู้จากสมรรถนะของระบบ จึงได้กำหนดค่าเริ่มต้นของค่าเกณฑ์แต่ละตัว ตามสมการที่ (3.5) – (3.7) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

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

สำหรับการกำหนดวิธีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตนั้น จะอยู่ในส่วนของการออกแบบโครงสร้างระดับการปรับแต่งพารามิเตอร์ ซึ่งจะอธิบายในส่วนต่อไป

3.2.5. การเลือกวิธีและระดับการควอนไทล์

การกำหนดระดับการควอนไทล์ จะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบ และข้อจำกัดทางฮาร์ดแวร์ของอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการสร้างตัวควบคุม และในกรณีที่ต้องการให้มีความถูกต้องในการควบคุมสูงๆ จะต้องใช้ระดับการควอนไทล์สูง แต่ขณะเดียวกันก็จะต้องใช้เวลา และหน่วยความจำในการคำนวณมาก ดังนั้น ในการออกแบบจึงต้องเลือกระดับที่เหมาะสม ระหว่างความถูกต้องในการควบคุม และข้อจำกัดทางฮาร์ดแวร์

3.2.6. การเลือกวิธีการฟัซซีฟิเคชัน

จะขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณอินพุตของตัวควบคุมในที่นี้ คือสัญญาณป้อนกลับ จากกระบวนการซึ่งได้จากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ หลักเกณฑ์ในการเลือกวิธีการฟัซซีฟิเคชัน มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ในกรณีที่สัญญาณที่วัดได้ เป็นสัญญาณซิงเกิลตัน และมีระดับของสัญญาณรบกวนต่ำ ควรเลือกวิธีการพีชซีพีเคชัน โดยใช้พีชซีซิงเกิลตัน เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย และได้ผลดีที่สุด

- ในกรณีที่สัญญาณที่วัดได้มีระดับของสัญญาณนอยส์สูง ควรเลือกวิธีการพีชซีพีเคชัน โดยใช้พีชซีนัมเบอร์ ซึ่งจะได้ออกผลดีกว่า เนื่องจากการพีชซีพีเคชัน โดยใช้พีชซีนัมเบอร์ มีความคงทนต่อสัญญาณนอยส์มากกว่าการใช้พีชซีซิงเกิลตันแต่ในการพีชซีพีเคชัน โดยใช้วิธีนี้จะใช้เวลา ในการคำนวณมากกว่า

- ในกรณีที่สัญญาณที่วัดได้เป็นสัญญาณในรูปการกระจายทางสถิติ เราควรที่จะเลือกวิธีการพีชซีพีเคชัน โดยใช้โอบริคนัมเบอร์ ซึ่งเป็นพีชซีนัมเบอร์ที่มีสมาชิกอยู่ในรูปของการกระจายทางสถิติ

ในระบบควบคุมที่ใช้ในการทดลองนี้ สัญญาณที่วัดได้เป็นสัญญาณซิงเกิลตัน และมีระดับของสัญญาณรบกวนอยู่ไม่สูงมากนัก จึงเลือกใช้วิธีการพีชซีพีเคชัน โดยใช้พีชซีซิงเกิลตัน ดังแสดงในสมการที่ (3.8)

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

3.2.7. การกำหนดจำนวนพีชซีเซตของตัวแปรอินพุต

จะเป็นการกำหนดความซับซ้อนของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุต และตัวแปรเอาต์พุต ซึ่งเป็นการกำหนด control hypersurface โดยจำนวนพีชซีเซตของตัวแปรอินพุต แต่ละตัว จะมีผลต่อขนาดของฐานกฎการควบคุม ดังสมการต่อไปนี้

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

โดยที่ M คือ ขนาดของฐานกฎการควบคุม

N_e คือ จำนวนเทอมของตัวแปรอินพุต e

$N_{\Delta e}$ คือ จำนวนเทอมของตัวแปรอินพุต Δe

ในการกำหนดจำนวนพีชซีเซตของตัวแปร ควรกำหนดให้เป็นจำนวนที่ เพื่อให้มีพีชซีเซตหนึ่งเซตที่อยู่ตรงกลางของเอกภพสัมพัทธ์ โดยปกติจะใช้ 5 หรือ 7 เซต

ในปริณูณานิพนธ์ ได้ออกแบบตัวควบคุมให้มีจำนวนพีชซีเซตของตัวแปรอินพุต e และ Δe เท่ากับ 3 เซต, และ 7 เซต

3.2.8. การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต

การกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันการเป็นสมาชิก ของตัวแปรอินพุต จะเป็นการกำหนดความสัมพันธ์ในการแมปปีงค่าของอินพุต ในเอกภพสัมพัทธ์กับฟuzzyเซตของตัวแปรอินพุต ถ้าต้องการให้ความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น จึงควรกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกให้เป็นแบบเชิงเส้นเช่นรูปสามเหลี่ยม หรือ รูปสี่เหลี่ยมคางหมู แต่ถ้าต้องการให้ความสัมพันธ์ ไม่ให้เป็นเชิงเส้นควรกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบไม่เป็นเชิงเส้น เช่น รูปประฆังคว่ำ

การกำหนดการกระจายของฟuzzyเซตบนเอกภพสัมพัทธ์นั้น สามารถกำหนดได้ทั้งแบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบ โดยบริเวณที่มีความหนาแน่นของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงนั้น จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุต และตัวแปรเอาต์พุตที่มีความซับซ้อนมากกว่าบริเวณที่มีความหนาแน่นของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกต่ำ

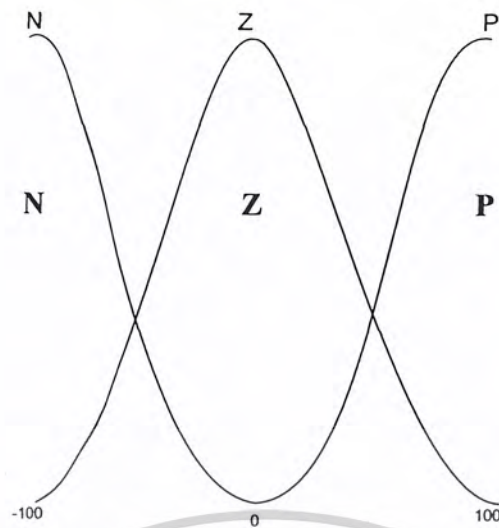
การซ้อนทับกัน (overlap) ของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของตัวควบคุมฟuzzy เนื่องจากในการอินเฟอร์เรนซ์แบบฟuzzy ต้องการให้เกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุมมากกว่า 1 กฎ การกำหนดเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับกันจะขึ้นอยู่กับความคลุมเครือ หรือ ความซับซ้อนของระบบ และการออกแบบให้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตนั้น มีการซ้อนทับกันมากกว่า 2 เซต จะทำให้ control hypersurface มีความเรียบมากขึ้น แต่ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของกฎการควบคุมใดๆจะมีผลกระทบต่อควบคุมของกฎที่อยู่ติดกันมาก ทำให้เกิดการรบกวนกันของกฎการควบคุม ดังนั้น ในการออกแบบฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต จึงไม่ควรให้มีการซ้อนทับกันของฟuzzyเซตมากกว่า 2 เซต

การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตนั้น จะมีแนวทางที่สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- ในกรณีที่ต้องการให้ใช้เวลาในการคำนวณน้อย ควรกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมคางหมู
- การกำหนดการกระจายของฟuzzyเซตบนเอกภพสัมพัทธ์ ควรกำหนดให้สมมาตรกัน
- การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต ควรกำหนดให้มีการซ้อนทับกันของฟuzzyเซตที่อยู่ติดกัน เพื่อให้มีการเกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุม และเพื่อยืนยันว่าจะมีกฎการควบคุมอย่างน้อยหนึ่งกฎ รองรับสำหรับใช้สร้างสัญญาณควบคุมในทุกสถานะของอินพุต ซึ่งจะแสดงถึงความสมบูรณ์ของฐานการควบคุม โดยปกติจะออกแบบให้มีเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับของฟuzzyเซต ประมาณ 15-25%

ในปฏิญญาฉบับนี้ ได้ออกแบบตัวควบคุม โดยกำหนดให้รูปร่างของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟuzzyเซตของตัวแปรอินพุต e และ Δe เป็นรูปประฆังคว่ำ โดยมีการกระจายของฟuzzyเซตแบบไม่เป็นเชิงเส้น และมีการซ้อนทับกันของฟuzzyเซต 25% แต่จะสามารถปรับเพิ่มหรือลดได้จากโปรแกรมดังแสดงในภาพที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.2 แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซตของตัวแปรอินพุต e และ Δe

โดยที่ N = Negative , Z = Almost Zero, P = Positive

3.2.9. การกำหนดจำนวนฟัซซี่เซตของตัวแปรเอาต์พุตบนเอกภพสัมพัทธ์

เป็นการกำหนดความละเอียดของผลการควบคุม แต่จะ ไม่เป็นการกำหนดความละเอียดของสัญญาณควบคุม เนื่องจากความละเอียดของสัญญาณควบคุมจะขึ้นอยู่กับวิธีการดีฟัซซิฟิเคชัน

3.2.10. การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุต

จะมีแนวทางคล้ายกันกับ ในการกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต แต่จากการทดลอง เราจะพบว่าผลการควบคุมจะขึ้นอยู่กับกฎการควบคุมมากกว่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุต ในที่นี้ จึงกำหนดให้ฟัซซี่เซตของตัวแปรเอาต์พุตเป็นฟัซซี่เซตที่เกิดจากความสะดวกในการคำนวณและจะกำหนดให้จำนวนฟัซซี่เซตเท่ากับ 201 เซต โดยให้จุดกึ่งกลาง ของฟัซซี่เซตแต่ละเซต อยู่ที่ค่าจำนวนเต็มในช่วง -100 ถึง 100

3.2.11. การกำหนดรูปแบบของกฎการควบคุม

รูปแบบทั่วไปของกฎการควบคุมจะอยู่ในรูปเงื่อนไข IF.....THEN..... โดยใน ส่วนเหตุ เป็นการกำหนดเงื่อนไขของค่าตัวแปรอินพุตในรูปฟัซซี่เซต และในส่วนผลแสดงถึงผลลัพธ์ คือค่าของตัวแปรเอาต์พุตในรูปฟัซซี่เซต เมื่อตัวแปรอินพุตเป็นไปตามเงื่อนไขในส่วนเหตุ รูปแบบของกฎการควบคุมที่ใช้กันทั่วไปเป็นกฎที่ถูกลิขิตโดย Professor Mamdani มีรูปแบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยที่ $E, \Delta E$ คือ ตัวแปรฟuzzyอินพุตที่ได้จากการทำฟuzzyฟิเคชันตัวแปรสถานะ e และ Δe
 U คือ ตัวแปรฟuzzyเอาต์พุต
 $E^k, \Delta E^k, U^k$ คือ ฟuzzyเซตของตัวแปร $E, \Delta E, U$ ตามลำดับ
 M คือ จำนวนกฎการควบคุมทั้งหมด ในที่นี้ $M = 7 \times 7 = 49$ กฎ

ในการคำนวณ กฎการควบคุมจะถูกแทนด้วยความสัมพันธ์ฟuzzyซึ่งเป็นผลคูณคาร์ทีเซียนระหว่างฟuzzyเซตของตัวแปรอินพุตในส่วนเหตุของกฎ กับฟuzzyเซตของตัวแปรเอาต์พุตในส่วนผลของกฎรูปแบบของความสัมพันธ์ R ซึ่งแทนกฎการควบคุมฟuzzy แสดงได้ดังสมการที่ (3.11) และสมการที่ (3.12)

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

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

สำหรับการกำหนดวิธีการปรับแต่งกฎการควบคุมนั้น จะอยู่ในส่วนของการออกแบบโครงสร้างระดับการปรับแต่งพารามิเตอร์ ซึ่งจะอธิบายในส่วนต่อไป

3.2.12. การเลือกวิธีการอินเฟอเรนซ์

จะขึ้นอยู่กับการใช้ตัวปฏิบัติการ t -norm และ s -norm ในการทำ CRI วิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ วิธี CRI ของ Zadeh เนื่องจากสะดวก และใช้เวลาในการคำนวณน้อย โดยจะใช้ตัวปฏิบัติการ \max และ \min ในการปฏิบัติการ s -norm และ t -norm ตามลำดับ ซึ่งสามารถหาค่าเอาต์พุตแบบฟuzzy U' ได้จากสมการที่ (3.13)

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

ในการอินเฟอเรนซ์แบบฟuzzy โดยใช้ตัวปฏิบัติการที่ไม่เป็นเชิงเส้น จะมีผลทำให้ control hypersurface ไม่เป็นเชิงเส้นด้วย ดังนั้น ถ้าต้องการให้ control hypersurface เป็นเชิงเส้น ควรจะเลือกใช้ตัวปฏิบัติการที่เป็นเชิงเส้น เช่น sum-product แต่ทั้งนี้จะต้องสัมพันธ์กับการกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตการเลือกวิธีการฟuzzyฟิเคชันและวิธีการดีฟuzzyฟิเคชัน

เนื่องจากหลักการของการควบคุมแบบฟิชชีเป็นการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในปฏิญานิพนธ์นี้ จึงเลือกใช้วิธี CRI ของ Zadeh

3.2.13. การเลือกวิธีการตีฟิชชีเพิกชั้น

จะเป็นการกำหนดความละเอียดของสัญญาณเอาต์พุต โดยจะต้องสัมพันธ์กับการกำหนด ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก ของตัวแปรอินพุต และตัวแปรเอาต์พุตการเลือกวิธีการตีฟิชชีเพิกชั้น จะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบ ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดี – ข้อเสียดังต่อไปนี้

วิธี Max-Procedure เป็นวิธีการที่สามารถทำได้ง่าย และรวดเร็วที่สุด แต่จะให้สัญญาณควบคุมที่หยาบมาก จึงไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน

วิธี MOM เป็นวิธีการที่สามารถทำได้ง่าย และรวดเร็ว ซึ่งการตีฟิชชีเพิกชั้นด้วยวิธีนี้ จะได้ผลเช่นเดียวกับการกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิก ของตัวแปรอินพุตเป็นฟิชชีซึ่งเกิดต้น เนื่องจากค่าของตัวแปรอินพุตที่ตำแหน่งอื่น ที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกต่ำกว่าค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุด จะไม่มีผลต่อค่าของเอาต์พุต วิธีนี้จะให้สัญญาณควบคุมหยาบ และผลการควบคุมไม่ดีเท่าที่ควร แต่จะถูกเลือกใช้ในกรณีที่ต้องการใช้เวลาในการคำนวณน้อย และไม่ต้องการความถูกต้องมากนัก

วิธี COG เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดเนื่องจากการหาจุดศูนย์กลางสำหรับเป็นตัวแทนของเอาต์พุตที่แท้จริง โดยพิจารณาผลจากอินพุตทุกตัว ทำให้ได้ค่าที่ถูกต้องกว่าวิธีอื่น แต่จะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าวิธีอื่น ๆ

วิธี FM เป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธี COG โดยใช้ระดับการควอนไตซ์ที่น้อยกว่า เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ในการตีฟิชชีเพิกชั้นด้วยวิธีนี้ จะได้ผลเช่นเดียวกับการกำหนดค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตเป็นฟิชชีซึ่งเกิดต้น แต่มีข้อจำกัดคือ ควรใช้กับกรณีที่ออกแบบตัวควบคุม โดยกำหนดค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตแบบสมมาตรเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการตีฟิชชีเพิกชั้นด้วยวิธีนี้ จะใช้ค่าที่จุดกึ่งกลางของฟิชชีเซตของตัวแปรเอาต์พุต เพื่อเป็นตัวแทนของแต่ละเซต

ในปฏิญานิพนธ์นี้ กำหนดให้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก ของตัวแปรเอาต์พุต เป็นฟิชชีซึ่งเกิดต้นจึงเลือกใช้วิธี FM ซึ่งจะได้ผลเช่นเดียวกับการใช้วิธี COG

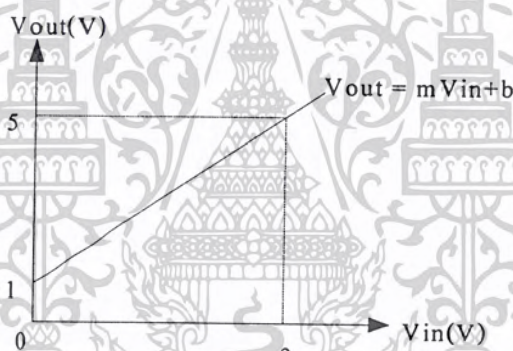
3.3 ทฤษฎี Signal Condition

เนื่องจากสัญญาณที่ใช้จะเป็นสัญญาณมาตรฐาน ที่มีขนาด 4-20 mA และ 1-5 V ซึ่งสัญญาณที่ใช้ส่งระหว่างชุดควบคุมแต่ละชุดจะเป็นสัญญาณกระแสขนาด 4-20 mA ส่วนชุดควบคุมแต่ละชุด จะรับสัญญาณอินพุตเป็นแรงดัน ซึ่งจะมีขนาดแตกต่างกันเพราะฉะนั้นจึงต้องมีการปรับแต่งสัญญาณให้มีลักษณะตามความต้องการของแต่ละชุดควบคุม

3.3.1 วงจร Zero

วงจร Zero เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ปรับแต่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Instrument Amplifier ให้อยู่ในระดับ 1-5 V โดยที่สัญญาณที่ออกจาก Instrument Amplifier จะมีขนาด 0-3 V

การออกแบบวงจร Zero จะใช้วิธีการคำนวณโดยการประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรงโดยการกำหนดให้แกน X แทนแรงดันไฟฟ้าทางด้าอินพุต และแกน Y แทนแรงดันไฟฟ้าทางด้า Output กราฟสมการเส้นตรงแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 แสดงสมการเส้นตรงที่ใช้คำนวณ

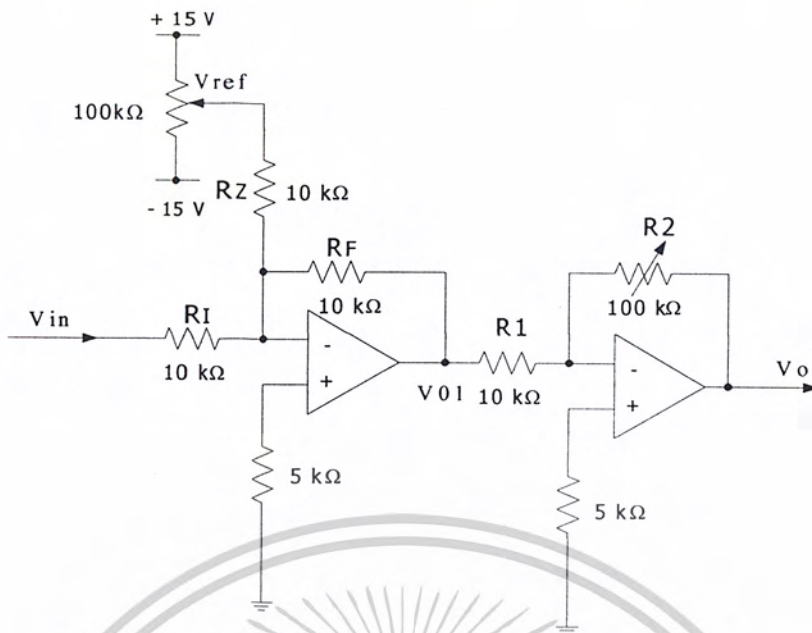
จากกราฟข้างบนเมื่อ

$$v_{in} = 0 - 3V$$

และ

$$v_{out} = 1 - 5V$$

วงจรที่ใช้แสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 แสดงวงจรเปลี่ยนระดับแรงดัน

สมการที่ใช้คำนวณสามารถแสดงได้ดังนี้

$$v_{o1} = -\frac{R_F}{R_I} v_{in} - \frac{R_F}{R_Z} v_{ref} \tag{3.3}$$

$$= -v_{in} - v_{ref} = -(v_{in} + v_{ref})$$

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_{o1} \tag{3.4}$$

$$= \frac{R_2}{R_1} (v_{in} + v_{ref})$$

$$\therefore m = \frac{R_2}{R_1}$$

$$b = -\frac{R_2}{R_1} v_{ref}$$

จาก $v_{in} = 0 - 3V$

$v_{out} = 1 - 5V$

จะได้
$$m = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{[v_{out}(\max) - v_{out}(\min)]}{[v_{in}(\max) - v_{in}(\min)]} \tag{3.5}$$

$$= \frac{(5 - 1)}{(3 - 0)} = 1.333$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก $m = \frac{R_2}{R_1}$ (3.6)

$R_2 = 13.33k\Omega$ เลือก $R_2 = 100k\Omega$ (กำหนด R_2 เป็น R ที่ใช้ปรับ Span ของ วงจร)

$$R_1 = \frac{R_2}{m} = \frac{13.33k\Omega}{1.333} = 10K\Omega \text{ เลือก } R_1 = 10k\Omega$$

หาค่า b ได้จากสมการเส้นตรง

$$v_o = mv_{in} + b \quad (3.7)$$

เมื่อ $v_{in} = 0V$ จะได้ $v_o = 1V$ (3.8)

และ $v_{in} = 3V$ จะได้ $v_o = 5V$ (3.9)

สมการที่ (3.8) แทนในสมการที่ (3.7) จะได้

$$1 = m(0) + b$$

$$b = 1$$

$$\therefore \frac{R_2}{R_1} v_{ref} = b$$

$$v_{ref} = -\frac{R_1}{R_2} b$$

$$= -0.750V$$

พิจารณาเมื่อ $v_{in} = 0V$

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_{in} - v_{ref})$$

$$= 1.333(0 - (-0.750))$$

$$= 1V$$

พิจารณาเมื่อ $v_{in} = 3V$

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_{in} - v_{ref})$$

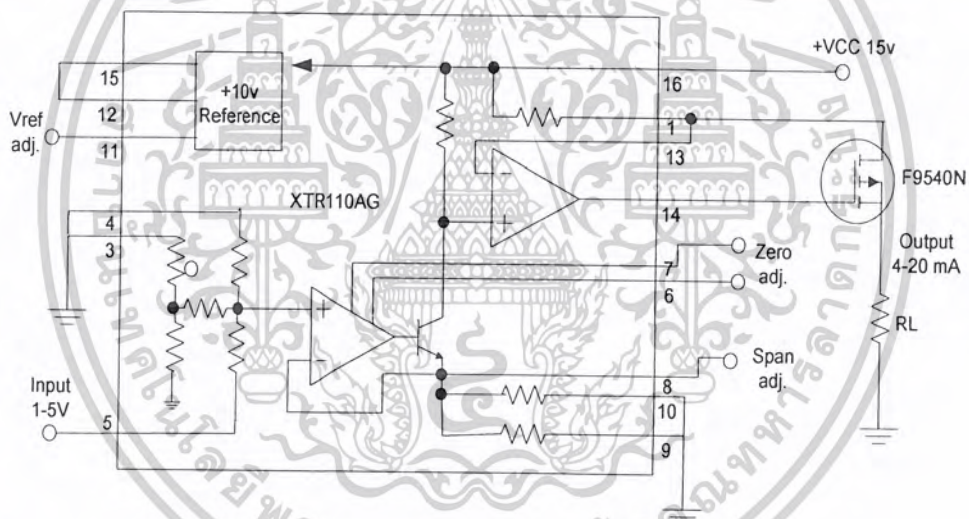
$$= 1.333(3 - (-0.750))$$

$$= 5V$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 Voltage to Current Circuit

การส่งสัญญาณระหว่างชุดควบคุมแต่ละชุดจะส่งเป็นสัญญาณกระแสขนาด 4-20 mA แต่สัญญาณที่ออกจากชุดควบคุมจะเป็นสัญญาณแรงดัน เพราะฉะนั้นจะต้องมีวงจรที่ต้องทำหน้าที่แปลงสัญญาณแรงดันเป็นสัญญาณกระแส โดยที่วงจรนี้จะใช้ไอซี 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันที่ออกจากชุด Instrument Amplifier ซึ่งแรงดันที่ออกจาก Instrument Amplifier จะผ่านวงจรขยายแรงดันและผ่านวงจรปรับระดับสัญญาณ ทำให้มีขนาดแรงดัน 1-5 V และแรงดัน 1-5 V นี้ก็จะต้องแปลงให้เป็นสัญญาณกระแสขนาด 4-20 mA เพื่อส่งไปเข้าวงจร Microcontroller และอีกส่วนหนึ่งก็คือแรงดันที่ออกจาก Microcontroller ซึ่งมีขนาด 0-2.5 V ก็ต้องแปลงให้เป็นสัญญาณกระแสที่มีขนาด 4-20 mA เพื่อส่งไปเข้าชุด Final Control Element (ชุดขับเคลื่อน) ต่อไปวงจรที่ใช้สำหรับแปลงแรงดันเป็นกระแสจะใช้ไอซีเบอร์ XTR101AG ซึ่งจะเป็นไอซี voltage-to-current converter/transmitter ต่อกับ p-channel MOSFET เบอร์ F9540N เพื่อทำหน้าที่ขับกระแส แสดงในภาพที่ 3.5



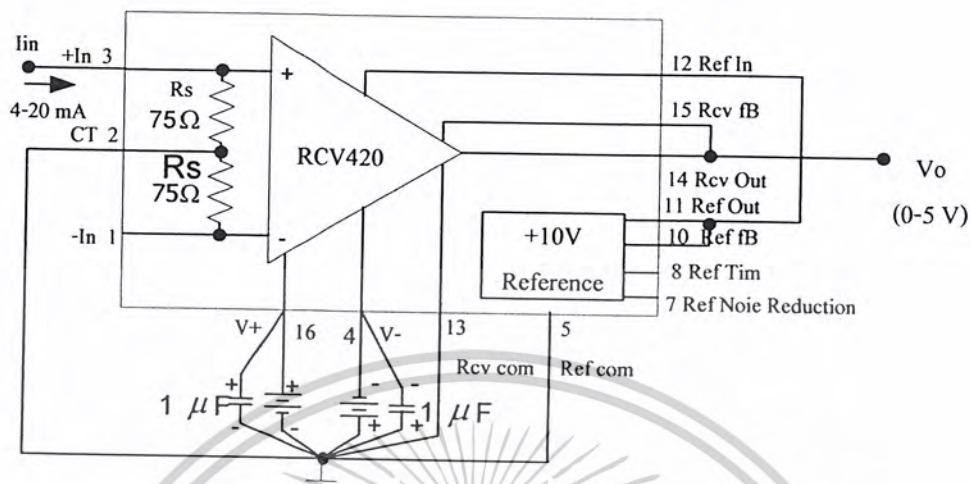
ภาพที่ 3.5 แสดงวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

3.3.3 Current to Voltage Circuit

เป็นวงจรสำหรับแปลงสัญญาณกระแสเป็นสัญญาณแรงดัน โดยจะแปลงสัญญาณกระแสขนาด 4-20 mA ที่ส่งมาจากชุด Sensor and Transmitter ให้เป็นสัญญาณแรงดันที่มีขนาด 0-2.5 V เพื่อส่งเข้าชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์มีแรงดันอ้างอิงที่ 2.5 V และรับค่าแรงดันแบบอนาล็อกจากชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อส่งให้ IC Power Operational Amplifier เปลี่ยนระดับสัญญาณแรงดัน 0-2.5 V นี้เป็นสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA วงจรเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสเป็นแรงดันนี้จะใช้ไอซีเบอร์ RCV 420 ซึ่งไอซีเบอร์นี้จะมีอินพุตเป็นกระแสขนาด 4-20 mA และเอาต์พุตขนาด 0-5 V วงจรการต่อใช้งานแสดงใน ภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 แสดงการต่อวงจรแปลงกระแสเป็นแรงดันโดยใช้ IC RCV420

3.4 ลักษณะรูปแบบของกระบวนการ

แบบ กระบวนการจำลอง ได้ถูกออกแบบให้มีหลายลักษณะเพื่อสามารถเลือกใช้งานตามความเหมาะสม โดยในที่นี้ขอแบ่งรูปแบบของกระบวนการจำลองตามลักษณะของตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุต

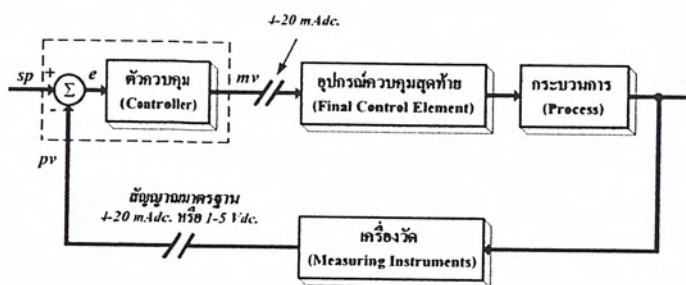
1. กระบวนการที่มีตัวแปรอินพุตเดียวและเอาต์พุตเดียว (Single Input Single Output Process : SISO)
2. กระบวนการที่มีตัวแปรอินพุตหลายตัวแปรและตัวแปรเอาต์พุตหลายตัวแปร (Multi Input Multi Output Process : MIMO)

โดยกระบวนการแบบ SISO เมื่อนำไปทดลองในด้านการควบคุมสามารถอาศัยหลักทฤษฎีแบบ Classical ในการศึกษาและออกแบบควบคุม กระบวนการแบบ MIMO ซึ่งเป็นระบบหลายตัวแปรอินพุตและหลายตัวแปรเอาต์พุต เป็นระบบที่ยุ่งยากซับซ้อน การสร้างแบบจำลองกระบวนการควบคุมระดับน้ำแบบ MIMO ก็เพื่อใช้เป็นชุดทดลองศึกษากระบวนการแบบ Multivariable Process Control และสามารถนำมาใช้ทดลองทางด้านการควบคุมที่อาศัยหลักการควบคุมแบบ Modern control และ Classical control ในการศึกษาซึ่งในรูปแบบกระบวนการแบบ MIMO ที่จัดรูปแบบในกระบวนการแบบ 4 ถึง 2 ตัวแปรอินพุตและ 2 ตัวแปรเอาต์พุตไว้คือ

Quadruple Tank Process

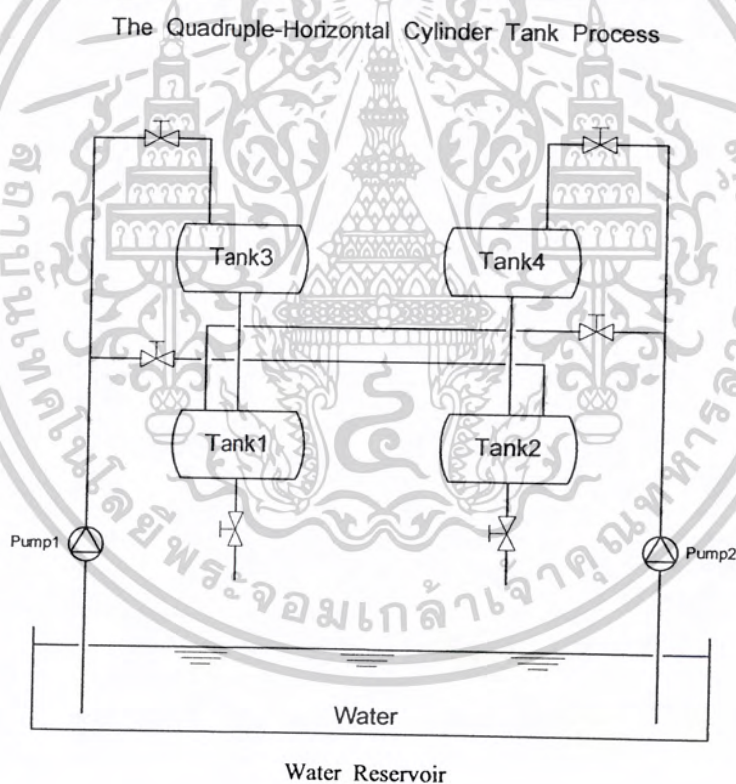
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในส่วนของปริญาณิพจน์เล่มนี้จะอ้างอิงในรูปแบบของ Classical control ในการทดลองที่มีรูปแบบดังรูปสำหรับกระบวนการแบบ SISO



ภาพที่ 3.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

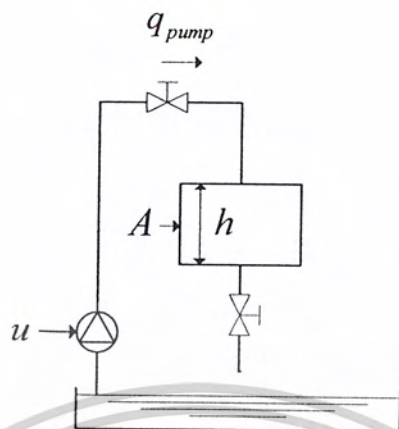
3.4.1 แบบจำลองของกระบวนการ



ภาพที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์ที่ประกอบอยู่ในกระบวนการจำลองและไดอะแกรมของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

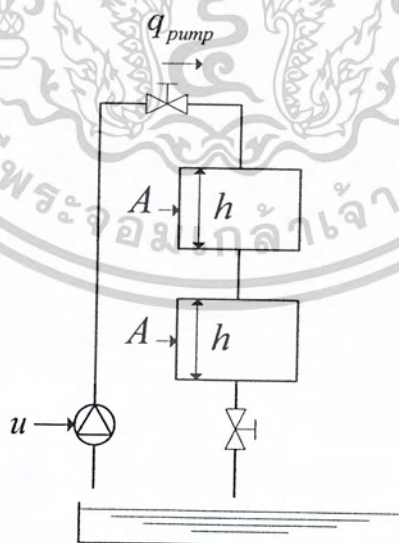
3.4.2 กระบวนการอันดับหนึ่ง (First Order System)



ภาพที่ 3.9 แสดงรูปแบบของกระบวนการอันดับหนึ่ง

จากภาพที่ 3.9 เมื่อต้องการทดสอบในกระบวนการอันดับหนึ่งจะทำการเปิด Valve ดังภาพ โดยจะมีวาล์วในการควบคุมอยู่สองตัวคือ วาล์วที่ใช้ควบคุมปริมาณของน้ำที่จะไหลเข้าถัง ซึ่งจะเป็นการแบ่งปริมาณที่จะเข้าอีกถังหนึ่ง และวาล์วที่ใช้ในการควบคุมปริมาณไหลออกของถัง

3.4.3 กระบวนการอันดับสอง (Second Order System)

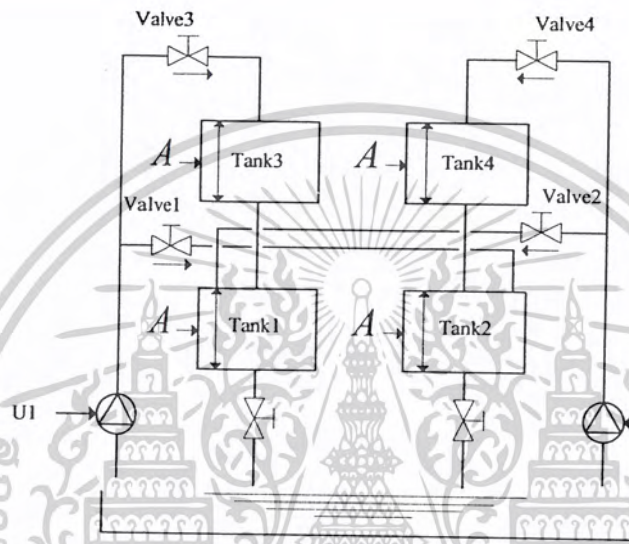


ภาพที่ 3.10 แสดงกระบวนการจำลองอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 3.10 เป็นกระบวนการควบคุมอันดับสองโดยเป็นแบบหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต โดยที่ไม่มีผลกระทบต่อกัน และเป็นการควบคุมระดับน้ำในถังด้านล่าง โดยปล่อยน้ำเป็นอินพุตเข้าสู่ด้านบน มีวาล์วช่วยในการปรับปริมาณของน้ำที่ไหลออกจากถัง

3.4.4 กระบวนการที่มีหลายตัวแปรอินพุตหลายตัวแปรเอาต์พุต (MIMO: Quadruple Tank)



ภาพที่ 3.11 แสดงกระบวนการแบบ 4 ถัง (Quadruple Tank Process)

จากภาพที่ 3.11 แสดงกระบวนการที่มีตัวแปรสองอินพุตสองเอาต์พุต โดยอินพุตจะเป็น U_1 และ U_2 ซึ่งไปควบคุมมอเตอร์ปั้มน้ำตัวที่หนึ่งและสองตามลำดับ และจะมีวาล์วในการปรับปริมาณของน้ำที่ไหลเข้าและไหลออก ตามลักษณะของที่จะทำการควบคุม

3.4.5 โครงสร้างแบบของกระบวนการ

จากรูปแบบกระบวนการจำลองดังที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่ารูปแบบกระบวนการสามารถปรับรูปแบบได้หลายลักษณะจากการควบคุมช่องทางการไหลของกระบวนการ จาก Valve On-Off และสำหรับปรับพารามิเตอร์ของกระบวนการสามารถปรับได้จากทางเข้าและทางออก

บทที่ 4

การออกแบบและการสร้างเครื่องควบคุมระดับน้ำในถัง ทรงกระบอกแนวนอนโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

4.1 กล่าวนำ

โดยปกติตัวควบคุม แบบพีซีจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เป็นหลัก ซึ่งทำให้มีขนาดใหญ่และมีความสิ้นเปลืองสูง ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ดังนั้นจึงได้เสนอตัวควบคุมแบบพีซีที่พัฒนาขึ้นจากไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ADuC812 ของ Analog device ซึ่งมีขนาดเล็กและซับซ้อนน้อยกว่าเครื่องคอมพิวเตอร์ และมี Analog-to-Digital จำนวน 8 ช่องสัญญาณ Digital-to-Analog จำนวน 2 ช่องสัญญาณ ซึ่งมีความสะดวกและเพียงพอที่จะทำการควบคุมระบบ ตลอดจนมีการทำงานที่ถูกต้องและรวดเร็ว ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

4.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ADuC812

4.2.1 คุณสมบัติ

Analog I/O

- 8-Channel, High Accuracy 12-Bit ADC
- On-Chip, 100 ppm/°C Voltage Reference
- High Speed 200 kSPS
- DMA Controller for High Speed ADC-to-RAM Capture
- 2 12-Bit Voltage Output DACs
- On-Chip Temperature Sensor Function

Memory

- 8K Bytes On-Chip Flash/EE Program Memory
- 640 Bytes On-Chip Flash/EE Data Memory
- 256 Bytes On-Chip Data RAM
- 16M Bytes External Data Address Space
- 64K Bytes External Program Address Space

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8051 Compatible Core

12 MHz Nominal Operation (16 MHz Max)

3 16-Bit Timer/Counters

High Current Drive Capability—Port 3

9 Interrupt Sources, 2 Priority Levels

Power

Specified for 3 V and 5 V Operation

Normal, Idle, and Power-Down Modes

On-Chip Peripherals

UART and SPI® Serial I/O

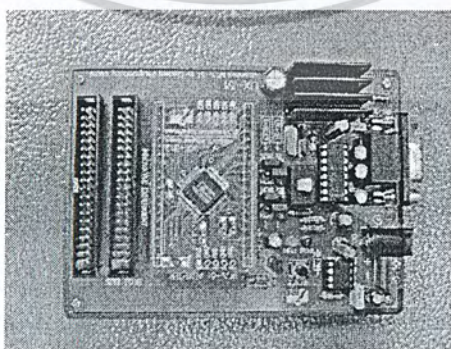
2-Wire (400 kHz I2C® Compatible) Serial I/O

Watchdog Timer

Power Supply Monitor

4.2.2 ลักษณะทั่วไป

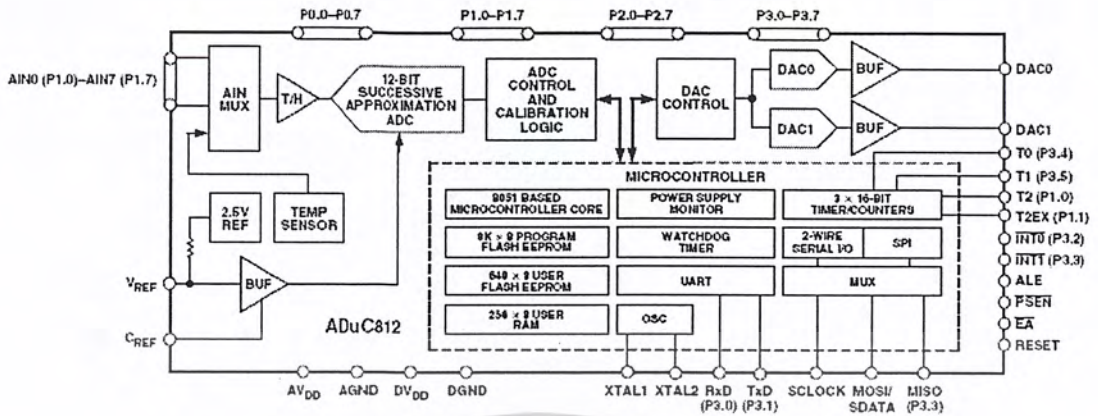
ไอซีเบอร์ ADuC812 เป็นการรวบรวมระบบข้อมูล 12 บิตเข้าด้วยกัน ที่มีประสิทธิภาพในการสอบเทียบในตัวเองสูง มี Analog to Digital 8 ช่อง , Digital to Analog 2 ช่องสัญญาณ 8 บิต MCU บนชิปเดียว มี Flash/EE program memory 8 Kbyte, 640 byte Flash/EE data memory และ 256 bytes data SRAM on-chip มีการเพิ่มเติม Watchdog Timer และ ADC DMA function Thirty-two programmable I/O lines, มีการส่งข้อมูลทั้งแบบ I2C และ SPI Serial Port I/O การแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอลสามารถมีแรงดันอ้างอิง 5 โวลต์หรือ 3 โวลต์ก็ได้ภาพที่ 4.1 แสดงไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ใช้ร่วมกับบอร์ดทดลอง ซึ่งมีโครงสร้างภายในดังภาพที่ 4.2 และโครงสร้างภายนอกดังภาพที่ 4.3



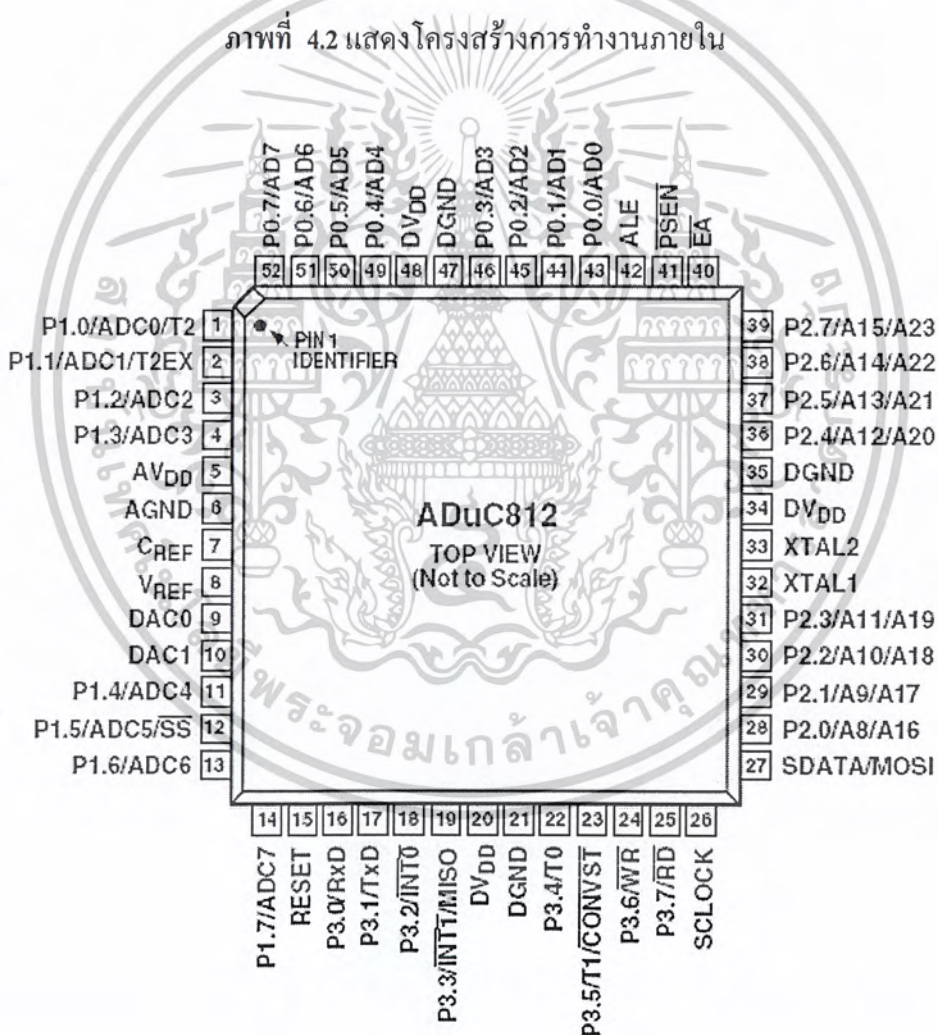
ภาพที่ 4.1 แสดงไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ร่วมกับบอร์ดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



ภาพที่ 4.2 แสดงโครงสร้างการทำงานภายใน



ภาพที่ 4.3 แสดงโครงสร้างภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 รายละเอียดของ ADC

Integral Nonlinearity

เป็นค่าเบี่ยงเบนสูงสุดของ Code ต่าง ๆ จากแนวเส้นตรงที่ผ่านจุดสุดท้ายของฟังก์ชันการแปลง ADC จุดสุดท้ายของการแปลง คือจุดต่ำสุดของสเกล (Zero scale) ที่จุดต่ำกว่า $1/2$ LSB จะเป็นจุดแรกที่ทำให้การแปลง และค่าเต็มสเกลจะเป็นจุดสุดท้ายที่อยู่สูงกว่า $1/2$ LSB

Differential Nonlinearity

เป็นค่าความแตกต่างที่วัดได้ และเป็นค่าในอุดมคติหนึ่งบิตที่มีการเปลี่ยนแปลง ระหว่างค่าหนึ่งไปอีกค่าหนึ่งที่อยู่ถัดไป

Offset Error

เป็นค่าเบี่ยงเบนของ Code ตัวแรกที่ทำให้การแปลง (0000 ... 000) ถึง (0000 ... 001) จากค่าในอุดมคติ ประมาณ $+1/2$ LSB

Full-Scale Error

เป็นค่าเบี่ยงเบนของ Code ตัวสุดท้ายที่ทำให้การแปลงจากค่าแรงดัน AIN ในอุดมคติ (Full Scale – 1.5 LSB) หลังจาก offset error ถูกปรับแล้ว

4.2.4 รายละเอียดของ DAC

Relative Accuracy

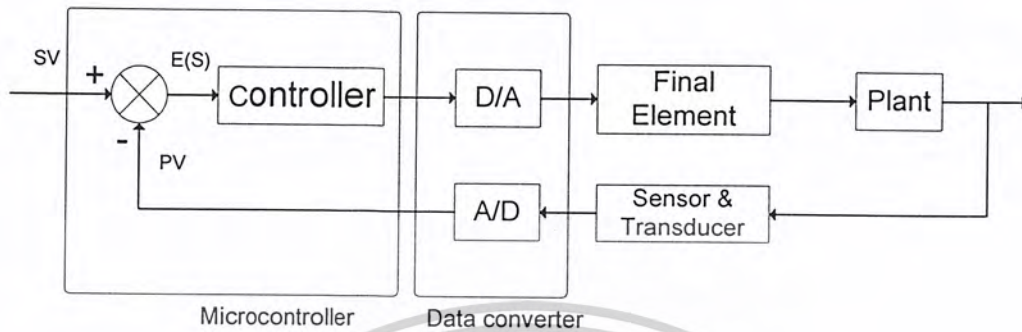
ความถูกต้องหรือความแม่นยำเชิงเส้นที่วัดของค่าเบี่ยงเบนสูงสุด จากเส้นตรงที่ลากผ่านจุดสุดท้ายของฟังก์ชันการแปลง Digital to Analog เป็นค่าที่วัดหลังจากการปรับ zero-scale error และ full-scale error แล้ว

Voltage Output Settling Time

เป็นค่าของเวลาทั้งหมดที่ทำให้การผลิตเอาต์พุต จากที่ไม่มีค่าใด ๆ เป็นค่าที่ต้องการค่าหนึ่ง หลังจากอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงเต็มสเกล Digital-to-Analog Glitch Impulse เป็นค่าของประจุที่ป้อนให้อินพุตเอาต์พุต เมื่ออินพุตมีการเปลี่ยนแปลงสถานะ ค่าดังกล่าวจะถูกระบุเป็น nV sec

4.3 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์

จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรและอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์ว่าในระบบควบคุม ที่ออกแบบประกอบด้วยส่วนต่างๆ อะไรบ้าง ส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมมีส่วนประกอบดังนี้



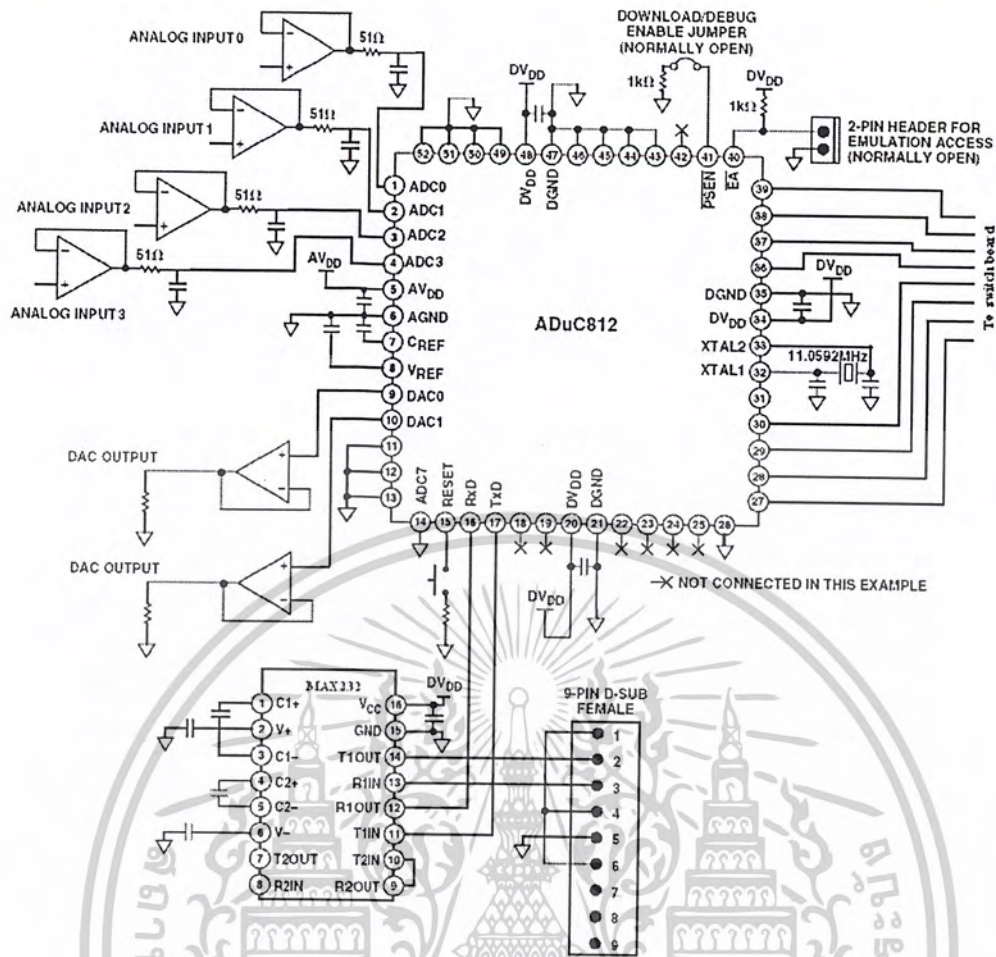
ภาพที่ 4.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม

จาก Block Diagram ของระบบจะเห็นว่ามีส่วนประกอบต่างๆ 5 ส่วนดังนี้

1. Plant
2. Sensor & Transducer ทำหน้าที่ในการวัดระดับน้ำใน Plant และส่งสัญญาณมาที่ชุด Data converter
3. Data Converter ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอกและอนาลอกเป็นดิจิทัล
4. Microcontroller ทำหน้าที่ในการรับค่า Setpoint และประมวลผลเพื่อควบคุมให้ได้ค่าเอาต์พุตตามที่ต้องการ
5. Final Element ทำหน้าที่ในการรับค่าสัญญาณควบคุมจากชุดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก เพื่อนำค่าดังกล่าวมาเข้าสู่ขั้วมอเตอร์ปั้มน้ำ

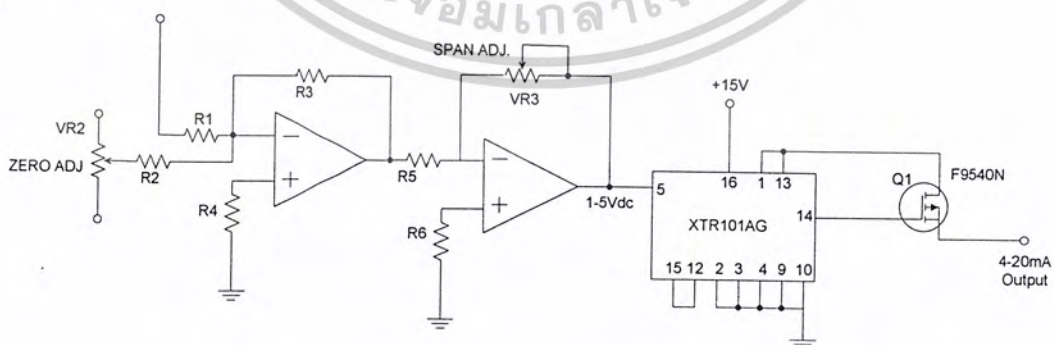
4.3.1 การออกแบบไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ADuC812 สามารถติดต่อกับวงจรภายนอกได้นั้นจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เสริมเข้ามาต่อรวม เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และป้องกันการเกิดอันตราย ที่จะเกิดกับไมโครคอนโทรลเลอร์อุปกรณ์ที่นำมาต่อรวมนั้นเป็นออปแอมป์ มีการต่อเป็นบัฟเฟอร์ เพื่อเป็นอุปกรณ์เสริม ในการส่งผ่านแรงดันที่จะเข้าตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ และแรงดันที่ส่งออกมาจากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 4.5 แสดงการต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับวงจรภายนอก

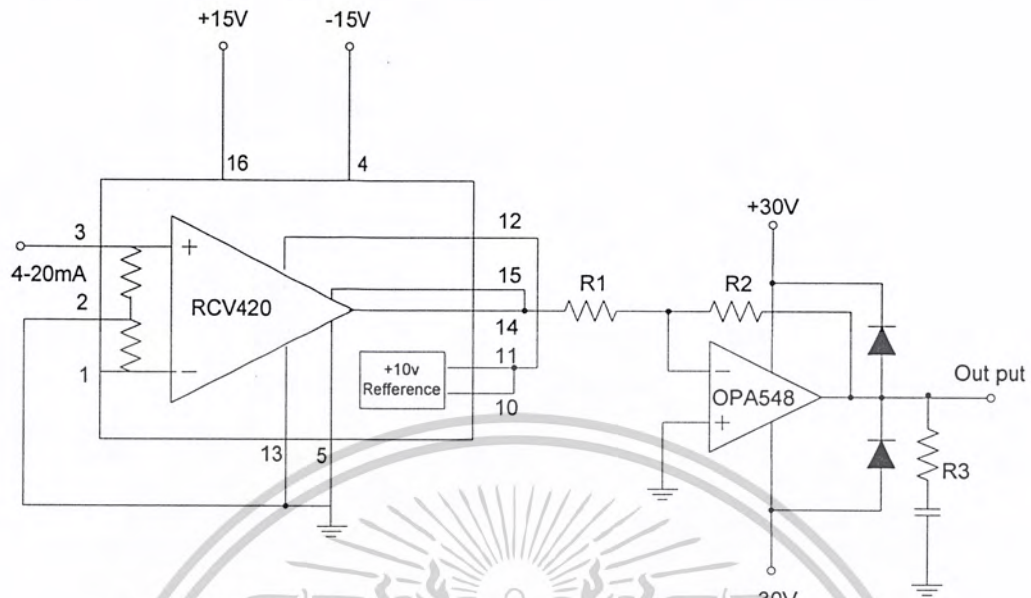
4.3.2 การออกแบบและสร้างวงจรในการปรับระดับและตั้งค่า Setpoint Variable จากชุดไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 4.6 แสดงการต่อวงจรชุดปรับระดับสัญญาณและส่งกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

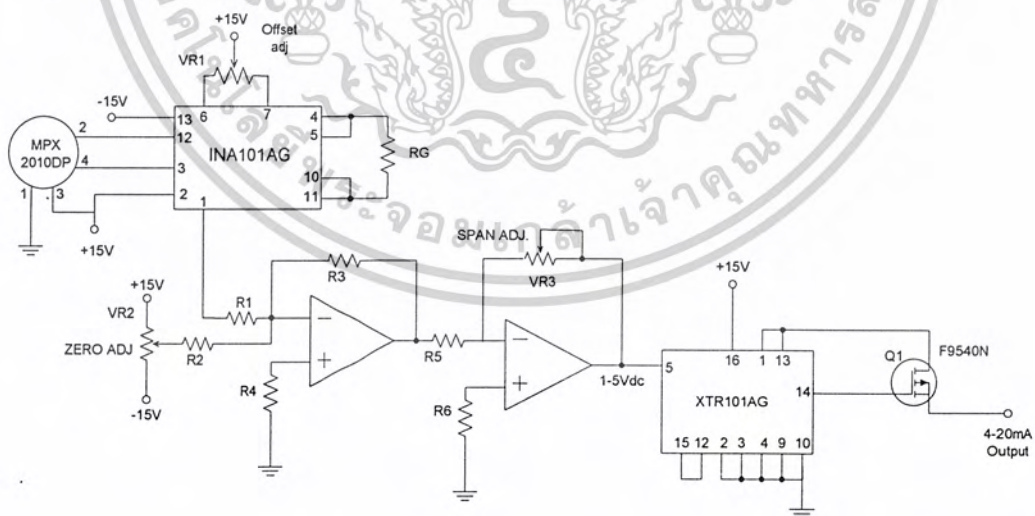
4.3.3 การออกแบบและสร้างวงจรในการรับค่า Process variable และปรับระดับสัญญาณเพื่อเข้าสู่ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 4.7 แสดงการต่อวงจรชุดขับมอเตอร์

4.3.4 SENSOR และ TRANSMITTER

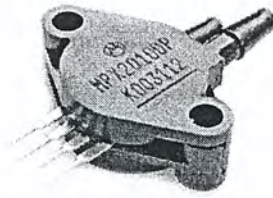
เป็นชุดที่ใช้สำหรับวัดระดับน้ำในถังโดยวัดระดับน้ำจาก 0 % ถึง 100 % แล้วปรับสัญญาณที่ออกมาให้อยู่ในรูปสัญญาณมาตรฐาน โดยมีขนาด 1-5 V และ 4-20 mA โดยวงจรที่ใช้สามารถแสดงได้ ดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 แสดงชุด Sensor และ Transmitter

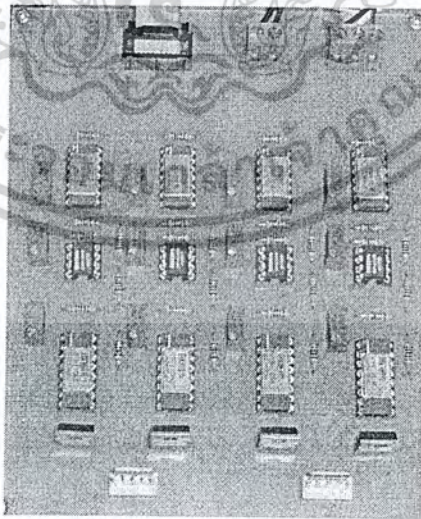
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 คุณสมบัติของ Differential Pressure Transmitter เบอร์ MPX2010DP



ภาพที่ 4.9 แสดง Differential Pressure Transmitter เบอร์ MPX2010DP

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่วัดระดับน้ำของถังทรงกระบอกแนวนอน โดยใช้หลักการของความดันแตกต่าง ซึ่งจะให้ความดันบรรยากาศเป็นความดันอ้างอิงต่อเข้ากับด้าน LOW ของตัวเซนเซอร์ อุปกรณ์เซนเซอร์ ที่ใช้คือ MPX 2010 DP เมื่อระดับน้ำในถังมีการเปลี่ยนแปลงระดับ จะทำให้ความดันเปลี่ยนแปลงความดันที่ได้จากตัวเซนเซอร์จะออกมาในรูปของแรงดันไฟฟ้า ความไวของตัวเซนเซอร์ มีค่าเท่ากับ 205 mV/Kpa ค่าแรงดันที่ได้จาก ตัวเซนเซอร์ จะต้องนำไปเข้าวงจรขยายให้ได้แรงดันอยู่ในช่วงสัญญาณมาตรฐานคือ 1-5 V โดยใช้ไอซี Instrumentation Amplifier เป็นตัวขยายแรงดันไฟฟ้า ที่ออกจากตัวเซนเซอร์ซึ่งมีค่าต่ำมาก และออกแบบชุด Signal Condition เพื่อทำหน้าที่ในการปรับ Zero และ Span ให้ได้ระดับสัญญาณมาตรฐานในรูปของแรงดันออกมาตามที่ต้องการ และในการส่งสัญญาณในระยะทางที่ไกลๆ มีความจำเป็นที่จะต้องส่งให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้า เนื่องจากปัญหาของแรงดันที่ตกคร่อมในสายตัวนำ ฉะนั้นจึงต้องมีการแปลงสัญญาณแรงดัน 1-5 V ให้อยู่ในรูปของกระแส 4-20 mA โดยใช้วงจรดังแสดงในภาพที่ 4.10

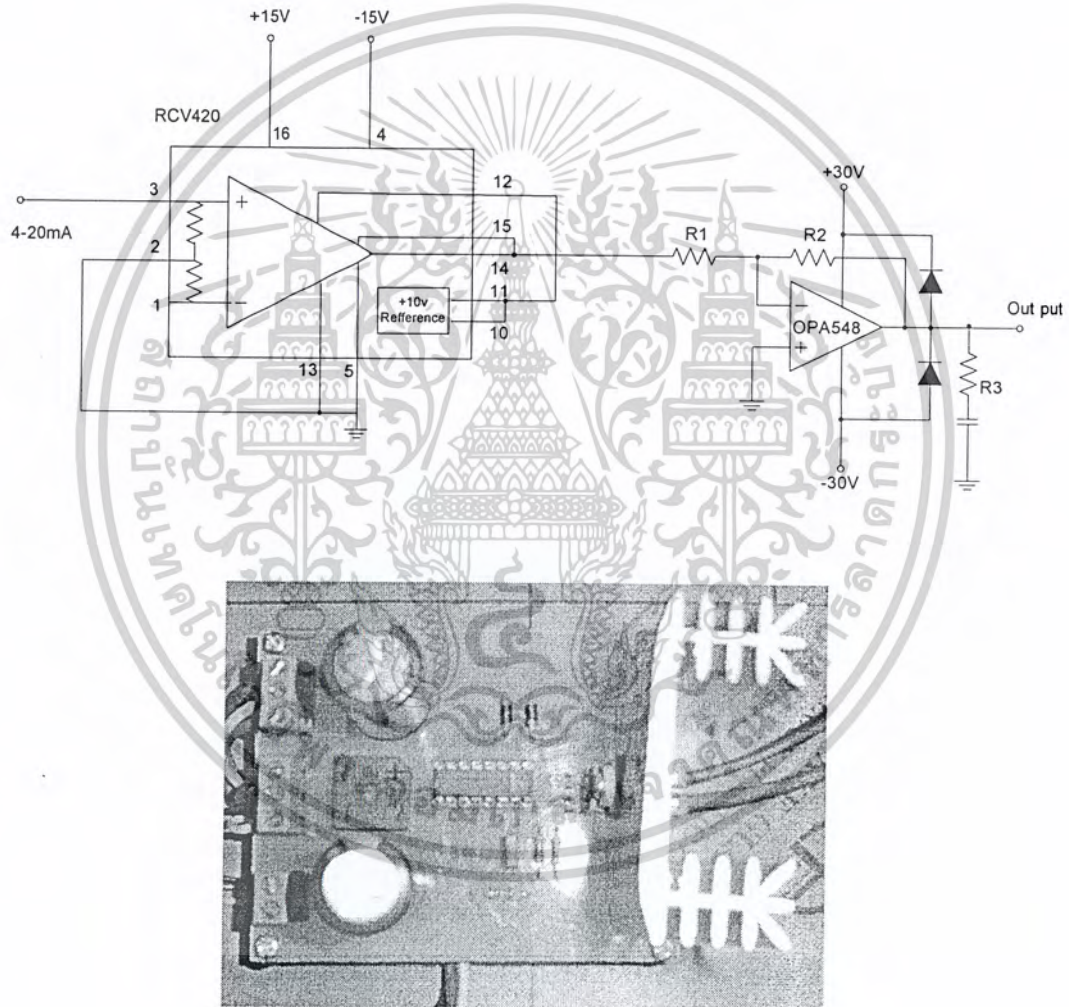


ภาพที่ 4.10 แสดงวงจรชุด Signal condition and transmitter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6 FINAL CONTROL ELEMENT

ในส่วนของ Final Control Element จะประกอบไปด้วยวงจร Drive Motor และ Motor Pump ในส่วนของชุด Drive Motor นั้นใช้ IC Power Operational Amplifier เบอร์ OPA548T เป็นตัว Drive Motor ซึ่งสามารถจ่ายกระแสได้ถึง 3 แอมแปร์ โดยจะมี IC เบอร์ RCV420 ทำหน้าที่รับสัญญาณควบคุมขนาด 4-20 mA ที่ได้รับมาจากในส่วนของ Controller แปลงให้เป็นแรงดันขนาด 0-5 V เพื่อส่งให้ IC Power Operational Amplifier ที่มีอัตราขยายเท่ากับ 4.8 เท่า ทำการขยายแรงดัน โดยที่เมื่อสัญญาณควบคุมมีขนาด 4 mA จะได้แรงดันที่เอาต์พุต 0 V และเมื่อสัญญาณควบคุมมีขนาด 20 mA จะได้แรงดันที่เอาต์พุต 24 V

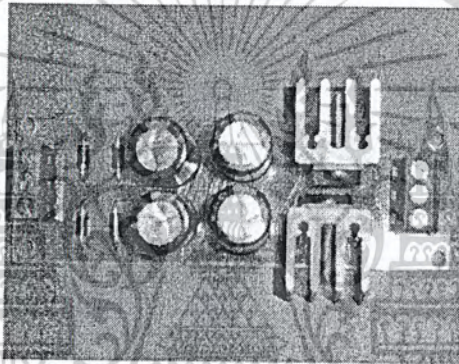
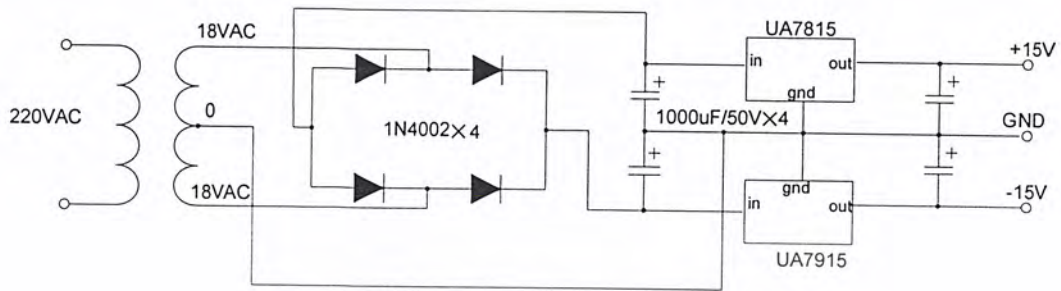


ภาพที่ 4.11 แสดงวงจรชุดขับมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.7 ชุดภาคจ่ายไฟ

เป็นชุดจ่ายไฟให้กับวงจรต่างๆ ในโครงงานนี้ ซึ่งมีอินพุทโวลต์เตจ 18-0-18 V AC และมีเอาต์พุทโวลต์เตจขนาด บวก-ลบ 15 โวลต์

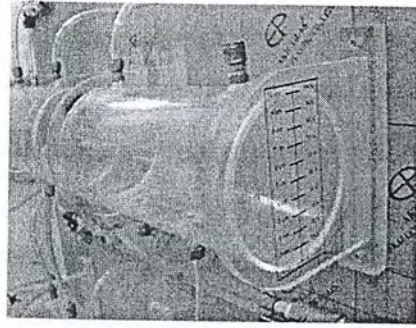


ภาพที่ 4.12 แสดงวงจรชุดจ่ายไฟ บวก-ลบ 15 โวลต์

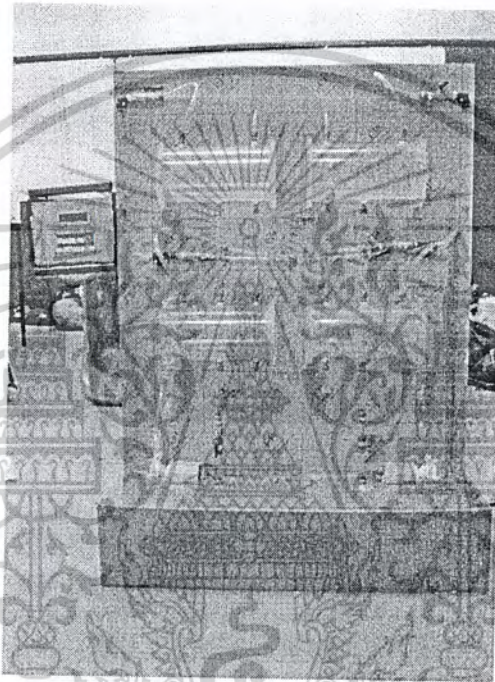
4.4 การออกแบบและสร้าง Plant ทดลอง

Plant ที่ออกแบบและสร้างขึ้นนั้นประกอบด้วยถังกระบอกแนวนอนทั้งหมด 4 ถัง โดยนำมาวางเรียงกันตามรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้ โดยมีการติดตั้งวาล์วเพิ่มเติมเข้าไป และสายที่ใช้จะเป็นสายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6 มิลลิเมตรสำหรับเป็นทางเข้าและทางออกของน้ำ และจะมีการต่อสายของน้ำ เพื่อทำการวัดความดันที่เกิดจากระดับน้ำในแต่ละถัง โดยจะใช้สายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร และมีการติดสเกลบอกระดับน้ำในแต่ละถัง โดยบอกระดับเป็นแบบเซนติเมตรและเปอร์เซ็นต์ โดยการเดินสาย การวางถัง การติดตั้งวาล์ว ตลอดจนถึงการวางตำแหน่งของปั๊มจะต้องมีความเหมาะสม เพื่อเป็นการลดปัญหาการเกิดความดันที่อาจจะเกิดขึ้น เมื่อประกอบเสร็จจะต้องมีรูปแบบของการควบคุมตามรูปแบบที่ออกแบบไว้ด้วย

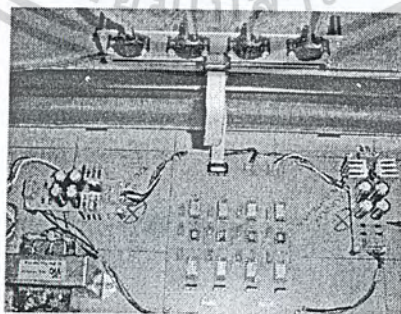
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.13 แสดงถึงน้ำทรงกระบอกแวนอนที่สร้างขึ้นพร้อมกับสเกลบอกระดับ



ภาพที่ 4.14 แสดงชุดทดลองที่ประกอบสมบูรณ์ (ด้านหน้า)



ภาพที่ 4.15 แสดงการต่อวงจรทางด้านหลังของชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

บทนี้เป็นการนำเอาอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์และตัวควบคุมมาทำการทดลอง ซึ่งอาจจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ การทดลองอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง และการทดลองการนำเอาตัวควบคุมไปควบคุมกระบวนการจริง

5.1 การทดลองอุปกรณ์ที่ใช้ในชุดทดลอง

ในส่วนนี้จะแสดงผลการทดลองที่ได้จากอุปกรณ์ 3 ชุดด้วยกันคือ ผลการทดลองที่ได้จากวงจร Pressure Transmitter ผลการทดลองจากวงจรแปลงสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA เป็นแรงดัน 0-5 V และวงจรขับมอเตอร์

5.1.1 วงจร Pressure Transmitter

ทำการทดลองโดยการปรับระดับน้ำใน Plant ให้มีค่าตั้งแต่ 0% ถึง 100% แล้วทำการวัดค่าสัญญาณที่ Output ที่ออกมาจะต้องมีค่า 1 ถึง 5 V และและผ่านวงจรขับกระแสจะต้องมีค่า 4 ถึง 20 mA

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองวงจร Pressure Transmitter

ระดับน้ำในถัง (%)	ระดับแรงดัน Output (V)	กระแส OUTPUT (MA)
0	1.00	4
10	1.42	5.55
20	1.81	7.07
30	2.23	8.6
40	2.59	10.23
50	3.09	11.84
60	3.46	13.45
70	3.81	15.13
80	4.25	16.77
90	4.61	18.54
100	5.00	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 วงจรแปลงสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA เป็นแรงดัน 0-5 V

ทำการทดลองโดยป้อนแหล่งจ่ายคงที่ที่ระดับต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.2 แล้ววัดสัญญาณเอาต์พุต ของวงจรแปลงสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA เป็นแรงดัน 0-5 V โดยใช้ไอซีแปลงกระแสเป็นแรงดัน เบอร์ RCV 420

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองวงจรแปลงสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA เป็นแรงดัน 0-5 V

กระแส Input(mA)	Voltage Output1 (V)
4.000	0.003
5.000	0.31332
6.000	0.62627
7.000	0.93870
8.000	1.2516
9.000	1.5642
10.000	1.8770
11.000	2.1900
12.000	2.5025
13.000	2.8155
14.000	3.1283
15.000	3.4410
16.000	3.7537
17.000	4.0665
18.000	4.3752
19.000	4.6924
20.000	5.0050

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

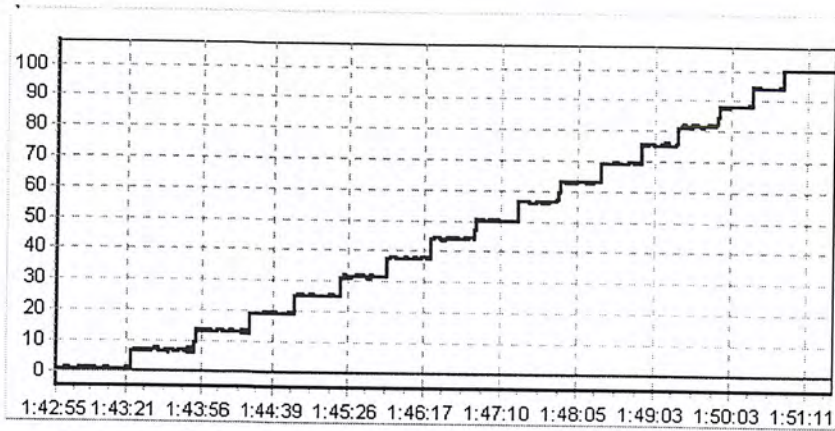
5.1.3 วงจรขับมอเตอร์

เป็นวงจรขยายแรงดันด้วย ใช้ IC Power Operational Amplifier ซึ่งมีเกนส์การขยาย 4.8 เท่าต่อร่วมกับ IC เบอร์ RCV420 เพื่อแปลงกระแส 4-20 mA เป็นแรงดัน 0-5V จะทำให้เอาต์พุตของวงจรมีค่า 0-24 V และทำการทดลองโดยป้อนกระแสค่าคงที่ที่ระดับต่างๆ ดังตารางที่ 5.3 แล้ววัดสัญญาณที่เอาต์พุตของวงจร

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดลองวงจรขับมอเตอร์

กระแส Input(mA)	Voltage Output1 (V)
4.000	0.0082
5.000	1.5033
6.000	3.0060
7.000	4.4015
8.000	6.0076
9.000	7.4985
10.000	9.0096
11.000	10.5240
12.000	12.0121
13.000	13.5079
14.000	15.0184
15.000	16.5168
16.000	18.0213
17.000	19.4832
18.000	20.9826
19.000	22.5287
20.000	24.0087

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

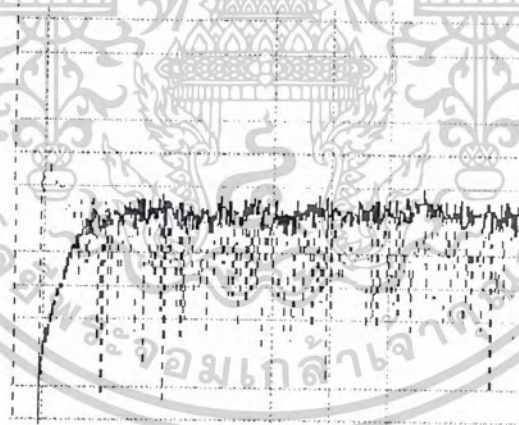


Step up 4-20 mA (0-100%)

ภาพที่ 5.1 แสดงการอ่านค่า PV ในรูปของกราฟ

5.2 การทดลองการนำตัวควบคุมไปควบคุมกระบวนการจริง

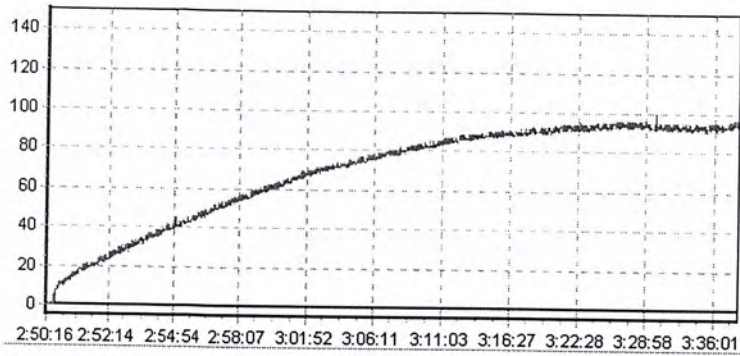
ในหัวข้อนี้เป็นการนำเอากระบวนการจำลองมาทดลองควบคุม โดยการปรับค่าพารามิเตอร์แบบลองผิดลองถูก ซึ่งจากการทดลองนี้เป็นเพียงตัวอย่างการทดลองบางส่วนเพื่อแสดงให้เห็นว่าชุดทดลองการควบคุมระดับน้ำที่ออกแบบสามารถนำไปควบคุมระดับน้ำได้จริง และสามารถที่จะนำตัวอย่าง การทดลองไปพัฒนารูปแบบของการทดลองให้เหมาะสมต่อไป



ภาพที่ 5.2 แสดงการแกว่งของค่า PV

จากภาพที่ 5.2 เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับชุดทดลองที่ทำการสร้างขึ้น พบว่ามีการแกว่งของสัญญาณเอาต์พุตที่อ่านค่ามาจากระดับน้ำ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีสัญญาณรบกวนค่อนข้างสูง และยังมี การแกว่งที่อาจเกิดจากการอ่านค่า ของตัวเซนเซอร์ที่เรานำมาต่อใช้งาน รวมทั้งการกระเพื่อมของ น้ำเนื่องจากการเติมน้ำเข้าสู่ถังตลอดเวลา อีกทั้งความยาวของสายสัญญาณ และลักษณะของ สายสัญญาณ ที่นำมาใช้งานที่ไม่ได้มีการชิลด์เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

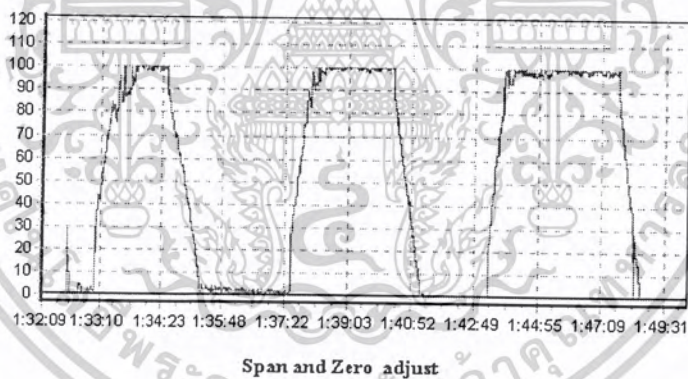
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Open loop MV=35%

ภาพที่ 5.3 แสดงผลการทดลองหลังจากทำการแก้ไขเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนแล้ว

จากภาพที่ 5.3 เป็นการควบคุมแบบระบบเปิด หลังจากทำการลดความยาวของสายไฟลงตลอดจนลักษณะการต่อต่าง ๆ เพื่อให้ได้สัญญาณที่ออกมาดีที่สุดที่สุด ถ้าต้องการให้กราฟออกมาดูดีกว่านี้ต้องทำการฟิลเตอร์ที่ตัวเซนเซอร์ด้วย เพื่อลดสัญญาณรบกวนและความเร็วในการอ่านค่าลง ทำให้กราฟที่ออกมาเรียบมากยิ่งขึ้นจนเกือบเป็นเส้นตรง หรืออาจนำเอาแอมพลิฟายเออร์มาต่อใช้งานเพื่อความสะดวกของสัญญาณมากยิ่งขึ้น

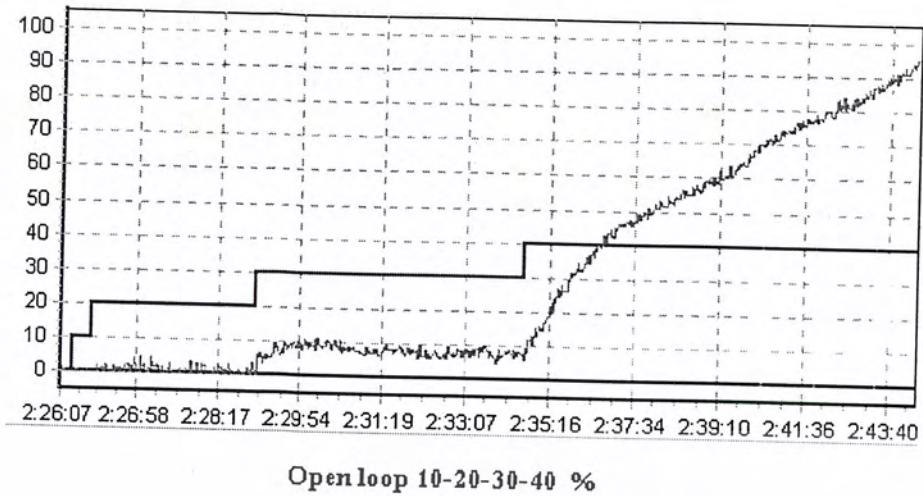


Span and Zero adjust

ภาพที่ 5.4 แสดงการปรับ SPAN-ZERO

เมื่อได้สัญญาณออกมาก่อนข้างนี้ได้แล้ว เราก็ทำการทดลองการปรับ SPAN ที่ระดับน้ำเต็มถึงแล้วปรับให้อ่านค่าแรงดันออกมาเป็น 5 โวลต์หรือได้กระแสออกมาเป็น 20 มิลลิแอมป์ จากนั้นก็ทำการปรับ ZERO ที่ไม่มีน้ำอยู่ในถัง โดยการปรับ SPAN-ZERO ทำการสั่งงานจากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้งสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุต

จากภาพที่ 5.5 เป็นการทดลองเพิ่มค่า MV จากการปรับแบบ Manual โดยเพิ่มขึ้นเป็นแบบ STEP เพื่อทำการดูอัตราการขยายของป้อนตลอดจนคุณลักษณะของชุดทดลองที่สร้างขึ้น โดยมีการปรับวาล์วเพื่อที่จะหาค่าคุณลักษณะของชุดทดลองในขณะนั้น จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าของ SV ในช่วง 30% ถึง 40% จะมีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำค่อนข้างสูง แสดงให้เห็นถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของที่เกิดขึ้นในระบบ

ภาพที่ 5.6 แสดงการทดลองการควบคุมระดับน้ำแบบระบบเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 5.6 เป็นกราฟแสดงผลการทดลองที่เกิดจากการคุมแบบระบบเปิด โดยเป็นการจ่ายค่า $MV = 35\%$ ออกไปโดยตรง เมื่อถึงสภาวะคงที่ (Steady State) อัตราการไหลของน้ำของทางเข้าจะเท่ากับอัตราการไหลของน้ำทางด้านออก จึงเกิดสภาวะคงที่ขึ้น จากชุดทดลองที่สร้างขึ้นจะเห็นได้ว่า จะมีสัญญาณอยู่ช่วงหนึ่งที่เกิดการแกว่งขึ้น อาจเป็นเพราะข้อบกพร่องของชุดทดลองที่อาจจะเกิดจากชุดทดลอง หรือวงจรชุดส่งสัญญาณต่าง ๆ ทั้งนี้ยังต้องทำการศึกษาเพื่อที่จะปรับปรุงแก้ไขจุดบกพร่องนี้ต่อไป

5.2.1 การควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่ง

การควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่ง เป็นการควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียว โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีซซึ่งเป็นตัวควบคุม ซึ่งผลการควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 5.7 ซึ่งจากภาพแสดงให้เห็นว่า Plant ที่สร้างขึ้นสามารถนำตัวควบคุมแบบพีซซึ่งมาควบคุมได้จริง แต่ก็ยังคงต้องปรับปรุงในด้านของรูปของสัญญาณให้มีความสวยงามมากขึ้น ซึ่งปัญหาหลักที่พบคือการกระเพื่อมของระดับน้ำจากการเติมน้ำเพื่อรักษาระดับอยู่ตลอดเวลา เมื่อน้ำมีการกระเพื่อมทำให้ค่า PV ที่อ่านเข้ามานั้นมีการแกว่งอยู่ตลอดเวลา แต่ระดับน้ำที่ได้นั้นยังคงรักษาระดับได้ตามค่า SV ที่เราป้อนเข้าไป

ภาพที่ 5.7 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 การควบคุมกระบวนการอันดับสอง

การควบคุมกระบวนการอันดับสองเป็นการควบคุมแบบสองถัง โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีซซีมาเป็นตัวควบคุม ซึ่งผลการควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 5.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าจะมีการเกิดโอเวอร์ชูตขึ้น ซึ่งเนื่องจากการที่เราทำการควบคุมกระบวนการแบบอิสระต่อกัน น้ำถูกปล่อยลงสู่ถังด้านบน แล้วมาเข้าสู่ถังด้านล่าง เมื่อถึงระดับที่เราทำการควบคุมแล้ว แต่ยังคงมีน้ำอยู่ปริมาณพอสมควรในถังด้านบน ถึงแม้ว่ามอเตอร์ปั้มน้ำจะหยุดหมุน แต่ก็ยังมีปริมาณน้ำที่เสริมจากถังด้านบน จึงเกิดการโอเวอร์ชูตขึ้น จากรูปที่ 5.8 เป็นการแสดงผลการทดลองโดยมีการตั้งค่าเป้าหมาย 2 ระดับ คือที่ 35% และที่ 60%

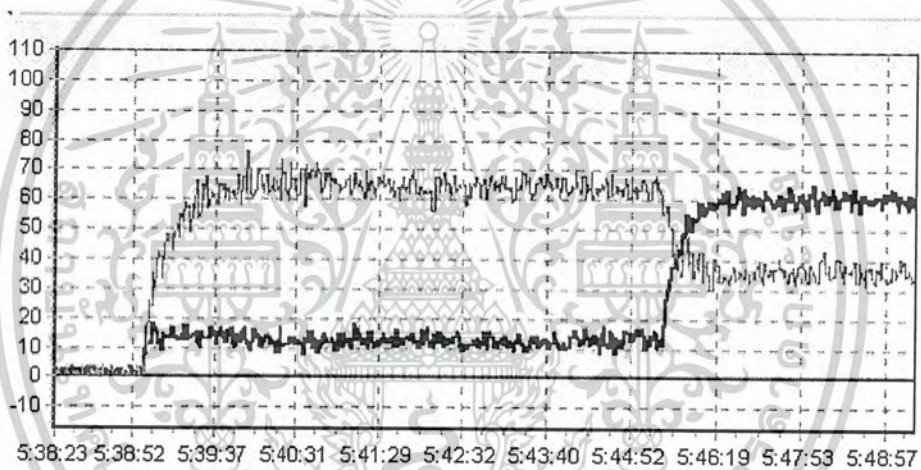


ภาพที่ 5.8 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการควบคุมกระบวนการอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 การควบคุมกระบวนการแบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต

การควบคุมกระบวนการแบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต จะเป็นการควบคุมกระบวนการแบบสองอินพุตสองเอาต์พุต โดยที่เราจะใช้มอเตอร์ปั้มน้ำสองตัวเป็นอุปกรณ์ชุดสุดท้ายในการจ่ายน้ำเข้าถัง และทำการควบคุมระดับน้ำที่ส่งถึงถัง โดยเปรียบเสมือนมีคอนโทรลเลอร์สองตัวสำหรับควบคุมระดับน้ำของแต่ละถัง ซึ่งยังคงใช้ตัวควบคุมแบบพีซซี โดยคอนโทรลเลอร์แต่ละตัวก็จะพยายามรักษาระดับน้ำตามค่าเป้าหมาย แต่จะมีการกวนเกิดขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำที่มาจากส่วนหนึ่งของปั้มน้ำที่หนึ่งเข้าสู่ถังสอง และปริมาณน้ำที่มาจากส่วนหนึ่งของปั้มน้ำที่สองเข้าสู่ถังหนึ่งทำให้กระบวนการมีการควบคุมที่ยากขึ้น โดยมีผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 5.9 โดยทำการตั้งค่าเป้าหมายไว้สองระดับ คือ ครั้งที่หนึ่งค่าเป้าหมายของถังหนึ่งอยู่ที่ 70 % ค่าเป้าหมายของถังสองอยู่ที่ 20 % ครั้งที่สองค่าเป้าหมายของถังหนึ่งอยู่ที่ 40 % ค่าเป้าหมายของถังสองอยู่ที่ 40 %



ภาพที่ 5.9 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการควบคุมกระบวนการแบบ MIMO

5.3 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองควบคุมกระบวนการของชุดทดลองที่ทำการสร้างขึ้น ทำให้เราทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นนับแต่เริ่มสร้างจนถึงเสร็จสมบูรณ์ ซึ่งได้ทำการแก้ปัญหาโดยตลอดซึ่งยังคงเกิดปัญหาที่ยังต้องแก้ไขปรับปรุงอยู่อีก ซึ่งพอจะสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การทดลองควบคุมกระบวนการยังคงมีการแกว่งของสัญญาณอยู่ ซึ่งทำให้รูปกราฟที่ออกมาดูไม่ค่อยดีเท่าที่ควร ถึงแม้จะทำการใส่ตัวกรองสัญญาณแล้วก็ตาม จึงต้องทำการแก้ไขข้อบกพร่องของระบบที่ยังเกิดขึ้นอยู่ เพื่อที่จะขจัดปัญหาดังกล่าวออกไป

2. การทดลองควบคุมกระบวนการ ยังคงต้องหากฎของการควบคุมที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น อาจจะเป็นการปรับแต่งกฎ หรือเพิ่มจำนวนกฎเข้าไป แต่ทั้งนี้เราได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวคอนโทรลเลอร์ เพราะฉะนั้นในการเพิ่มเติมเงื่อนไขต่าง ๆ ของโปรแกรม เราจะต้องคำนึงถึงขีดจำกัดของไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วย โดยเฉพาะหน่วยความจำว่ามีขนาดเพียงพอสำหรับจะเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมลงไป หรืออาจจะต่อหน่วยความจำเพิ่มเติมเข้ามา



บทที่ 6

บทสรุป

6.1 บทสรุป

ปฏิญญาฉบับนี้ได้นำเสนอการพัฒนากระบวนการจำลองระบบควบคุมระดับน้ำแบบหลายหน้าที่ ที่ถูกออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบกระบวนการจำลองได้หลายลักษณะและยืดหยุ่นต่อการใช้งาน สำหรับการทดลองทางด้านพลศาสตร์กระบวนการและการควบคุมกระบวนการ ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ได้ดีในระดับหนึ่ง คือนำไปทดลองระบบควบคุมแบบอินพุตตัวแปรเดียวและเอาที่พหุตัวแปรเดียวแบบอันดับหนึ่งและอันดับสองได้ดี แต่กระบวนการในรูปแบบอื่นยังไม่สามารถใช้ได้ดีเท่าใดนัก ทั้งนี้เพราะข้อจำกัดบางอย่างที่จะกล่าวในหัวข้อปัญหาและอุปสรรคในการพัฒนา แต่ทั้งนี้หากลดข้อจำกัดที่ว่านี้ได้กระบวนการจำลองนี้สามารถจะใช้ศึกษาทดลองในพลศาสตร์กระบวนการและการควบคุมที่ต้องการกระบวนการที่หลากหลาย เพื่อให้ผู้ศึกษาได้รับประโยชน์จากการทดลองมากที่สุดต่อไป

6.2 ปัญหาและอุปสรรค

การพัฒนากระบวนการจำลองนี้ ปัญหาและอุปสรรคที่พบมากจะเกี่ยวกับสัญญาณที่เกิดจากผลการทดลองอันเนื่องมาจาก อุปกรณ์ทางฮาร์ดแวร์ที่อาจจะยังไม่ดีเท่าที่ควร ความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์บางตัว สายไฟหรือสายสัญญาณที่ยังไม่ดีเท่าที่ควร ตลอดจนตัวควบคุมที่ต้องการทำการปรับปรุงเพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการที่สร้างขึ้น มีการควบคุมที่ง่ายขึ้น ปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงจำเป็นต้องหาทางแก้ไขต่อไป

6.3 แนวทางแก้ไขและการพัฒนา

ในส่วนของอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์นั้น ควรจะทำการปรับปรุงให้มีลักษณะความเป็นเชิงเส้นมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ ตลอดจนปรับปรุงวงจรต่าง ๆ ให้ผลิตสัญญาณรบกวนน้อยที่สุด เปลี่ยนสายไฟหรือสายสัญญาณให้ดียิ่งขึ้น ในส่วนของตัวคอนโทรลเลอร์นั้นเราต้องทำการปรับปรุงกฎการควบคุมหรือเพิ่มจำนวนกฎของการควบคุมเพิ่มขึ้น เพื่อให้มีผลละเอียดยของการควบคุมที่สูงยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

Okata,K. **Modern Control Engineering** .3rd Edition.'New Jersey : Prentice-Hall. 1997.

กิตติ ตีรเศรษฐ. **พื้นฐานวิศวกรรมระบบควบคุม**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2539.

ผศ.ธีรวัฒน์ ประกอบผล : **การพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยภาษาซี** , สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., พฤษภาคม 2545

ผศ.ธีรวัฒน์ ประกอบผล : **การประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์** , สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

ประภาพร ช่างไม้. **คู่มือการเขียนโปรแกรมภาษาซี** , IDC



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



INA101

High Accuracy INSTRUMENTATION AMPLIFIER

FEATURES

- LOW DRIFT: 0.25 μ V/ $^{\circ}$ C max
- LOW OFFSET VOLTAGE: 25 μ V max
- LOW NONLINEARITY: 0.002%
- LOW NOISE: 13nV/ \sqrt Hz
- HIGH CMR: 106dB AT 60Hz
- HIGH INPUT IMPEDANCE: 10 10 Ω
- 14-PIN PLASTIC, CERAMIC DIP, SOL-16, AND TO-100 PACKAGES

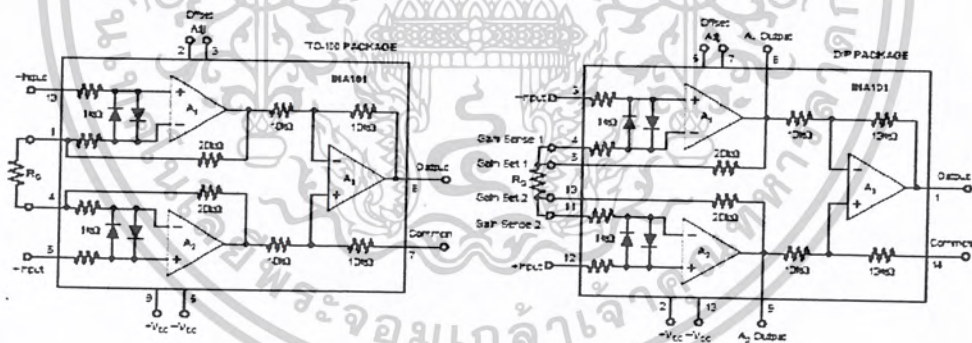
APPLICATIONS

- STRAIN GAGES
- THERMOCOUPLES
- RTDs
- REMOTE TRANSDUCERS
- LOW-LEVEL SIGNALS
- MEDICAL INSTRUMENTATION

DESCRIPTION

The INA101 is a high accuracy instrumentation amplifier designed for low-level signal amplification and general purpose data acquisition. Three precision op amps and laser-trimmed metal film resistors are integrated on a single monolithic integrated circuit.

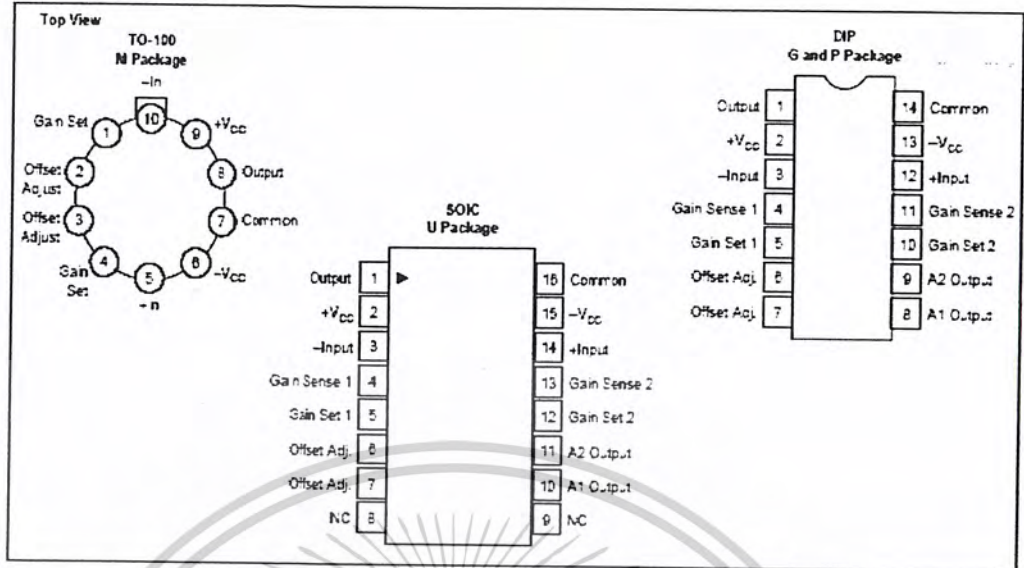
The INA101 is packaged in TO-100 metal, 14-pin plastic and ceramic DIP, and SOL-16 surface-mount packages. Commercial, industrial and military temperature range models are available.



International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 1140, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 6730 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85706 • Tel: (520) 746-1111 • Telex: 910-852-1111
 Internet: <http://www.burr-brown.com/> • FAX Line: (800) 548-6133 (US-Canada Only) • Cable: BBROGRP • Telex: 366-6481 • FAX: (520) 896-1510 • Immediate Product Info: (800) 548-6132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIN CONFIGURATIONS



ORDERING INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	TEMPERATURE RANGE
INA1D1AM	10-Pin Metal TO-100	-25°C to +85°C
INA1D1CM	10-Pin Metal TO-100	-25°C to +85°C
INA1D1AG	14-Pin Ceramic DIP	-25°C to +85°C
INA1D1CG	14-Pin Ceramic DIP	-25°C to +85°C
INA1D1HP	14-Pin Plastic DIP	0°C to +70°C
INA1D1KU	SOL-16 Surface Mount	0°C to +70°C
INA1D1SG	14-Pin Ceramic DIP	-55°C to +125°C
INA1D1SM	10-Pin Metal TO-100	-55°C to +125°C

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage	±20V
Power Dissipation	600mW
Input Voltage Range	±V _{CC}
Output Short Circuit (to ground)	Continuous
Operating Temperature (M, G Package)	-55°C to +125°C
P, J Package	-25°C to +85°C
Storage Temperature (M, G Package)	-65°C to +150°C
P, J Package	-40°C to +85°C
Lead Temperature (soldering, 10s) (M, G, P Package)	+300°C
Lead Temperature (wave soldering, 9s) (J Package)	+260°C

PACKAGE INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER(1)
INA1D1AM	10-Pin Metal TO-100	007
INA1D1CM	10-Pin Metal TO-100	007
INA1D1AG	14-Pin Ceramic DIP	109
INA1D1CG	14-Pin Ceramic DIP	109
INA1D1HP	14-Pin Plastic DIP	010
INA1D1KU	SOL-16 Surface Mount	211
INA1D1SG	14-Pin Ceramic DIP	109
INA1D1SM	10-Pin Metal TO-100	007

NOTE: (1) For detailed drawing and dimension table, please see end of data sheet, or Appendix D of Burr-Brown IC Data Book.



ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

This integrated circuit can be damaged by ESD. Burr-Brown recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS

ELECTRICAL

At +25°C with ±15VDC power supply and in circuit of Figure 1, unless otherwise noted.

PARAMETER	INA118B, AG			INA118C, SG			INA118C, CG			INA118P, KU			UNITS
	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
GAIN Range of Gain Gain Equation Error from Equation, DC ¹⁾	1	$G = 1 + (48R/G)$ $5(0.01 + 0.0004G)$ -0.03G	1000	-	-	-	-	-	-	-	$±0.1 + 0.0015G$ -0.05G	$±0.3 + 0.002G$ -0.10G	1% 1% %
Gain Temp. Coefficient²⁾ G = 1 G = 10 G = 100 G = 1000		2 20 22 22	5 10 10 10	-	-	-	-	10 11 11	-	-	-	-	ppm/°C ppm/°C ppm/°C ppm/°C
Nonlinearity, DC³⁾		$±0.002 + 10^{-4}G$	$±0.005 + 2.10^{-4}G$	$±0.001 + 10^{-4}G$	$±0.002 + 10^{-4}G$	$±0.001 + 10^{-4}G$	$±0.001 + 10^{-4}G$	$±0.002 + 10^{-4}G$	-	-	-	-	% of pp FS
BATED OUTPUT Voltage Current Output Impedance Capacitive Load	±10 ±5	±12.5 ±10 0.2 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	V mA Ω pF
INPUT OFFSET VOLTAGE Initial Offset at +25°C ± Temperature ± Supply ± Time		$±125 + 200G$	$±50 + 400G$	$±10 + 100G$	$±25 + 200G$ $±0.75 + 10G$	$±10 + 100G$	$±125 + 200G$ $±0.25 + 10G$	$±125 + 400G$	$±250 + 900G$	$±125 + 400G$	$±250 + 900G$	-	μV μV/°C mV/V mV/mA
INPUT BIAS CURRENT Initial Bias Current each input ± Temperature ± Supply Initial Circuit Current ± Temperature		±15 ±0.2 ±0.1 ±15	±30	±10	-	-	±5 ±20	-	-	-	-	-	nA nA/°C nA/V nA nA/°C
INPUT IMPEDANCE Differential Common mode		$10^8 3$ $10^8 3$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≥1 pF ≥1 pF
INPUT VOLTAGE RANGE Range, Linear Response CMR, min. IN2, Source Impedance DC to 60Hz, G = 1 DC to 60Hz, G = 10 DC to 60Hz, G = 100 to 1000	±10	±12	-	-	-	-	-	-	-	±5 ±0 ±0	±5 ±5 ±5	-	V dB dB dB
INPUT NOISE Input Voltage Noise $f_n = 0.01Hz$ to 10Hz Circuitry, G = 1000 $f_n = 10Hz$ $f_n = 100Hz$ $f_n = 10kHz$ Input Current Noise $f_n = 0.01Hz$ to 10Hz Circuitry $f_n = 10Hz$ $f_n = 100Hz$ $f_n = 10kHz$		0.0 10 15 12 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	nV/√pp nV/√Hz nV/√Hz pA/√pp pA/√Hz pA/√Hz pA/√Hz
DYNAMIC RESPONSE Small Signal, ±2.5% Fullness G = 1 G = 10 G = 100 G = 1000 Small Signal, ±1% Fullness G = 1 G = 10 G = 100 G = 1000 Full Power, G = 1 to 100 Slew Rate, G = 1 to 100 Settling Time (±1%) G = 1 G = 100 G = 1000 Settling Time (±0.1%) G = 1 G = 100 G = 1000		200 100 25 2.5 20 10 1 200 6.4 0.2 20 40 200 20 50 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Hz Hz Hz Hz Hz Hz Hz Hz Hz Hz μs μs μs μs μs μs
POWER SUPPLY Rated Voltage Voltage Range Current, Output ⁴⁾	±5	±15	±20 ±8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	V V mA
TEMPERATURE RANGE⁵⁾ Specification Operation Storage		-25 -55 -65	+05 +125 +150	-25	+125	-	-	0 -25 -80	-	+70 +95 +95	-	-	°C °C °C

¹⁾ Specifications same as for INA118B, AG.

NOTES: (1) Typically the tolerance of R_G will be the major source of gain error. (2) Nonlinearity is the maximum peak deviation from the best straight line as a percentage of (peak-to-peak full scale output). (3) Not including the TCR of R_G . (4) Adjusted to zero at any one gain. (5) % output slope = 113°C/W. %q: percent circuitry = 19°C/W, $v_{CS} = 27°C/W$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10 kPa On-Chip Temperature Compensated & Calibrated Silicon Pressure Sensors

The MPX2010/MPXV2010G series silicon piezoresistive pressure sensors provide a very accurate and linear voltage output — directly proportional to the applied pressure. These sensors house a single monolithic silicon die with the strain gauge and thin-film resistor network integrated on each chip. The sensor is laser trimmed for precise span, offset calibration and temperature compensation.

Features

- Temperature Compensated over 0°C to +85°C
- Ratiometric to Supply Voltage
- Differential and Gauge Options

Application Examples

- Respiratory Diagnostics
- Air Movement Control
- Controllers
- Pressure Switching

Figure 1 shows a block diagram of the internal circuitry on the stand-alone pressure sensor chip.

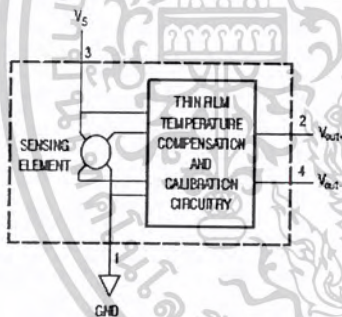


Figure 1. Temperature Compensated and Calibrated Pressure Sensor Schematic

VOLTAGE OUTPUT versus APPLIED DIFFERENTIAL PRESSURE

The output voltage of the differential or gauge sensor increases with increasing pressure applied to the pressure side (P1) relative to the vacuum side (P2). Similarly, output voltage increases as increasing vacuum is applied to the vacuum side (P2) relative to the pressure side (P1).

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.

REV 9

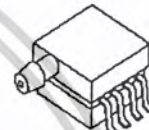
© Motorola, Inc. 2002

MPX2010 MPXV2010G SERIES

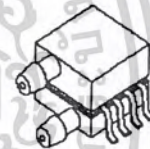
Motorola Preferred Device

**COMPENSATED
PRESSURE SENSOR**
0 to 10 kPa (0 to 1.45 psi)
FULL SCALE SPAN: 25 mV

**SMALL OUTLINE PACKAGE
SURFACE MOUNT**



MPX2010GP
CASE 1369



MPXV2010DP
CASE 1351

PIN NUMBER

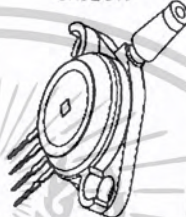
1	Gnd	5	N/C
2	+V _{out}	6	N/C
3	V _S	7	N/C
4	-V _{out}	8	N/C

NOTE: Pin 1 is noted by the notch in the lead.

UNIBODY PACKAGE



MPX2010D
CASE 344



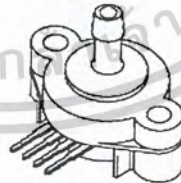
MPX2010GP
CASE 344B



MPX2010DP
CASE 344C



MPX2010GS
CASE 344E



MPX2010GSX
CASE 344F

PIN NUMBER

1	Gnd	3	V _S
2	+V _{out}	4	-V _{out}

NOTE: Pin 1 is noted by the notch in the lead.



digital dna

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MPX2010 MPXV2010G SERIES

MAXIMUM RATINGS(NOTE)

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum Pressure (P1 > P2)	P_{max}	75	kPa
Storage Temperature	T_{stg}	-40 to +125	°C
Operating Temperature	T_A	-40 to +125	°C

NOTE: Exposure beyond the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.

OPERATING CHARACTERISTICS ($V_S = 10$ Vdc, $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted, P1 > P2)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range ⁽¹⁾	P_{OP}	0	—	10	kPa
Supply Voltage ⁽²⁾	V_S	—	10	16	Vdc
Supply Current	I_o	—	6.0	—	mA _{dc}
Full Scale Span ⁽³⁾	V_{FSS}	24	25	26	mV
Offset ⁽⁴⁾	V_{off}	-1.0	—	1.0	mV
Sensitivity	$\Delta V/\Delta P$	—	2.5	—	mV/kPa
Linearity ⁽⁵⁾	—	-1.0	—	1.0	% V_{FSS}
Pressure Hysteresis ⁽⁵⁾ (0 to 10 kPa)	—	—	± 0.1	—	% V_{FSS}
Temperature Hysteresis ⁽⁵⁾ (-40°C to +125°C)	—	—	± 0.5	—	% V_{FSS}
Temperature Effect on Full Scale Span ⁽⁶⁾	TCV_{FSS}	-1.0	—	1.0	% V_{FSS}
Temperature Effect on Offset ⁽⁶⁾	TCV_{off}	-1.0	—	1.0	mV
Input Impedance	Z_{in}	1000	—	2550	Ω
Output Impedance	Z_{out}	1400	—	3000	Ω
Response Time ⁽⁶⁾ (10% to 90%)	t_r	—	1.0	—	ms
Warm-Up	—	—	20	—	ms
Offset Stability ⁽⁷⁾	—	—	± 0.5	—	% V_{FSS}

NOTES:

- 1.0 kPa (kiloPascal) equals 0.145 psi.
- Device is ratiometric within this specified excitation range. Operating the device above the specified excitation range may induce additional error due to device self-heating.
- Full Scale Span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
- Offset (V_{off}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
- Accuracy (error budget) consists of the following:
 - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure, using end point method, over the specified pressure range.
 - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
 - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C.
 - TcSpan: Output deviation at full rated pressure over the temperature range of 0 to 85°C, relative to 25°C.
 - TcOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 0 to 85°C, relative to 25°C.
- Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.
- Offset stability is the product's output deviation when subjected to 1000 hours of Pulsed Pressure, Temperature Cycling with Bias Test.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



High-Voltage, High-Current OPERATIONAL AMPLIFIER

FEATURES

- **WIDE SUPPLY RANGE**
Single Supply: +8V to +60V
Dual Supply: $\pm 4V$ to $\pm 30V$
- **HIGH OUTPUT CURRENT:**
3A Continuous
5A Peak
- **WIDE OUTPUT VOLTAGE SWING**
- **FULLY PROTECTED:**
Thermal Shutdown
Adjustable Current Limit
- **OUTPUT DISABLE CONTROL**
- **THERMAL SHUTDOWN INDICATOR**
- **HIGH SLEW RATE:** 10V/ μs
- **LOW QUIESCENT CURRENT**
- **PACKAGES:**
7-Lead TO-220, Zip and Straight Leads
7-Lead DPAK Surface-Mount

APPLICATIONS

- VALVE, ACTUATOR DRIVERS
- SYNCHRO, SERVO DRIVERS
- POWER SUPPLIES
- TEST EQUIPMENT
- TRANSDUCER EXCITATION
- AUDIO AMPLIFIERS

DESCRIPTION

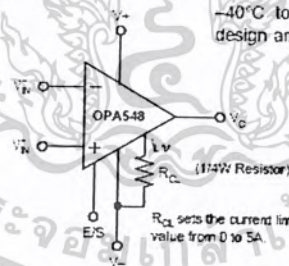
The OPA548 is a low-cost, high-voltage/high-current operational amplifier ideal for driving a wide variety of loads. A laser-trimmed monolithic integrated circuit provides excellent low-level signal accuracy and high output voltage and current.

The OPA548 operates from either single or dual supplies for design flexibility. In single-supply operation, the input common-mode range extends below ground.

The OPA548 is internally protected against over-temperature conditions and current overloads. In addition, the OPA548 was designed to provide an accurate, user-selected current limit. Unlike other designs which use a "power" resistor in series with the output current path, the OPA548 senses the load indirectly. This allows the current limit to be adjusted from 0A to 5A with a resistor/potentiometer or controlled digitally with a voltage-out or current-out DAC.

The Enable/Status (E/S) pin provides two functions. An input on the pin not only disables the output stage to effectively disconnect the load, but also reduces the quiescent current to conserve power. The E/S pin output can be monitored to determine if the OPA548 is in thermal shutdown.

The OPA548 is available in an industry-standard 7-lead staggered and straight lead TO-220 package, and a 7-lead DPAK surface-mount plastic power package. The copper tab allows easy mounting to a heat sink or circuit board for excellent thermal performance. It is specified for operation over the extended industrial temperature range, $-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$. A SPICE macromodel is available for design analysis.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Product or processing does not necessarily include testing of all parameters.



Copyright © 1997-2003, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

Output Current	See SOA Curve
Supply Voltage, V+ to V-	60V
Input Voltage	(V-) - 0.5V to (V+) + 0.5V
Input Shutdown Voltage	V+
Operating Temperature	-40°C to +125°C
Storage Temperature	-55°C to +125°C
Junction Temperature	150°C
Lead Temperature (soldering 10s) ⁽²⁾	300°C

NOTES: (1) Stresses above these ratings may cause permanent damage.
 (2) Vapor-phase or IR reflow techniques are recommended for soldering the CPAS47F surface-mount package. Wave soldering is not recommended due to excessive thermal shock and 'shadowing' of nearby devices.

ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

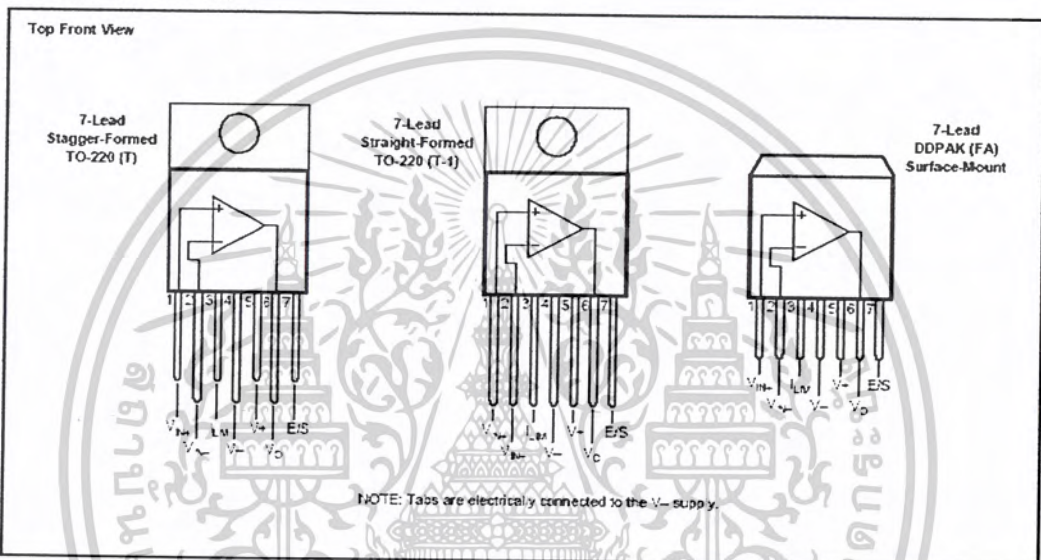
This integrated circuit can be damaged by ESD. Texas Instruments recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

PACKAGE/ORDERING INFORMATION

For the most current package and ordering information, see the Package Ordering Addendum at the end of this data sheet.

PIN CONFIGURATIONS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



OPA227
OPA2227
OPA4227
OPA228
OPA2228
OPA4228

For most current data sheet and other product information, visit www.burr-brown.com

High Precision, Low Noise OPERATIONAL AMPLIFIERS

FEATURES

- **LOW NOISE:** $3nV/\sqrt{Hz}$
- **WIDE BANDWIDTH:**
 OPA227: 8MHz, $2.3V/\mu s$
 OPA228: 33MHz, $10V/\mu s$
- **SETTLING TIME:** $5\mu s$
 (significant improvement over OP-27)
- **HIGH CMRR:** 138dB
- **HIGH OPEN-LOOP GAIN:** 160dB
- **LOW INPUT BIAS CURRENT:** 10nA max
- **LOW OFFSET VOLTAGE:** $75\mu V$ max
- **WIDE SUPPLY RANGE:** $\pm 2.5V$ to $\pm 18V$
- **OPA227 REPLACES OP-27, LT1007, MAX427**
- **OPA228 REPLACES OP-37, LT1037, MAX437**
- **SINGLE, DUAL, AND QUAD VERSIONS**

APPLICATIONS

- DATA ACQUISITION
- TELECOM EQUIPMENT
- GEOPHYSICAL ANALYSIS
- VIBRATION ANALYSIS
- SPECTRAL ANALYSIS
- PROFESSIONAL AUDIO EQUIPMENT
- ACTIVE FILTERS
- POWER SUPPLY CONTROL

DESCRIPTION

The OPA227 and OPA228 series op amps combine low noise and wide bandwidth with high precision to make them the ideal choice for applications requiring both ac and precision dc performance.

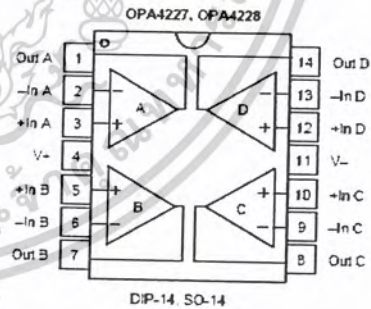
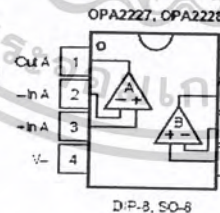
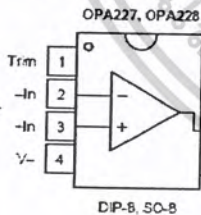
The OPA227 is unity gain stable and features high slew rate ($2.3V/\mu s$) and wide bandwidth (8MHz). The OPA228 is optimized for closed-loop gains of 5 or greater, and offers higher speed with a slew rate of $10V/\mu s$ and a bandwidth of 33MHz.

The OPA227 and OPA228 series op amps are ideal for professional audio equipment. In addition, low quiescent current and low cost make them ideal for portable applications requiring high precision.

The OPA227 and OPA228 series op amps are pin-for-pin replacements for the industry standard OP-27 and OP-37 with substantial improvements across the board. The dual and quad versions are available for space savings and per-channel cost reduction.

The OPA227, OPA228, OPA2227, and OPA2228 are available in DIP-8 and SO-8 packages. The OPA4227 and OPA4228 are available in DIP-14 and SO-14 packages with standard pin configurations. Operation is specified from $-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$.

SPICE Model available for OPA227 at www.burr-brown.com



International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 6738 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85706 • Tel: (520) 746-1111
 Telex: 318-952-1111 • Internet: <http://www.burr-brown.com> • Cable: BURRCORP • Telex: 096-6491 • FAX: (520) 885-1510 • Immediate Product Infor: (800) 548-4122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS: $V_S = \pm 5V$ to $\pm 15V$

OPA227 Series

At $T_A = +25^\circ C$, and $R_L = 10k\Omega$, unless otherwise noted.
Boldface limits apply over the specified temperature range, $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$.

PARAMETER	CONDITION	OPA227P, U			OPA227PA, UA			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
OFFSET VOLTAGE Input Offset Voltage $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$ vs Temperature vs Power Supply $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$ vs Time Channel Separation (dual, quad)	V_{OS} dV_{OS}/dT PSRR $V_D = \pm 2.5V$ to $\pm 18V$ dc $f = 1kHz, R_L = 5k\Omega$		± 5 ± 0.1 ± 0.5 0.2 0.2 110	± 75 ± 100 ± 0.6 ± 2		± 10 ± 0.3 *	± 200 ± 200 *	μV $\mu V/^\circ C$ $\mu V/V$ $\mu V/V$ $\mu V/mo$ $\mu V/V$ dB
INPUT BIAS CURRENT Input Bias Current $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$ Input Offset Current $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$	I_B I_{OS}		± 2.5 ± 2.5	± 10 ± 10 ± 10 ± 10		*	*	nA nA nA nA
NOISE Input Voltage Noise, $f = 0.1Hz$ to $10Hz$ Input Voltage Noise Density, $f = 10Hz$ $f = 100Hz$ $f = 1kHz$ Current Noise Density, $f = 1kHz$	e_n i_n		90 15 3.5 3 3 0.4			*	*	nV \sqrt{p} nV \sqrt{ms} nV/ \sqrt{Hz} nV/ \sqrt{Hz} nV/ \sqrt{Hz} pA/ \sqrt{Hz}
INPUT VOLTAGE RANGE Common-Mode Voltage Range Common-Mode Rejection $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$	V_{CM} CMRR $V_{CM} = (V^-+2V)$ to (V^+-2V)		(V^-+2) 120 120	138	(V^+-2)	*	*	V dB dB
INPUT IMPEDANCE Differential Common-Mode	$V_{CM} = (V^-+2V)$ to (V^+-2V)		$10^7 \parallel 12$ $10^9 \parallel 3$			*	*	$\Omega \parallel pF$ $\Omega \parallel pF$
OPEN-LOOP GAIN Open-Loop Voltage Gain $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$ $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$	A_{OL} $V_D = (V^-+2V)$ to $(V^+-2V), R_L = 10k\Omega$ $V_D = (V^-+3.5V)$ to $(V^+-3.5V), R_L = 600\Omega$		132 132 132 132	160		*	*	dB dB dB dB
FREQUENCY RESPONSE Gain Bandwidth Product Slew Rate Settling Time: 0.1% 0.01% Overload Recovery Time Total Harmonic Distortion + Noise	GBW SR $G = 1, 10V$ Step, $C_L = 10pF$ $G = 1, 10V$ Step, $C_L = 10pF$ $V_{IN} = V_D$ $f = 1kHz, G = 1, V_D = 3.5V_{rms}$		8 2.3 5 5.6 1.3 0.00005			*	*	MHz V/ μs μs μs μs %
OUTPUT Voltage Output $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$ $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$ Short-Circuit Current Capacitive Load Drive	$R_L = 10k\Omega$ $R_L = 10k\Omega$ $R_L = 600\Omega$ $R_L = 600\Omega$ I_{SC} C_{LOAD}		(V^-+2) (V^-+2) $(V^-+3.5)$ $(V^-+3.5)$ ± 45	(V^+-2) (V^+-2) $(V^+-3.5)$ $(V^+-3.5)$		*	*	V V V V mA
POWER SUPPLY Specified Voltage Range Operating Voltage Range Quiescent Current (per amplifier) $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$	V_S I_Q $I_Q = 0$ $I_Q = 0$		± 5 ± 2.5 ± 3.7	± 15 ± 18 ± 3.8 ± 4.2		*	*	V V mA mA
TEMPERATURE RANGE Specified Range Operating Range Storage Range Thermal Resistance SO-8 Surface Mount DIP-8 DIP-14 SO-14 Surface Mount	θ_{JA}		-40 -55 -65	+85 +125 +150		*	*	$^\circ C$ $^\circ C$ $^\circ C$ $^\circ C$ $^\circ C/W$ $^\circ C/W$ $^\circ C/W$ $^\circ C/W$

* Specifications same as OPA227P, U.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS: $V_S = \pm 5V$ to $\pm 15V$

OPA228 Series

At $T_A = +25^\circ C$, and $R_L = 10k\Omega$, unless otherwise noted.

Backface limits apply over the specified temperature range, $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$.

PARAMETER	CONDITION	OPA228P, U OPA228P, U			OPA228PA, UA OPA228PA, UA OPA4228PA, UA			UNITS	
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX		
OFFSET VOLTAGE Input Offset Voltage $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$ vs Temperature vs Power Supply $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$ vs Time Channel Separation (dual, quad)	V_{OS}		± 5	± 75		± 10	± 200	μV μV $\mu V/^\circ C$ $\mu V/V$ $\mu V/mo$ $\mu V/V$	
	dV_{OS}/dT		± 0.1	± 0.6		± 0.3	± 2	$\mu V/^\circ C$	
	PSRR	$V_O = \pm 2.5V$ to $\pm 18V$		± 0.5	± 2		*	*	$\mu V/V$
INPUT BIAS CURRENT Input Bias Current $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$ Input Offset Current $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$	I_B		± 2.5	± 10		*	*	nA	
	I_{OS}		± 2.5	± 10		*	*	nA	
NOISE Input Voltage Noise, $f = 0.1Hz$ to $10Hz$ Input Voltage Noise Density, $f = 10Hz$ $f = 100Hz$ $f = 1kHz$ Current Noise Density, $f = 1kHz$	e_n		90	15		*	*	nV \sqrt{p} nV \sqrt{ms}	
	e_n		3.5	3		*	*	nV \sqrt{Hz}	
	i_n		3	0.4		*	*	nV \sqrt{Hz}	
	i_n		0.4			*	*	pA \sqrt{Hz}	
INPUT VOLTAGE RANGE Common-Mode Voltage Range Common-Mode Rejection $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$	V_{CM}		$(V^-)+2$	$(V^+)-2$		*	*	V	
	CMRR	$V_{CM} = (V^-)+2V$ to $(V^+)-2V$	120	120		*	*	dB	
INPUT IMPEDANCE Differential Common-Mode			$10^7 \parallel 12$	$10^9 \parallel 3$		*	*	$\Omega \parallel pF$	
		$V_{CM} = (V^-)+2V$ to $(V^+)-2V$				*	*	$\Omega \parallel pF$	
OPEN-LOOP GAIN Open-Loop Voltage Gain $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$ $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$	A_{OL}	$V_O = (V^-)+2V$ to $(V^+)-2V$, $R_L = 10k\Omega$	132	160		*	*	dB	
		$V_O = (V^-)+2.5V$ to $(V^+)-3.5V$, $R_L = 800\Omega$	132	160		*	*	dB	
			132	160		*	*	dB	
FREQUENCY RESPONSE Minimum Closed-Loop Gain Gain Bandwidth Product Slew Rate Settling Time: 0.1% 0.01% Overload Recovery Time Total Harmonic Distortion + Noise THD+N	GBW		5			*	*	V/V	
	SR		23			*	*	MHz	
		$G = 5, 10V$ Step, $C_L = 100pF$, $C_F = 12pF$	11			*	*	V/ μs	
		$G = 5, 10V$ Step, $C_L = 100pF$, $C_F = 12pF$	1.5			*	*	μs	
		$V_{IN} \cdot G = V_O$ $f = 1kHz$, $G = 5$, $V_O = 3.5Vrms$	2			*	*	μs	
OUTPUT Voltage Output $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$ $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$ Short-Circuit Current Capacitive Load Drive		$R_L = 10k\Omega$	$(V^-)+2$	$(V^+)-2$		*	*	V	
		$R_L = 10k\Omega$	$(V^-)+2$	$(V^+)-2$		*	*	V	
		$R_L = 800\Omega$	$(V^-)+3.5$	$(V^+)-3.5$		*	*	V	
	$R_L = 800\Omega$	$(V^-)+3.5$	$(V^+)-3.5$		*	*	V		
		± 45				*	*	mA	
			See Typical Curve				*	*	mA
POWER SUPPLY Specified Voltage Range Operating Voltage Range Quiescent Current (per amplifier) $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$	V_S		± 5	± 15		*	*	V	
	I_Q	$I_Q = 0$ $I_Q = 0$	± 2.5	± 18		*	*	V	
TEMPERATURE RANGE Specified Range Operating Range Storage Range Thermal Resistance SO-8 Surface Mount DIP-8 DIP-14 SO-14 Surface Mount			-40	-85		*	*	$^\circ C$	
			-55	+125		*	*	$^\circ C$	
			-65	+150		*	*	$^\circ C$	
				150		*	*	$^\circ C/W$	
				100		*	*	$^\circ C/W$	
			80		*	*	$^\circ C/W$		
			100		*	*	$^\circ C/W$		

* Specifications same as OPA228P, U.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



RCV420

Precision 4mA to 20mA CURRENT LOOP RECEIVER

FEATURES

- COMPLETE 4-20mA TO 0-5V CONVERSION
- INTERNAL SENSE RESISTORS
- PRECISION 10V REFERENCE
- BUILT-IN LEVEL-SHIFTING
- ±40V COMMON-MODE INPUT RANGE
- 0.1% OVERALL CONVERSION ACCURACY
- HIGH NOISE IMMUNITY: 86dB CMR

APPLICATIONS

- PROCESS CONTROL
- INDUSTRIAL CONTROL
- FACTORY AUTOMATION
- DATA ACQUISITION
- SCADA
- RTUs
- ESD
- MACHINE MONITORING

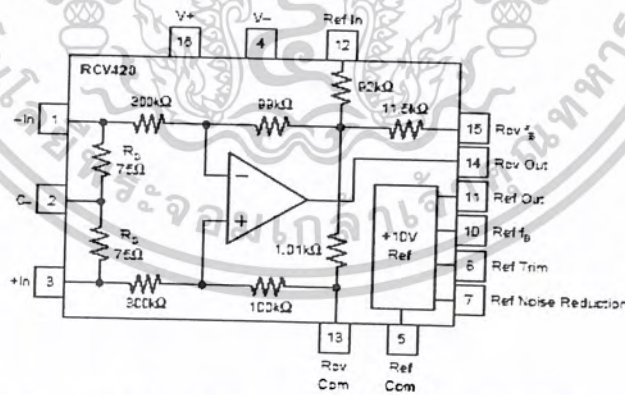
DESCRIPTION

The RCV420 is a precision current-loop receiver designed to convert a 4–20mA input signal into a 0–5V output signal. As a monolithic circuit, it offers high reliability at low cost. The circuit consists of a premium grade operational amplifier, an on-chip precision resistor network, and a precision 10V reference. The RCV420 features 0.1% overall conversion accuracy, 86dB CMR, and ±40V common-mode input range.

The circuit introduces only a 1.5V drop at full scale, which is useful in loops containing extra instrument burdens or in intrinsically safe applications where

transmitter compliance voltage is at a premium. The 10V reference provides a precise 10V output with a typical drift of 5ppm/°C.

The RCV420 is completely self-contained and offers a highly versatile function. No adjustments are needed for gain, offset, or CMR. This provides three important advantages over discrete, board-level designs: 1) lower minimal design cost, 2) lower manufacturing cost, and 3) easy, cost-effective field repair of a precision circuit.



International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11439, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 6739 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85736 • Tel: (520) 746-1111 • Fax: (520) 746-6132
 Internet: <http://www.burr-brown.com/> • FAXLine: (800) 548-6133 (US/Canada Only) • Cable: BBRCORP • Telex: 966-6491 • FAX: (520) 683-1511 • Intradate Product Info: (800) 548-6132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS

ELECTRICAL

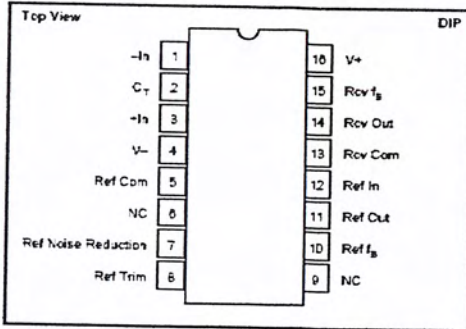
A: T = +25°C and V₀ = ±15V, unless otherwise noted.

CHARACTERISTICS	RCV420KP, JP			UNITS
	MIN	TYP	MAX	
GAIN Initial Error Error—JP Grade vs Temp Nonlinearity ⁽¹⁾		0.3125 0.05 15 0.0002		V/mA % of span % of span ppm/°C % of span
OUTPUT Rated Voltage (I ₀ = +10mA, -5mA) Rated Current (E ₀ = 10V) Impedance (Differential) Current Limit (To Common) Capacitive Load (Stable Operation)	10 +10, -5	12		V mA Ω mA pF
INPUT Sense Resistance Input Impedance (Common-Voice) Common-Voice Voltage CMR ⁽²⁾ vs Temp (DC) (T _A = T _{MIN} to T _{MAX}) AC 80Hz	74.25 70	75 200 80 75 80	75.75 ±40	Ω kΩ V dB dB dB
OFFSET VOLTAGE (RTD)⁽³⁾ Initial vs Temp vs Supply (±11.4V to ±18V) vs Time	74	10 60 200	1	mV μV/°C dB μV/mo
ZERO ERROR⁽⁴⁾ Initial Initial—JP Grade vs Temp		0.025 10	0.075 0.15	% of span % of span ppm of span/°C
OUTPUT NOISE VOLTAGE f _c = 0.1Hz to 10Hz f _c = 10kHz		50 800		μV _{rms} nV/√Hz
DYNAMIC RESPONSE Gain Bandwidth Full Power Bandwidth Slew Rate Settling Time (0.01%)		150 30 15 10		kHz kHz V/μs μs
VOLTAGE REFERENCE Initial Trim Range ⁽⁵⁾ vs Temp vs Supply (±11.4V to ±18V) vs Output Current (I ₀ = 0 to +10mA) vs Time Noise (0.1Hz to 10Hz) Output Current	0.00 +10, -2	±4 5 0.0002 0.0002 15 5	±0.01	V % ppm/°C %/V %/mA ppm/kHz μV _{rms} mA
POWER SUPPLY Rated Voltage Range ⁽⁶⁾ Quiescent Current (V ₀ = 0V)	-5, +11.4	±15 2	±16 4	V V mA
TEMPERATURE RANGE Specification Operation Storage Thermal Resistance, θ _{JA}	0 -25 -40		+70 +55 +55	°C °C °C °C/W

NOTES: (1) Nonlinearity is the max peak deviation from best fit straight line. (2) With 0 source impedance on Rev Com pin. (3) Referred to output with all inputs grounded including Ref In. (4) With 4mA input signal and Voltage Reference connected (includes V₀₂, Gain Error, and Voltage Reference Errors). (5) External trim slightly affects drift. (6) I₀ Ref = 5mA, I₀ Rev = 2mA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIN CONFIGURATION



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

Supply	±22V
Input Current, Continuous	40mA
Input Current Momentary, 0.1s	250mA, 1% Duty Cycle
Common-Mode Input Voltage, Continuous	±40V
Lead Temperature (soldering, 10s)	+300°C
Output Short-Circuit to Common (Rcv and Ref)	Continuous

NOTE: (1) Stresses above these ratings may cause permanent damage.

PACKAGE INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER ⁽¹⁾
RCV420KP	15-Pin Plastic DIP	19D
RCV420JP	15-Pin Plastic DIP	19D

NOTE: (1) For detailed drawing and dimension table, please see end of data sheet, or Appendix C of Burr-Brown IC Data Book.

ORDERING INFORMATION

PRODUCT	PERFORMANCE GRADE	PACKAGE
RCV420KP	0°C to +70°C	15-Pin Plastic DIP
RCV420JP	0°C to +70°C	15-Pin Plastic DIP

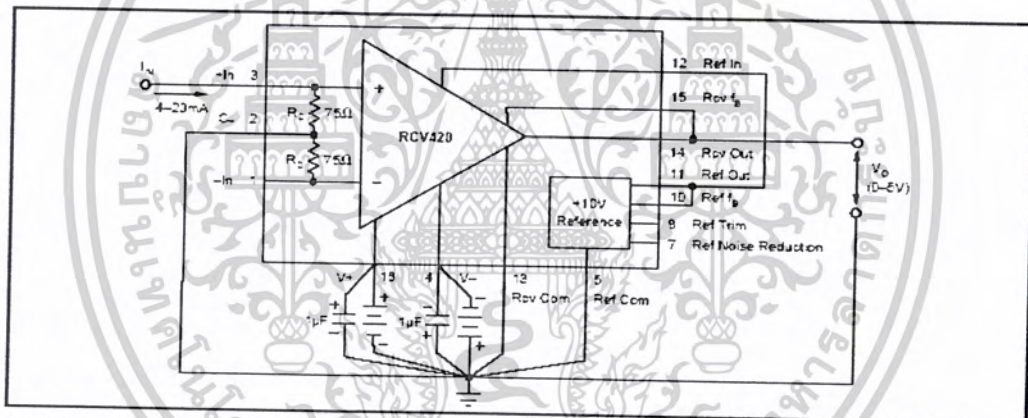


FIGURE 1. Basic Power Supply and Signal Connections.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SBOC141A - JANUARY 1984 - REVISED AUGUST 2003

PRECISION VOLTAGE-TO-CURRENT CONVERTER/TRANSMITTER

FEATURES

- 4mA TO 20mA TRANSMITTER
- SELECTABLE INPUT/OUTPUT RANGES:
0V to +5V, 0V to +10V Inputs
0mA to 20mA, 5mA to 25mA Outputs
Other Ranges
- 0.005% MAX NONLINEARITY, 14 BIT
- PRECISION +10V REFERENCE OUTPUT
- SINGLE SUPPLY OPERATION
- WIDE SUPPLY RANGE: 13.5V to 40V

APPLICATIONS

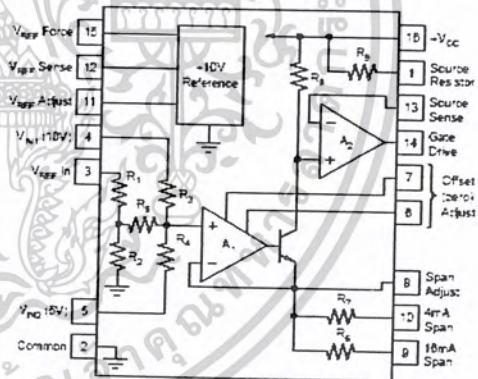
- INDUSTRIAL PROCESS CONTROL
- PRESSURE/TEMPERATURE TRANSMITTERS
- CURRENT-MODE BRIDGE EXCITATION
- GROUNDED TRANSDUCER CIRCUITS
- CURRENT SOURCE REFERENCE FOR DATA ACQUISITION
- PROGRAMMABLE CURRENT SOURCE FOR TEST EQUIPMENT
- POWER PLANT/ENERGY SYSTEM MONITORING

DESCRIPTION

The XTR110 is a precision voltage-to-current converter designed for analog signal transmission. It accepts inputs of 0 to 5V or 0 to 10V and can be connected for outputs of 4 to 20mA, 0 to 20mA, 5 to 25mA and many other commonly used ranges.

A precision on-chip metal film resistor network provides input scaling and current offsetting. An internal 10V voltage reference can be used to drive external circuitry.

The XTR110 is available in 16-pin plastic DIP, ceramic DIP and SOL-16 surface-mount packages. Commercial and industrial temperature range models are available.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS

ELECTRICAL

At $T_A = +25^\circ\text{C}$ and $V_{CC} = +24\text{V}$ and $R_L = 250\Omega^{**}$, unless otherwise specified.

PARAMETER	CONDITIONS	XTR110AG, KP, KU			XTR110BG			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
TRANSMITTER								
Transfer Function			$I_o = 10 [(V_{IN}/16) + (V_{IN}/4) + (V_{IN}/2)] / R_{SPAN}$					
Input Range: $V_{IN}^{(1)}$	Specified Performance	0		+10	*		*	V
Current, I_o	Specified Performance	0		+5	*		*	V
	Specified Performance ⁽¹⁾	4		20	*		*	mA
Nonlinearity	Derated Performance ⁽¹⁾	0		40	*		*	mA
	1EmA/20mA Span ⁽²⁾		0.01	0.025		0.002	0.005	% of Span
Offset Current, I_{os}	$I_o = 4\text{mA}^{(1)}$							
Initial			0.2	0.4		0.02	0.1	% of Span
vs Temperature	(1)		0.0003	0.005		*	0.003	% of Span/°C
vs Supply, V_{CC}	(1)		0.0005	0.005		*	*	% of Span/V
Span Error	$I_o = 20\text{mA}$							
Initial	(1)		0.3	0.6		0.05	0.2	% of Span
vs Temperature	(1)		0.0025	0.005		0.0009	0.003	% of Span/°C
vs Supply, V_{CC}	(1)		0.003	0.005		*	*	% of Span/V
Output Resistance	From Drain of FET ($C_{EXT}^{(3)}$)		10×10^3				*	Ω
Input Resistance	V_{IN}		27			*	*	$k\Omega$
	V_{INZ}		22			*	*	$k\Omega$
	$V_{REF IN}$		19			*	*	$k\Omega$
Dynamic Response								
Setting Time	To 0.1% of Span		15			*	*	μs
	To 0.01% of Span		20			*	*	μs
Slew Rate			1.3			*	*	mV/ μs
VOLTAGE REFERENCE								
Output Voltage		-9.95	+10	+10.05	-9.98	*	+10.02	V
vs Temperature			35	50		15	30	ppm/°C
vs Supply, V_{CC}	Line Regulation		0.0002	0.005		*	*	%/V
vs Output Current	Load Regulation		0.0005	0.01		*	*	%/mA
vs Time			100			*	*	ppm/1k hrs
Trim Range	Specified Performance	-0.100		+0.25	*		*	V
Output Current		10			*		*	mA
POWER SUPPLY								
Input Voltage, V_{CC}		-13.5		+40	*		*	V
Quiescent Current	Excluding I_o		3	4.5	*		*	mA
TEMPERATURE RANGE								
Specification: AG, BG		-40		+85	*		*	°C
KP, KU		0		+70	*		*	°C
Operating: AG, BG		-55		+125	*		*	°C
KP, KU		-25		+85	*		*	°C

* Specifications same as AG/KP grades. ** Specifications apply to the range of R_L shown in Typical Performance Curves.

NOTES: (1) including internal reference. (2) Span is the change in output current resulting from a full-scale change in input voltage. (3) With in compliance range limited by $(+V_{CC} - 2V) + V_{CC}$ required for linear operation of the FET. (4) For V_{REF} adjustment circuit see Figure 3. (5) For extended I_{REF} drive circuit see Figure 4. (5) Unit may be damaged. See section "Input Voltage Range".

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Power Supply, $-V_{CC}$	40V
Input Voltage, V_{IN} , V_{INZ} , V_{REF}	$+V_{CC}$
See text regarding safe negative input voltage range.	
Storage Temperature Range: A, B	-55°C to +125°C
K, U	-40°C to +85°C
Lead Temperature	
(soldering, 10s) G, P	300°C
(wave soldering, 3s) U	260°C
Output Short-Circuit Duration, Gate Drive	
and V_{REF} Force	Continuous to common and $+V_{CC}$
Output Current Using Internal 50k Resistor	40mA



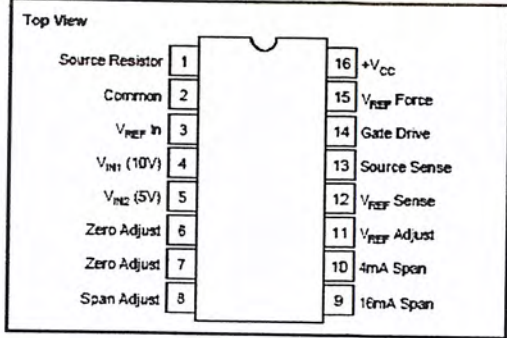
ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

This integrated circuit can be damaged by ESD. Texas Instruments recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIN CONFIGURATION



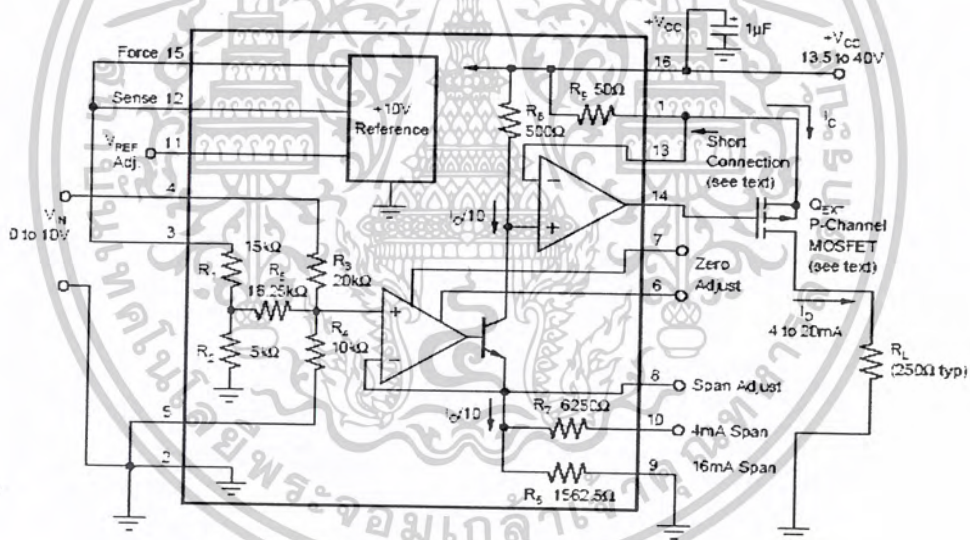
PACKAGE INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER ⁽¹⁾
XTR110DAG	16-Pin Ceramic DIP	109
XTR110DBG	16-Pin Ceramic DIP	109
XTR110KDP	16-Pin Plastic DIP	180
XTR110KDU	SOL-16 Surface-Mount	211

NOTE: (1) For detailed drawing and dimension table, please see end of data sheet, or Appendix C of Burr-Brown IC Data Book.

ORDERING INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	TEMPERATURE RANGE
XTR110DAG	16-Pin Ceramic DIP	-40°C to +85°C
XTR110DBG	16-Pin Ceramic DIP	-40°C to +85°C
XTR110KDP	16-Pin Plastic DIP	0°C to +70°C
XTR110KDU	SOL-16 Surface-Mount	0°C to +70°C



INPUT RANGE (V)	OUTPUT RANGE (mA)	PIN 3	PIN 4	PIN 5	PIN 9	PIN 10
0-10	0-20	Com	Input	Com	Com	Com
2-10	4-20	Com	Input	Com	Com	Com
0-10	4-20	+10V Ref	Input	Com	Com	Open
0-10	5-25	+10V Ref	Input	Com	Com	Com
0-5	0-20	Com	Com	Input	Com	Com
1-5	4-20	Com	Com	Input	Com	Com
0-5	4-20	+10V Ref	Com	Input	Com	Open
0-5	5-25	+10V Ref	Com	Input	Com	Com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้