

อุปกรณ์เสริมสำหรับชุดทดลอง CE 124 ระบบตรรกฟัซซี  
ACCESSORIES CE 124 FUZZY LOGIC SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่.....  
เลขทะเบียน 46539  
วัน, เดือน, ปี ๒๕๕๖

ปีการศึกษา 2544

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกการศึ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา และอ.บุญชนะ ภูระหงษ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ  
ให้โปรเจกต์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทั้งไปรษณีย์และสื่อที่ทางมหาวิทยาลัย และเซอร์ฟแวร์รวมถึงการทำให้  
คำปรึกษาต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณบริษัท ESSO และ บริษัท FOXBORO ที่ได้ช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์ และ  
ให้คำปรึกษาได้เป็นอย่างดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PROJECT TITLE** ACCESSORIES CE124 FUZZY LOGIC SYSTEM  
**STUDENT** Mr. Dachanan Tipmud No. 43015724  
Mr. Paradon Kongsawit No. 43015741  
**ADVISOR** Asso.Prof.Dr. Pitikhate Suraksa  
Mr.boonchana poorahong  
**COURSE** Bachelor of Industrial Technology in Electronics  
**DEPARTMENT** Information Engineering  
**YEAR** 2001

**ABSTRACT**

This project is to develop to simulate the controller systems used in industry. The task of this automatic controlling system is to control production line. The main objective of this device is to study the differences, advantages and disadvantages between controller using "PID" and "Fuzzy", for production line control level. In addition, it is also for studying each machinery parts in detailed level.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ใบเสนอปริญญาบัตร

หัวข้อปริญญาบัตร	อุปกรณ์เสริมสำหรับชุดทดลอง CE 124 ระบบตรรกะพีซี
นักศึกษา	นายเดชนันต์ ทิพย์หมัด รหัสประจำตัว 43015724
	นายภราคร คงสวัสดิ์ รหัสประจำตัว 43015741
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาบัตร	ผศ.ดร.ปิติเขต ผู้รักษา อ. บุญยชนะ ภูระหงษ์
ระดับการศึกษา	ปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
ปีการศึกษา	2544

ปริญญาบัตรฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว



(อ.บุญยชนะ ภูระหงษ์)

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 1	6
บทนำ	6
บทที่ 2	8
2.1 การวัดระดับ (Level Measurement)	8
2.1.1 การวัดระดับโดยการวัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Pressure Method)	8
2.1.1.1 แบบท่อปล่อยอากาศ (Air Purge Tube)	9
2.1.1.2 การวัดระดับน้ำในภาชนะที่มีความดันและอุณหภูมิสูง	10
2.2 การวัดอัตราการไหล (Flow Measurement)	13
2.2.1 การแยกประเภทของการวัดอัตราการไหล	13
2.2.2 รูปแบบของการไหล	14
2.2.2.1 Laminar Flow	14
2.2.2.2 Turbulent Flow	15
2.2.3 ค่าความหนืด (Viscosity)	16
2.2.4 อุณหภูมิ (Temperature)	18
2.2.5 ความดัน (Pressure)	18
2.2.6 Compressibility	18
2.3 สัญญาณมาตรฐานในการควบคุมอัตโนมัติ	22
2.3.1 สัญญาณมาตรฐาน	22
2.3.1.1 สัญญาณมาตรฐานมิใช้ในระบบควบคุม	23
2.3.1.2 ข้อดีของระบบกระแสเทียบกับระบบแรงดันไฟฟ้า	24
2.3.1.3 ข้อดีของระบบแรงดันไฟฟ้าเทียบกับระบบกระแส	24
2.3.2 การเปรียบเทียบระบบเครื่องมือวัดควบคุมระบบลมกับอิเล็กทรอนิกส์	24
2.3.3 Transmitter	28
2.3.3.1 แผ่นแสดงคุณสมบัติ (Name Plate)	28
2.3.3.2 รูปแบบโดยทั่วไป	29
2.4.2.3 ส่วนประกอบ (Name Of Components)	30
2.4.2.4 การต่อวงจร (Wiring)	32
2.5 ระบบทางพลศาสตร์ของกระบวนการ	36
2.5.1 ระบบทางพลศาสตร์ของกระบวนการอันดับที่หนึ่ง	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2	ระบบทางพลศาสตร์ของกระบวนการอันดับที่สอง	37
2.5.3	ระบบทางพลศาสตร์ของกระบวนการอันดับที่สอง	41
3.1	ทำไมจึงต้องใช้ “FUZZY CONTROL”	46
3.1.1	เหตุผลทางทฤษฎี	46
3.1.2	เหตุผลทางปฏิบัติ	46
3.2	FUZZY คืออะไร	47
3.3	FUZZY ทำงานอย่างไร	47
3.4	FUZZY MODELS	49
3.4.1	Fuzzification of Inputs (FUZZLIFIER)	49
3.4.2	Rule Evaluation (กฎของการวินิจฉัย)	49
3.4.3	Defuzzification of Outputs (DEFUZZIFIER)	49
3.4.3.1	เทคนิคและวิธีการเปลี่ยน Fuzzy Sets เป็น Crisp Sets	50
3.4.3.2	ทฤษฎีค่าน้ำหนักเฉลี่ย	50
3.4.3.3	กรรมวิธีค่าศูนย์กลาง (Center of Gravity, Centroid)	50
3.4.3.4	กรรมวิธีซึ่งเกิดต้น: สังเคราะห์เอา output เดียว	51
3.5	ทฤษฎี Fuzzy Control	51
3.5.1	ทฤษฎี Crisp Sets มีหลักการดังนี้	51
3.5.1.1	ทฤษฎี Fuzzy Sets มีหลักการดังนี้	53
3.5.1.2	ทฤษฎี Fuzzy Logic	55
3.6	ข้อดีและข้อเสียของการควบคุมโดยใช้ FUZZY	55
3.7	ตัวอย่าง Temperature Control by Fuzzy	56
3.8	การประยุกต์ใช้งาน โดยการใช้ Fuzzy Control	56
บทที่ 4	ตัวควบคุมแบบ PID และการนำไปใช้งาน	58
4.1	ลักษณะสมบัติของ โพรเซส (Process Characteristic)	58
4.2	แบบต่าง ๆ ของการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control Modes)	59
4.3	On-Off Controller (Two-Position Control)	60
4.4	Proportional Control (P-only Control)	61
4.5	Proportional-Plus-Integral Control (PT-Control)	62
4.6	Proportional – Plus-Integral-Plus-Derivative Control (PID) Control)	64
4.7	Proportional-Plus-Derivative Control (PD-Control)	64
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง	67
5.1	ขั้นตอนการทดลอง	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์การควบคุม	6
รูปที่ 2.1 แสดงการวัดแบบท่อปล่อยอากาศ	9
รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของตำแหน่งการวัดแบบใช้ความดันในถัง	11
รูปที่ 2.3 แสดงบล็อกของสมการคิฟเฟอเรนเชียล	13
รูปที่ 2.4 การต่อวงจร	13
รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบการไหลของ Laminar Flow	14
รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบการไหลของ Turbulent Flow	15
รูปที่ 2.7 แสดงภาพของสมการความหนืด	16
รูปที่ 2.8 แสดงอัตราการไหลของของเหลวในท่อและความเร็วที่เกิดขึ้น	19
รูปที่ 2.9 แสดงอัตราความเร็วของของเหลวในท่อ และ ค่า $\eta$	21
รูปที่ 2.14 เป็นการแสดงการควบคุมป้อนกลับในรูปของ Block Diagram	22
รูปที่ 2.16 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของคอนโทรลเลอร์	27
รูปที่ 2.17 แผ่นแสดงคุณสมบัติของทรานสมิตเตอร์	28
รูปที่ 2.18 รูปแบบโดยทั่วไปของทรานสมิตเตอร์ รุ่น UNE 11	29
รูปที่ 2.19 แสดงส่วนประกอบของทรานสมิตเตอร์	30
รูปที่ 2.20 แสดงจุดปรับแต่งต่างในการปรับเทียบมาตรฐาน	31
รูปที่ 2.21 แสดงการต่อใช้งานของทรานสมิตเตอร์กับแหล่งจ่าย และเครื่องรับ	32
รูปที่ 2.22 แสดงการวัดระดับแบบถึงเปิด	33
รูปที่ 2.23 แสดงการวัดระดับแบบถึงปิด แบบ Dry Leg	34
รูปที่ 2.24 แสดงการวัดระดับแบบถึงปิด แบบ Wet Leg	35
รูปที่ 2.25 กระบวนการระดับอันดับที่หนึ่ง	36
รูปที่ 2.26 กระบวนการระดับชนิดอนุกรม-แบบระบบที่ไม่มีผลกระทบต่อกัน	38
รูปที่ 2.27 กระบวนการระดับของเหลวชนิดอนุกรม-แบบระบบที่มีผลกระทบต่อกัน	40
รูปที่ 3.1 แสดงกราฟ Crisp Sets ของช่วงอายุวัยกลางคน	42
รูปที่ 3.2 แสดงกราฟ Fuzzy Sets ของช่วงอายุวัยกลางคน	43
รูปที่ 3.3 การใช้ Fuzzy ในการควบคุมระบบป้อนกลับ	52
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรม	54
รูปที่ 4.2 สัญญาณขาออก V.S. สัญญาณขาเข้าของ On - Off Controller (กรณี Open - loop)	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 สัญญาณขาออก v.s. สัญญาณขาเข้าของ P-only Controller (กรณี Open-Loop)	57
รูปที่ 4.4 สัญญาณขาออก v.s. สัญญาณขาเข้าของ PI-Controller ขณะ Openloop	59
รูปที่ 4.5 ผลของ D-Action ในตัวควบคุม PD-Controller ขณะ Openloop	60
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงผลการทดลอง PID	68
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงผลการทดลอง FUZZY	69



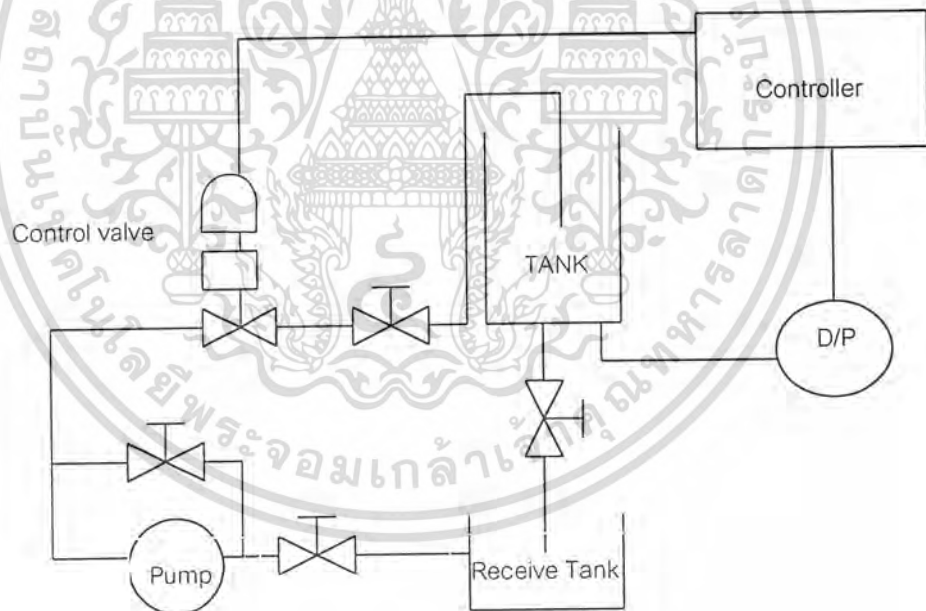
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

ปัจจุบันระบบการควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้การควบคุมแบบอัตโนมัติ มาควบคุมขบวนการผลิตรวมไปถึงการควบคุมระดับและการควบคุมอัตราการไหลของของเหลว ซึ่งพูดได้ว่าเป็นส่วนสำคัญมากในระบบ โรงงานอุตสาหกรรมเช่นระบบน้ำประปา, ระบบโรงกลั่น น้ำมันปิโตรเลียมหรือก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งระบบเหล่านี้ที่สำคัญต้องมีสัญญาณติดต่อซึ่งกันและกัน ในการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์หลายตัวถึงจะทำให้ระบบเหล่านั้นเป็นจริง

โครงการนี้เป็นการจำลองระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติทางด้านการควบคุมระดับและการควบคุมอัตราการไหลของของเหลว เพื่อศึกษาถึงข้อแตกต่างของระบบควบคุมทั้งแบบการควบคุมแบบอัตโนมัติที่ใช้การควบคุมแบบ PID และการควบคุมแบบอัตโนมัติที่ใช้การควบคุมแบบ FUZZY LOGIC และศึกษารายละเอียดการทำงานของอุปกรณ์ในระบบควบคุม ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์การควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งที่สำคัญของระบบวัดคۇمนี้ ก็คืออุปกรณ์ที่ใช้ในระบบที่ประกอบไปด้วย คอนโทรลวาล์ว (CONTROL VALVE), คอนโทรลเลอร์ (CONTROLLER), ทรานสมิตเตอร์ (TRANSMITTER) ฯลฯซึ่งจะมีการทำงานเริ่มที่ทรานสมิตเตอร์ได้มีการตรวจจັบระดับของของเหลวในระบบ (PROCESS)จะเช็คว่ามีระดับเป็นเช่นไรแล้วจะส่งสัญญาณไปให้กับคอนโทรลเลอร์คำนวณว่าจะสั่งให้คอนโทรลวาล์วหรี่ เปิดกว้าง หรือปิด เพื่อจะทำให้ระดับน้ำในถัง นั้นเป็นไปตามความต้องการของระบบที่ได้ตั้งเป้าหมายไว้แล้ว แต่จะเห็นว่าระบบวัดคۇม และอุปกรณ์วัดคۇมที่ได้กล่าวมานี้จะไม่ค่อยมีให้พบกันได้อบยนัก โครงการนี้จึงมีแรงบันดาลใจในการจำลองระบบวัดคۇมนี้ ขึ้นมาเพื่อให้นักศึกษาได้สัมผัสระบบงานจริง และจะเป็นประโยชน์ทางการศึกษาได้ในโอกาสต่อไปข้างหน้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 การวัดระดับ (Level Measurement)

ในงานอุตสาหกรรมเกือบทุกประเภทจะมีงานวัดระดับแทรกอยู่ด้วยเสมอเช่นการวัดระดับน้ำมัน น้ำในถังการวัดระดับน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์โดยอาศัยหลักการวัดโดยวิธีตรงที่ใช้ลูกลอย หรือ ดิพสติก (Dipsticks) ซึ่งเป็นวิธีการวัดแบบง่าย ๆ แต่ถ้าเป็นการวัดระดับในภาชนะที่มีแรงดันสูง อุณหภูมิสูง เป็นสารเคมีที่มีอันตราย หรือต้องการสัญญาณระดับเพื่อการควบคุมบันทึกค่า ดังนี้ จะใช้การวัดโดยวิธีตรงไม่ได้จะต้องประยุกต์ หลักการทางวิทยาศาสตร์อื่น ๆ เข้าช่วย เพื่อให้งานการวัดระดับบรรลุผลตามความมุ่งหมาย

##### 2.1.1 การวัดระดับโดยการวัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Pressure Method)

หลักการวัดระดับ โดยวิธีการวัดความดันดิฟเฟอเรนเชียลเป็นที่แพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมวิธีหนึ่งสามารถใช้กับของเหลวที่สกปรกมีความดันหรืออุณหภูมิสูงได้ดี หลักการวัดตามสมการเบื้องต้น ดังนี้

$$P = h \cdot SG_m$$

เมื่อ

P คือ ค่าความดันมีหน่วยเป็น เมตรน้ำ

h คือ ค่าความสูงของเหลว มีหน่วยเป็นเมตร

SG<sub>m</sub> คือ ความถ่วงจำเพาะของสาร (ไม่มีหน่วย)

พิจารณาจากสมการค่าความถ่วงจำเพาะของสารเป็นค่าคงที่ซึ่งเป็นคุณสมบัติประจำตัวของสารนั้น เช่น น้ำมีค่าความถ่วงจำเพาะเป็น 1, โปรทมีค่า ความถ่วงจำเพาะเป็น 13.6 ดังนั้นความดันที่เกิดขึ้นจึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสูงของของเหลวนั้น ดังสมการใหม่นี้

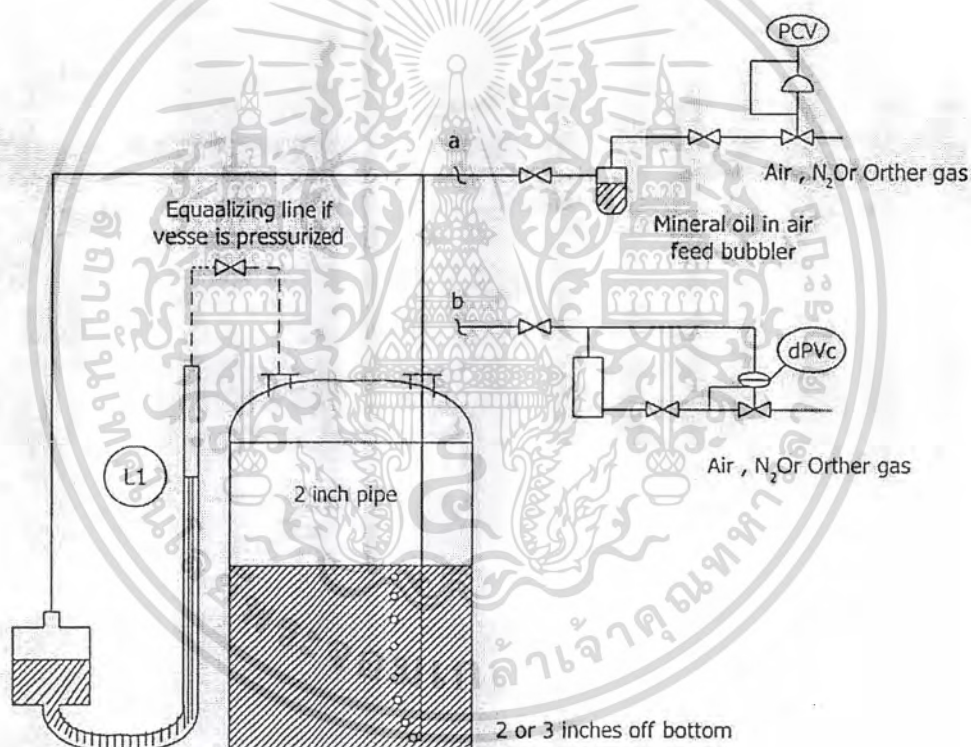
$$h = \frac{P}{SG_m} \dots\dots\dots 2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1.1 แบบท่อปล่อยอากาศ (Air Purge Tube)

อุปกรณ์การวัดแบบง่าย ๆ ตามรูปที่ 2.1 เหมาะสำหรับใช้วัดระดับของเหลวในถังเปิด โดยเฉพาะถ้าของเหลวนั้นสกปรก, หรือมีฤทธิ์กัดกร่อนเพราะอุปกรณ์สำหรับวัดไม่ต้องสัมผัสโดยตรงกับของเหลวนั้น

วิธีการวัด ใช้ท่อปล่อยอากาศ (Air Purge Tube) ซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีต่อการกัดกร่อนของเหลวได้ดี ติดตั้งตามแนวความสูงของถังด้านล่างห่างจากระดับก้นถังหรือระดับตกตะกอน 2-3 นิ้วด้านบนมีระบบอัด



รูปที่ 2.1 แสดงการวัดแบบท่อปล่อยอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศป้อนลงมาสู่ท่อนี้ตลอดเวลาก๊าซที่นิยมใช้ คือ ไนโตรเจน หรือ อากาศ ไม่ทำปฏิกิริยากับของเหลวในระบบก๊าซที่จะป้อนลงสู่ท่อปล่อยอากาศจะต้องผ่านวาล์วรักษาความดัน (Regulating Valve) ตัววัดการไหลของก๊าซ (Rotameter) หรืออาจใช้กระเปาะบรรจุน้ำหรือน้ำมัน เพื่อสังเกตว่ามีก๊าซไหลผ่านอยู่ตลอดเวลา ตามรูป 2.1 ความดันในท่อปล่อยอากาศจะมีค่าเท่ากับ ความดันของของเหลวระดับปลายท่อ เพราะเมื่อความดันในท่อสูงกว่าก๊าซในท่อจะถูกระบายออกไป ดังนั้นความดันของก๊าซในท่อจะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามระดับความสูงของของเหลว เราจึงสามารถทราบค่าความสูงได้จากค่าความดันในท่อนี้ สาเหตุที่ต้องให้ก๊าซไหลผ่านท่อตลอดเวลาเพื่อให้แน่ใจว่าท่อไม่ตัน และค่าความดันของก๊าซในท่อไม่ต่ำกว่าความดันของของเหลวที่ปลายท่ออันจะทำให้ของเหลวไหลย้อนเข้าไปในท่อคาร์ระดับที่อ่านได้จะผิดไปจากความเป็นจริงท่อปล่อยอากาศจะต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 8 มิลลิเมตร และพิวด้านในของท่อต้องเรียบเพื่อลดการสูญเสียความดัน (Pressure Loss) และถ้าของเหลวที่วัดระดับอยู่นั้นมีแนวโน้มที่จะเกิดการอุดตันได้ง่ายจะต้องมี By pass ต่อความดันที่มีค่ามากกว่าปกติเป่าไล่สิ่งที่จะสะสมอยู่ในท่อควรมีค่าประมาณ 0.2 ลิตรต่อนาทีวิธีการแบบนี้ สามารถวัดระดับได้ตั้งแต่ 0.3 ถึง 10 เมตรความผิดพลาดประมาณ  $\pm 1\%$  ถ้าต้องการอ่านค่าระดับในจุดที่ห่างออกไปไกลกว่า 75 ฟุตต้องใช้ทรานสมิตเตอร์ที่ใช้วัดค่าความดันดิฟเฟอเรนเชียลเข้าช่วย

### 2.1.1.2 การวัดระดับน้ำในภาชนะที่มีความดันและอุณหภูมิสูง

การวัดระดับน้ำในภาชนะที่มีความดันและอุณหภูมิสูง เช่น หม้อน้ำเลี้ยง (Drum) ของหม้อไอน้ำ (Boiler) ซึ่งน้ำที่อยู่ภายใต้สภาวะจุดเดือด (Saturation) ตลอดเวลา ค่าสัญญาณระดับน้ำที่ใช้ป้อนเข้าเครื่องควบคุมเพื่อเติมน้ำให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมตลอดเวลา ในปัจจุบันนิยมใช้หลักการวัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล การจัดเตรียมอุปกรณ์ดังในรูปที่ 2.2 กระเปาะน้ำที่จุดต่อด้านบนมีไว้ เพื่อเป็นจุดเปรียบเทียบ (Reference) ขณะใช้งานไอน้ำภายในกระเปาะมีระดับคงที่อยู่ตลอดเวลา ค่าความดันดิฟเฟอเรนเชียลที่วัดได้เกิดจากความแตกต่างของระดับน้ำในกระเปาะกับระดับน้ำของหม้อน้ำเลี้ยง ค่าความแตกต่างที่วัดได้จะมีค่ากลับกันกับระดับน้ำในหม้อน้ำเลี้ยง คือ ค่าความแตกต่างจะเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อระดับน้ำลดลงต่ำสุด และค่าความแตกต่างจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อระดับในหม้อน้ำเลี้ยงสูงท่วมระดับจุดต่อบนคือสูงเสมอระดับน้ำในกระเปาะ

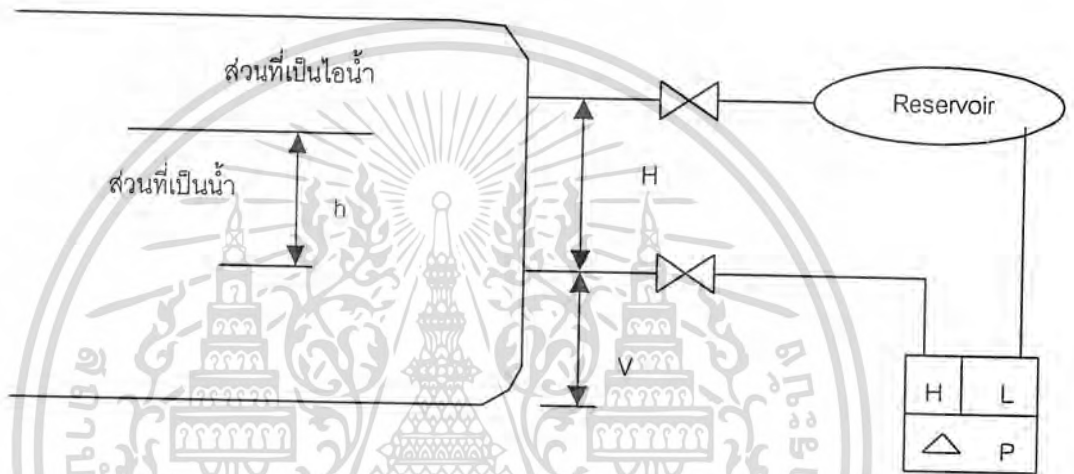
ปัญหาความยุ่งยากของการวัดระดับน้ำที่อยู่ภายใต้สภาวะจุดเดือดคือจุดเดือดของน้ำจะเปลี่ยนไปตามค่าความดันภายในขณะเดียวกัน ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมีแนวโน้มลดลงและค่าความถ่วงจำเพาะของไอน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจุดเดือดของน้ำเพิ่มขึ้น ถ้าความดันภายในเพิ่มขึ้น ดังแสดงกราฟรูป 2.4 ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำจะมีค่าลดลงเท่ากับไอน้ำเมื่อความดันสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3208.2 Psig และอุณหภูมิจุดเดือดเพิ่มขึ้นเป็น 705.47 °F ดังนั้น สูตรที่ใช้คำนวณในเบื้องต้นจึงใช้ไม่ได้ เนื่องจาก

$$h = \frac{\Delta P}{SG_m} \dots\dots\dots 3$$

ค่าความถ่วงจำเพาะเปลี่ยนค่าไปตามความดันตลอดเวลา จะต้องมียางจรที่คอยแก้ค่าความถ่วงจำเพาะ ให้ถูกต้องตลอดย่านการใช้งาน



รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของตำแหน่งการวัดแบบใช้ความดันในถัง เมื่อพิจารณาจากรูป 2.2

ความดันที่ด้าน L ของตัววัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล เกิดจากผลรวมของความดันสถิตภายใน บวกกับความดันที่เกิดจากน้ำในท่อด้าน L

ความดันที่ด้าน H ของตัววัดเกิดจากผลรวมของความดันสถิตภายใน, ความดันที่เกิดจากแรงกดของไอน้ำ, ความสูงของน้ำภายใน และความดันที่เกิดจากน้ำในท่อ H ถ้ากำหนดให้ Pd คือ ความดันสถิตภายในหม้อน้ำเลี้ยง (Drum Static Pressure)

H คือ ระยะความสูงระหว่างจุดต่อบนและจุดต่อด้านล่าง

h คือ ความสูงของน้ำจากจุดต่อด้านล่าง

Gs คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของไอน้ำที่อิมตัวภายในหม้อน้ำเลี้ยง (Gravity of Sat. Steam)

Gw คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อิมตัว (Specific Gravity of Saturated water)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V คือ ค่าความสูงจากจุดล่างของหม้อน้ำเลี้ยงถึงตัววัดค่าความดันดิฟเฟอเรนเชียล

Go คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำในท่อต่อเข้าตัววัด

PH คือ ค่าความดันที่ปรากฏที่ด้าน H ของตัววัด

PL คือ ค่าความดันที่ปรากฏที่ด้าน L ของตัววัด

จะได้

$$PH = Pd + (H-h) G_s + h G_w + Vgo \quad \dots\dots\dots 4$$

$$PL = Pd + Hgo + Vgo \quad \dots\dots\dots 5$$

ความดันดิฟเฟอเรนเชียล ( $\Delta P$ ) ที่เกิดขึ้นที่ตัววัดจะมีค่าเท่ากับ PH - PL

$$\Delta P = PH - PL = h G_w + (H - h) G_s - Hgo \quad \dots\dots\dots 6$$

จากสมการ....3 นำ Hgo หาคancel จะได้

$$\Delta P = \frac{h(G_w - G_s)}{Hgo} - \frac{(Go - G_s)}{Go} \quad \dots\dots\dots 7$$

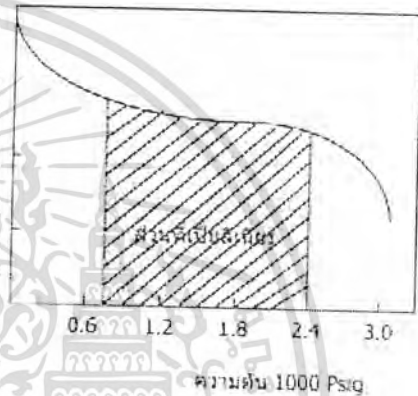
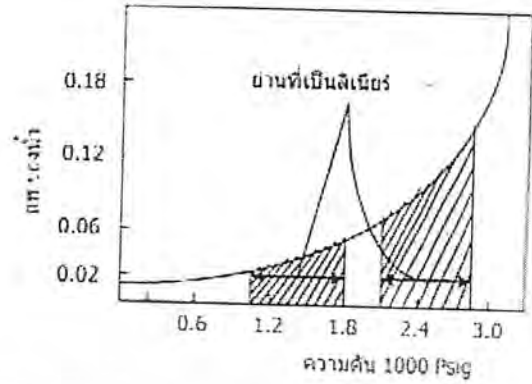
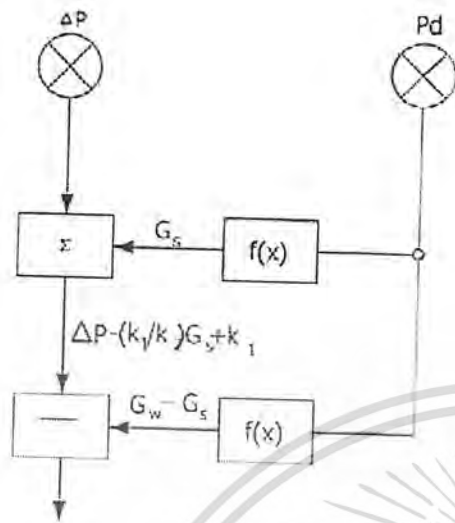
ถ้ากำหนดให้  $K_1 = Hgo$  และ  $K_2 = Go$  และแทนค่าลงใน .....7

$$\text{จะได้} \quad \Delta P = h(G_w - G_s) - \frac{K_1 + K_1 G_s}{K_2} \quad \dots\dots\dots 8$$

$$h = \frac{\Delta P - (K_1/K_2)G_s + K_2}{(G_w - G_s)} \quad \dots\dots\dots 9$$

จากวงจรการวัดจะเป็นดังรูป 2.3 ค่าความสูงของระดับน้ำภายในหม้อน้ำเลี้ยงจึงจะถูกต้องตลอดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$h = \frac{\Delta P - (k_v/k)G_s + k_1}{G_w - G_s}$$

รูป 2.3 แสดงบล็อกของสมการ  
ที่มีเฟืองเรขาคณิต

## 2.2 การวัดอัตราการไหล (Flow Measurement)

โดยทั่วไปแล้วการวัดอัตราการไหลของของไหลนั้นทำได้ 2 แบบคือทางกล (Mechanical Type) และทางไฟฟ้า (Electrical Type) กล่าวคือ ทางกลนั้น โดยทั่วไปจะใช้วัดของไหลในท่อ (Pipe) เป็นส่วนมาก อาจวัดโดยให้ผ่านกังหัน (Vane) และออกมาในรูปทางกลคือแรงบิด (Torque) หรือใช้ความแตกต่างของความดันที่ไหลผ่านออริฟิส (Orifice) ส่วนทางไฟฟ้าจะเป็นไปในรูปของขดลวดตัดผ่านสนามแม่เหล็ก และการเปลี่ยนค่าความต้านทานของการไหลหลักการของการวัดทางไฟฟ้าจะเอาผลที่ได้จากทางกลมาใช้งาน โดยใช้เครื่องมือที่เปลี่ยนงานทางกลเป็นทางไฟฟ้าโดยเป็นสัดส่วนที่สอดคล้องกันออกมา

### 2.2.1 การแยกประเภทของการวัดอัตราการไหล

การวัดของไหลขึ้นอยู่กับปริมาณการไหลและอัตราไหล โดยปริมาณของของไหลนั้นจะอยู่ในลักษณะของน้ำหนักหรือปริมาตรของการไหล เช่น ปริมาตรในกระบอกสูบเป็นต้นส่วนอัตราการไหลนั้นเราสามารถค้นหาจากการไหลที่ต่อเนื่องของของไหล โดยมีหน่วยต่อเวลาในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของสัญญาณและอัตราการไหล โดยเราสามารถกระทำได้หลายแบบ เช่น แผ่นออริฟิส กังหัน Electromagnetic Flow Meter เป็นต้น

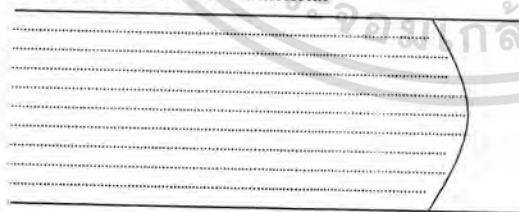
สิ่งสำคัญที่ลืมไม่ได้ในเครื่องมือที่นำมาวัดการไหล คือ Accuracy, Reliability และ Repeatability ในการวัดการไหล ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นฐานหลายอย่าง ที่ควรทราบเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เครื่องมือในการวัดให้เหมาะสม เช่น ค่าความหนืด (Viscosity), ความหนาแน่น (Density) การลดปริมาตรลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น (Compressibility), ความดัน, อุณหภูมิ ฯลฯ โดย ค่าเหล่านี้จะสัมพันธ์กันแทบทั้งสิ้น

## 2.2.2 รูปแบบของการไหล

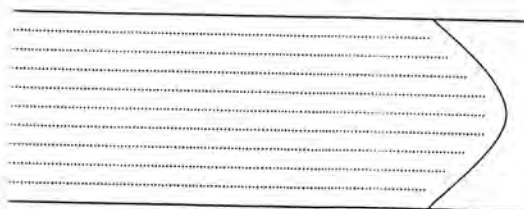
### 2.2.2.1 Laminar Flow

ลักษณะการไหลจะเป็นไปอย่างราบเรียบชั้นของ Fluid จะขนานกันไปตลอด ไหลในลักษณะนี้เกิดจาก Fluid นั้นมีความหนืดสูงมาก เช่น กlycerin น้ำมันเตา อนุของสารเหล่านี้จับตัวกันแน่น หรือ อัตราการไหลมีค่าต่ำมาก ๆ

ในการวัด Flow โดยทั่ว ๆ ไปแล้วส่วนใหญ่จะไม่พบการไหลแบบ Laminar นี้ข้อดีของการไหลแบบนี้ให้ Rangeability ดีกว่าแบบ Turbulent มากในเครื่องวัดแบบ Turbulent ค่าการไหล Flow จะแปรผันตามความดันดิฟเฟอเรนเชียลกำลังสองซึ่งจะให้ Rangeability ประมาณ 5:1 เป็นอย่างสูงแต่ในการไหลแบบ Laminar ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Flow กับค่าความดันดิฟเฟอเรนเชียลจะเป็นแบบเชิงเส้น (Linear) ทำให้ได้ค่า Rangeability ได้ถึง 100:1 และให้ความถูกต้องดีตลอดย่านคิดกับแบบ Turbulent ที่ให้ความถูกต้องดีเฉพาะ Flow ย่านสูง ๆ แต่ย่านต่ำ ๆ จะมีค่าผิดพลาดสูง การแบ่งย่าน Laminar Flow กับ Turbulent Flow พิจารณาจากค่า Reynold Number  $Rd$  จาก 0 ถึง 2100 เป็นย่าน Laminar



Lamina



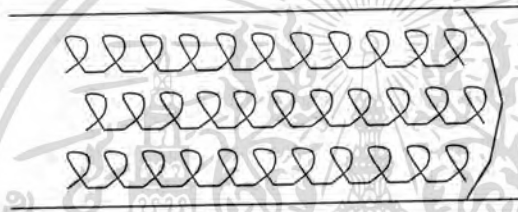
Critical Flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบการไหลของ Laminar Flow  
แต่ในช่วง  $Rd$  2100 ถึง 4000 จะเป็นย่านวิกฤติ [Critical Zone] ซึ่งการไหลสองแบบผสม  
กัน

### 2.2.2.2 Turbulent Flow

การไหลส่วนใหญ่จะเป็นแบบ Turbulent Flow แทบทั้งสิ้น ในลักษณะการไหล  
จะเป็นแบบไม่เป็นระเบียบไม่มีชั้นที่แน่นอนการไหลลักษณะนี้เป็นไปในท่อซึ่งเราไม่สามารถเห็น  
ได้จะต้องพิจารณาค่า Reynold Number  $Rd$  ถ้าค่า  $Rd$  มากกว่า 4000 ขึ้นไปจะเป็นการไหลแบบ  
Turbulent



รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบการไหลของ Turbulent Flow

จากการทดลองพบว่าการไหลโดยผ่านออร์ฟิสนั้นเป็นแบบ Turbulent แทบทั้งสิ้น

- Reynold Number,  $Rd$

ตั้งชื่อตามนักวิจัยยุคแรก Osborne Reynold ผู้ค้นพบปรากฏการณ์ของการไหลโดย  
Reynold พบว่าตัวเลขครุฑซึ่งบอกรูปภาพของการไหล ขึ้นอยู่กับความเร็วในการไหล ความหนืด  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และ ความหนาแน่นของ Fluid  
ถ้ากำหนดให้

$p$  คือ ค่าความหนาแน่นของ Fluid

$v$  คือ ความเร็วในการไหล

$d$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

$\eta$  คือ ค่าความหนืดของ Fluid

จะได้

$$Rd = \frac{v \cdot d \cdot p}{\eta} ; Rd \text{ เป็นค่าที่ไม่มีหน่วย (Dimensionless)}$$

.....10

๗

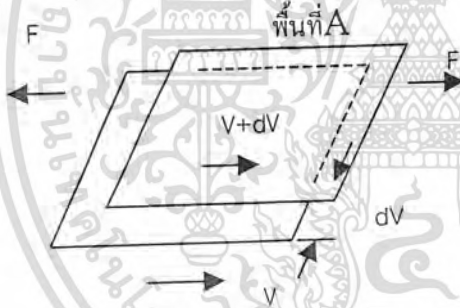
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ค่าความหนืด (Viscosity)

ค่าความหนืด คือ คุณสมบัติต่อต้านการไหลของสาร ในสมัยก่อนเรากำหนดค่าความหนืดได้จากเครื่องมือที่รักษาระดับสูง และ อุณหภูมิของของเหลวและให้ของเหลวไหลออกมา (หยด) ออกมาในช่องแคบ ๆ [Orifice] หรือท่อแคพพิลารี ให้ได้ปริมาตรที่กำหนด ค่าความหนืดของน้ำเท่านั้น ที่เหมาะกับการเปรียบเทียบในวงการอุตสาหกรรมน้ำมัน เท่านั้น แต่เมื่อวิทยาศาสตร์เจริญก้าวหน้ามากขึ้น ค่าความหนืดของสารอื่น ๆ ที่เป็นก๊าซจึงจำเป็นต้องกำหนดขึ้น จึงมีผู้ที่คิดค้นหาหน่วยที่เป็นวิทยาศาสตร์สามารถคำนวณร่วมกับตัวแปรอื่น ๆ ได้โดยกำหนดนิยามขึ้นดังนี้

ความหนืด =  $\frac{\text{Shear Stress}}{\text{Velocity Gradient}}$  .....11

โดยแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.7 แสดงภาพของสมการความหนืด

ให้ : Shear Stress มีหน่วยเป็น  $F/A = N/m$ ,  $dy$  เป็นระยะห่าง ระหว่างแผ่นทั้งสองมีหน่วยเป็น เมตร [m] เพราะฉะนั้นความเร็วของแผ่นทั้งสองที่แยกจากกัน  $dv$  ด้วย Shear Stress มีหน่วยเป็น  $m/s$  และ:  $\eta$  คือ ความหนืดแบบสัมบูรณ์ จะได้

$$\eta = \frac{N/m^2}{m/s/m} = N \cdot s/m^2$$

$$= kg \cdot (m/s^2 / m^2) \cdot s = kg/m \cdot s \quad \dots\dots\dots 12$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป เป็นการแสดงให้เห็นถึงที่มาของหน่วยความหนืดแบบสัมบูรณ์ระหว่างแผ่นทั้งสอง ฉาบไว้ด้วย Fluid ต่าง ๆ กัน เช่น น้ำมัน, น้ำ เมื่อป้อนแรงเฉือน  $F$  ที่เท่ากันจะทำให้แผ่นทั้งสองแยกออกจากกันด้วยความเร็วต่างกัน ถ้ามีความเร็วมากจะมีความหนืดน้อย แต่ในทางเป็นจริงจะเกิดขึ้นในระหว่างชั้นต่าง ๆ ของ Fluid ในขณะที่มีการไหลค่าความหนืดที่ได้นี้เป็นแบบสัมบูรณ์ การบอกค่าความหนืดที่นิยมอีกแบบหนึ่ง คือ แบบคินเมติก [Kinematic Viscosity]

$$\text{ค่าความหนืดแบบคินเมติก} = \frac{\text{ค่าความหนืดแบบสัมบูรณ์}}{\text{ค่าความหนาแน่นของ Fluid}}$$

$$v = \eta / \rho \quad \dots\dots\dots 13$$

เมื่อ  $v$  คือ ค่าความหนืดแบบคินเมติก  
 $\rho$  คือ ค่าความหนาแน่น

การเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดใน Fluid ที่เป็นของเหลวและก๊าซต่ออุณหภูมิจะมีทิศทางตรงข้ามกล่าวคือ ในของเหลวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนืดจะต่ำลงแต่ในก๊าซอุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนืดจะสูงขึ้นด้วย Poiseuille เป็นผู้ค้นพบและกำหนดว่า

$$\eta = \frac{\eta_0 [1 + at + bt^2]}{(1 + at + bt^2)} \quad \dots\dots\dots 14$$

เมื่อ  $\eta$  คือ ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ  $t$  °C

$\eta_0$  คือ ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 0 °C

a, b คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง

โดยน้ำจะมี  $\eta_0 = 0.0179$  poisc,  $a = 0.03368$  และ  $b = 0.000221$

### 2.2.4 อุณหภูมิ (Temperature)

ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะทำให้ตัวแปรอื่น ๆ อีกหลายตัว เช่นค่าความหนืด, ค่าความหนาแน่น, การลดปริมาตรและความดันเพิ่มขึ้นเปลี่ยนแปลงค่าตามไปด้วยในการวัด Fluid ที่เป็นของเหลวเนื่องจากอุณหภูมิในช่วงไหลผ่านตัววัดมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อย ดังนั้นจึงประมาณว่าเป็นค่าคงที่แต่ใน Fluid ที่เป็นก๊าซหรือเป็น ไอ อุณหภูมิจะต้องวัดและนำมาแก้ไขค่าของ Flow ด้วยในการวัดค่าแบบปริมาตร (Volumetric Flow) ค่าอุณหภูมิพื้นฐาน (Temperature Base) มีค่า 60 °F หรือ 520 °R ในหน่วยของค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ ค่า Flow ในระบบที่มีอุณหภูมิต่ำ ๆ จะต้องเทียบกับอุณหภูมิพื้นฐานนี้ เพื่อสะดวกในการเปรียบเทียบและค่าที่บอกเป็นที่เข้าใจกันโดยทั่วไป

### 2.2.5 ความดัน (Pressure)

การเปลี่ยนแปลงค่าของความดันในของเหลวจะมีผลต่อตัวแปรอื่น ๆ น้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ค่าความดันพื้นฐาน [Pressure Base] มีค่า 14.7 Psia สำหรับการวัดแบบกำหนดค่าเป็นปริมาตร เช่น ค่า Air Flow กำหนดไว้ 15 SCFM [Standard Cubic Feet Per Minute] หมายความว่าค่า Air Flow ในขณะนั้นมีค่า 15 ลูกบาศก์ฟุตต่ออนาที มีอุณหภูมิ 60 °F และความดัน 14.7 Psia แม้ว่าอุณหภูมิและความดันจะไม่เท่ากับ 60 °F และ 14.7 Psia ที่ต้องเทียบค่าปริมาณบอกที่ความดันพื้นฐานและอุณหภูมิพื้นฐานเพื่อให้สะดวกต่อความเข้าใจ โดยยึดการบอกค่าอุณหภูมิและความดันเดียวกัน

### 2.2.6 Compressibility

ของเหลวเมื่อเพิ่มความดันปริมาตรของมันเกือบไม่เปลี่ยนแปลงดังนั้นในการคำนวณถือว่าเป็นค่าคงที่(ยกเว้นย่านความดันสูง)แต่ในกรณีที่ Fluid เป็นก๊าซหรือไอ ค่า Compressibility นี้เป็นตัวประกอบที่มีความสำคัญมากค่า Compressibility Factor จะถูกนำมาคำนวณด้วยเสมอมีฉะนั้นค่าที่ได้จะผิดพลาด

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรสำหรับก๊าซจะเป็นไปตามกฎของก๊าซ(Gas Law)

สำหรับก๊าซที่สมบูรณ์ (Perfect Gas)

$$pV = RT$$

.....15

เมื่อ  $p$  = ค่าความดันสัมบูรณ์

$V$  = ปริมาตรจำเพาะ

$R$  = ค่าคงที่ของก๊าซ

และ  $T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์

ถ้าการเปลี่ยนแปลงเป็นไปแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal)

$$pV^r = \text{ค่าคงที่}$$

แต่ถ้าการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไม่มีความร้อนสูญเสีย หรือ เพิ่มเติมเข้ามา (Ideabatic)

$$pV = \text{ค่าคงที่}$$

เมื่อ  $r$  อัตราส่วนของ ค่าความร้อนจำเพาะ (เมื่อเปลี่ยนแปลงแบบความดันคงที่) ค่าความร้อนจำเพาะ (เมื่อเปลี่ยนแปลงของปริมาตรคงที่)

ในของเหลว ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลง ความดัน และ ปริมาตร โดยกำหนดค่า

Bulk Modulus  $K$

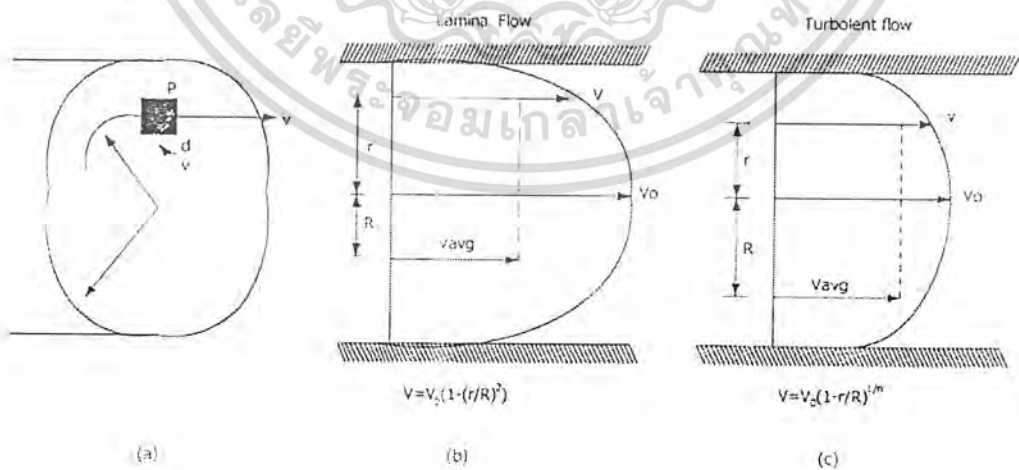
โดยค่า Bulk Modulus = ค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงไป .....16

Volume Strain (ปริมาตรที่เปลี่ยนไป / ปริมาตรเดิม)

รูปแบบของการไหล ในการวัดอัตราการไหลของ Fluid นั้น เมื่อ Fluid ไหลในท่อกลม โดยมีการเปลี่ยนแปลงในรูปมวลต่อเวลา ( $dm/dt$  หรือ  $dm$ ) คือ

$$dm = \rho V dA \text{ .....17}$$

ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.8 แสดงอัตราการไหลของของเหลวในท่อและความเร็วที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $p$  คือ ความหนาแน่นของ Fluid ที่จุด  $P$

$V$  คือ ความเร็วของ Fluid ที่จุด  $P$  โดยมีพื้นที่  $dA$

และ ผลรวมของอัตราไหลทั้งหมดในท่อที่จุด  $P$  ได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} m &= \int dm \\ &= \int pVdA \end{aligned} \quad \dots\dots\dots 18$$

จากการไหลแบบ Laminar Flow ดังรูป b นั้น หาค่า Parabolic Velocity ได้จาก

$$V = V_o [1 - (r^2 / R^2)] \quad \dots\dots\dots 19$$

เมื่อ  $V_o$  คือ ความเร็วที่จุดกึ่งกลางท่อ

$R$  คือ รัศมีของท่อ

$r$  คือ ตำแหน่งที่ทำการทดสอบ

กล่าวคือ เมื่อ Fluid มีความหนาแน่นที่ทุกจุดเท่ากันแล้วเราสามารถหาค่าความเร็วที่ได้นั้นเป็นค่าเฉลี่ยได้ คือ

$$\begin{aligned} m &= \int pVdA \\ &= pV_{avg}A \end{aligned} \quad \dots\dots\dots 20$$

ดังนั้น การไหลแบบ Laminar Flow ในท่อกลมนี้หาอัตราการไหล [Mass Flow Rate] ได้คือ

$$\begin{aligned} m &= p V_o \int \int [1 - (r^2 / R^2)] r dr d\theta \\ &= p \pi R^2 (V_o/2) \end{aligned}$$

$$= pV_{avg}A$$

เมื่อพื้นที่หน้าตัดของท่อเป็น  $\pi R^2$

$$V_{avg} = V_o/2 \quad \dots\dots\dots 21$$

ส่วนการไหลแบบ Turbulent Flow ที่ไหลในท่อโดยไม่เกิดความฝืดของท่อ (รูป C) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = V_0[1-(r/R)]^{1/n} \dots\dots\dots 22$$

โดยค่า  $n$  ขึ้นอยู่กับค่า Reynold Number ซึ่งในท่อกลมนั้นค่า Reynold Number หาได้

จาก

$$Rn = \frac{\rho \cdot V_{avg} \cdot D}{\mu} \dots\dots\dots 23$$

เมื่อ  $\mu$  คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Velocity)

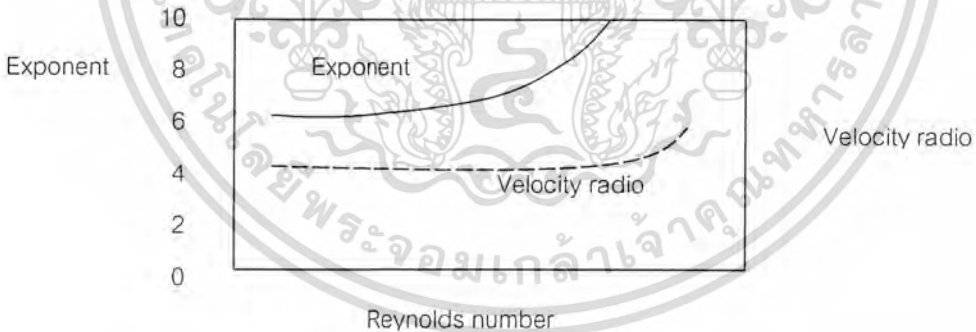
$D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (Diameter)

การไหลแบบ Turbulent นั้น เมื่อไหลในท่อกลมไม่มีความฝืดแล้ว

ค่าความเร็วเฉลี่ย  $[V_{avg}]$  หาได้จาก

$$V_{avg} = \frac{2n^2}{[n+1][2n+1]} \cdot V_0 \dots\dots\dots 24$$

ค่าของ  $n$  ขึ้นอยู่กับค่า Reynold Number ดังแสดงในรูป



Exponent  $n$  And Velocity Ratio  $V_{avg} / V_0$  As A Function Of Reynolds Number

รูปที่ 2.9 แสดงอัตราความเร็วของของเหลวในท่อ และ ค่า  $n$

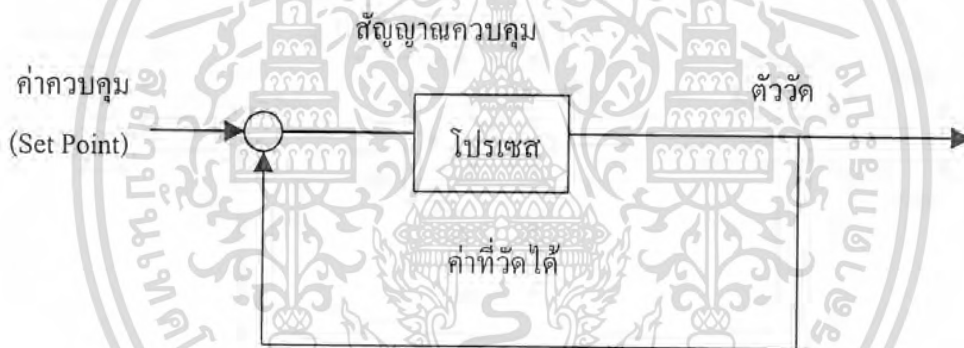
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 สัญญาณมาตรฐานในการควบคุมอัตโนมัติ

การใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ อาจพบว่าสัญญาณควบคุมที่ใช้อยู่ในระบบนั้นมีค่าต่าง ๆ กันหลายค่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เป็นสัญญาณควบคุมไฟฟ้ามักมีค่าแตกต่างกันหรือบางที่เป็นคนละหน่วยกันเป็นกระแสก็เป็นแรงไฟฟ้าก็มีเมื่อมีการสั่งซื้ออุปกรณ์ในระบบ เช่น Controller หรือ Transmitter เพิ่มเติม จะพบว่าอุปกรณ์รุ่นใหม่ใช้ระบบสัญญาณคิดไปจากเดิม บางครั้งสามารถสั่งหรือเลือกซื้ออุปกรณ์ที่มีระบบสัญญาณเหมือนเดิมได้ แต่ในบางครั้งก็เลือกไม่ได้ จำเป็นต้องใช้สัญญาณมาตรฐานใหม่ เพราะสัญญาณมาตรฐานเก่าเลิกผลิตไปแล้ว

### 2.3.1 สัญญาณมาตรฐาน

ในระบบควบคุมอัตโนมัติ จะมีการวัดและการนำสัญญาณที่วัดได้ไปเทียบกับค่าที่ต้องการควบคุม (Set Value) ลักษณะแบบนี้คือ การควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback Control)



รูปที่ 2.14 เป็นการแสดงการควบคุมป้อนกลับในรูปของ Block Diagram

#### การทำงานของระบบ

สัญญาณจากตัววัด จะถูกส่งมาเข้าคอนโทรลเลอร์ (Controller) ซึ่งจะทำการวัดที่ส่งเข้ามาเปรียบเทียบกับค่าควบคุม (Set Point) ที่กำหนดไว้ และ ทำการส่งสัญญาณไปบังคับตัวควบคุมสุดท้าย (Final Control Element) ซึ่งทำการบังคับหรือควบคุมปริมาณของพลังงานหรือวัสดุที่ป้อนเข้าโปรเซสนี้จะทำให้ค่าที่เราจะวัดและควบคุมเช่น อุณหภูมิ ความดัน ฯลฯ เปลี่ยนไป ซึ่งตัววัดก็จะทำการส่งสัญญาณกลับเข้ามายังคอนโทรลเลอร์และ คอนโทรลเลอร์ก็จะทำการเปรียบเทียบกับค่าควบคุม พร้อมกับส่งสัญญาณควบคุมไปยังตัวควบคุมสุดท้ายเพื่อปรับแต่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณของพลังงานหรือวัสดุอีก เป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ค่าที่เราต้องการจะวัดและควบคุม

### ในระบบทางปฏิบัติ

ตัววัดและ ตัวควบคุมสุดท้ายจะอยู่เป็นส่วนหนึ่งของโปรเซสแต่คอนโทรลเลอร์จะแยกออกมาติดตั้งต่างหากโดยอาจจะอยู่ในบริเวณใกล้ ๆ กับโปรเซส หรือเข้าไปรวมกันอยู่ในห้องคอนโทรลเพื่อสะดวกในการที่จะใช้โอเปอเรเตอร์คนเดียวให้สามารถดูหลายโปรเซสได้ในเวลาเดียวกันห้องคอนโทรลนี้จะอยู่ห่างจากโปรเซสออกไปดังนั้นระยะจากตัววัดถึงคอนโทรลเลอร์และจากคอนโทรลเลอร์ถึงตัวควบคุมสุดท้าย ก็จะไกลด้วย เมื่อระยะทางไกลออกไป ปัญหาที่ติดตามมาคือ ความถูกต้องของค่าสัญญาณที่ส่งไปมา ถ้าสัญญาณมีค่าน้อย ๆ อาจเกิดการสูญเสียไปในสัญญาณได้ ทางแก้ไขในกรณีนี้ก็คือ ต้องมีตัวขยายสัญญาณอยู่ใกล้กับตัววัด เพื่อทำการขยายสัญญาณให้มีความแรงหรือมีค่ามากขึ้น

ปัญหาอีกอย่างหนึ่งก็คือ ตัวแปรที่วัดและควบคุมนั้นมีหลายชนิด และหลายช่วงการวัด เช่น อาจทำการวัดอุณหภูมิ ความดัน การไหลโดยแต่ละจุดของอุณหภูมิที่วัด อาจมีช่วงการวัดต่าง ๆ กัน คือ  $0-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0-300\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นต้นถ้าเป็นเช่นนี้คอนโทรลเลอร์แต่ละตัวก็ต้องทำมาเป็นพิเศษเพื่อรับค่าสัญญาณต่าง ๆ กันนี้

#### 2.3.1.1 สัญญาณมาตรฐานมีใช้ในระบบควบคุม มี 2 แบบ คือ

##### 1. สัญญาณมาตรฐานในระบบไฟฟ้า

แบ่งย่อยเป็น 2 พวก คือ สัญญาณกระแส และแรงดันไฟฟ้า

##### 1.1 สัญญาณกระแส

4 – 20 mA (ปัจจุบันนิยมใช้มากที่สุด)

10 – 50 mA

0 – 20 mA

0 – 50 mA

##### 1.2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า

1 – 5 volt (ปัจจุบันนิยมใช้มากที่สุด)

0 – 10 volt

0 – 10 mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. สัญญาณมาตรฐานในระบบลม (Pneumatic)

ปัจจุบันที่ใ้ใช้กันอยู่มี 2 หน่วยต่างกัน คือระบบเมตริกกับระบบอังกฤษ  
 ระบบเมตริก 0.2 – 1.0 Kg/cm ระบบอังกฤษ 3 – 15 Psi  
 ทั้งสองหน่วยเมื่อเทียบแล้วจะมีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นอุปกรณ์ในหน่วยต่างกันนี้  
 เมื่อปรับแต่งเล็กน้อยก็อาจใช้ประกอบกันหรือแทนกันได้

### 2.3.1.2 ข้อดีของระบบกระแสเทียบกับระบบแรงดันไฟฟ้า

1. ส่งสัญญาณได้ไกลกว่า เนื่องจากการไม่มีการสูญเสียในสาย เช่น ที่เกิดในระบบแรงดัน ซึ่งจะมีการสูญเสียในสายเนื่องจากความต้านทาน
2. ตัวรับสัญญาณมักมี Input Impedance ต่ำ ซึ่งจะเกิดสัญญาณรบกวน (Noise) น้อยกว่าระบบแรงดันไฟฟ้าซึ่งมักมี Input Impedance ของตัวรับสูง

### 2.3.1.3 ข้อดีของระบบแรงดันไฟฟ้าเทียบกับระบบกระแส

จุดเด่นที่สำคัญคือ ถ้าอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งอุปกรณ์ที่เหลือยังทำงานได้ ในขณะที่เป็นการต่ออนุกรมแบบระบบกระแสทั้งวงจรจะหยุดทำงาน หรือทำงานผิดพลาดหมด และจะไม่ทราบตัวใดเสีย นอกจากจะถอดออกมาตรวจทีละตัว ซึ่งทำได้ลำบากและเสียเวลามาก

### 2.3.2 การเปรียบเทียบระบบเครื่องมือวัดควบคุมระบบลมกับอิเล็กทรอนิกส์ (Pneumatic VS Electronic Instrument)

เครื่องมือวัดและควบคุมในอุตสาหกรรมที่มีใช้งานใน โรงงานอุตสาหกรรมนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ตามหลักการทำงาน คือ เครื่องมือวัดระบบอิเล็กทรอนิกส์ ระบบลมจะใช้ลมเป็นสัญญาณหลักตั้งแต่แหล่งจ่ายพลังงานก็เป็นลม Air Compressor ความดัน 1.4 Kg/cm<sup>2</sup> จะจ่ายให้กับอุปกรณ์ในระบบทุกตัว ตัววัดหรือพวก Transmitter ก็มักจะให้สัญญาณออกซึ่งแสดงค่าวัดเป็นลบ มีความดันอยู่ในช่วง 0.2-1 Kg/cm<sup>2</sup> (บางครั้งใช้ 3-15 Psi) ลมสัญญาณวัดเหล่านี้จะส่งผ่านไปยังเครื่องควบคุมหรือเครื่องบันทึก (Recorder) ซึ่งก็มีหลักการทำงานภายในโดยใช้ลมเช่นเดียวกัน สัญญาณออกจากเครื่องควบคุมก็เป็นลมมีความดันตามมาตรฐานส่งออกตามท่อออกไปจับวาล์วควบคุม (Control Valve) ซึ่งสามารถขับเคลื่อนได้โดยตรงเพราะใช้ความดันลมในการขับเคลื่อน

เครื่องมือวัดระบบอิเล็กทรอนิกส์จะมีหลักการการทำงานที่ต่างจากระบบลมอย่างชัดเจน สัญญาณในระบบจะเป็นสัญญาณไฟ อาจจะเป็นในรูปของไฟฟ้ากระแสตรงก็ได้ แหล่งจ่ายไฟของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบมักจะเป็นไฟตรง 24 V หรือ ไฟสลับ 220 V สัญญาณออกจากตัววัด หรือ Transmitter จะเป็นกระแสไฟอยู่ในช่วง 4–20 mA หรือแรงดันไฟ 1–5 V ส่งไปตามสายไฟไปยังเครื่องควบคุม หรือ เครื่องบันทึกซึ่งภายในก็ใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ สัญญาณภายในเครื่องจะเป็นสัญญาณไฟฟ้าหมดสัญญาณออกจากเครื่องควบคุมที่จะส่งไปที่วาล์วก็เป็นสัญญาณไฟฟ้า เช่นเดียวกัน

เราสามารถแยกว่าระบบใดเป็นระบบลม ระบบใดเป็นอิเล็กทรอนิกส์ได้โดยง่ายเครื่องมือวัดระบบลมจะมีการเดินท่อ หรือสายยางเพื่อส่งสัญญาณลม เต็มไปหมด เวลาทำงานก็มักได้ยินเสียงลม แต่เครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์จะมีแต่สายไฟต่อกับอุปกรณ์แต่ละตัว เดินสายเป็นระเบียบมากกว่าระบบลม เวลาทำงานก็เงียบไม่ได้ยินเสียงอะไร ระบบทั้งสองนี้มีความแตกต่างกันหลายประการ ระบบลมถึงได้ว่าเป็นระบบเก่าแก่ ใช้งานนาน แต่มีความคงทนดี ซ่อมบำรุงไม่ยากนักในขณะที่ระบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นระบบใหม่มีความสามารถสูงกว่าระบบลมหลายด้าน ติดตั้งได้ง่ายและรวดเร็ว

ตาราง 2.1 ข้อเปรียบเทียบระหว่างเครื่องมือวัดระบบลมและระบบอิเล็กทรอนิกส์

คุณสมบัติ	ระบบลม	ระบบอิเล็กทรอนิกส์
1. สัญญาณมาตรฐาน ในระบบ	สัญญาณลม 0.2-1.0 Kg/cm <sup>2</sup> หรือ 3-15 PSI	สัญญาณกระแส 4-20 mA สัญญาณแรงดัน 1-5 V
2. แหล่งจ่ายพลังงาน	ลมความดัน 1.4 Kg/cm <sup>2</sup> หรือ 20 PSI	ไฟตรง 24 v หรือ ไฟสลับ 220 v
3. จำนวนตัววัดตัวแปร	มีไม่มากนัก	มีเกือบทุกชนิด
4. ระยะทางการส่งสัญญาณ	สัญญาณตามท่อไม่เกิด 30 m	สัญญาณไฟส่งตามสายได้ไกลเท่าไรก็ได้
5. สัญญาณขั้ววาล์วควบคุม	ใช้ลมขั้ววาล์วได้โดยตรง	ต้องแปลงสัญญาณไฟเป็นลมโดยตัวแปลงสัญญาณ ก่อนนำไปขั้ววาล์ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.1 (ต่อ)

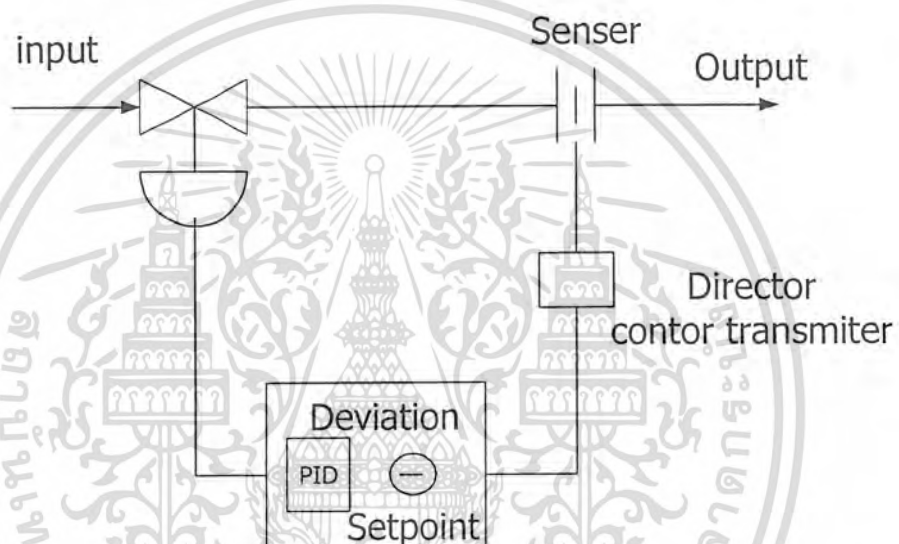
คุณสมบัติ	ระบบลม	ระบบอิเล็กทรอนิกส์
6. ความรวดเร็วในการทำงาน	ช้าแต่ก็พอเหมาะกับการควบคุม โปรเซส	รวดเร็วมาก แต่ช้า ในระบบ ทำงานช้า ตอบรับไม่ทัน
7. การใช้งานทดแทนกัน ระหว่างอุปกรณ์ที่ผลิตโดย คนละบริษัท	ส่วนใหญ่ไม่มีปัญหา	ส่วนใหญ่มีปัญหา
8. ต่อกับคอมพิวเตอร์ได้	ต้องแปลงสัญญาณลม เป็นไฟฟ้า ก่อน โดย ใช้ P/I Converter	ต่อได้โดยตรงและสะดวกมาก
9. สภาพแวดล้อมการใช้งาน	ลมต้องสะอาด ไม่มีฝุ่น ไม่กลัว ความร้อน กลัว กัดกร่อน	กลัวฝุ่นกลัวความร้อนกลัว สัญญาณรบกวนไม่กลัว อุณหภูมิต่ำ กลัวการกัดกร่อน ของสารเคมี
10. การติดตั้ง	ติดตั้งยาก ต้องเดินท่อ	ติดตั้งง่าย รวดเร็ว
11. ความปลอดภัยในการใช้ งานบริเวณอันตราย	ปลอดภัย	ต้องใช้อุปกรณ์ชนิดที่เป็น Intrinsic Safe
12. Back up	ออกแบบระบบให้เก็บลมไว้ได้นาน ได้ง่ายกว่า	ต้องใช้แบตเตอรี่
13. ประสิทธิภาพการทำงาน	ดี	ดีมาก
14. ราคา	ถูกกว่าถ้าไม่คิดค่าติดตั้ง	แพงกว่าแต่ค่าติดตั้งถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หลักการและการทำงานของอุปกรณ์ Controller

ตัวควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Controller)

ตัวควบคุมปกติระดับสัญญาณ 1-5 VDC ที่วัดมาจากตัวแปรขบวนการ (Process Variable) และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ถูกกำหนดไว้ก่อน คือ ค่าเป้าหมาย (Set Point) ตัวควบคุมทำให้สัญญาณเอาต์พุตเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นไปตามคุณสมบัติของวงจรตัวควบคุมก็คือวงจร Proportional Integral และ Derivative สัญญาณเอาต์พุตนี้ จะถูกส่งไปควบคุมอุปกรณ์ในขบวนการ เรียกว่า Final Control Element เพื่อจะกำจัดค่าที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเป้าหมาย



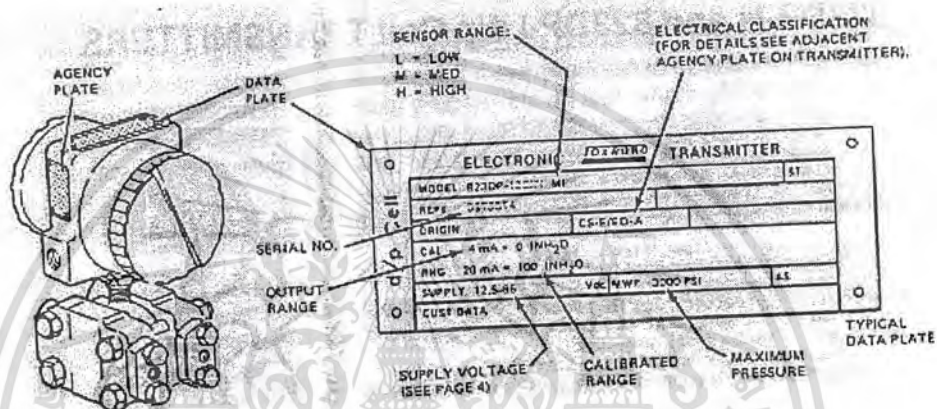
รูปที่ 2.16 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 Transmitter

#### 2.3.3.1 แผ่นแสดงคุณสมบัติ (Name Plate)

รูปแบบและข้อมูลที่สำคัญของอุปกรณ์จะแบ่งชื่ออยู่ที่ Data Plate และสะดวกในการหาอุปกรณ์นำไปใช้ให้ได้ตามที่ต้องการ ดังรูป



รูปที่ 2.17 แผ่นแสดงคุณสมบัติของทรานสมิตเตอร์

โดยปกติแล้ว จะแสดงรูปแบบ (Model), เลขตัวเครื่อง (No) และ ย่านใช้งาน (DAL RNG) ใน Data Plate

ในการประกอบติดตั้งอุปกรณ์ (Transmitter) นั้น ควรหลีกเลี่ยงความเสียหายเอาไว้ โดยระมัดระวังดังต่อไปนี้

- ไม่ควรให้ถูกฝน หรือน้ำ
- อย่าให้เกิดการกระทบกระเทือนมาก หรือ ให้มีการกระทบกระเทือนน้อยที่สุด
- อุณหภูมิรอบ ๆ และความชื้นสัมพัทธ์ โดยอุณหภูมิอยู่ในย่าน  $-40^{\circ}\text{C}$  ถึง  $100^{\circ}\text{C}$  แต่ปกติแล้วจะใช้ในช่วง  $-20^{\circ}\text{C}$  ถึง  $60^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 5 ถึง 100% RH ที่  $40^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.2 รูปแบบโดยทั่วไป

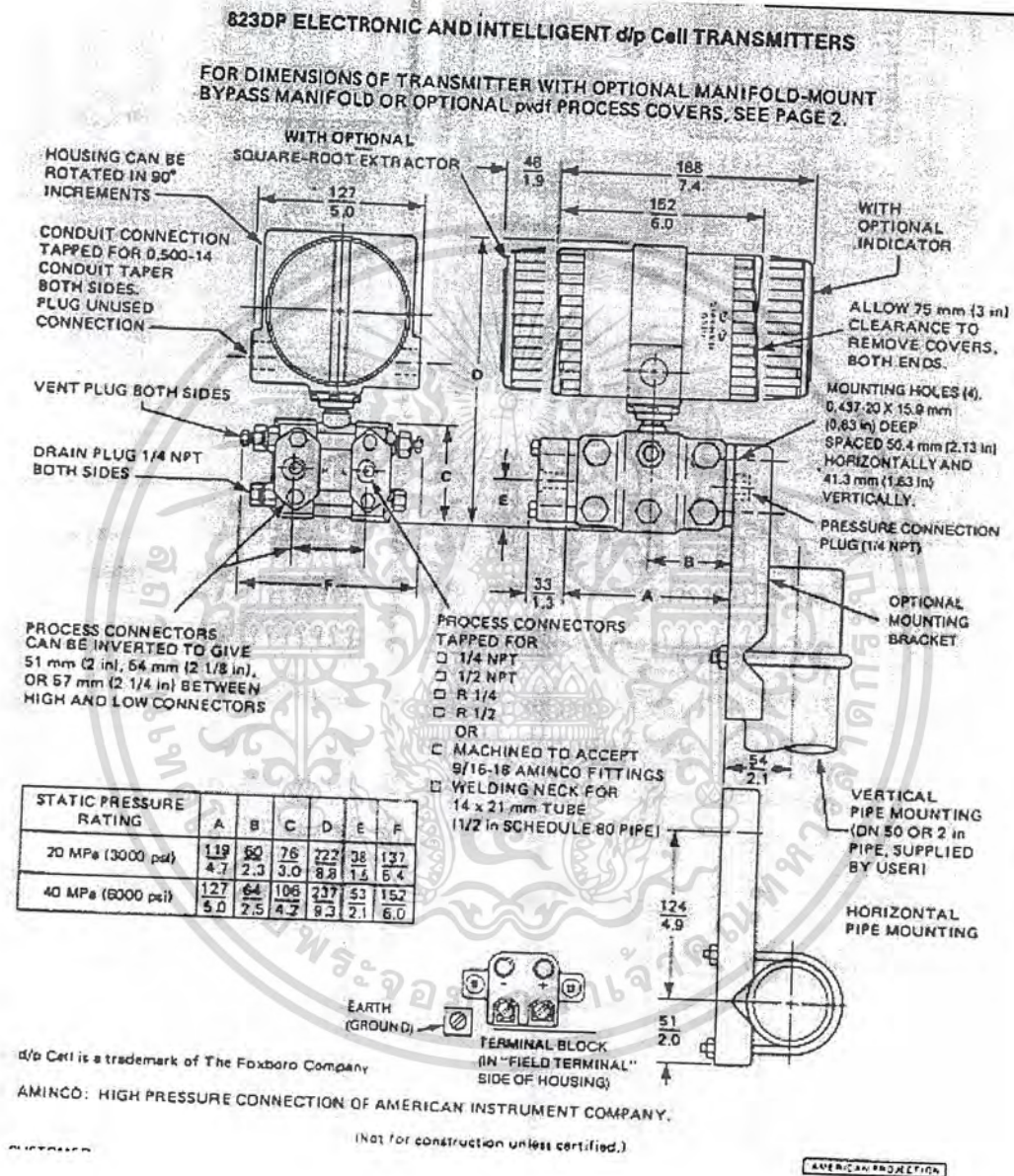
รุ่น UNE 11 และ UNE 11F ของ Differential Pressure Transmitter (D/P Cell) ผลความแตกต่างของสเปน (Span) จาก 100 ถึง 2100 mm H<sub>2</sub>O, 1 ถึง 210 kPa, 10 ถึง 2100 mbar หรือ 4 ถึง 840 inH<sub>2</sub>O โดยจะให้เอาท์พุทในย่าน 4 ถึง 20 mA หรือ 10 ถึง 50 mADC ถ้าสัญญาณต้องมีการส่งไปไกล ๆ ต้องมีการชิลที่สายนำสัญญาณ เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนเพราะเป็นอุปกรณ์ที่ขึ้นอยู่กับความต้านทานของโหลดด้วย



รูปที่ 2.18 รูปแบบโดยทั่วไปของทรานสมิตเตอร์ รุ่น UNE 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

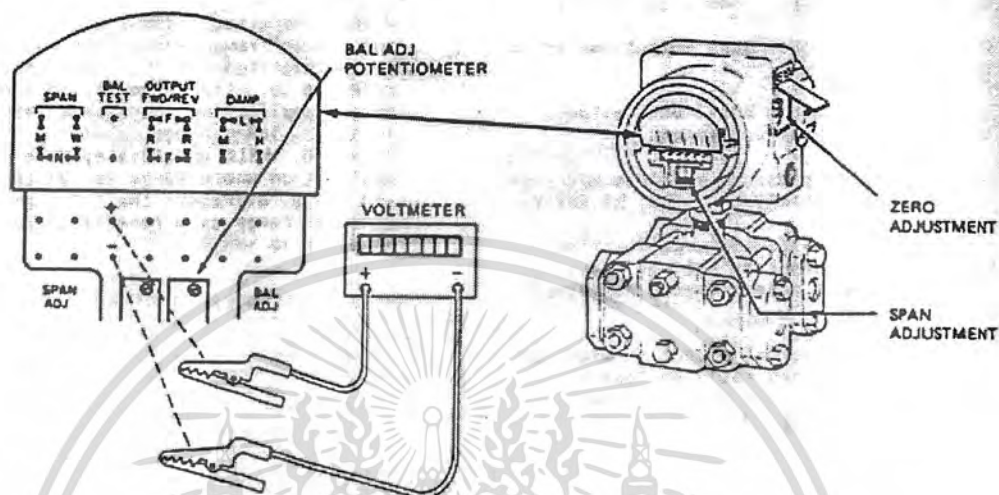
2.4.2.3 ส่วนประกอบ (Name Of Components)



รูปที่ 2.19 แสดงส่วนประกอบของทรานสมิตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

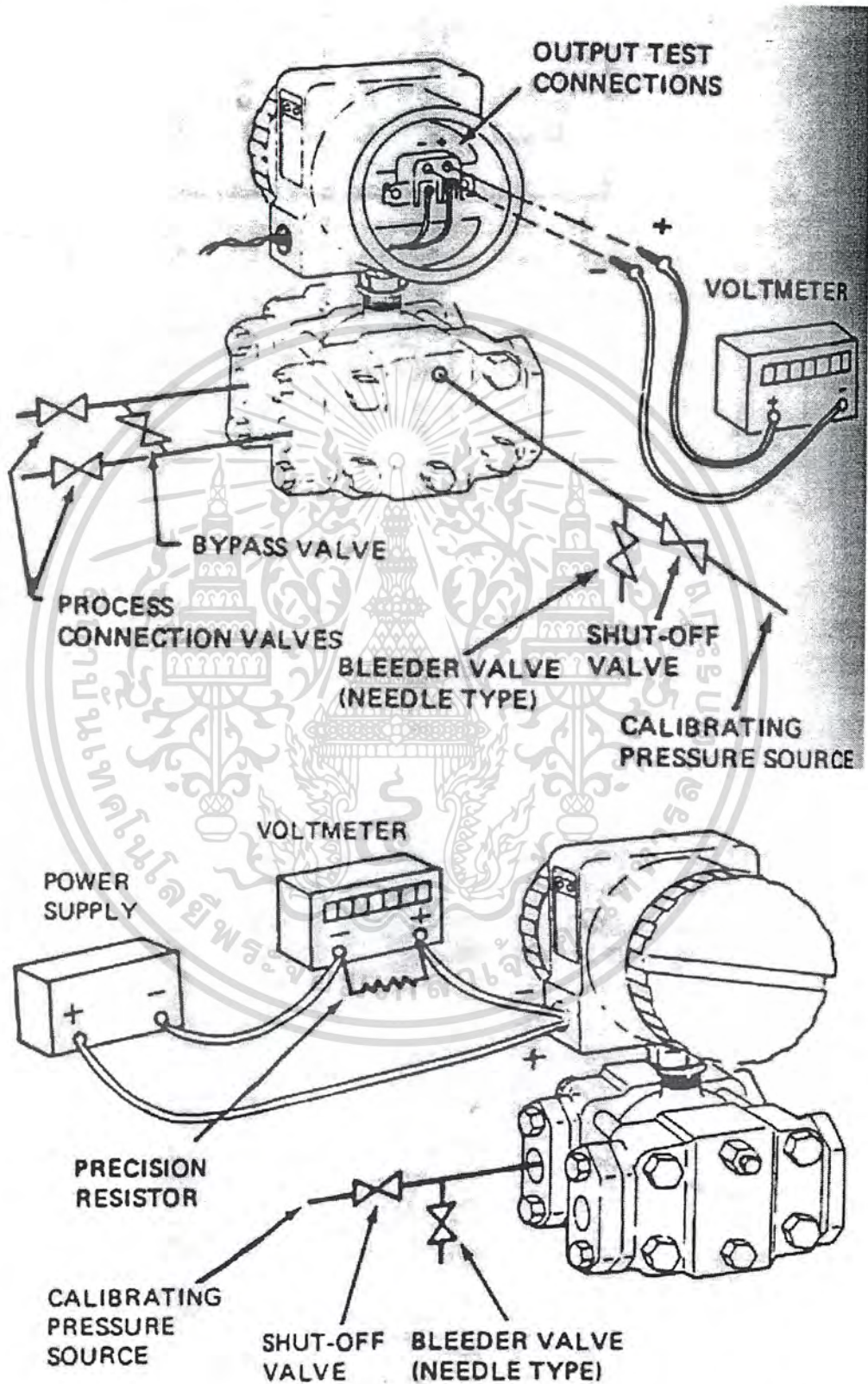
- จุดปรับแต่ง (Name of Amplifier Unit Adjustments)



รูปที่ 2.20 แสดงจุดปรับแต่งต่างในการปรับเทียบมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.2.4 การต่อวงจร (Wiring)



รูปที่ 2.21 แสดงการต่อใช้งานของทรานสมิตเตอร์กับแหล่งจ่าย และเครื่องรับ

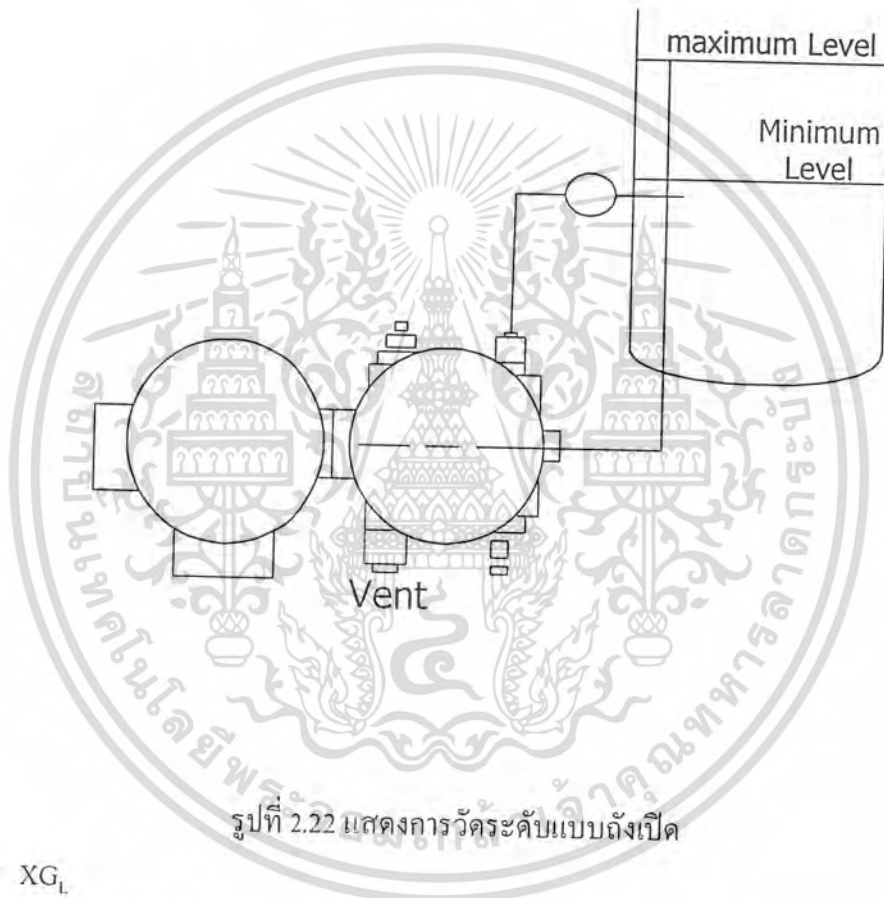
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.2.5 การวัดระดับของถังเปิด (Open Tank Liquid Level Measurement)

ย่านของความดันที่แตกต่างกัน (Differential Pressure Range)

เมื่อเป็นถังเปิด ความดันทางด้านความดันสูงของทรานสมิตเตอร์ (Transmitter)

จะเป็นด้านที่ต่อการวัดระดับและจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าของเหลวในถังเพราะเป็นตัวป้องกันไม่ให้สารผสมกับสารในถัง



รูปที่ 2.22 แสดงการวัดระดับแบบถังเปิด

$$\text{Span} = XG_L$$

$$\text{Zero Suppression} = MG_L + ZG_S$$

$G_L$  = ความถ่วงจำเพาะของของเหลวในถัง

$G_L$  = ความถ่วงจำเพาะของของเหลวในท่อที่ต่อออกจากถังถึงทรานสมิตเตอร์

ถ้าระดับของทรานสมิตเตอร์อยู่ต่ำกว่าจุดต่ำสุดของจุดต่อของถังหรืออยู่ในระดับเดียวกัน ( $Z = 0$ )

ตัวอย่างที่ 1 สมมุติว่าให้ถังเปิดมี  $x=2$  เมตร,  $y=0.125$  เมตร และ  $z=0.25$  ความถ่วงจำเพาะของสารในถัง  $G_L=0.8$  (เทียบโดยน้ำ), ความถ่วงจำเพาะของของเหลวในจุดต่อออกจากถังเปิดถึงทรานสมิตเตอร์  $G_S=0.9$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีทำ

$$\text{Span} = 2 \times 0.8$$

$$= 1.6 \text{ mH}_2\text{O}$$

$$\text{Zero Suppression} = (0.125 \times 0.8) + (0.25 \times 0.9)$$

$$= 1.325 \text{ mH}_2\text{O}$$

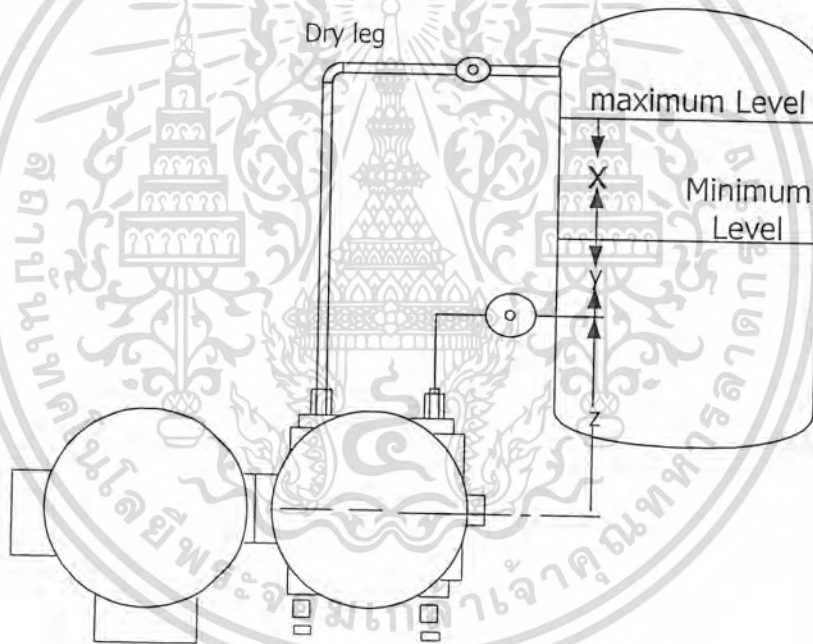
$$\text{ย่านของความแตกต่าง} = 0.325 \text{ ถึง } 1.925 \text{ mH}_2\text{O}$$

การวัดระดับในถังปิด (Closed Tank Liquid Level Measurement)

- ย่านของความดันแตกต่าง (Differential Pressure Range-With Dry Leg)

ความถ่วงจำเพาะของสารในจุดต่อออกไปจากถังไปยังทรานสมิตเตอร์

(Transmitter) ต้องมีค่าสูงกว่า ความถ่วงจำเพาะของสารในถังเพื่อกันไม่ให้สารผสมกัน



รูปที่ 2.23 แสดงการวัดระดับแบบถังปิด แบบ Dry Leg

$$\text{Span} = xG_L$$

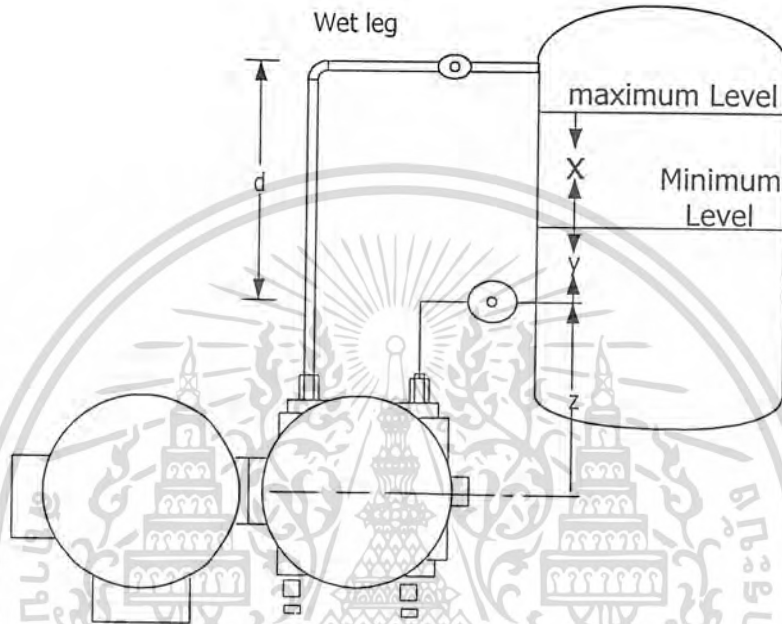
$$\text{Zero suppression} = yG_L + zG_L$$

$G_L$  = ความถ่วงจำเพาะของของไหลในถัง

$G_s$  = ความถ่วงจำเพาะของของไหลที่ต่อไปจากถังไปยังทรานสมิตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ย่านของความดันที่แตกต่างกัน (Differential Pressure Range-With Wet Leg)  
ความถ่วงจำเพาะของสารในจุดที่ต่อไปยังทรานสมิตเตอร์ (Transmitter) ต้องมีค่าสูงกว่าความถ่วงจำเพาะของสารในถัง



รูปที่ 2.24 แสดงการวัดระดับแบบถังปิด แบบ Wet Leg

$$\text{Span} = xG_L$$

$$\text{Zero elevation} = dG_s - yG_L$$

$G_L$  = ความถ่วงจำเพาะของของเหลวในถัง

$G_s$  = ความถ่วงจำเพาะของของเหลวที่ต่อออกไปจากถังไปยังทรานสมิตเตอร์

ตัวอย่างที่ 2 สมมุติให้ถังปิดมี  $x=2$  เมตร,  $y=0.5$  เมตร และ  $d=3$  เมตร โดยกำหนดว่าความถ่วงจำเพาะในถัง  $G_L = 0.8$  (เทียบโดยน้ำ) ความถ่วงจำเพาะในสายต่อจากถัง  $G_s = 0.9$

วิธีทำ

$$\text{Span} = 2 \times 0.8 = 1.6 \text{ mH}_2\text{O}$$

$$\text{Zero suppression} = (3 \times 0.9) - (0.5 \times 0.8)$$

$$= 2.3 \text{ mH}_2\text{O}$$

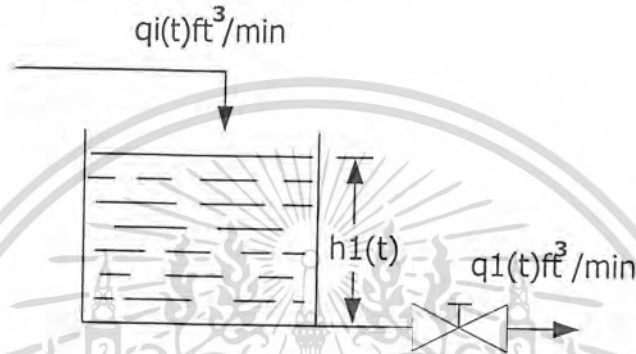
$$\text{ย่านความแตกต่าง} = -2.3 \text{ ถึง } -0.7 \text{ mH}_2\text{O}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ ที่ย้ายเป็นค่าลบนั้นเพราะเกิดจากความดันที่ทรานสมิตเตอร์ ทางด้านความดันต่ำอยู่สูงกว่าทางด้านความดันสูง

2.5 ระบบทางพลศาสตร์ของกระบวนการ

2.5.1 ระบบทางพลศาสตร์ของกระบวนการอันดับที่หนึ่ง



รูปที่ 2.25 กระบวนการระดับอันดับที่หนึ่ง

$$q(t) = \frac{CV}{7.48} \frac{\sqrt{\Delta P(t)}}{G} = \frac{CV}{7.48} \sqrt{\frac{\rho gh(t)}{144g_c G}} = CV' \sqrt{h_1(t)}$$

$h_1(t)$  = ระดับน้ำในถัง ; ft

$CV$  = สัมประสิทธิ์ของวาล์ว  $\frac{gal / min}{\sqrt{Psi}}$

7.48 = ตัวประกอบการแปลงหน่วยจากแกลลอนเป็นลูกบาศก์ฟุต

$g_c$  = ตัวประกอบของการเปลี่ยนแปลง  $32.2 \text{ lbom-ft/lbf-sec}^2$

$G$  = ความถ่วงจำเพาะของของเหลว

$\Delta P$  = ความดันตกคร่อมวาล์ว ; Psi

$P$  = ความหนาแน่นของของเหลว ;  $lbm/ft^3$

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของถัง ;  $ft^2$

เขียนสมการทางพลังงานที่สภาวะไม่คงที่จะได้

$$\rho q_i(t) - \rho q_1(t) = \rho A_1 \frac{dh_1(t)}{d(t)}$$

.....26

$$q_1(t) = \frac{CV}{7.48} \sqrt{h_1(t)} = CV' \sqrt{h_1(t)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่า  $q_i(t)$  แทนลงในสมการ 26

$$q_i(t) - \frac{CV}{7.48} \sqrt{h_1(t)} = a \frac{dh_1(t)}{dt}$$

เมื่อทำการปรับเป็นเชิงเส้นเขียนอยู่ในรูปตัวแปรเบี่ยงเบน

$$Q_i(t) - C_1 H_1(t) = A \frac{dH_1(t)}{dt} \dots\dots\dots 27$$

$$C_1 = \frac{\partial q_i(t)}{\partial q_i(t)} = \frac{1}{2} CV'(\bar{h}_1)^{-1/2}$$

$\bar{h}_1$  = ค่าเปลี่ยนไปจาก Process

ตัวแปรที่มีการเบี่ยงเบนคือ

$$Q_i(t) = q_i(t) - \bar{q}_i$$

$$H_1(t) = h_1(t) - \bar{h}_1$$

จัดสมการที่ 27 ใหม่จะได้

สมการใหม่  $\frac{1}{C_1} Q_i(t) - H_1(t) = \frac{A}{C_1} \frac{dH_1(t)}{dt}$

เมื่อ

$$\tau_1 = \frac{A}{C_1}$$

$$K_1 = \frac{1}{C_1}$$

$$\tau_1 \frac{dH_1(t)}{dt} + H_1(t) = K_1 Q_i(t) \dots\dots\dots 28$$

แปลงลาปลาซในสมการ 28 จะได้

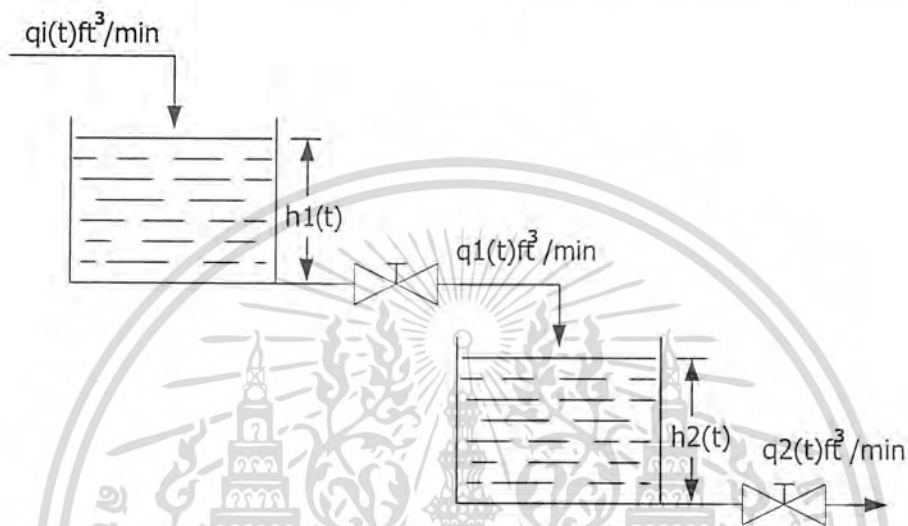
$$H_1(s) = \frac{K_1}{(\tau_1 s + 1)} Q_i(s)$$

$$\frac{H_1(s)}{Q_i(s)} = \frac{K_1}{(\tau_1 s + 1)}$$

## 2.5.2 ระบบทางพลศาสตร์ของกระบวนการอันดับที่สอง

กระบวนการระดับของเหลวชนิดอนุกรม แบบระบบไม่มีผลกระทบต่อกัน

ระบบอันดับสองจะมีทั้งแบบที่มีผลกระทบต่อกัน (Interacting System) และระบบที่ไม่มีผลกระทบต่อกัน (Noninteracting System) ซึ่งจะอธิบายทั้งสองแบบที่ใช้ในกระบวนการจริง



รวมทั้งความหมายของเทอมของควมมีผลกระทบต่อกัน และไม่มีผลกระทบโดยให้หาฟังก์ชันถ่ายโอนของความสัมพันธ์ระหว่างระดับของเหลวในถังที่สองต่ออัตราการไหลทางเข้าของถังแรก และต่ออัตราไหลของเครื่องสูบน้ำดังทุกถังจะเปิดออกสู่บรรยากาศ และ กระบวนการเป็นแบบไอโซเทอร์มอล (Isothermal) การเปิดวาล์วก็ยังคงที่และอัตราการไหลที่ผ่านวาล์วจะได้

รูปที่ 2.26 กระบวนการระดับชนิดอนุกรม-แบบระบบที่ไม่มีผลกระทบต่อกัน

$$q(t) = \frac{CV}{7.48} \frac{\sqrt{\Delta P(t)}}{G} = \frac{CV}{7.48} \sqrt{\frac{\rho gh(t)}{144g_c G}} = CV' \sqrt{h_1(t)}$$

$h_1(t)$  = ระดับน้ำในถัง ; ft

$CV$  = สัมประสิทธิ์ของวาล์ว  $\frac{gal / min}{\sqrt{Psi}}$

7.48 = ตัวประกอบการแปลงหน่วยจากแกดลอนเป็นลูกบาศก์ฟุต

$g_c$  = ตัวประกอบของการเปลี่ยนแปลง 32.2 lbom-ft/lbf-sec<sup>2</sup>

$G$  = ความถ่วงจำเพาะของของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Delta P$  = ความดันตกคร่อมวาล์ว ; Psi

$P$  = ความหนาแน่นของของเหลว ; lbm/ft<sup>3</sup>

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของถัง ; ft<sup>2</sup>

$$\rho q_1(t) - \rho q_1(t) = \rho A_1 \frac{dh_1(t)}{d(t)} \dots\dots\dots 29$$

สามารถแสดงอัตราการไหลที่ผ่านวาล์วอีกสมการหนึ่งคือ

$$q_1(t) = C'_{v1} \sqrt{h_1(t)} \dots\dots\dots 30$$

สมการ 29 และ 30 อธิบายได้จากถังแรกต่อไปพิจารณาถึงที่สองโดยเขียนสมมูลย์ทางมวลที่สถานะไม่คงที่ของถังที่สองจะได้

$$\rho q_1(t) - \rho q_2(t) = \rho A_2 \frac{dh_2(t)}{d(t)} \dots\dots\dots 31$$

และสมการที่ได้เตรียมไว้ของอัตราไหลที่ผ่านวาล์วที่ถังที่สองคือ

$$q_2(t) = C'_{v2} \sqrt{h_2(t)} \dots\dots\dots 32$$

สมการที่ 29 ถึง 32 จะเป็นตัวอธิบายความสัมพันธ์ของกระบวนการนี้ สมการ 30 เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น การจำลองการทำงานโดยคอมพิวเตอร์จะเป็นวิธีการที่ยอมรับมากที่สุด อย่างไรก็ตามในที่นี้ เราเพียงต้องการฟังก์ชันถ่ายโอน สมการเหล่านี้จะต้องทำการปรับให้เป็นเชิงเส้นก่อน

แทนสมการ 30 ถึง 29 แทนสมการ 30 และสมการ 32 ใน 31 จะได้

$$q_1(t) = C'_{v1} \sqrt{h_1(t)} = A_1 \frac{dh_1(t)}{dt} \dots\dots\dots 33$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 
$$C'_{v1}\sqrt{h_1(t)} - C'_{v2}\sqrt{h_2(t)} = A_2 \frac{dh_2(t)}{dt} \dots\dots\dots 34$$

จากสมการ 33 เมื่อทำการปรับเป็นเชิงเส้นแล้วจะเขียนในรูปตัวแปรเบี่ยงเบน

$$Q_i(t) - C_1 H_1(t) = A_1 \frac{dH_1(t)}{dt} \dots\dots\dots 35$$

เมื่อ

$$C_1 = \frac{\rho q_1(t)}{\rho h_1(t)} = \frac{1}{2} C'_{v1} (\bar{h}_1)^{-1/2}$$

และตัวแปรที่มีการเบี่ยงเบนคือ

$$H_1(t) = h_1(t) - \bar{h}_1$$

$$Q_i(t) = q_i(t) - \bar{q}_i$$

จาก 34 จะได้

$$C_1 H_1(t) - C_2 H_2(t) = A_2 \frac{dh_2(t)}{dt} \dots\dots\dots 36$$

เมื่อ 
$$C_1 = \frac{\rho q_1(t)}{\rho h_1(t)} = \frac{1}{2} C'_{v1} (\bar{h}_1)^{-1/2}$$

และ 
$$H_2(t) = h_2(t) - \bar{h}_2$$

และทำการจัดใหม่ สมการที่ 35 และ 36 จะได้

$$\tau_1 \frac{dH_1(t)}{dt} + H_1(t) = K_1 Q_i(t) \dots\dots\dots 37$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ  $\tau_2 \frac{dH_2(t)}{dt} + H_2(t) = K_2 Q_i(t)$  .....38

เมื่อ  $\tau_1 = \frac{A_2}{C_2}$  , นาที

$\tau_2 = \frac{A_1}{C_1}$  , นาที

$K_1 = \frac{1}{C_1}$  , ฟุต-นาที ต่อ ลูกบาศก์ฟุต

$K_2 = \frac{C_1}{C_2}$  , ไม่มีหน่วย

แปลงลาปลาซในสมการ 37 และ สมการ 38 และจัดใหม่จะได้

$H_1(s) = \frac{K_1}{(\tau_1 S + 1)} Q_i(s)$  .....39

$H_2(s) = \frac{K_2}{(\tau_2 S + 1)} H_1(s)$  .....40

สมการ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับของเหลวในถังแรก กับอัตราไหลทางเข้า และอัตราไหลทางออก และสำหรับสมการ 40 นั้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับของเหลวในถังที่สองกับระดับของเหลวในถังแรกเพื่อที่จะหาฟังก์ชันถ่ายโอนที่ต้องการ แทนสมการ 39 ในสมการ 40 จะได้

$H_2(s) = \frac{K_1 K_2}{(\tau_1 S + 1)(\tau_2 S + 1)} Q_i(s)$  .....41

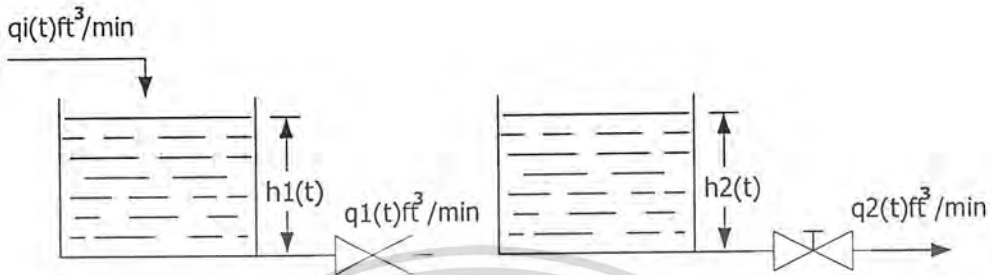
หรือฟังก์ชันถ่ายโอนแต่ละตัวแปรทางเข้าคือ

$\frac{H_2(s)}{Q_i(s)} = \frac{K_1 K_2}{(\tau_1 S + 1)(\tau_2 S + 1)}$  .....42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.53 ระบบทางพลศาสตร์ของกระบวนการอันดับที่สอง

กระบวนการระดับของเหลวชนิดอนุกรม แบบระบบที่มีผลกระทบต่อกัน



รูปที่ 2.27 กระบวนการระดับของเหลวชนิดอนุกรม-แบบระบบที่มีผลกระทบต่อกัน ผลกระทบต่อกันระหว่างทั้งสองได้จากสมการของอัตราการไหลที่ผ่านวาล์ว

$$q_1(t) = \frac{Cv_1 \sqrt{\Delta P(t)}}{7.48 G} = \frac{Cv_1 \sqrt{\rho g(h_1(t) - h_2(t))}}{7.48 \cdot 144 g_c G}$$

$$q_1 = Cv_1 \sqrt{h_1(t) - h_2(t)}$$

สมการนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลระหว่างถังทั้งสองขึ้นอยู่กับระดับของเหลวของทั้งสองถัง ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกัน โดยจะหาฟังก์ชันถ่ายโอนของความสัมพันธ์ระหว่าง

$$\frac{H_2(s)}{Q_i(s)}$$

โดยเริ่มจากการเขียนสมดุลย์ทางมวลที่สภาวะไม่คงที่รอบถังแรก โดยจะเป็นสมการเดียวกับ 29

$$\rho q_i(t) - \rho q_1(t) = \rho A_1 \frac{dh_1(t)}{dt} \dots\dots\dots 29$$

สมการของวาล์วใช้เหมือนกับที่ได้เตรียมไว้แล้ว

$$q_1 = Cv_1 \sqrt{h_1(t) - h_2(t)} \dots\dots\dots 43$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสมมุติฐานมวลที่สภาวะไม่คงที่รอบถังที่สองจะใช้สมการ 31 คือ

$$\rho q_1(t) - \rho q_2(t) = \rho A_2 \frac{dh_2(t)}{dt} \dots\dots\dots 31$$

และสมการที่ได้เตรียมไว้ของอัตราไหลที่ผ่านวาล์วที่ถังสองในสมการ 32 คือ

$$q_2 = C V_2 \sqrt{h_2(t)} \dots\dots\dots 32$$

แทนสมการ 43 ใน 29 เมื่อความหนาแน่นเป็นของเหลวชนิดเดียวกันจะได้

$$q_1(t) - C V_1 \sqrt{h_1(t) - h_2(t)} = A_1 \frac{dh_1(t)}{dt}$$

จากนั้นทำการปรับเป็นเชิงเส้นและเขียนรูปตัวแปรเบี่ยงเบนจะได้

$$Q_1(t) - C_4 H_1(t) + C_4 H_2(t) = A_1 \frac{dH_1(t)}{dt} \dots\dots\dots 44$$

เมื่อ

$$C_4 = \frac{\partial q_1(t)}{\partial h_1(t)} \Big|_{ss} = \frac{\partial q_1(t)}{\partial h_2(t)} \Big|_{ss} = \frac{1}{2} C V_1 (\bar{h}_1 - \bar{h}_2)^{-1/2}$$

จัดใหม่ในสมการ 44 และแปลงลาปลาซจะได้

$$H_1(s) = \frac{K_4}{(\tau_4 s + 1)} Q_1(s) + \frac{1}{(\tau_4 s + 1)} H_2(s) \dots\dots\dots 45$$

เมื่อ  $K_4 = \frac{1}{C_4}$  , ฟุต-นาที่ต่อลูกบาศก์ฟุต

$\tau_4 = \frac{A_1}{C_4}$  , นาที่

จากนั้นทำเหมือนเดิมกับถังที่สอง จากสมการ 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_1(t) - q_2(t) = A_2 \frac{dh_2(t)}{dt}$$

$$C'V_1 \sqrt{h_1(t) - h_2(t)} - C'V_2 = A_2 \frac{dh_2(t)}{dt}$$

จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนเชิงเส้นและเขียนในตัวแปรเบี่ยงเบนจะได้

$$C_4 H_1(t) - C_4 H_2(t) - C_2 H_2(t) = A_2 \frac{dH_2(t)}{dt} \dots\dots\dots 4.6$$

เมื่อ

$$C_2 = \left. \frac{\partial q_2(t)}{\partial K_2(t)} \right|_{ss} = \frac{1}{2} C'V_2 (\bar{h}_2)^{-1/2}$$

$$H_2(t) = h_2(t) - \bar{h}_2$$

$$C_4 = \left. \frac{\partial q_1(t)}{\partial h_1(t)} \right|_{ss} = \left. \frac{\partial q_1(t)}{\partial h_2(t)} \right|_{ss} = \frac{1}{2} C'V_1 (\bar{h}_1 - \bar{h}_2)^{-1/2}$$

จัดใหม่ในสมการ 4.6 และแปลงลาปลาซจะได้

$$C_4 H_1(s) - (C_1 + C_2) H_2(s) = A_2 S H_2(s)$$

$$\left( \left( \frac{A_2}{C_4 + C_2} \right) S + 1 \right) H_2(s) = \left( \frac{C_4}{C_4 + C_2} \right) H_1(s)$$

เมื่อ  $K_5 = \frac{C_4}{C_4 + C_2}$  . ไม่มีหน่วย

$\tau_5 = \frac{A_2}{C_4 + C_2}$  . นาที

จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_2(s) = \left(\frac{K_5}{\tau_5 s + 1}\right) H_1(s) \dots\dots\dots 47$$

สุดท้ายแทนสมการ 45 ในสมการ 47 จะได้

$$H_2(s) = \frac{K_4 K_5}{(\tau_4 s + 1)(\tau_5 s + 1)} Q_i(s) + \frac{K_5}{(\tau_4 s + 1)(\tau_5 s + 1)} H_2(s)$$

$$= \left(\frac{K_4 K_5}{(\tau_4 s + 1)(\tau_5 s + 1) - K_5}\right) Q_i(s)$$

จัดใหม่จะได้

$$= \left(\frac{K_4 K_5}{\tau_4 \tau_5 s^2 + (\tau_4 + \tau_5) s + (1 - K_5)}\right) Q_i(s) \dots\dots\dots 48$$

จากนั้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนตามต้องการ

$$\frac{H_2(s)}{Q_i(s)} = \frac{\frac{K_4 K_5}{1 - K_5}}{\frac{\tau_4 \tau_5}{1 - K_5} s^2 + \frac{(\tau_4 + \tau_5)}{1 - K_5} s + 1} \dots\dots\dots 49$$

เปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบแบบมีผลกระทบท่อกันกับระบบแบบไม่มีผลกระทบท่อกัน โดยนำสมการที่ 42 กับ สมการที่ 49 มาเปรียบเทียบจะเห็นว่าค่าเวลาลงตัวจะแตกต่างกันอย่างไรก็ตามสำหรับในกรณีของระบบแบบมีผลกระทบท่อกันนั้นจะมีค่าเวลาลงตัวมากกว่า ผลก็คือผลตอบสนองของระบบจะช้ากว่า

## บทที่ 3

### การควบคุมโดยใช้ FUZZY (CONTROL)

#### 3.1 ทำไมจึงต้องใช้ “FUZZY CONTROL”

สามารถแยกพิจารณาได้ 2 ทาง

##### 3.1.1. เหตุผลทางทฤษฎี

- FUZZY CONTROL ไม่ต้องการ Mathematical Model ทำให้สามารถออกแบบการควบคุม

ที่มี Mathematical Model ยากๆ ได้

- FUZZY CONTROL สามารถออกแบบโดยนำข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญซึ่งมีลักษณะไม่ชัดเจนมา

ใช้ได้อย่างมีระบบและมีประสิทธิภาพ ซึ่ง Controller แบบเก่านั้นไม่สามารถนำข้อมูลแบบภาษามนุษย์มาใช้ได้

- FUZZY CONTROL นั้นเป็น Non-linear Controller ซึ่งถูกปรับแต่งโดยทฤษฎี Universal

Approximation Fuzzy Logic Control ซึ่งสามารถปรับแต่งให้ทำงานเป็น Non-linear Controller

##### 3.1.2 เหตุผลทางปฏิบัติ

- เข้าใจง่าย เนื่องจาก Fuzzy Control เป็นการเลียนแบบวิธีการควบคุมของมนุษย์ซึ่งหลักการ

ของ Fuzzy Control ก็สามรถที่จะเข้าใจได้ง่ายแม้แต่โดยบุคคลซึ่งไม่ใช่ผู้เชี่ยวชาญ ในทศวรรษที่ผ่านมาทฤษฎีการควบคุมแบบเก่าได้มีการใช้ Mathematical Tools ที่ซับซ้อนมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งก็เป็นสิ่งจำเป็นในการแก้ปัญหาที่ยาก ซึ่งวิศวกรที่เข้าใจในทฤษฎีมีน้อย

- Implement ได้ง่าย Fuzzy Logic ซึ่งเป็นหัวใจของ Fuzzy Control สามารถ Implement

ได้ไม่ยากนัก ปัจจุบันมี Fuzzy VLSI Chip เกิดขึ้นมากมาย ซึ่งก็จะทำให้ในการสร้าง Fuzzy Controller ทำได้ง่ายและรวดเร็ว

- ใช้ค่าใช้จ่ายไม่มากนักในการพัฒนา เนื่องจาก Fuzzy Control นั้นสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย ใช้เวลาในการเรียนรู้ไม่มากนัก ทำให้ Software Cost ต่ำและจากการที่ Fuzzy Control สามารถ Implement ได้ง่าย จึงทำให้ Hardware Cost

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังมี Software Tools สำหรับออกแบบ Fuzzy Controller อีกด้วย ดังนั้น Fuzzy Control จึงเป็นวิธีการที่มีอัตราส่วนระหว่างประสิทธิภาพการทำงานต่อราคาสูงมากที่สุดทีเดียว

### 3.2 FUZZY คืออะไร

Fuzzy เป็นศัพท์เทคนิคโดยเฉพาะ หมายถึง สภาพแห่งความกำกวมหรือคลุมเครือที่มีฐานมาจากสัญชาตญาณมนุษย์มากกว่าเรื่องของความน่าจะเป็น

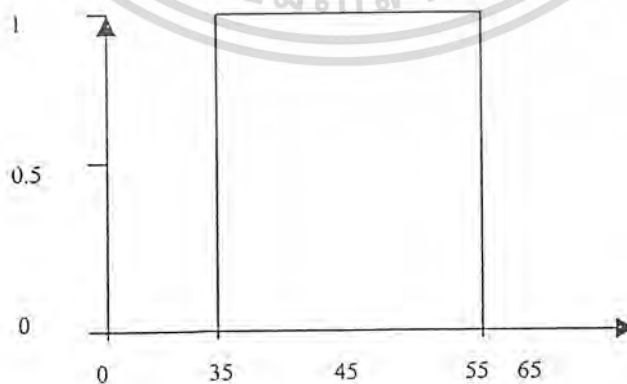
#### ลักษณะเด่นของFuzzy

ประการแรก Fuzzy Sets สามารถให้ค่าจำกัดความของคุณภาพทางภาษา (Quantitatively Using Linguistic Terms) ได้ดี เช่น สูง เตี้ย เลว ร้อน เย็น เป็นต้น และยังสามารถให้ค่าความสำคัญของแต่ละสมาชิกใน Fuzzy Sets ได้ (Degree Membership)

ประการที่ 2 output ที่ได้จาก Fuzzy System จะมีการเปลี่ยนแปลงค่อยเป็นค่อยไปอย่างต่อเนื่องถึงแม้ว่า input ของ Fuzzy System จะเปลี่ยนไปอย่างทันทีทันใดก็ตาม

### 3.3 FUZZY ทำงานอย่างไร

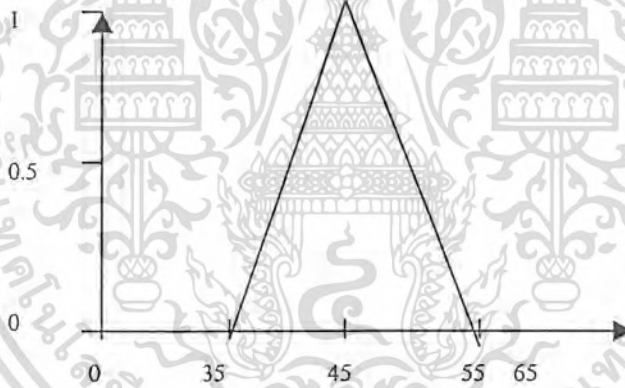
Fuzzy Sets เป็นทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้เป็นเครื่องมือในการตัดสินใจ ซึ่งจะเป็นการเลียนแบบการตัดสินใจของมนุษย์ คือ จะเป็นการประมาณ (Approximation) จากปัจจัยหรือตัวแปรต่างๆของระบบเพื่อสรุปหาเหตุผล ดังนั้น Fuzzy Logic จึงไม่ใช่ลอจิกที่มีเพียง 0 กับ 1 (Crisp Sets) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เท่านั้น แต่เป็นลอจิกที่แทนความหมายของตัวแปร โดยปกถึงระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรนั้นๆดังแสดงในรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 แสดงกราฟ Crisp Sets ของช่วงอายุวัยกลางคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง เมื่อนึกถึงคำว่า “วัยกลางคน” เราพบว่ามิชอบเขตที่คลุมเครือ คือไม่ทราบค่าที่แน่นอนได้จึงไม่อาจจะใช้ระบบไบนารีในเครื่องคอมพิวเตอร์ธรรมดาแก้ปัญหานี้ได้ จุดนี้เองที่ทฤษฎี Fuzzy เข้ามาช่วยในการคำนวณหาขอบเขต โดยสมมติว่า เราสรุปว่า วัยกลางคนหมายถึงอายุ 45 ปี แต่คนอายุ 35 หรือ 55 ก็ไม่อาจจะจัดอยู่ในข่าย “ไม่ใช่วัยกลางคนได้” ดังนั้นความหมายของคำว่า “วัยกลางคน” นั้นค่อนข้างจะแตกต่างกันภายในกรอบแห่งขอบเขตนั้น ในทางตรงกันข้าม ผู้ที่มีอายุน้อยกว่า 30 หรือมากกว่า 60 ก็เรียกได้ว่า “ไม่อยู่ในข่ายวัยกลางคนแน่” ความคิดนี้แสดงออกมาได้ตามกราฟรูปที่ 1-2 หรือตามฟังก์ชันที่เรียกว่า “ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก” (Membership Function) ที่มีค่าเกรกระหว่าง 0 และ 1 โดย Fuzzy Sets ก็แสดงออกในรูปของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกนี้อย่างไรก็ดีสังเกตด้วยว่า ค่าเกรกระหว่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะแปรเปลี่ยนได้ระหว่าง 0 และ 1 นี้เองทำให้การแสดงออกเป็นตัวเลขได้ดังแสดงในรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 แสดงกราฟ Fuzzy Sets ของช่วงอายุวัยกลางคน

จากรูปที่ 3-2 คนอายุ 34 และ 56 จะไม่ถูกจัดเป็น “วัยกลางคน” แต่ใครก็ตามที่ตอนนี้นี้ที่ยังคิดว่าตัวเองหนุ่มด้วยอายุแค่ 34 ก็อย่างเข้า “วัยกลางคน” ทันทีเมื่อถึงวันเกิดในปีหน้า ลักษณะค่อนข้างยืดหยุ่นนี้เกิดขึ้นเป็นเพราะการกำหนดค่าที่ไม่มีคามยืดหยุ่น แนวคิดที่มีการกำหนดค่าชัดเจนในรูป 0 หรือ 1 เช่นเดียวกับระบบไบนารีที่ใช้กันในคอมพิวเตอร์ธรรมดาทั่วไปนั้นทำงานโดยกำหนดช่วงตายตัว (Fixed Range) โดยที่เรากำหนดไว้ว่า “วัยกลางคน” คือช่วงระหว่าง 35 ถึง 55 ปี ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Crisp Sets ซึ่งจะมีลักษณะที่ตรงกับข้ามกับ Fuzzy Sets อย่างสิ้นเชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 FUZZY MODELS

องค์ประกอบหลักสำหรับระบบควบคุมโดยใช้ Fuzzy Logic มีดังนี้

3.4.1 Fuzzification of Inputs (FUZZIFIER) คือขั้นตอนที่ทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่เข้ามาไปเป็น Input ของระบบ Fuzzy ซึ่งจะอยู่ในรูปของค่าความเป็นสมาชิก (Degree of Membership) ใน Fuzzy Set

3.4.2 Rule Evaluation (กฎของการวินิจฉัย)

สำหรับกฎการวินิจฉัยค่า Input และค่าความจริงจะสนับสนุนเงื่อนไขสำหรับการสร้างส่วนกำหนดรูปแบบ Fuzzy ที่ช่วงปกติ Fuzzy Compiler จะดึงค่าของ input และนำมาวินิจฉัยค่าเพื่อให้ได้ผลออกมาทาง output ของระบบตามทฤษฎี ระบบจะรวมเอาค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดของ input เพื่อนำมาวินิจฉัยและประมวลผล แต่จริงๆแล้วการครอบคลุมค่าเหล่านี้ไม่จำเป็นในการใช้งานปกติ

กฎของการวินิจฉัยนั้นได้มาจากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง Input และ Output ขึ้นมาเพื่อนำไปสู่ Output ที่ต้องการ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง Input และ Output ก็คือ Rule นั้นเอง

ลักษณะของ IF/THEN RULES มีดังนี้

IF เงื่อนไข THEN ผลลัพธ์ หรือ

IF เงื่อนไข (1) AND เงื่อนไข (2) THEN ผลลัพธ์, ผลลัพธ์,...

เช่น IF Dt=NB AND DT=NM THEN Dto=PS

หมายเหตุ Dt = error

DT = change of error

Dto = Output

NB = Negative Big

NM = Negative Medium

PS = Positive Small

3.4.3 Defuzzification of Outputs (DEFUZZIFIER)

Defuzzifier คือ ขั้นตอนที่ทำกรเปรียบเทียบ Fuzzy Output ทั้งหมดเข้ากับผล

ลัพธ์รวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เทคนิคและวิธีการเปลี่ยน Fuzzy Sets เป็น Crisp Sets

### 3.4.3.1 เทคนิค Maximizer เลือกค่าสูงสุดจากหลายๆ แบบมาเพียงแบบหนึ่ง

เป็นการใช้ค่าสูงสุดของค่าระดับการเป็นสมาชิก จากการกระทำหลายๆ แบบ แล้วเลือกกระทำเพียง 1 รูปแบบ จากตัวอย่างลิ้นบังคับน้ำมัน สมมติว่าผลของการกระทำของ 3 ระบบมีค่า  $\mu$  ของลิ้นบังคับน้ำมันคือ

$$\mu_{\text{ซ้าย}} = 0.75$$

$$\mu_{\text{ขวา}} = 0.4$$

$$\mu_{\text{ปานกลาง}} = 0.2$$

ดังนั้นการกระทำของลิ้นบังคับน้ำมันจะใช้ค่า  $\mu_{\text{ซ้าย}} = 0.75$  เป็นค่าสูงสุด

ถ้าหากเกิดการกระทำที่มีค่า  $\mu$  สูงสุดเท่ากัน 2 อย่าง จะต้องใช้รูปแบบการแก้ปัญหาอีกลักษณะหนึ่ง คือใช้ค่าเฉลี่ยของค่า Output หรือเลือกการกระทำที่สัมพันธ์กับค่าระดับของระบบพื้นฐาน ถึงแม้เทคนิค Maximizer จะเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุด แต่ก็ไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร

### 3.4.3.2 ทฤษฎีค่าน้ำหนักเฉลี่ย

จะใช้ค่าเฉลี่ยของการกระทำหลังจากการกำหนดค่าระดับของระดับการเป็นสมาชิกไว้ล่วงหน้าแล้ว เป็นวิธีที่ง่าย และใช้การคำนวณเพียงเล็กน้อย แต่ยังไม่ค่อยชัดเจน เพราะค่า Output ของฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิก (Membership Function) มีค่า output มากกว่า 1 ค่า ต่อค่า  $\mu$  ที่กำหนดให้ค่า output ฟังก์ชันของการเป็นสมาชิกมีลักษณะคล้ายกับรูปปรีสมิต หรือปรีสมิตตัดยอด ถ้า  $\mu = 0.5$  ค่า output มาจากค่าฟังก์ชันของขอบสัญญาณทั้งด้านขาขึ้นและขาลง ถ้า  $\mu = 1$  จะมีค่าตรงกับช่วงของสัญญาณที่เกิดขึ้นทั้งหมด

วิธีการจัดการความไม่ชัดเจนสามารถทำได้ด้วยกระบวนการ Damppling ค่าในฟังก์ชัน output ด้วยค่าที่แน่นอนให้กลับไปอยู่ในฟังก์ชัน input ซึ่งเป็นวิธีที่น่าเบื่อและไม่สามารถใช้ค่าที่เป็นค่าตรงข้ามของฟังก์ชัน input ในการวิเคราะห์ด้วย ตัวอย่างเช่น เราจะไม่ใช่ว่าถ้าความเร็วคือไม่เร็ว เป็นต้น

### 3.4.3.3 กรรรมวิธีค่าศูนย์กลาง (Center of Gravity, Centroid)

เป็นการแสดงว่าค่า Output ที่สัมพันธ์กับค่าจุดศูนย์กลางมวลของ output ในระดับที่ทำงาน เพราะว่าเราไม่ใช่ค่าของฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิกและจะไม่เกิดความไม่ชัดเจนอีกต่อไปกรรมวิธีนี้เป็นการคำนวณที่แน่นอน และเป็นการแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในวิธีอื่นๆ ค่าศูนย์กลางมักจะสัมพันธ์กับค่า output 1 ค่า ผลที่ได้จากการกระทำอย่างหยาบๆ ภายในช่วงของ output กฎทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะต้องมีการปฏิบัติเพียงจุดเดียวของแต่ละระบบ ในกรณีที่ต้องทำพร้อม ๆ กันหลายกฎในการกระทำ 1 ครั้ง จะต้องเกิดการซ้อนทับกัน (Overlap) ของค่าฟังก์ชัน input ของระดับการเป็นสมาชิกเพื่อแก้ไขความไม่ต่อเนื่องของ output ถึงแม้ว่าจะมีข้อบกพร่อง แต่ก็ยังเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการรวมกัน (Combination) และการแปลงค่า Fuzzy กลับคืน (Defuzzification)

กรรมวิธีนี้จะรวมค่า Output ของการกระทำหลายๆ ค่า เป็นค่าเดียวสำหรับใช้ในระบบและค่า output ค่าเดียวนี้เป็นค่าน้ำหนักเฉลี่ยของศูนย์กลาง (Centroid) ของแต่ละฟังก์ชัน ระดับการเป็นสมาชิก ตัวอย่าง การกระทำ 3 แบบ ของลิ้นบั้งคัม น้ำมัน ในเครื่องยนต์ ซึ่งกระทำดังนี้กระทำในเซตช้า (Slight) ด้วยค่า  $u = 0.75$  และ  $0.4$  ในเซตปานกลาง (Medium) ด้วยค่า  $u = 0.2$  จะได้ค่าศูนย์กลาง ซึ่งแสดงโดยกลมเล็กๆ และค่า output ที่ได้จะควบคุมให้ลิ้นบั้งคัม น้ำมัน ของเครื่องยนต์ทำงานที่ระดับ 29% ของระดับการทำงานทั้งหมด

#### 3.4.3.4 กรรมวิธีซึ่งเกิดขึ้น: ตั้งเคราะห์เอา output เดียว

เป็นเทคนิคพิเศษของแบบกรรมวิธีค่าศูนย์กลางหรือจะเรียกอีกอย่างคือกรรมวิธี Remaining Combination Defuzzification วิธีนี้เป็นการนำ output ของแต่ละ Fuzzy มาใช้ใหม่เป็นค่า output ค่าโดยใช้ค่าน้ำหนักเฉลี่ย จากการกระทำรวมกันหลายๆ อย่าง วิธีนี้ได้ค่าความถูกต้องน้อยกว่ากรรมวิธีค่าศูนย์กลางและยังคงต้องการซ้อนทับกันของ input ฟังก์ชันเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงความไม่ต่อเนื่องของ output ด้วยหลักการและคำนวณที่ไม่ยุ่งยาก

### 3.5 ทฤษฎี Fuzzy Control

ระบบควบคุมแบบ Fuzzy มีพื้นฐานแนวความคิดมาจากทฤษฎี Fuzzy Logic และทฤษฎี Fuzzy Sets

ทฤษฎี Fuzzy Sets คือยอมรับสมาชิกที่มีลักษณะตามเซตเพียงบางส่วนเข้ามาเป็นสมาชิก ซึ่งแตกต่างจากทฤษฎีเซตดั้งเดิม (Crisp Set) ทฤษฎีเซตดั้งเดิมจะเน้นชัดเจนเลยว่าเป็นสมาชิกของเซตหรือไม่ เท่านั้น ไม่มีการสมาชิกของเซตเพียงบางส่วน

ทฤษฎี Crisp Sets มีหลักการดังนี้

#### 1. การเป็นสมาชิกของเซต

“ถ้า  $X$  เป็นสมาชิกของเซต  $A$ ” เราจะใช้สัญลักษณ์

$$X \in A$$

“ถ้า  $X$  ไม่เป็นสมาชิกของเซต  $A$ ” เราจะใช้สัญลักษณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X \notin A$$

ซึ่งใน Crisp Set เราจะระบุชัดเจนว่าสมาชิกของ Universe เป็นสมาชิกของเซต A หรือไม่ เราสามารถแทนค่าระดับการเป็นสมาชิก (Membership function) ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์  $\mu$  ดังนี้

$$\mu(x) = 1 \text{ ก็ต่อเมื่อ } X \in A$$

$$\mu(x) = 0 \text{ ก็ต่อเมื่อ } X \notin A$$

### 2. การเป็นสับเซต

“ถ้าสมาชิกทุกตัวของเซต A เป็นสมาชิกของเซต B เป็นสับเซตของเซต B” เราจะใช้สัญลักษณ์การเป็นสับเซต ดังนี้

$$A \subseteq B$$

### 3. การเท่ากันของเซต

“ถ้าสมาชิกทุกตัวของเซต A เท่ากับสมาชิกทุกตัวของเซต B จะเรียกว่าเซต A เท่ากับเซต B” เราจะใช้สัญลักษณ์การเท่ากันดังนี้

$$A = B$$

### 4. การไม่เท่ากันของเซต

“ถ้าสมาชิกทุกตัวของเซต A ไม่เท่ากับสมาชิกทุกตัวของเซต B จะเรียกว่าเซต A ไม่เท่ากับเซต B” เราใช้สัญลักษณ์การไม่เท่ากันดังนี้

$$A \neq B$$

### 5. การเป็นสับเซตแท้

“ถ้าสมาชิกทุกตัวของเซต A เป็นสับเซตของเซต B จะเรียกว่าเซต A เป็นสับเซตแท้ของเซต B” เราใช้สัญลักษณ์การเป็นสับเซตแท้ดังนี้

$$A \subset B$$

### 6. การปฏิบัติการเบื้องต้นของเซต ได้แก่

Complement เป็นการสร้างเซตใหม่โดยสมาชิกของเซตใหม่จะไม่เป็นสมาชิกของเซต A เลข Complement  $A=A'$

Union เป็นการสร้างเซตใหม่โดยสมาชิกของเซตใหม่จะมีสมาชิกของทุกเซตรวมอยู่

Intersection เป็นการสร้างเซตใหม่โดยสมาชิกของเซตใหม่จะมีสมาชิกซึ่งเป็นสมาชิกของทุกเซต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ทฤษฎี Fuzzy Sets มีหลักการดังนี้

### 1. การเป็นสมาชิกของ Fuzzy Sets

ในระบบ Crisp Sets จะกำหนดเพียงว่า X เป็นสมาชิกหรือไม่เป็นสมาชิกของเซต A โดยแทนด้วยฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิก (Membership Function) เป็น 0 หรือ 1 แต่ Fuzzy Set จะยอมรับสมาชิกที่มีลักษณะที่ถูกต้องเพียงบางส่วนและผิดเพียงบางส่วนไม่มีขอบเขตแน่นอน การประยุกต์ใช้ทฤษฎี FUZZY จะต้องแสดงค่าระดับ (Degree) ซึ่งเป็นค่าที่เป็นไปได้ที่จะเป็นสมาชิก ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 แสดงดังนี้

$$\mu_A(x) \rightarrow [0,1]$$

หมายความว่า ระดับการเป็นสมาชิก (Grade of Membership) หรือ Degree of Membership) ของ X ใน Fuzzy Set อยู่ในช่วงทั้งหมดจาก 0 ถึง 1 เมื่อประยุกต์เข้ากับ Fuzzy Logic ค่า  $\mu$  จะถูกเรียกว่า ค่าความจริงที่แสดงค่าระดับขอบเขตของเซต คือ

$$0 \leq x \leq 1$$

โดยถ้าค่าสูงแสดงว่ามีความเป็นสมาชิกมาก, ถ้าค่าต่ำแสดงว่ามีความเป็นสมาชิกน้อย, ค่า 0 จะหมายถึงไม่เป็นสมาชิกเลยและ 1 คือเป็นสมาชิกอย่างสมบูรณ์ 4 นิยามที่ Fuzzy Sets ขยายมาจาก Crisp Set

-Fuzzy Set A และ B จะเท่ากันก็ต่อเมื่อ  $\mu_A(x) = \mu_B(x)$  สำหรับทุกๆ x ใน x เขียนแทนด้วย

$$A = B$$

-Subset หรือ Containment นิยาม โดย

$$A \subset B \leftrightarrow \mu_A \leq \mu_B$$

- Complement ของ Fuzzy Set A เขียนแทนด้วย  $A'$  นิยามโดย

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

-Union Fuzzy Set A และ B ซึ่งมีฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิก  $\mu_A(x)$  และ  $\mu_B(x)$  ตามลำดับสามารถแทนด้วย Fuzzy Set C กำหนดโดย

$$\mu_C(x) = \text{Max} [\mu_A(x) \mu_B(x)]$$

หรืออาจเขียนย่อเป็น

$$\mu_C(x) = \text{Max} [\mu_A(x) \mu_B(x)]$$

-Intersection ของ Fuzzy Set A และ B ซึ่งมีฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิก  $\mu_A(x)$  และ  $\mu_B(x)$  ตามลำดับสามารถแทนด้วย Fuzzy Set กำหนดโดยฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิก ของ Fuzzy Set กำหนดโดย

$$\mu_C(x) = \text{Min} [\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

หรืออาจเขียนเป็น

$$\mu_C(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$$

อย่างไรก็ตามไม่มีหลักตายตัวว่าการ Union ต้องใช้ Max Operation, การ Intersection ต้องใช้ Min Operation หรือ การ Complement ต้องใช้  $\mu'_A(x) = 1 - \mu_A(x)$  ดังนั้นเพื่อให้ General , มากยิ่งขึ้นจึงมีนิยามสัจพจน์ (Axiom) ปฏิบัติการแต่ละชนิด ดังนี้

-Complement C :  $[0,1] \rightarrow [0,1]$

Axiom C<sub>1</sub>:  $C(0) = 1$  และ  $C(1) = 0$  หมายความว่าสามารถรอบคลุมคลิซเซต

Axiom C<sub>2</sub>: สำหรับทุกๆ  $a, b \in [0,1]$  ถ้า  $a < b$  แล้ว  $C(a) \geq C(b)$

ทุกๆ การปฏิบัติการที่จะถือว่าเป็นการ Complement ได้อย่างน้อยที่สุดจะต้องสอดคล้องกับสัจพจน์ทั้งสอง

-Union U :  $[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$

Axiom U<sub>1</sub>:  $U(0,0) = 0; U(0,1) = U(1,0) = U(1,1) = 1$  หมายความว่า จะต้องสามารถรอบ

คลุม Crisp Sets

Axiom U<sub>2</sub>:  $U(a,b) = U(b,a)$ ; มีคุณสมบัติการสลับที่

Axiom U<sub>3</sub>: ถ้า  $a \leq a'$  และ  $b \leq b'$  แล้ว  $U(a,b) \leq U(a',b')$

Axiom U<sub>4</sub>:  $U(U(a,b),c) = U(a,U(b,c))$ ; มีคุณสมบัติการจัดหมู่ทุกๆ การปฏิบัติที่จะถือว่าเป็นการ Union ได้อย่างน้อยที่สุดที่จะต้องสอดคล้องกับสัจพจน์ทั้งสี่

-Intersection I :  $[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$

Axiom I<sub>1</sub>:  $I(1,1) = I(0,1) = I(1,0) = I(0,0) = 0$  หมายความว่า จะต้องสามารถรอบ

คลุมคลิซเซต

Axiom I<sub>2</sub>:  $I(a,b) = I(b,a)$ ; มีคุณสมบัติการสลับที่

Axiom I<sub>3</sub>: ถ้า  $a \leq a'$  และ  $b \leq b'$  แล้ว  $I(a,b) \geq I(a',b')$  หมายความว่า I เป็น Monotonic

Axiom I<sub>4</sub>:  $I(I(a,b),c) = I(a,I(b,c))$ ; มีคุณสมบัติการจัดหมู่

ทุกๆ การปฏิบัติที่จะถือว่าเป็นการ Intersection ได้อย่างน้อยที่สุดจะต้องสอดคล้องกับสัจพจน์ทั้งสี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ทฤษฎี Fuzzy Logic

Fuzzy Logic จะมีการกระทำทางลอจิกเพื่อรวมค่าลอจิกต่างๆ ให้เป็นค่าฟัซซี่ลอจิกคล้ายตัวแปรในระบบลอจิก 2 ระดับ โดยจะต้องมีกำหนดลักษณะความหมายให้แตกต่างกันแต่ใช้คำสั่งทางลอจิกที่เหมือนกันคือ AND, OR และ NOT ความหมายต่างๆ ในระบบฟัซซี่ถูกกำหนดโดย

L.A. Zadeh ผู้คิดค้นระบบ FUZZY LOGIC

### 1. การ AND ของ Fuzzy Logic

คือค่าความจริงที่น้อยที่สุด (Minimum) นั่นคือ สำหรับค่า Fuzzy A และ B

$$\mu(A \text{ AND } B) = \text{Min} [\mu_A, \mu_B(x)]$$

### 2. การ OR ของ Fuzzy Logic

คือ ค่าความจริงเป็นค่ามากที่สุด (Maximum)

$$\mu(A \text{ OR } B) = \text{Max} [\mu_A, \mu_B]$$

การ NOT ของค่า Fuzzy Logic

$$\mu(\text{NOT } A) = 1 - \mu_A$$

ซึ่งการกระทำทั้งสามนี้เป็นสมมูลของการกระทำในลอจิก 2 ระดับ (O U 1)

## 3.6 ข้อดีและข้อเสียของการควบคุมโดยใช้ FUZZY

### ข้อดีของการควบคุมโดยใช้ FUZZY

1. Fuzzy Control สามารถออกแบบโดยนำข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งมีลักษณะไม่ชัดเจนมาใช้ได้อย่างมีระบบและมีประสิทธิภาพ ซึ่ง Controller แบบเก่านั้นไม่สามารถนำข้อมูลแบบภาษามนุษย์ (Linguistic Description) มาใช้ได้
2. Fuzzy Control เป็น Model-free approach ไม่ต้องการ Mathematical Model
3. Fuzzy Control สามารถควบคุมระบบ Nonlinear ได้ โดยอาศัยการปรับแต่งค่า Parameter โดยทฤษฎี Universal Approximation Fuzzy Logic Controller ให้เหมาะสม
4. เข้าใจง่ายเนื่องจาก Fuzzy Control เป็นการเลียนแบบวิธีการควบคุมของมนุษย์ ไม่ต้องเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยาก
5. Temperament ระบบได้ง่าย โดยเฉพาะในส่วนของ Fuzzy Logic ทำให้การสร้าง Fuzzy Controller ทำได้ง่ายและรวดเร็ว
6. ค่าใช้จ่ายในการพัฒนาระบบไม่มากนัก ใช้เวลาในการเรียนรู้ไม่มากนัก และมี Software Tools สำหรับการออกแบบ Fuzzy Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข้อเสียของการควบคุมโดยใช้ FUZZY

1. ต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญอย่างมากในการกำหนด ลักษณะกราฟของ MF และเงื่อนไขการควบคุม
2. ถ้าการกำหนดเงื่อนไขการควบคุมไม่ละเอียดพอ การควบคุมจะไม่สามารถเข้าสู่สถานะ Steady State ได้ แต่จะเกิดการ Oscillate อยู่บริเวณใกล้จุด Set Point

### 3.7 ตัวอย่าง Temperature Control by Fuzzy

#### ขั้นตอนที่ 1. FUZZICATION

กำหนดนิยามของ Input และ Output ในรูป Fuzzy Set ให้มี Label = 7 คือ

NL	=	Negative large
NM	=	Negative Medium
NS	=	Negative Small
ZR	=	Zero
PS	=	Positive Small
PM	=	Positive Medium
PL	=	Positive Large

สร้างกราฟความสัมพันธ์ของ Input และ output ซึ่งนิยามโดยฟังก์ชันการเป็นสมาชิกในระบบที่ทำการควบคุม ดังรูปที่ 3-4 (MF of Temp. Control)

#### ขั้นตอนที่ 2. INFERENCE RULES

สร้างเงื่อนไขการควบคุมโดยใช้กฎ IF/THEN Rules ดังรูปที่ 3-5

เขียน Matrix Display System for Inference ดังรูปที่ 3-6

#### ขั้นตอนที่ 3. DEFUZZIFICATION

ใช้วิธี Center of Gravity หาค่า Control Signal

### 3.8 การประยุกต์ใช้งาน โดยการใช้ Fuzzy Control

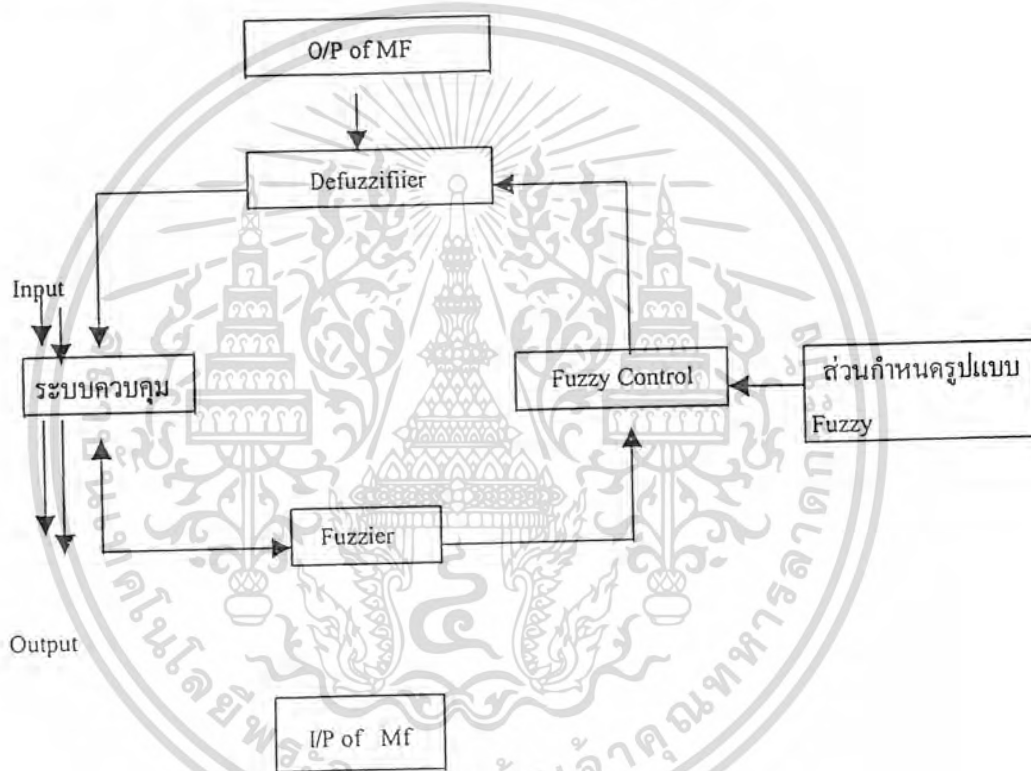
การใช้ Fuzzy เป็นตัวควบคุมแบบป้อนกลับ

เราสามารถเลือกค่า Output ของระบบ Fuzzy และใช้มันเป็นค่า input เพื่อเป็นตัวควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ดังรูปที่ 3-4 ในระบบ Fuzzy ค่าของ Input Fuzzy จะใช้เป็นส่วนกำหนดรูปแบบ โดยที่ส่วนกำหนดแบบนี้จะปฏิบัติตามค่า input เมื่อมันทำการรวมและทำการแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Fuzzy กลับคืนจากค่าที่อ่านได้จากส่วนกำหนดรูปแบบเพื่อใช้เป็นค่าควบคุม output 1 ค่า หรือมากกว่า

Fuzzy Logic ถูกปรับปรุง และนำไปใช้งานต่างๆ ในหลายๆ ทาง ซึ่งรวมทั้งการแบ่งประเภทของเขตสภาพอากาศ พฤติกรรมคนงานนวล การควบคุมการเผาปูนซีเมนต์ จำนวนผู้โดยสารในรถไฟ ลิฟต์ การจัดการรางของการใช้รางรถไฟ และเทคนิคการบริการอื่นๆ และยังคงมีการคิดค้นใหม่ๆ เพิ่มขึ้นเพื่อปรับปรุงวิธีการใช้ระบบพื้นฐานของ Fuzzy เช่น การแก้ไขฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิก ความสม่ำเสมอของส่วนกำหนดรูปแบบ Fuzzy เป็นต้น



รูป 3-4 การใช้ Fuzzy ในการควบคุมระบบป้อนกลับ

Fuzzy logic เหมาะที่จะนำไปใช้กับระบบที่มีลักษณะดังนี้

1. มีรูปแบบระบบที่ซับซ้อน ยุ่งยาก หรือทำให้เกิดความชัดเจนได้ยาก
2. เป็นระบบที่ถูกควบคุม โดยผู้เชี่ยวชาญ
3. มี input , output ซับซ้อนมาก มีค่าฟังก์ชันไม่คงที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องพอสมควร
4. เป็นระบบที่ใช้คนคอยสังเกตขณะที่ระบบกำลังทำงาน
5. เป็นระบบที่ไม่แน่นอนต่างๆ ไป เช่น ระบบเศรษฐกิจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ตัวควบคุมแบบ PID และการนำไปใช้งาน

#### (PID Controller and Its Utilization)

การออกแบบระบบควบคุมทางด้านอุตสาหกรรม (Industrial Control) เป็นงานที่ค่อนข้างจะยุ่งยากซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถสรุปการออกแบบระบบระบบควบคุมได้ด้วยคำถามสองข้อหลัก คือ เป้าหมายหลักของการควบคุมคืออะไรและเราจะดำเนินการอย่างไร เพื่อบรรลุเป้าหมายดังกล่าว เป็นการยากที่จะตอบคำถามทั้งสองข้อให้ครอบคลุมงานทุกประเภทเราเพียงจะกล่าวในที่นี้ได้ว่า การควบคุมเพื่อบรรลุผลตามเป้าหมายหลักนั้นมักจะเกี่ยวข้องกับการควบคุมโปรเซสย่อยหลาย ๆ โปรเซส การควบคุมให้ได้ผลจึงประกอบด้วยระบบควบคุมย่อยที่เหมาะสม

ระบบควบคุมย่อยโดยส่วนใหญ่จะเป็นระบบควบคุมแบบง่าย ๆ ที่ใช้หลักการควบคุมแบบป้อนกลับ

(ดูรูปที่ 7) และโดยทั่วไปตัวควบคุมที่ใช้มักจะเป็นแบบ PID ระบบควบคุมย่อยส่วนน้อยที่จำเป็นต้องใช้หลักการควบคุมแบบซับซ้อน (Complex Control) เช่น Cascade Control Feedforward-Feedback Control Selective Control ฯลฯ

อาจจะกล่าวได้อีกนัยว่าในการกำหนดแบบของการควบคุม เราจะพยายามใช้การควบคุมแบบง่าย ๆ ก่อน ต่อเมื่อการควบคุมแบบง่าย ๆ ใช้ไม่ได้ผล เราจึงจะใช้การควบคุมแบบซับซ้อน

การศึกษาให้เข้าใจการควบคุมแบบง่าย ๆ (Simple Control) ซึ่งใช้ตัวควบคุมแบบ PID จึงเป็นความจำเป็นพื้นฐานในการควบคุมทางอุตสาหกรรม

#### 4.1 ลักษณะสมบัติของ โปรเซส (Process Characteristic)

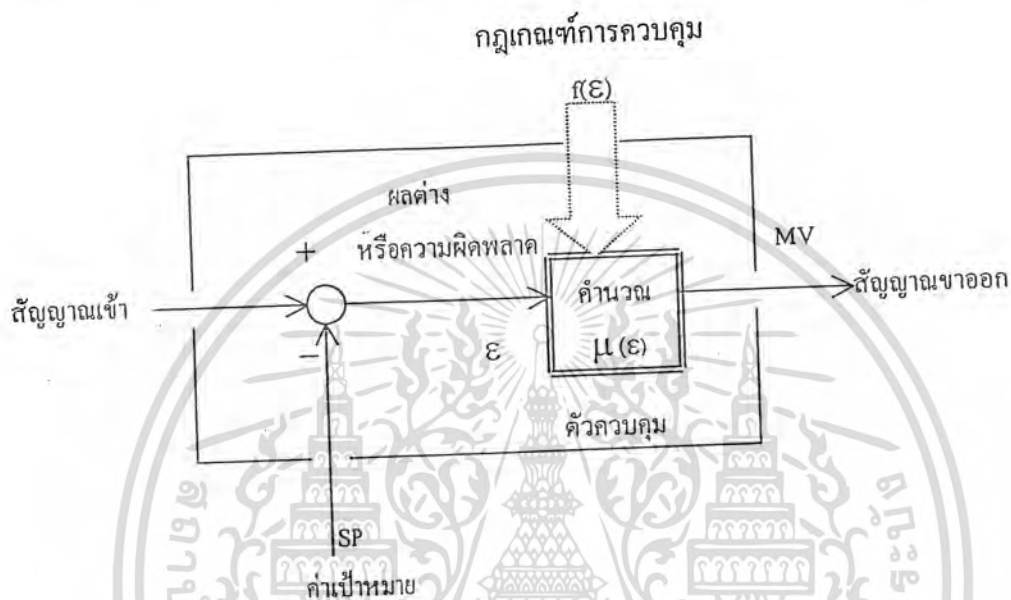
ไม่ว่าเราจะควบคุมสิ่งใด มีชีวิตหรือไม่ก็ตาม เราจำเป็นต้องทราบถึง “ธรรมชาติ” ของสิ่งนั้นว่าตอบสนองอย่างไรต่อการเปลี่ยนแปลงของการกระทำจากภายนอก ในการควบคุมโปรเซสเราจึงควรทำการศึกษาให้เข้าใจลักษณะสมบัติของโปรเซส (Process Characteristic) เสียก่อน

โดยทั่ว ๆ ไปแล้วการศึกษาลักษณะสมบัติของโปรเซสจะเป็นการศึกษาว่าตัวแปรโปรเซสเปลี่ยนแปลงอย่างไรเมื่อสัญญาณควบคุม สถานะการทำงาน หรือสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลง แต่เพื่อจะลดความยุ่งยาก ในที่นี้เราจะศึกษาลักษณะสมบัติของโปรเซสโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรโปรเซสเมื่อสัญญาณควบคุมเปลี่ยนแปลงเพียงอย่างเดียว ขณะที่สถานะการทำงานและสภาพแวดล้อมมีค่าคงที่ใกล้เคียงกับขณะปฏิบัติงานจริง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2 แบบต่าง ๆ ของการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control Modes)

แบบของการควบคุมแบบป้อนกลับถูกกำหนดโดยความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาออก (MV) กับสัญญาณขาเข้า (PV) ของตัวควบคุม (Controller) ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์การควบคุม (Control Law) ที่พนักงาน (Operator) เป็นผู้ “ปรับตั้ง” ไว้ล่วงหน้า



รูปที่ 4-1 บล็อกไดอะแกรม

แบบของการควบคุมแบบป้อนกลับมีหลายแบบด้วยกันแต่ที่สำคัญได้แก่ On-Off P-only PT PD และ PTD มีด้วยกัน 3 แบบ

4.2.1 ตัวควบคุมที่ใช้จะเป็นแบบ On-Off Controller หรือ PTD Controller กรณี PTD Controller กฎเกณฑ์การควบคุมพื้นฐาน Proportional (P) Integral (T) และ Derivative (D) On-Off Controller (Two-Position Control)

เป็นแบบการควบคุมที่ง่ายที่สุดของการควบคุมแบบป้อนกลับ เหมาะสำหรับการควบคุมที่ราคาถูก แต่ผลการควบคุมไม่ดีนัก เรามักจะพบการควบคุมแบบนี้ในเครื่องใช้ภายในบ้าน เช่น เตารีด ตู้เย็น ตู้อบ เป็นต้น

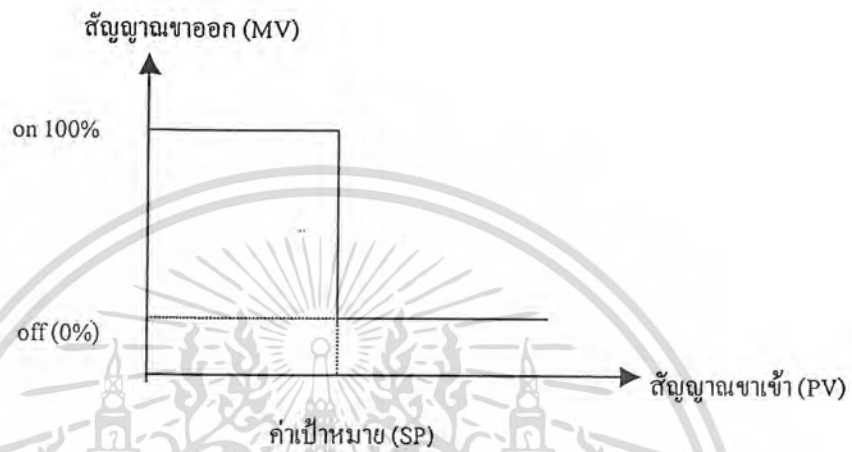
สัญญาณขาออกของตัวควบคุมมีเพียงสองสถานะคือ On และ Off สัญญาณนี้จะทำให้ตัวปรับโปรเซส (Final Control Element) ทำงานเต็มที่หรือหยุดทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

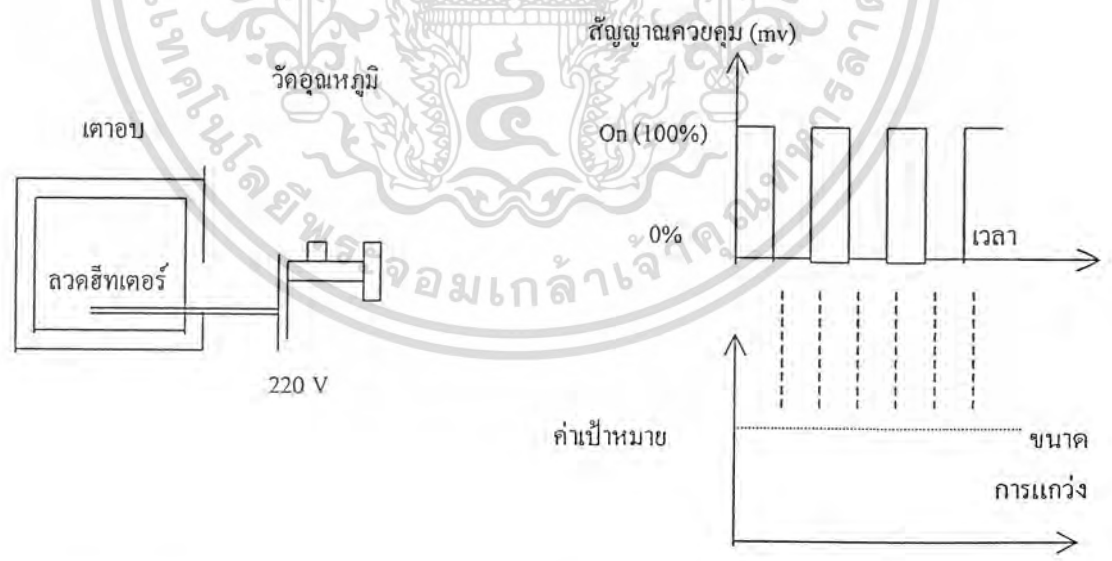
ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาออก (MV) กับสัญญาณขาเข้า (PV) ที่ค่าเป้าหมาย (SP) ค่าหนึ่ง ค่าใดแสดงได้ดังนี้

$$MV = \text{On} \text{ เมื่อ } PV < SP$$

$$MV = \text{Off} \text{ เมื่อ } PV > SP$$



รูปที่ 4-2 สัญญาณขาออก V.S. สัญญาณขาเข้าของ On – Off Controller (กรณี Open – loop)



ในการนำ On-Off Control ไปใช้งาน (ดูรูปที่ 28) ความเที่ยงตรงจะไม่ดีนักตัวแปร โพรเซส จะแกว่งรอบค่าเป้าหมาย โดยมีคาบเวลา (Period) ของการแกว่งขึ้นอยู่กับค่า Diadem ของ โพรเซส

“ยิ่ง Diadem มีค่ามาก คาบเวลาของการแกว่งยิ่งจะมีค่ามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนขนาด (Amplitude) ของการแกว่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วน  $\text{DiademCapacity Lag}$  “ยิ่งอัตราส่วน Diadem มีค่ามาก ขนาดของการแกว่งยิ่งจะมีค่ามาก Capacity Lag

ข้อสังเกตที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือตัวรับโปรเซสจะทำงานปิดเปิดบ่อยครั้ง โดยมีความถี่ (Frequency) ในการปิดเปิดเท่ากับความถี่ (= 1) ของการแกว่งคาบเวลา

ในทางปฏิบัติเราจะใช้ On-Off Control ได้ในโปรเซสที่มีค่า Capacity Lag มาก ๆ และค่า

Deadtime ปานกลาง หรือการควบคุมแบบง่าย ๆ Disturbance ไม่นอกเพื่อความคิดพลาด (ขนาดของการแกว่ง) จะไม่มากเกินไป และตัวรับโปรเซสจะได้ทำงานไม่บ่อยครั้งเกินไปด้วย (สดความสึกหรอ)

#### 4.2.2 Proportional Control (P-only Control)

ข้อเสียของการควบคุมแบบ On-Off Control คือ มีการแกว่งของค่าตัวแปร โปรเซสรอบค่าเป้าหมาย เนื่องจาก สัญญาณควบคุมมีแค่สองค่า (On หรือ Off) ขณะที่สัญญาณวัดมีค่าเข้าใกล้ค่า

เป้าหมาย สัญญาณควบคุมจะมีค่ามากหรือน้อยเกินไปไม่สอดคล้องกับค่าความผิดพลาด

เพื่อจะกำจัดกาการแกว่งเราจึงควรจะกำหนดให้สัญญาณควบคุมมีขนาดเป็นสัดส่วนเหมาะสมกับขนาดของความผิดพลาด (Proportional Action) ขณะที่สัญญาณวัดมีค่าเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย การควบคุมที่ใช้หลักการนี้เราเรียกว่า Proportional Control หรือ P-only Control

เราจะพบการควบคุมแบบ P-only Control ในงานควบคุมระดับน้ำในถังเก็บการควบคุมแรงดันของก๊าซในถัง ฯลฯ

ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาออก (MV) ของ P-only Controller ที่ค่าเป้าหมาย (SP) ใด ๆ แสดงได้ดังนี้

$$MV = 100 \cdot (SP - PV) + b \dots\dots\dots (1)$$

PB

$$MV = \text{สัญญาณขาออก}$$

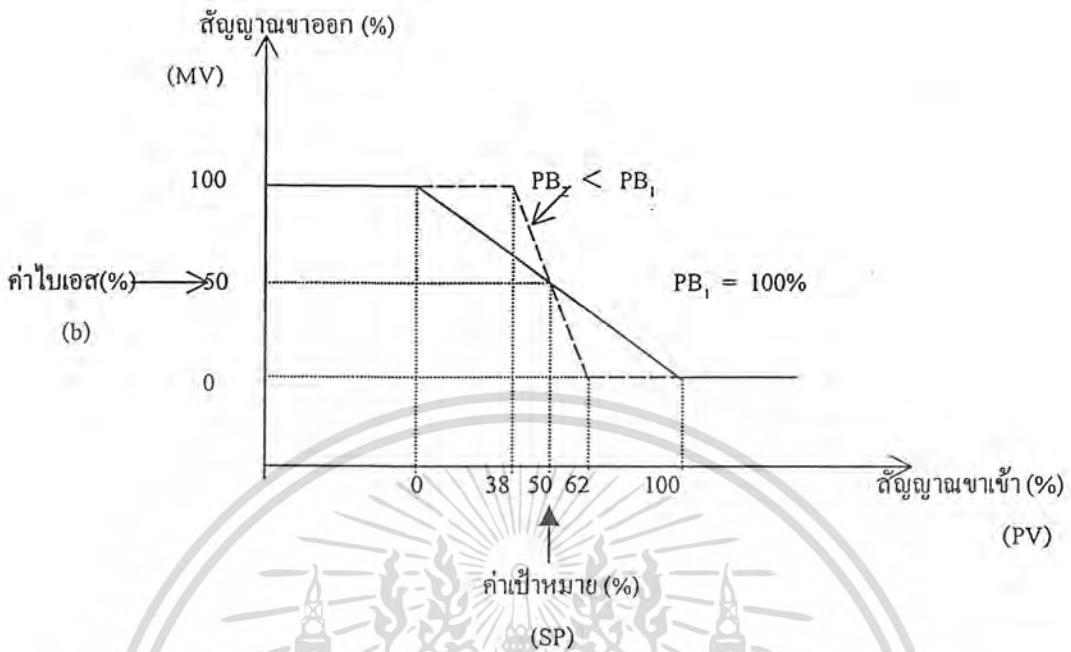
$$SP = \text{ค่าเป้าหมาย}$$

$$PV = \text{สัญญาณขาเข้า}$$

$$B = \text{ค่าไบแอส (Bias) เป็นค่าสัญญาณควบคุมขณะที่ไม่มีความผิดพลาด (SP=PV)}$$

$$PB = \text{Proportional Band มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (\%)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-3 สัญญาณขาออก v.s. สัญญาณขาเข้าของ P-only Controller (กรณี Open-Loop)

อัตราการตอบสนองต่อความผิดพลาดของ P-only Controller ถูกกำหนดด้วยค่า Proportional Band เราให้คำจำกัดความของ Proportional Band ว่าเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาเข้า (กรณีค่าเป้าหมายคงที่) ที่ทำให้สัญญาณขาออกเปลี่ยนแปลงไป 100%

#### 4.2.3 Proportional-Plus-Integral Control (PI-Control)

ในทางอุตสาหกรรมเรามักจะเรียกว่า "Proportional-Plus-Reset Control"

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า P-only Control จะมี Offset ถ้าเกิดมีสิ่งรบกวน โพรเซส (Process Disturbance) เพื่อจะกำจัดค่า Offset โดยพนักงานไม่งานไม่จำเป็นต้องคอยปรับตั้งตัวควบคุมบ่อยๆ เราจำเป็นต้องทำให้ตัวควบคุมสามารถปรับค่าไบแอสโดยอัตโนมัติตัวควบคุมดังกล่าว ได้แก่ PI-Controller ซึ่งมี Integral Action (หรือ Reset Action) เพิ่มเติมจากเดิม

ระบบควบคุมส่วนมากมักจะเป็นการควบคุมแบบ PI-Control โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการควบคุมอัตราการไหลและการควบคุมแรงดันของเหลว ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

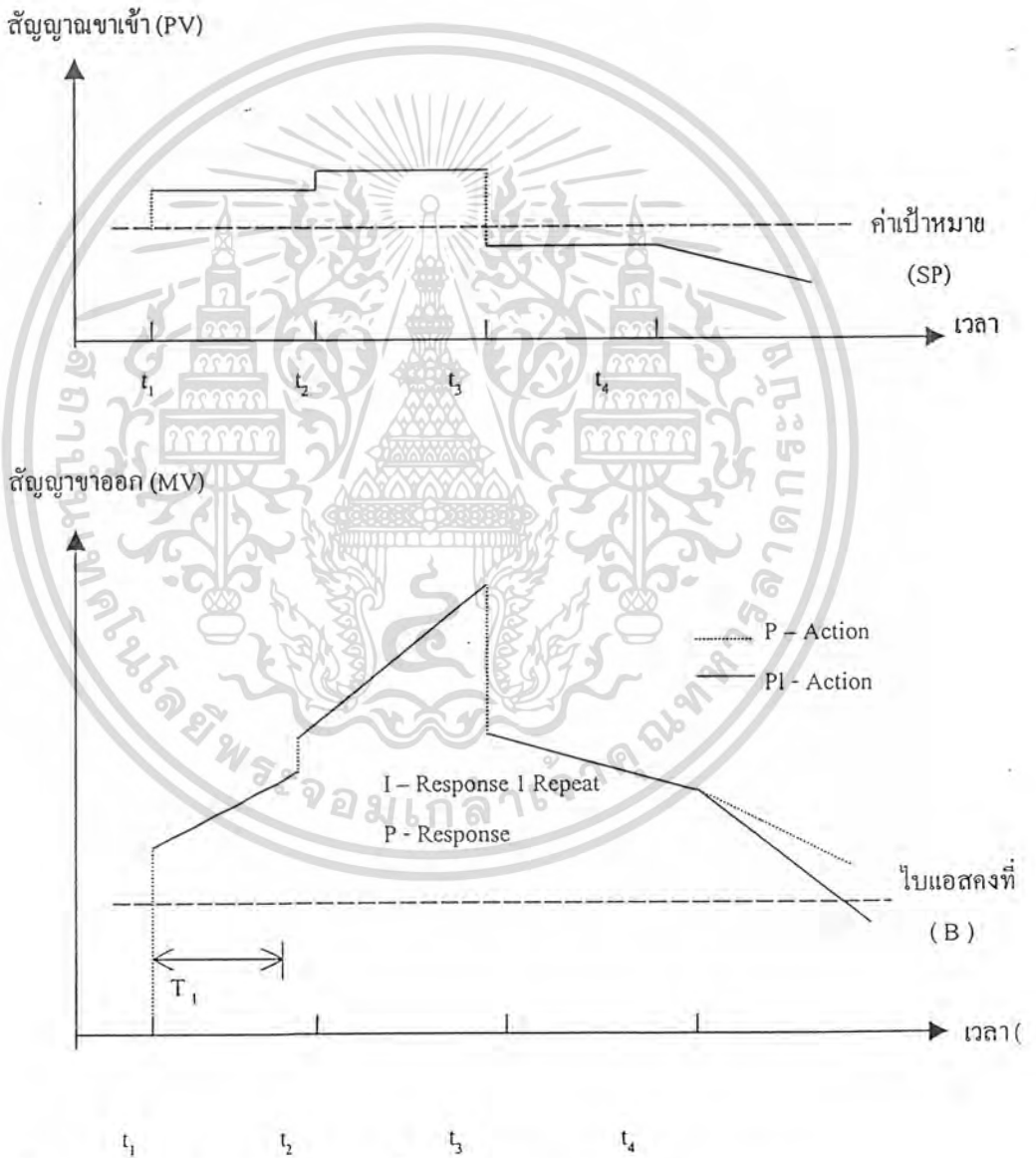
ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาออกกับสัญญาณขาเข้าของ PI-Controller แสดงได้ดัง

นี้

$$MV = 100/PB[SP-PV) + 1/Tr \cdot \int (SP-PV).dt] + b \dots\dots\dots (4)$$

โดยที่  $T_r$  = Integral Time หรือ Reset Time หน่วยเป็นนาที (Minute)

หมายเหตุ ในตำราบางเล่มอาจเรียก  $T_r$  ว่า Minutes Per Repeat



รูป 4-4 สัญญาณขาออก v. s. สัญญาณขาเข้าของ PI-Controller ขณะ Openloop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 Proportional – Plus-Integral-Plus-Derivative Control (PID) Control

ในทางอุตสาหกรรมเรามักจะเรียกว่า “Proportional-Plus-Reset-Plus-Rate Control”

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า Integral Action ใน PI-Control จะทำให้ตัวควบคุมตอบสนองต่อความผิดพลาดช้าลง กรณีที่โปรเซสช้าอยู่แล้วเราอาจจำเป็นต้องเพิ่ม Derivative Action (หรือ Rate Action) เพื่อลดความช้าของระบบควบคุม การควบคุมแบบนี้เราเรียกว่า PID-Control

เราจะพบการควบคุมแบบ PID ในงานควบคุมอุณหภูมิเป็นส่วนใหญ่ ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาออก (MV) กับสัญญาณขาเข้า (PV) ของ PID-Controller ที่ค่าเป้าหมาย (SP) ใดๆ แสดงได้ดังนี้

$$MV = 100 \left[ \frac{(SP-PV)}{PB} + 1 \cdot \frac{(SP-PV)dt}{T} + T_o \cdot d(SP-PV) \right] + b \dots\dots\dots(5)$$

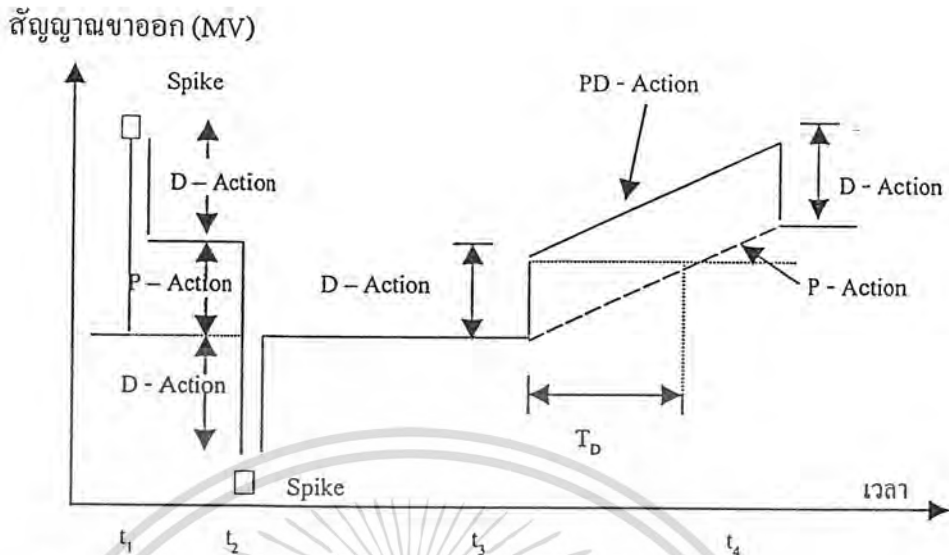
To = Derivative Time หรือ Rate Time หน่วยเป็นนาที (Minutes)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ MV กับ PV ในสมการ (5) จะยุ่งยากซับซ้อนไม่เหมาะสำหรับการอธิบาย Derivative Action รูปที่ 37 แสดงความสัมพันธ์ของ MV กับ PV ของ

PD-Controller กรณี Open-Loop ซึ่งง่ายต่อการทำความเข้าใจ Derivative Action สัญญาณขาเข้า (DV)



รูปที่ 4 - 5 Derivative Action



รูปที่ 4-6 ผลของ D-Action ในตัวควบคุม PD-Controller ขณะ Openloop

ผลตอบสนองของ Derivative Action จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า ความผิดพลาด (SP-PV)

กรณีที่ค่าเป้าหมายมีค่าคงที่ ตรงเวลาที่สัญญาณเข้าไม่เปลี่ยนแปลง Derivative Action จะไม่มีผล ต่อเมื่อสัญญาณเข้าเกิดเปลี่ยนแปลง Derivative Action จะเพิ่มหรือลดสัญญาณออกตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้า

จากรูปที่ 4-6 ขณะเวลา  $t_3 < t < t_4$  สัญญาณเข้าเปลี่ยนแปลงด้วยอัตราคงที่ D-Action จะทำงานคล้ายกับเป็นการทำให้ผลตอบสนองของ P-Action เร็วกว่าเดิมเป็นเวลา  $T_D$  นาที

บางท่านอาจจะกล่าวว่า Derivative Action  $D =$  จะปรับสัญญาณขาออกไปด้านทานความผิดพลาด “ล่วงหน้า” ก่อนที่ขนาดของความผิดพลาดจะมีค่ามาก (ค่ากล่าวนี้แม้จะไม่ถูกต้องนักแต่ก็พออนุโลมจำเป็นหลักการได้) การเพิ่ม Derivative Action เข้าไปใน PI-Control จะทำให้ผลตอบสนองของระบบต่อสิ่งรบกวนไวขึ้น สัญญาณวัดเปลี่ยนแปลงสู่ค่าเป้าหมายไวขึ้น จากรูปที่ 38 ข. เราจะพบว่ายิ่ง  $T_d$  มีค่ามากสัญญาณวัดยิ่งเปลี่ยนแปลงกลับสู่ค่าเป้าหมายไวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าเราปรับตั้งค่า  $T_d$  มากเกินไปสัญญาณวัดอาจเกิดการแกว่งได้ (กรณี  $T_d = T_{d3}$ ) ปกติเรามักปรับค่า  $T_d$  ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่า  $T_{d3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กล่าวโดยสรุป

“ข้อดีของ PID Control คือ ระบบควบคุมจะตอบสนองต่อสิ่งรบกวน (Disturbance) ไวขึ้น ทำให้เสถียรภาพในการควบคุมดีขึ้นกว่า PI Control สำหรับ โพรเซสที่ตอบสนองช้า”

การควบคุมแบบนี้เหมาะกับโพรเซสที่มี Capacity Lag ใด ๆ และ Diadem ขนาดไม่โตนัก ซึ่งส่วนใหญ่มักจะเกี่ยวข้องกับการควบคุมอุณหภูมิ

ในระบบควบคุมที่สัญญาณวัดมีสัญญาณรบกวน (Noise) เราไม่ควรจะใช้ Derivative Action แม้ว่าสัญญาณรบกวนมีขนาดเล็ก แต่อัตราการเปลี่ยนแปลง (ความถี่) มักจะมีค่าสูง

Derivative Action ซึ่งมีขนาดเป็นสัดส่วน โดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงอาจจะทำให้สัญญาณขาออกผิดพลาดไปอย่างมากมาย เพื่อจะแก้ปัญหา Noise ในทางปฏิบัติจึงมักจะเพิ่มการกรองความถี่ (Filtering) ด้วยค่า Time Constant = T (N มีค่าเท่ากับ 3-10 ใน Derivative Action

#### 4.3.4 Proportional-Plus-Derivative Control (PD-Control)

ในทางอุตสาหกรรมเรามักจะเรียกว่า “Proportional-Plus-Rate Control”

ลักษณะความสัมพันธ์ของสัญญาณขาออกกับสัญญาณขาเข้าของตัวควบคุม PD-Controller ได้แสดงแล้วในรูปที่ 37 ซึ่งมีสมการดังนี้

$$MV = 100. [SP-PV] + T d (SP-PV) + b \dots\dots\dots (6)$$

PB dt

PD-Control จะใช้ในการควบคุมโพรเซสจำพวกเดียวกับ P-only Control โดย PD-Control จะให้ค่า Offset น้อยกว่า P-only Control

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 ขั้นตอนการทดลอง

- 5.1.1 เมื่อต่อสายสัญญาณและสายไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว ให้จ่ายน้ำเข้าระบบ ซึ่งในขณะนี้น้ำยังไม่เข้าไปยังแท็งก์เก็บน้ำ
- 5.1.2 Key ค่า Set Point ตามค่าที่ระบุน้ำที่ต้องการ ดังตารางที่ 5.1

Scale	Set point
100	255
90	22.95
80	204
70	178.5
60	153
50	127.5
40	102
30	76.5
20	51
10	25.5
0	0

ตารางที่ 5.1

ตัวอย่าง การ Key ค่าเพื่อควบคุมระดับน้ำที่ 80%

เมื่อเข้าไปใน Program ควบคุมระดับน้ำ จะเจอหน้าจอ Dos แล้วจะมีข้อความว่า

Set Point (0-255 Centimeter) =

ต่อจากนี้สามารถใส่ค่า Set Point ที่ต้องการ คือ 204

Set Point (0-255 Centimeter) = 204

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจะเจอหน้าจอแสดงสถานะของระดับน้ำที่ควบคุมด้วย PID Control

### PID CONTROL

Set Point = 204

Ki =1.000000

Kp =150.000000

Kd = 100.000000

Input Y feed back = 255

Go to plant == 65535

Out paint ==255

หรือหากควบคุมด้วย Fuzzy logic control หน้าจอแสดงสถานะจะเป็นไปดังนี้

Fuzzy logic control

Set Point = 204

Input Y feed back = 255

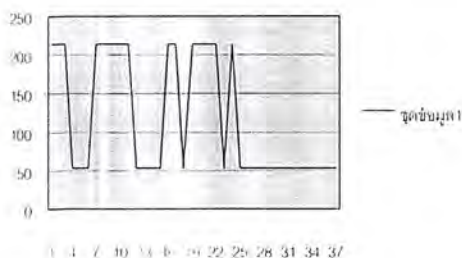
Go to plant == 65535

Out paint ==255

เมื่อถึงระดับน้ำที่ได้ตั้งไว้ ค่า Out paint == 0

## 5.2 ผลการทดลอง

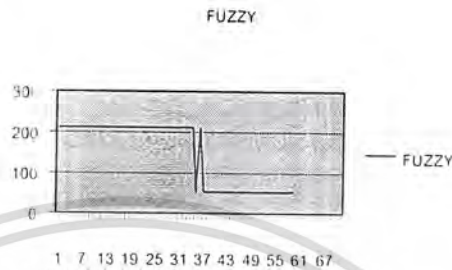
จากการทดลองจะเห็นว่า การควบคุมแบบ PID ความเร็วน้ำเมื่อใกล้ถึงจุด Set Point ความเร็วของการสูงขึ้นของระดับน้ำมีความเร็วคงที่ และเมื่อถึงจุด Set Point คอนโทรลเลอร์จะรี และปิดเปิดวาล์วอย่างรวดเร็วเพื่อให้ระดับน้ำเข้าสู่จุด Set point มากที่สุด ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการควบคุมแบบ Fuzzy Logic Control เมื่อระดับน้ำใกล้ถึงจุด Set Point ความเร็วน้ำจะลดลงเรื่อยจนถึงจุด Set Point ทั่วแล้วจะปิดสนิททันที ทำให้ช่วงเวลาที่เข้าใกล้จุด Set Point ได้เร็ว ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2

### สรุปการทดลอง

จากการทดลองเราจะเห็นได้ว่าค่า Dead Time ของ FUZZY มีค่าน้อยกว่า PID ค่า Settling Time ของ Fuzzyก็มีค่าน้อยกว่าPID และ Rise Timeของ FUZZY ก็มีค่าน้อยกว่า PIDในข้างต้นเราสามารถสรุปได้ว่า FUZZY มีคุณสมบัติดีกว่า PID

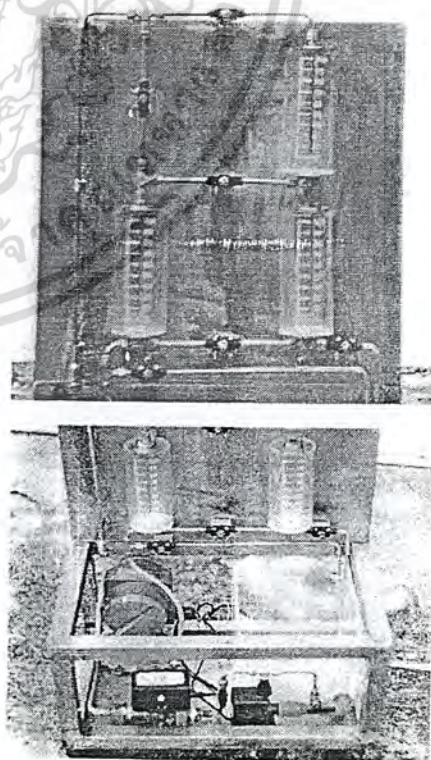
ในการควบคุมแบบ PID จากการทดลองผลที่ได้จะเกิด ความไม่เสถียรเนื่องจากการแกว่งของโปรเซส (Overshoot) มากกว่าการควบคุมแบบ FUZZY การตอบสนองของระบบต่อสิ่งรบกวนของ FUZZY มีความไวกว่าการควบคุมแบบ PID จากกราฟที่ได้ในตอนต้นการควบคุมแบบ PID จะเกิด ค่าความแตกต่างระหว่างสัญญาณที่วัดได้กับค่าเป้าหมาย (Offset) แต่ FUZZY จะไม่เกิดค่า Offset

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการควบคุมระดับที่จุด Set Point นั้นไม่สามารถให้เสถียรได้ 100% เนื่องจากไม่สามารถหาวาล์วที่ทำหน้าที่ควบคุมระดับน้ำแบบปิดเปิดหรือหรีได้ทันที จึงต้องใช้ Solenoid Valve แทน ซึ่งเมื่อระบบสั่งให้วาล์วหรี Solenoid Valve จะทำการปิดเปิดวาล์วอย่างรวดเร็วซึ่งความเร็วจะขึ้นอยู่กับว่าระบบจะสั่งให้วาล์วหรีแค่ไหน และค่าที่ Set ให้ Solenoid Valve ทำงานอยู่ที่ระดับ 48% ของค่าที่ระบบสั่งให้ตัดการจ่ายน้ำเข้าระบบ คือเมื่อระดับน้ำใกล้จุด Set Point ระดับแรงดันที่จ่ายออกมาจากระบบควบคุมมาสู่วาล์วจะลดต่ำลงจาก 10V,9V,8V.....0V เมื่อเข้าจุด Set Point เมื่อระบบส่งแรงดันมาที่ระดับ 5V วาล์วจะตัดทำให้ระดับน้ำลดลง (ขณะที่เปิดวาล์วจ่ายน้ำออกตลอดเวลา) ทำให้ระดับแรงดันสูงขึ้น วาล์วก็เปิด ซึ่งจากค่ากิกิพลาดที่เกิดขึ้นนี้ยังส่งผลไปถึงการควบคุมระดับน้ำแบบได้ระดับเช่น จาก 10% ไปยัง 20 % ไม่ได้ แต่สามารถควบคุมในระดับที่ต่างกัน 20% ขึ้นไปได้

โครงสร้างของชุดทดลองนี้สามารถนำไปพัฒนาให้สามารถควบคุมได้เสถียรขึ้นได้โดยการเปลี่ยน Control Valve ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และสามารถนำไปควบคุมระดับน้ำแบบ First Order และ Secound Order ได้ โดยการใส่ Control Valve ทั้งระบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. เอกสารประกอบการบรรยายเรื่องเครื่องควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Controller) เอก โษยสวัสดิ์, พรพจน์ หันหาญ, พล คงเถื่อ
2. สารประกอบการบรรยายเรื่อง สัญญาณมาตรฐานในระบบควบคุมอัตโนมัติ เมธา, ชุณหศิริ
3. Process instrumentation theory and practict โครงการเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
4. Introduction to process instrumentation, สุพจน์ ตุงกเสวรงค์
5. Intruction manual model SDBT power distributor YOKOKAW
6. Intruction manual model UNE 11 differential pressure transmitter YOKOKAWA
7. Intruction manual model y/ caln 01 AORN 24 control valve YOKOKAWA
8. Intruction manual model 61H shelf-mounted controller FOXBORO
9. หนังสือเครื่องวัดอุตสาหกรรม, สมศักดิ์ กิริติวุฒิเศรษฐ์
10. INSTRUMENTATION FOR ENGINEERING MEASUREMENTS JAMES W. DALLY, WILLIAM R.RILEY, KENNETH G.McCONNELL Copyrigh C1984, by Johnn Wiley Sons, Inc
11. INSTRUMENTATION DEVICES AND SYSTEMS  
C S RANGAN  
G R SARMA  
V S V Mani  
C 1983, TATA McGRAW-HILL PUBLISHING COMPANY LIMITED  
Seventh Reprint 1989

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้