

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตัวควบคุมแบบ PID ชนิดหลายอินพุท

Universal Input PID Controller



โดย
นายเจษฎา ตั้งเขตมงคลสุข
นายแมนรัตน์ รุ่งวัฒนโยธิน

อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์ สว่าง เลิศถิรสุนทร
อาจารย์ คงศักดิ์ อนันตหิรัญรัตน์

๐๕๖

๐๕๔

เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 33955
วัน, เดือน, ปี..... 23 ก.ย. 2542

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2541

ภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม

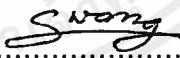
คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

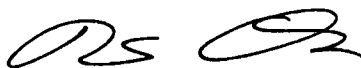
เรื่อง ตัวควบคุมแบบ PID ชนิดหลายอินพุท
Universal Input PID Controller

ผู้จัดทำ

นายเจษฎา ตั้งเขตมมงคลสุข เลขประจำตัว 38014084

นายแมนรัตน์ รุ่งวัฒนโยธิน เลขประจำตัว 38014403


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อ. สว่าง เลิศศิริสุนทร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อ. คงศักดิ์ อนันตศิริฐรัตน์)

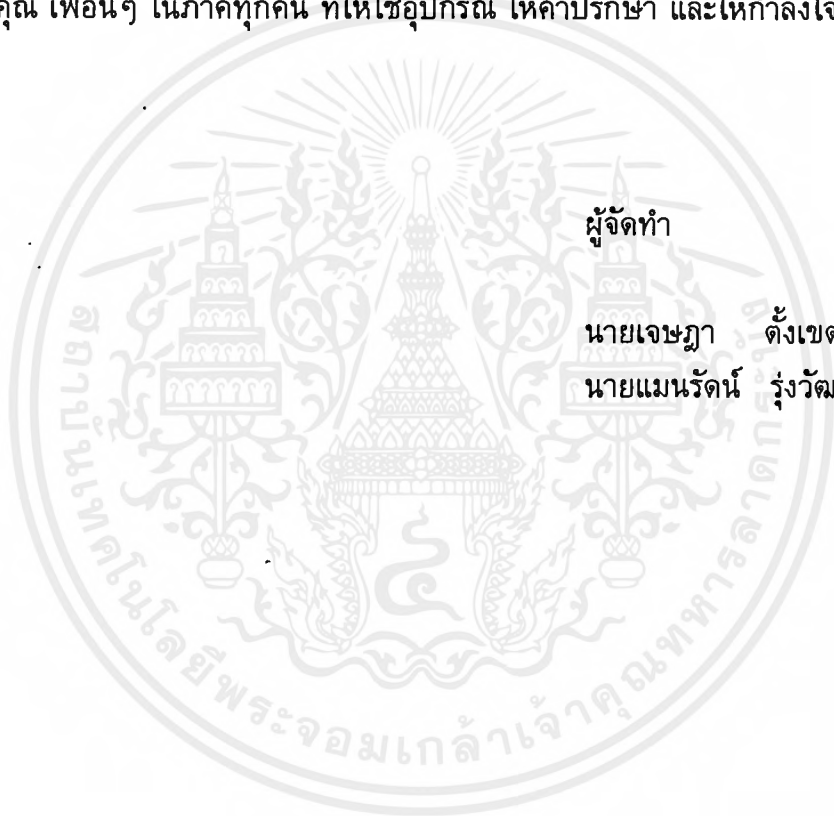
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความเมตตาจาก อ.สว่าง เลิศศิรสุนทร และ อ.คงศักดิ์ อนันตหิรัญรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาทั้ง 2 ท่าน ที่ได้ให้ความกรุณาแนะนำ แก่ผู้จัดทำ ตลอดมา พร้อมทั้ง อ.สุเรียร เกียรติสุนทร ที่ได้กรุณาช่วยรับผิดชอบ และให้ความช่วยเหลือในสิ่งต่างๆ นอกจากนี้ยังมี คณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้ และให้คำแนะนำ แก่ผู้จัดทำ กลุ่มผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ. โอกาสนี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ของผู้จัดทำที่ได้อุปการะผู้จัดทำ รวมทั้งยังเป็นผู้ให้กำลังใจ แก่ผู้จัดทำโดยตลอดมา

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ในภาคทุกคน ที่ให้ใช้อุปกรณ์ ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจ แก่ผู้จัดทำมา โดยตลอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

ปริญญานิพนธ์ ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรของนักศึกษาวิศวกรรมศาสตรปีที่ 4 โดยจะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่เรียกว่า Universal Input PID Controller ซึ่งเป็นโครงการของกลุ่มของข้าพเจ้าที่ได้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการควบคุมระบบที่รับ input จาก Thermocouple K type, RTD ชนิด pt100, สัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA และ 1-5 V และทำการคำนวณเพื่อให้ค่าเหล่านี้เข้าสู่ค่า Set Point โดยผ่าน PID Controller แล้วส่งค่า Output ออกไปเพื่อควบคุมระบบนั้นๆ

ปริญญานิพนธ์ ฉบับนี้ได้พยายามรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อที่ได้จัดทำ ซึ่งหากผิดพลาดประการใด หรือขาดสิ่งใดไป ก็ต้องขออภัยไว้ ณ. ที่นี้ด้วย

กลุ่มผู้จัดทำ

นายเจษฎา ตั้งเขตมงคลสุข

นายแมนรัตน์ รุ่งวัฒนโยธิน

ตัวควบคุมแบบ PID ชนิดหลายอินพุท

Universal Input PID Controller

โดย เจษฎา ตั้งเขตมงคลสุข 38014084
แมนรัตน์ รุ่งวัฒนโยธิน 38014403

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. สว่าง เลิศศิริสุนทร
อ. คงศักดิ์ อนันตศิริวัฒน์

บทคัดย่อ

Universal Input PID controller เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อทำการควบคุม Plant ต่างๆ ซึ่งจะมีขอบเขตการใช้งานค่อนข้างกว้าง ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะต่างๆ ของตัวมัน เช่น ความสามารถในการรับ Input , Function ภายใน ฯลฯ สำหรับ Universal Input PID Controller ที่จัดทำขึ้นนั้นจะสามารถรับข้อมูลได้จาก 4 Inputs และมีระบบควบคุมภายในเป็นแบบ PID Controller แต่เนื่องจากยังเป็นรุ่นทดสอบ จึงขาดคุณสมบัติในการทำ Auto tuning ที่สำคัญไป

สำหรับการทำงานจะรับข้อมูลจาก Input ผ่าน A/D เพื่อผ่านเข้าสู่ส่วนคำนวณ(Microcontroller) ซึ่งจะพยายามปรับค่า Input ให้เข้าสู่ค่า Set Point ที่ได้ป้อนเข้าไปทางคีย์บอร์ด แล้วจึงส่งค่าควบคุมออกไปทาง Output เพื่อนำไปใช้ควบคุม Plant ต่อไป

Abstract

The Universal Input PID Controller is a device used for controlling various plants. Its work has a rather large boundary that is effected by many characteristics such as ability of inputs' reception, internal functions etc. For this Universal Input PID Controller, it can receive 4 kinds of input and has internal control process in PID control type. Because it is a test type so it has not a property to do the importance work like an Auto tuning.

For its work, it will receive input and pass it through A/D to go to Arithmetic part (Micro controller) that will adjust an input to set point, which is received by keyboard, and send control value to output to control plant.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 Thermocouple	3
2.2 RTD	7
2.3 ระบบควบคุม	11
2.3.1 ON-OFF Controller	12
2.3.2 P-Controller	13
2.3.3 I-Controller	15
2.3.4 PI-Controller	15
2.3.5 PD-Controller	16
2.3.6 PID-Controller	18
2.4 Signal Type	19
2.5 A/D Converter	20
2.5.1 Single Slope A/D Converter	20
2.5.2 Dual Slope A/D Converter	20
2.5.3 Parallel Comparator A/D Converter	21
2.5.4 ADC ชนิดที่มี D/A ภายใน	22
ชนิด Counter	22
ชนิด Up-Down Counter	23
ชนิด Successive Approximation	23
2.6 D/A Converter	24
2.6.1 Binary Weighted Resistors	24
2.6.2 R/2R Ladder	25
2.7 V/I Converter	26
2.7.1 Offset V/I Converter (Floating Load)	26
2.7.2 V/I Converter (Grounded Load)	26

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.8 I/V Converter	27
2.8.1 Floating I/V Converter	27
2.8.2 Grounded-Referenced I/V Converter	27
บทที่ 3 หลักการทำงานของ Universal Controller	29
3.1 โครงสร้างโดยรวม	29
3.2 PID Controller สำหรับ Digital Signal	31
3.3 การควบคุม Calculating Period และ Sampling Period	32
3.4 Universal Input PID Controller กับ MCS51	33
3.4.1 Sampling Period	33
3.4.2 Seven-Segments	34
3.4.3 Keyboard	35
3.4.4 Port	36
3.4.5 A/D	38
3.4.6 D/A	39
3.4.7 Programming	39
บทที่ 4 การออกแบบวงจร	43
4.1 วงจร RTD	43
4.2 วงจร Thermocouple	44
4.3 วงจร แปลงสัญญาณ 1-5 V เป็น 0-5 V	44
4.4 วงจร แปลงสัญญาณ 4-20 mA เป็น 0-5 V	45
4.5 วงจร 7-Segments	45
4.6 วงจร Switch	46
4.7 วงจร แปลงสัญญาณ output ให้เป็น 4-20 mA	46
4.8 วงจร CPU	47
4.9 วงจร กำเนิด Clock ให้ A/D	47

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	49
5.1 การทดลอง	49
5.2 ผลการทดลอง	50
5.3 Universal Input PID Controller และ Level Process	54
บทที่ 6 สรุปและวิเคราะห์	55
สรุปผลการดำเนินงาน	55
ปัญหาที่เกิดขึ้น และแนวทางแก้ไข	56
แนวทางการพัฒนาในอนาคต	57
ภาคผนวก ก. ผลการปรับแต่ง Input	
ภาคผนวก ข. Program	
ภาคผนวก ค. Data Sheet	
หนังสืออ้างอิง	

สารบัญญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 (ก),(ข) วงจรการทดลองของซีแม็ค	3
รูปที่ 2.2 วงจรการทดลองของเพลเทียร์	3
รูปที่ 2.3 เทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานทั้ง 7 แบบ	6
รูปที่ 2.4 อัตราส่วนของความต้านทานของโลหะเทียบกับความต้านทานที่ 0 °C	8
รูปที่ 2.5 วงจร บริดจ์	9
รูปที่ 2.6 วงจร RTD แบบ 3 สาย	9
รูปที่ 2.7 วงจร RTD แบบ 4 สาย	10
รูปที่ 2.8 ระบบควบคุมแบบ Open-loop	11
รูปที่ 2.9 ระบบควบคุมแบบ Closed-loop	11
รูปที่ 2.10 (ก) Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ 2 ตำแหน่ง หรือแบบ ON-OFF	13
(ข) Differential Gap ของการควบคุมแบบ 2 ตำแหน่ง	13
รูปที่ 2.11 Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ Propotional	14
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการวัด กับช่วงชักของวาล์ว เมื่อมี ค่า PB ตั้งแต่ 20% ถึง 500%	14
รูปที่ 2.13 Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ Integral	15
รูปที่ 2.14 (ก) Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ PI	16
(ข) อินพุทของตัวควบคุมซึ่งเป็นแบบ Unit Step	16
(ค) เอาท์พุทของตัวควบคุมแบบ PI เมื่ออินพุทเป็นแบบ Unit step	16
รูปที่ 2.15 (ก) Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ PD	17
(ข) อินพุทของตัวควบคุมซึ่งเป็นแบบ Unit Ramp	17
(ค) เอาท์พุทของตัวควบคุมแบบ PD	17
รูปที่ 2.16 (ก) Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ PID	18
(ข) อินพุทของตัวควบคุมซึ่งเป็นแบบ Unit Ramp	18
(ค) เอาท์พุทของตัวควบคุมแบบ PID	18
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์สัญญาณชนิดต่างๆ	19
รูปที่ 2.18 Single Slope A/D Converter	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 2.19 Dual Slope A/D Converter	20
รูปที่ 2.20 การทำงานของ Dual Slope A/D Converter	21
รูปที่ 2.21 Parallel Comparator A/D Converter	21
รูปที่ 2.22 A/D Converter ชนิด Counter	22
รูปที่ 2.23 การทำงานของ A/D Converter ชนิด Counter	22
รูปที่ 2.24 A/D Converter ชนิด UP-Down Counter	23
รูปที่ 2.25 การทำงานของ A/D Converter ชนิด UP-Down Counter	23
รูปที่ 2.26 A/D Converter ชนิด Successive Approximation	23
รูปที่ 2.27 Binary Weighted Resistors D/A Converter	24
รูปที่ 2.28 R/2R Ladder D/A Converter	25
รูปที่ 2.29 V/I Converter (Floating Load)	26
รูปที่ 2.30 V/I Converter (Grounded Load)	26
รูปที่ 2.31 Floating I/V Converter	27
รูปที่ 2.32 Grounded-referenced I/V Converter	27
รูปที่ 3.1 Block Diagram ของ Universal Controller	30
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $e(t)$ กับ t	31
รูปที่ 3.3 แสดงขาของ 7-Segments	34
รูปที่ 3.4 แสดงขาของ Switch	35
รูปที่ 3.5 แสดงการเชื่อมต่อ 89C51 กับ 7-Segments และ Switches	36
รูปที่ 3.6 แสดงการเชื่อมต่อ 89C51 กับ 8255	38
รูปที่ 3.7 Flow Chart แสดง Main Program	40
รูปที่ 3.8 Flow Chart แสดง ส่วนรับ Input Channel และ Set Point	41
รูปที่ 3.9 Flow Chart แสดง ส่วน Process Value และ PID Controller	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.1 วงจร RTD	43
รูปที่ 4.2 วงจร Thermocouple	44
รูปที่ 4.3 วงจร Voltage Input	44
รูปที่ 4.4 วงจร Current Input	45
รูปที่ 4.5 วงจร 7-Segments	45
รูปที่ 4.6 วงจร Switch	46
รูปที่ 4.7 วงจร Output	46
รูปที่ 4.8 วงจร CPU	47
รูปที่ 4.9 วงจร กำเนิด Clock 500 kHz	47
รูปที่ 4.10 วงจรในส่วนของ Digital Signal	48
รูปที่ 5.1 Level Process	49
รูปที่ 5.2 Block Diagram ของ Level Process	50
รูปที่ 5.3 กราฟผลการทดลอง $K_p=10$	51
รูปที่ 5.4 กราฟผลการทดลอง $K_p=10$ $K_i=3$	52
รูปที่ 5.5 กราฟผลการทดลอง $K_p=10$ $K_i=3$ $K_d=0.2$	53
รูปที่ 5.6 Universal Input PID Controller	54
รูปที่ 5.7 Level Process	54
รูปที่ ก.1 กราฟแสดงผลระหว่าง Output ของวงจรรับ Input จาก RTD ที่มาจากการ คำนวณ (Cal) และจากการวัดจริง (Act)	ก.2
รูปที่ ก.2 กราฟแสดงผลระหว่าง Output ของวงจรรับ Input จาก Thermocouple ที่มาจาก การคำนวณ (Cal) และจากการวัดจริง (Act)	ก.4
รูปที่ ก.3 กราฟแสดงผล Output จากการคำนวณของวงจรรับ Input จากสัญญาณ มาตรฐาน 1-5 V.	ก.6
รูปที่ ก.4 กราฟแสดงผล Output จากการคำนวณของวงจรรับ Input จากสัญญาณ มาตรฐาน 4-20 mA.	ก.7

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2-1 แสดงคุณสมบัติเปรียบเทียบของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน	6
ตารางที่ 2-2 แสดงสภาวะแวดล้อมในการใช้งานเทอร์โมคัปเปิลโดย ไม่ต้องใช้ protecting tube	7
ตารางที่ 2-3 แสดง Output ของ Paralell Comparator ADC	22
ตารางที่ 3.1 แสดง Data ของ Seven-Segments	34
ตารางที่ 3.2 แสดงการเชื่อมต่อขา 89C51 กับ 8255	37
ตารางที่ 3.3 แสดงค่า Select Bit ที่ส่งไป 8255	37
ตารางที่ ก.1 แสดงผลของวงจรส่วนรับ Input จาก RTD ชนิด pt100	ก.1
ตารางที่ ก.2 แสดงผลส่วนรับ Input จาก Thermocouple ชนิด K-Type	ก.3
ตารางที่ ก.3 แสดงผลส่วนรับ Input จาก สัญญาณมาตรฐาน 1-5 V และ 4-20 mA	ก.5

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาของโครงการ

ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมในปัจจุบันนี้ ได้มีการนำเครื่องจักรอัตโนมัติมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งจะมีส่วนช่วยให้การทำงานมีความถูกต้องได้มากกว่าการใช้แรงงานคนเป็นอย่างมาก และเพื่อให้เครื่องจักรทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพก็จำเป็นต้องมีส่วนควบคุมไว้ใช้ควบคุมเครื่องจักรเหล่านั้น

ด้วยการเล็งเห็นถึงความสำคัญดังกล่าวมา รายงานฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงการนำวงจร Electronic และ Microcontroller มาใช้ในระบบควบคุมอัตโนมัติ โดยจะทำการเป็น Universal Input Controller ที่มีระบบควบคุมภายในเป็น PID Controller

ขอบเขตของโครงการ

1. Universal Input PID Controller สามารถรับ Input ได้ 4 ชนิด คือ สัญญาณจาก Thermocouple K type, RTD ชนิด pt100, สัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA และสัญญาณมาตรฐาน 1-5 V

2. Universal Input PID Controller สามารถรับค่า Set Point ซึ่งเป็นค่า ณ จุดที่ระบบจะต้องรักษาเสถียรภาพไว้ โดยจะรับผ่านทาง keyboard และค่า Set Point ของอุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 0-150 °C, ค่า Set Point ของกระแสจะอยู่ในช่วง 4-20 mA และ ค่า Set Point ของความต่างศักย์จะอยู่ในช่วง 1-5 V

3. Universal Input PID Controller สามารถเลือก Mode การทำงานของ Input ทั้ง 4 ชนิดได้ทาง Keyboard และสามารถแสดงค่า Process Variable ปัจจุบันออกทางหน้าจอ 7 Segments ได้

4. Universal Input PID Controller จะเป็น PID Controller ในรูปแบบของ Software (Program) ซึ่งอยู่ใน Microcontroller ทำหน้าที่เป็นตัวคำนวณค่าที่จะต้องส่งไปให้แก่ Plant เพื่อให้ค่า Process Variable สู่เข้าหาค่า Set Point

5. Universal Input PID Controller จะให้ Control Signal (Output Signal) เป็นสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA ไปใช้ในการควบคุม Plant ให้มีเสถียรภาพ เช่นส่ง Control Signal ไปเพิ่ม หรือลดความร้อนของ Heater เพื่อให้อุณหภูมิของ Plant มีค่าเข้าใกล้กับค่า Set Point

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. แบ่ง Universal Input PID Controller เป็น 3 ส่วนคือ ส่วนวงจรสำหรับรับ Analog Input และแปลงให้เป็น Digital โดยผ่าน A/D, ส่วน Microcontroller ที่ทำหน้าที่คำนวณ และ ส่วนสุดท้ายคือวงจร Output ที่รับค่า Digital จาก Microcontroller แล้วแปลงเป็น Analog โดยใช้ D/A
2. ศึกษาถึงพฤติกรรมของการจ่าย Output ของ Thermocouple และ RTD รวมทั้งจัดทำวงจรเพื่อรับค่าเข้ามา
3. จัดทำวงจรขยาย และวงจร I/V เพื่อแปลง Input ทั้ง 4 ชนิดให้เป็นสัญญาณ 1-5 V ก่อนเข้า A/D
4. จัดทำวงจรในส่วนของการนำข้อมูลจาก A/D ไปเข้า Microcontroller และเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการรับค่าจากคีย์บอร์ด , คำนวณ และประมวลผลเพื่อส่งออกไปยัง D/A
5. จัดทำวงจรรับข้อมูลจาก Microcontroller ผ่าน D/A เป็นสัญญาณ 1-5 V
6. จัดทำวงจรแปลงให้ Output เป็นสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA

ประโยชน์ที่จะได้รับจากโครงการ

1. สามารถนำ Universal Input PID Controller ไปใช้ในงานควบคุมซึ่งมี Input Signal เป็นค่า Voltage จาก Thermocouple, ค่า R ที่เปลี่ยนแปลงของ RTD, ค่าสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA หรือ สัญญาณมาตรฐาน 1-5 V และจะส่งสัญญาณควบคุม 4-20 mA ออกไปเพื่อควบคุมให้ Process Variable ของ Plant เข้าสู่ค่า Set Point ที่ตั้งไว้
2. Universal Input-PID Controller ที่จัดทำขึ้นเป็นเพียงรุ่นทดลอง ซึ่งยังขาด Function เสริมในอีกหลายอย่างเช่น Auto Tuning ซึ่งในการตัดแปลงอาจใช้พื้นฐานจากรุ่นทดสอบนี้ไปดัดแปลงก็ได้

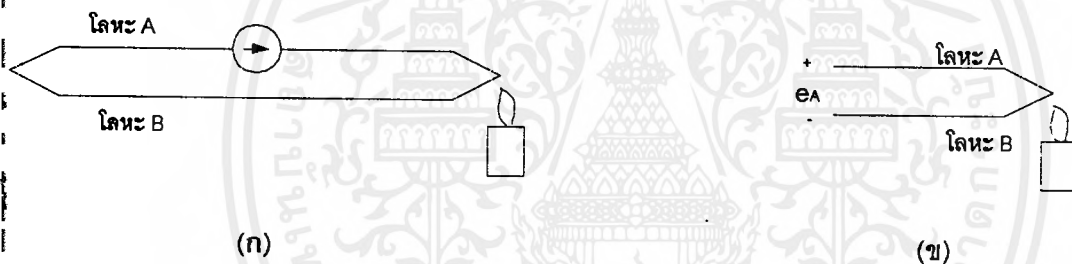
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples)

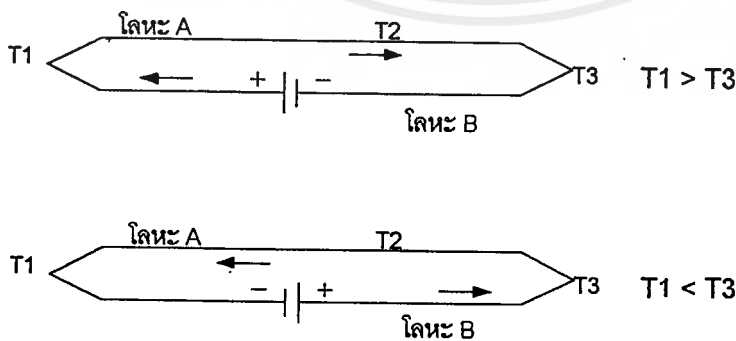
ความเป็นมา ในปี ค.ศ. 1821 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน Thomas Seebeck พบว่าเมื่อนำลวดโลหะ 2 เส้นที่ด้วยโลหะต่างชนิดกันมาเชื่อมต่อกันปลายทั้ง 2 เข้าด้วยกัน ถ้าปลายจุดต่อทั้ง 2 มีอุณหภูมิต่างกันก็จะเกิดกระแสไหลในวงจรเส้นลวดทั้ง 2 ตามรูปที่ 2.1 (ก) ปริมาณการไหลของกระแสขึ้นกับผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้ง 2 และถ้าเปิดปลายจุดต่อด้านหนึ่ง จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ปลายด้านเปิด แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้เรียกว่า "ซีเบ็คโวลต์เตจ"

เมื่อ α คือค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (Seebeck Coefficient) เป็นค่าคงที่มีหน่วยเป็น Volt /K ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิ และ e_{AB} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้



รูปที่ 2.1 วงจรการทดลองของซีเบ็ค

ต่อมาในปี 1834 นักวิทยาศาสตร์ Jean C.A. Peltier พบว่าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในวงจรลักษณะเดียวกับที่ซีเบ็คสร้างขึ้น จะทำให้เกิดอุณหภูมิที่ปลายทั้ง 2 ของจุดต่อแตกต่างกัน โดยปลายข้างหนึ่งจะร้อนขึ้น และปลายอีกข้างจะเย็นลง การทดลองของเพลเทียร์เป็นดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรการทดลองของเพลเทียร์

เมื่อมีกระแสจากแหล่งจ่ายภายนอกไหลผ่านวงจร จะทำให้ปลายข้างขวามีอุณหภูมิสูงขึ้น และปลายข้างซ้ายมีอุณหภูมิลดลง ในทางกลับกันเมื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสก็จะทำให้ อุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้ง 2 กลับกันด้วย

จากการค้นพบของซีเบ็ค และเพลเทียร์ การศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับเทอร์โมคัปเปิลได้ดำเนิน ต่อมา จนเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิใช้อย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรม

เทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน มีหลายชนิด เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะ ต่างๆ

1. เทอร์โมคัปเปิลแบบ S (Type S Platinum 10% Rhodium V.S. Platinum)

ในปี 1886 Le Chatelier ได้ประดิษฐ์เทอร์โมคัปเปิล โดยสายลวดทำจาก พลาตินัม และสาย บวกทำจากโลหะผสม 90% ของพลาตินัม + 10% ของโรเดียม สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1400 °C ซึ่งต่อมาเทอร์โมคัปเปิลแบบนี้ได้กลายเป็นแบบ S, มาตรฐานสากล ตาม IPTS 68 ระบุว่าสามารถใช้ ในการสอบเทียบค่า และเปรียบเทียบเป็นค่ามาตรฐาน (Calibration and Comparison) ตั้งแต่จุด แข็งตัวของ แอนติโมนี (630.74 °C) จนถึงจุดแข็งตัวของทอง (1064.43 °C)

เทอร์โมคัปเปิลแบบ S นี้สามารถใช้งานในสภาวะที่เป็น Oxidizing และ Inert ได้ ดีโดย สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1400 °C หรือกับการใช้งานในระยะสั้นๆ สามารถทนได้ถึง 1482 °C แต่ไม่ เหมาะกับสภาวะงานที่เป็น Reducing, Vacuum หรือมีไอของโลหะ เช่น ตะกั่ว สังกะสี และไอของ อโลหะ เช่น อาเซนิก ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส แต่ถ้าจำเป็นต้องใช้จะต้องป้องกันด้วย Protecting Tube ที่เป็นแบบอโลหะ เช่น อลูมินาบริสุทธิ์

2. เทอร์โมคัปเปิลแบบ R (Type R Platinum 13% Rhodium V.S. Platinum)

เทอร์โมคัปเปิลแบบ R สายบวกทำจาก พลาตินัม สายลบทำจาก พลาตินัม 87% + โรเดียม 13% ผลที่ได้ทำให้แบบ R ให้เอาท์พุทสูงกว่า แบบ S (คุณสมบัติเหมือนกับแบบ S ทนอุณหภูมิสูงสุด ได้ 1400 °C)

3. เทอร์โมคัปเปิลแบบ B (Type B Platinum 30% Rhodium/Platinum 6% Rhodium)

ผลิตครั้งแรกเมื่อ 1954 ในเยอรมัน สายบวกทำจากพลาตินัม 70% + โรเดียม 30%, สายลบ ทำจากพลาตินัม 94% + โรเดียม 6%

เทอร์โมคัปเปิลแบบ B จะให้แรงเคลื่อนต่ำกว่าแบบ S และ R แต่คุณสมบัติที่เด่นกว่าคือ แข็ง แรง และทนทานกว่า สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 1704 °C ในสภาวะที่เป็น Oxidizing หรือ Inert แต่ไม่เหมาะกับการใช้งานในสภาวะ Reducing หรือ Vacuum และในงานที่มีไอของโลหะ และ อโลหะเช่นเดียวกับแบบ R และ S

* เทอร์โมคัปเปิลที่ทำจากธาตุบริสุทธิ์จะให้ลิเนียร์ที่ดี แต่ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ *

4. เทอร์โมคัปเปิลแบบ J (Type J Iron V.S. Constantan)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
UNIVERSAL INPUT PID CONTROLLER
ผู้ให้บริการเนื้อหาอิเล็กทรอนิกส์ให้ฟรีให้ติดต่อขอแก้ไขเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก พลาตินัม มีราคาแพง ทำให้ราคาของ เทอร์โมคัปเปิลสูง จึงได้ค้นคว้าหาวัสดุที่ราคาถูกเพื่อมาแทน พลาตินัม วัสดุที่เริ่มทดลอง เช่น เหล็ก นิกเกิล เปราะมากในสภาพงานที่เป็น Oxidizing ต่อมาพบว่าโลหะผสมระหว่าง 60% ของทองแดง + 40% ของนิกเกิล ที่ต่อมาเรียกว่า Constantan แก้ปัญหานี้ได้จึงได้มีเทอร์โมคัปเปิลแบบ J ที่สายบวกเป็น เหล็ก และสายลบเป็น Constantan

เทอร์โมคัปเปิลแบบ J เหมาะกับสภาพงานที่เป็น Vacuum, Oxidizing, Reducing หรือ Inert ที่อุณหภูมิไม่เกิน 760°C ไม่เหมาะกับงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C และที่อุณหภูมิสูงกว่า 538°C สายที่เป็นเหล็กจะเกิด Oxidization ด้วยอัตราสูงกว่าปกติมาก สำหรับที่อุณหภูมิสูงกว่า 538°C จะต้องใช้สายขนาดใหญ่จะทำให้อายุการใช้งานยาวขึ้น

5. เทอร์โมคัปเปิลแบบ K (Type K Chromel V.S. Alumel)

เพื่อให้วัดอุณหภูมิได้สูงกว่า และถูกกว่าแบบ J จึงได้มีการประดิษฐ์เทอร์โมคัปเปิลแบบใหม่ที่สายบวกทำจากโลหะผสมระหว่าง นิกเกิล 10% + โครเมียม 90% และสายลบทำจากโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 95% + 5% ของส่วนผสมระหว่าง อลูมิเนียม, แมงกานีส และซิลิกอน ซึ่งต่อมาได้กลายเป็นแบบมาตรฐานแบบ K ที่นิยมใช้กันแพร่หลายมากที่สุด ใช้กับสภาวะงานที่เป็น Oxidizing หรือ Inert ได้ดีกว่าแบบอื่น ทนอุณหภูมิได้ถึง 1260°C และที่อุณหภูมิต่ำถึง -250°C และยังสามารถใช้ในสภาพงานที่ต้องรับการแผ่รังสีโดยตรงจากแหล่งกำเนิดความร้อน

ข้อควรระวัง ไม่ควรใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ K สัมผัสโดยตรงกับ

- ในสภาพงานที่เป็น Reducing หรือเป็นการใช้งานสลับกันระหว่าง Oxidizing และ Reducing
- สภาวะงานที่มีไอของซัลเฟอร์ เพราะซัลเฟอร์จะทำลายโลหะทั้งคู่ของเทอร์โมคัปเปิล โดยเฉพาะสายลบจะเกิดอย่างรวดเร็ว
- สภาวะงานที่เป็น Vacuum ยกเว้นในช่วงเวลาสั้นๆ

ถ้าจำเป็นต้องใช้งานในสภาพดังกล่าวจะต้องใช้ Protecting Tube ป้องกันเสียก่อน อายุการใช้งานของเทอร์โมคัปเปิลแบบ K นี้ประมาณ 20 ปี

6. เทอร์โมคัปเปิลแบบ T (Type T Copper V.S. Constantan)

เป็นเทอร์โมคัปเปิลที่เหมาะสมกับการวัดอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ สายบวกทำจากทองแดง และสายลบทำจาก Constantan วัดอุณหภูมิได้ต่ำถึง -184°C แต่อุณหภูมิทางบวกวัดได้ต่ำกว่าแบบอื่น คือประมาณ 370°C เป็นแบบที่ทนการกัดกร่อนในบรรยากาศที่มีความชื้นได้ดีเป็นพิเศษ และยังสามารถใช้งานในสภาวะที่เป็น Vacuum, Oxidizing, Reducing หรือ Inert ได้ดี

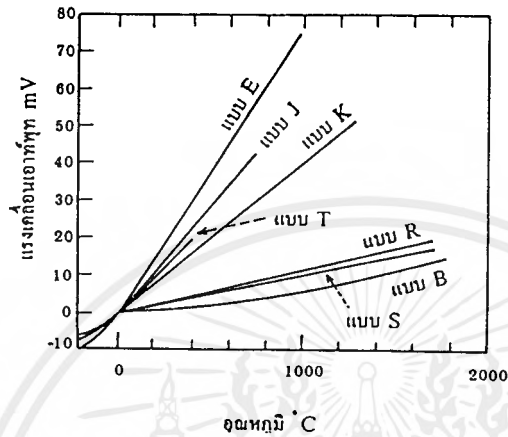
การใช้งานที่ต้องสัมผัสกับการแผ่รังสีโดยตรงจะทำให้ส่วนผสมของเทอร์โมคัปเปิลเปลี่ยนไป ได้ จึงไม่เหมาะกับงานลักษณะนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ถ้าหากกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เทอร์โมคัปเปิลแบบ E (Type E Chromel V.S. Constantant)

สายบวกทำจากส่วนผสมระหว่าง 10% ของโครเมียม + 90% ของนิกเกิล และสายลบทำจาก Constantan อุณหภูมิใช้งานปกติอยู่ระหว่าง -250°C ถึง 871°C เหมาะกับสภาพงานที่เป็น Oxidizing คุณสมบัติด้านอื่นๆ คล้ายกับเทอร์โมคัปเปิลแบบ K



รูปที่ 2.3 เทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานทั้ง 7 แบบ

สรุปส่วนผสม, ย่านอุณหภูมิ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน

ตารางที่ 2-1 แสดงคุณสมบัติเปรียบเทียบของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน

แบบ	ส่วนผสม	ย่านอุณหภูมิใช้งาน		แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ mV
		$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$	
B	แพลตินัม - 30% โรเดียม			
J	แพลตินัม - 6% โรเดียม	0 to 1820	32 to 3310	0 to 13.814
R	แพลตินัม - 13% โรเดียม			
	แพลตินัม	-50 to 1768	-60 to 3210	-2.26 to 21.108
S	แพลตินัม - 10% โรเดียม			
	แพลตินัม	-50 to 1768	-60 to 3210	-0.236 to 18.698
J	เหล็ก / คอนสแตนแตน	-210 to 760	-350 to 1400	-8.096 to 42.922
K	โครเมล / อลูเมน	-270 to 1372	-450 to 2500	-6.458 to 54.875
T	ทองแดง / คอนสแตนแตน	-270 to 400	-450 to 750	-6.258 to 20.869
E	โครเมล / คอนสแตนแตน	-270 to 1000	-450 to 1830	-9.835 to 76.358

■ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดกับจุดเยือกแข็งของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2-2 แสดงสภาวะแวดล้อมในการใช้งานเทอร์มิคัปเปิลโดยไม่ต้องใช้ protecting tube

TC แบบ	บรรยากาศ Oxidizing	บรรยากาศ Reducing	บรรยากาศ Inert	Vacuum	บรรยากาศ Sulferous	Temp < 0 °C	มีโลหะ
B	ได้	ไม่ได้	ได้	ได้ในช่วงสั้นๆ	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
R	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
S	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
J	ได้	ได้	ได้	ได้	ไม่ได้ถ้า > 500 °C	ไม่ได้	ได้
K	ได้*	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้	ได้
T	ได้	ได้	ได้	ได้	ไม่ได้	ได้	ได้
E	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้+	ได้

* ใช้งานได้ดีกว่าแบบ E, J และ T เมื่ออุณหภูมิ > 500 °C

+ โดยเฉพาะกับอุณหภูมิ < 0 °C

2.2 อาร์ทีดี (Resistance Temperature Detectors, RTD)

ในปีเดียวกับที่ซีเบ็คค้นพบกฎของพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากความร้อน(Thermoelectric Law) เซอร์ฮัมฟรีย์ เดวี ก็ค้นพบว่า ค่าความต้านทานของลวดโลหะก็เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ 50 ปีต่อมา เซอร์วิลเลียม ซีมอนส์ ได้ทำการทดลองอย่างจริงจัง และพบว่าเส้นลวดแพลตินัมสามารถใช้เป็นตัวกลางวัดอุณหภูมิได้และต่อมาได้เป็นเครื่องวัดอุณหภูมิที่แพร่หลาย และเป็นเครื่องมือมาตรฐานสากลในการวัดอุณหภูมิ ตั้งแต่จุดแข็งตัวของ ออกซิเจน (-182.96 °C) ไปจนถึงจุดแข็งตัวของ แอนติโมนี (630.74 °C)

หลักการของอาร์ทีดี

ค่าความต้านทานไฟฟ้าในเส้นลวดโลหะจะเปลี่ยนแปลงไปตามสมการ ดังนี้

$$R_t = R_0 (1 + \alpha T) \text{ หรือ } dR_t / dT = \alpha R_0$$

เมื่อ R_t คือ ค่าความต้านทานของลวดโลหะ ที่อุณหภูมิ t °C

R_0 คือ ค่าความต้านทานของลวดโลหะ ที่อุณหภูมิ 0 °C

α คือ สัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ออุณหภูมิ 1 °C ($\Omega / \Omega / C$) (temperature coefficient of resistance)

ซึ่งค่า α มีค่าเปลี่ยนแปลงตามชนิดของโลหะ เช่น แพลตินัม 0.00392 $\Omega / \Omega / C$ จากย่าน 0 °C ถึง 100 °C, นิกเกิล 0.0063 $\Omega / \Omega / C$ ทองแดง 0.00425 $\Omega / \Omega / C$

ในทางปฏิบัติค่า α ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแต่ละช่วงจะไม่แปรผันเป็นเส้นตรง (Nonlinearity) ในห้องปฏิบัติการมาตรฐานที่ต้องการค่าแน่นอน ทำได้โดยการใช้สมการต่อไปนี้

$$R_t = R_0 (1 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^4 \dots\dots\dots)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

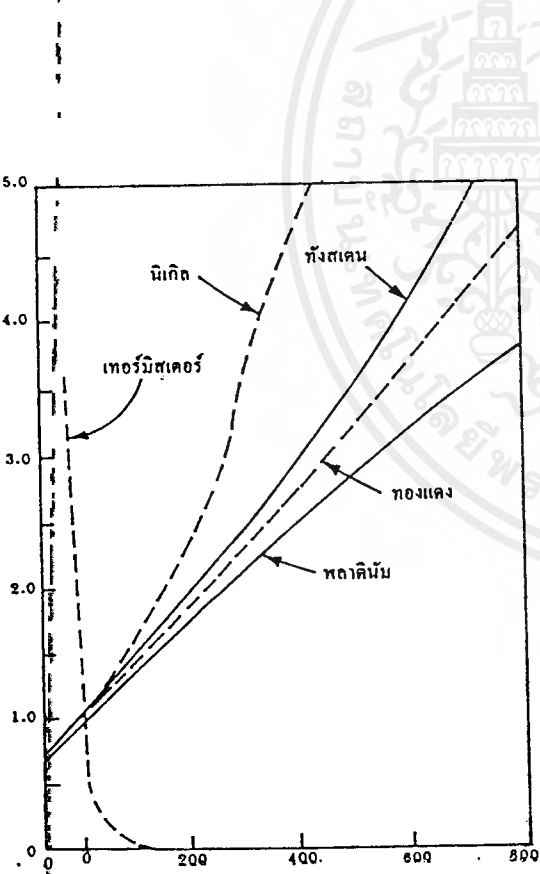
และ/หรือ การเผยแพร่ ดัดแปลง หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า α , β และ γ ได้จากการทดลอง (Empirical Quantity) ซึ่งทางบริษัทผู้ผลิตเป็นผู้กำหนด มา เช่น พลาตินัม $\alpha = 3.985 \times 10^{-3}$ $\beta = -5.856 \times 10^{-7}$ $\gamma = 4.330 \times 10^{-10}$

สูตรนี้สามารถใช้ได้ตลอดย่านการใช้งานที่ต้องการ Accuracy สูง แต่โดยทั่วไป การคำนวณจะใช้สูตร $R_t = R_0(1 + \alpha T)$ โดยเลือกค่า α ตามตาราง

รูปที่ 2.4 เป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าของ RTD ที่ทำจากโลหะชนิดต่างๆ แกนตั้งจะบอกว่า ความต้านทานที่อุณหภูมิ T (R_t) จะมีค่าเป็นกี่เท่าของความต้านทานที่ 0°C RTD แบบพลาตินัม เป็นแบบที่ใช้มากที่สุดในงานอุตสาหกรรม มีค่ามาตรฐาน 100Ω ที่ 0°C และถูกใช้ในห้องปฏิบัติการทั่วไป หรือเรียกว่าแบบ Standard Platinum Resistance-Thermometers (SPRTs) ในช่วงอุณหภูมิสูงถึง 600°C ควรใช้ RTD พลาตินัมแบบ 10Ω เพราะให้เสถียรภาพดีกว่าแบบ 100Ω

นิเกิล อาร์ทีดี ไม่ใช่แบบมาตรฐานเหมือนพลาตินัม เพราะต่างบริษัทก็กำหนดค่าความต้านทานที่ 0°C ต่างกันไปทำให้การเลือกใช้อุปกรณ์ประกอบอื่นๆ เช่น ทรานสมิตเตอร์, เครื่องควบคุม เฉพาะของบริษัทนั้นๆ นิเกิลอาร์ทีดีวัดอุณหภูมิได้ไม่สูงเท่ากับพลาตินัม ย่านการใช้งานอยู่ในช่วง -195°C ถึง 360°C ค่าผิดพลาดต่ำกว่าแบบพลาตินัมแต่ให้ลิเนียร์ที่ดีกว่าแบบพลาตินัม



อาร์ทีดีแบบทองแดง เป็นแบบที่ให้ลิเนียร์ ดีในการวัดดีที่สุดในย่านการใช้งานแคบประมาณ -200°C ถึง 150°C และความต้านทานจำเพาะต่ำ ปกติจะมีความต้านทาน 10Ω ที่ 0°C , ค่าผิดพลาด $\pm 0.25^\circ\text{C}$

อาร์ทีดีแบบทังสเตน ก็มีใช้อยู่บ้าง แต่ไม่แพร่หลาย เพราะมีเสถียรภาพไม่ดี แต่มีข้อดีคือมีความแข็งแรง (Strength) สูงกว่าแบบอื่นๆ ทนอุณหภูมิได้สูง

อาร์ทีดีแบบพลาตินัม 100Ω โอห์ม จะเปลี่ยนค่าความต้านทานโดยเฉลี่ย 0.385Ω ต่อ 1°C ในการใช้งานปกติมีแหล่งจ่ายกระแสที่ (current source) 1 mA . เล็งอาร์ทีดีอยู่ ทุกๆ 1°C ที่เปลี่ยนจะทำให้เกิดค่าโวลเตจ เปลี่ยน 0.385 mV . ซึ่งมากกว่าเทอร์โมคัปเปิลแบบ K ถึง 10 เท่า ดังนั้น ที่สัญญาณรบกวนค่าเดียวกันจะมี ผลต่ออาร์ทีดีน้อยกว่าเทอร์โมคัปเปิล

รูปที่ 2.4 อัตราส่วนความต้านทานของโลหะ เทียบกับความต้านทานที่ 0°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าการเผยแพร่ ทั้งสิ้น ยกเว้นให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความผิดพลาดอันเกิดจากกระแสเลี้ยงอาร์ทีดี (Self Heating)

อาร์ทีดีจำเป็นต้องมีกระแสไฟฟ้าเลี้ยงตัวมันอยู่จำนวนหนึ่ง ถ้ามีค่ามากขึ้น เขาทุทโวลเตจก็จะสูงขึ้น แต่กระแสจำนวนนี้ก็สร้างความร้อนขึ้นในตัวอาร์ทีดีเองด้วย

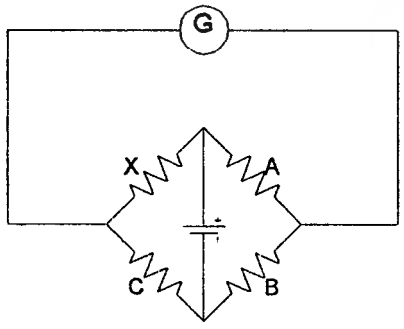
$$\text{พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น} = I^2R$$

เมื่อ I คือกระแสเลี้ยงอาร์ทีดี และ R คือค่าความต้านทานของอาร์ทีดี ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดค่าผิดพลาดทำให้ค่าความต้านทานสูงขึ้น จึงต้องจำกัดค่ากระแสให้มีสูงเกินไป โดยปกติอาร์ทีดีแบบพลาสติกนั้นจะเกิดค่าผิดพลาดขึ้น $1/2^\circ\text{C}$ ต่อค่ากระแสเลี้ยง 1 mA . ในบรรยากาศปกติ (ไม่มีภาวไหลแต่ในการใช้งานที่ต้องจุ่มลงในของเหลว ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจะกระจายลงสู่ของเหลว ทำให้ค่าผิดพลาดนี้ต่ำลง ทั้งนี้ขึ้นกับความเร็วในการไหล, ความหนาแน่นของตัวกลาง อาจลดลงถึง $1/5$ ของค่าความผิดพลาดในบรรยากาศปกติ

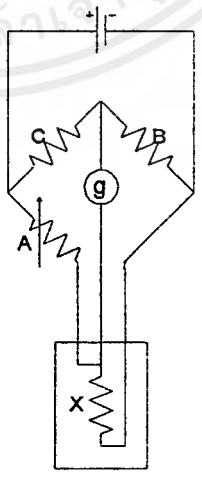
วงจรต่อใช้งานของ อาร์ทีดี

วงจรต่อใช้งานพื้นฐานของอาร์ทีดี คือ "วีธสโตน บริดจ์" ให้ "X" คือตัวอาร์ทีดี ซึ่งติดตั้งอยู่ในจุดที่ต้องการวัดอุณหภูมิ วีธสโตนประกอบด้วย 3 ตัวคือ A, B และ C อยู่ในทรานสมิตเตอร์ในอุณหภูมิบรรยากาศ วีธสโตน A, B และ C ที่ใช้แบบที่มีความถูกต้องสูง, ค่า Drift. ต่ำมาก (การเปลี่ยนค่าความต้านทานเมื่ออุณหภูมิบรรยากาศเปลี่ยน)

วงจรบริดจ์นี้จะอยู่ในภาวะสมดุลเมื่อ อาร์ทีดีอยู่ในอุณหภูมิ 0°C ซึ่งจะทำให้อัตราส่วน $X/Q = A/B$ ถ้าวัดโนมิเตอร์จะชี้ที่ 0°C วงจรนี้ใช้ได้เมื่อทรานสมิตเตอร์อยู่ใกล้กับตัวอาร์ทีดีมากๆ เท่านั้น เพราะถ้าสายยาวค่าผิดพลาดจะเกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานของสาย ค่าผิดพลาดนี้ขึ้นกับความยาวของสายตัวนำจากอาร์ทีดี และอุณหภูมิของสายตัวนำ ถ้ามีค่ามากขึ้นค่าผิดพลาดก็จะสูงขึ้น วงจรแบบ 2 สายจึงเหมาะสำหรับการวัดที่ไม่ต้องการความถูกต้องสูงนัก



รูปที่ 2.5 วงจรบริดจ์



รูปที่ 2.6 วงจร RTD 3 สาย

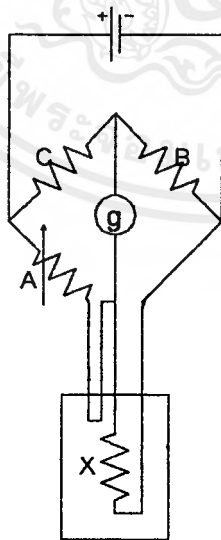
วงจรอาร์ทีแบบ 3 สายเป็นแบบมาตรฐานที่นิยมใช้กันมากที่สุดในวงการอุตสาหกรรมทั่วไป สายทั้ง 3 a, b และ c ที่ต่อเข้าวงจรวัดจึงจะต้องมีขนาด, ความยาวเท่ากัน และอยู่ในบรรยากาศที่มีอุณหภูมิเดียวกัน เป็นการชดเชยความผิดพลาดอันเกิดจากการขยายสายตัวนำยาวในสภาวะงานที่หลักเลียงไม่ได้ จากวงจรวัดเมื่อบริดจ์อยู่ในภาวะสมดุล

$$X = (C/B)A \quad \text{ให้} \quad B = C \quad (\text{ปกติจะออกแบบให้เท่ากัน})$$

เนื่องจาก $a = b = c$, $X + b$ จึงเท่ากับ $A + a$ ค่าอุณหภูมิของการวัดจึงขึ้นกับค่าความต้านทานของ อาร์ทีดี "X" เพียงตัวเดียว วงจรวัดแบบ 3 สายนี้เป็นแบบที่มีความถูกต้องสูง

วงจรวัดแบบ 4 สาย แบบแรกเป็นแบบที่เลื่อนจุดต่อของบริดจ์ (bridge point) ไปอยู่ภายนอก สายที่ต่อจากอาร์ทีดีทั้ง 4 เส้นจะต้องมีขนาด, ความยาว และอยู่ในบรรยากาศที่มีอุณหภูมิเดียวกันตลอดเหมือนแบบ 3 สาย แต่วิธีนี้ให้ความถูกต้องสูงกว่า

วงจรวัดแบบ 4 สายแบบที่ 2 ใช้ในกรณีที่ต้องการความถูกต้องสูงสุดต้องการทราบค่าอุณหภูมิเป็นจุดๆ ไม่ต้องการวัดค่าแบบต่อเนื่อง เช่น ในห้องปฏิบัติการ ลักษณะการต่อเป็นแบบ 3 สาย มีสวิตช์สำหรับโยกสลับสายเพื่อหาค่าเฉลี่ย ในการวัดครั้งหนึ่งๆ ต้องอ่านค่า 2 ครั้ง ตามตำแหน่งสวิตช์ ค่าความต้านทานของอาร์ทีดีเป็นค่าเฉลี่ยของค่าที่อ่านได้ทั้ง 2 ครั้ง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนอันเกิดจากวิธีการวัดแบบ 3 สาย เนื่องจากค่าความต้านทานของสายอาจไม่เท่ากัน เช่น ตำแหน่งบนอ่านได้ 250.17°C และตำแหน่งล่างอ่านได้ 250.16°C ค่าที่บันทึก 250.165°C เป็นต้น สิ่งที่ต้องระวังในการวัดด้วยวิธีนี้คือ จุดต่อ หรือหน้าคอนแทคท์ ทุกจุดจะต้องมั่นใจว่าแน่นสนิท สะอาดปราศจากออกไซด์ ซึ่งจะทำให้ค่าที่อ่านได้ไม่แน่นอน และกัลวาโนมิเตอร์ที่ใช้จะต้องเป็นแบบอิมพีแดนซ์สูง



รูปที่ 2.7 วงจร RTD 4 สาย

2.3 ระบบควบคุม

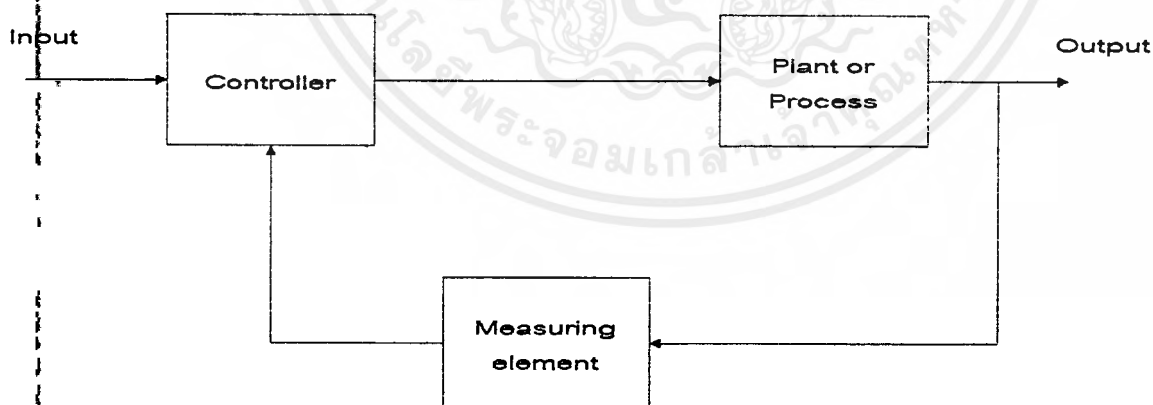
ระบบควบคุมอาจจะแบ่งอย่างง่าย ๆ ออกเป็น 2 แบบ คือ ระบบควบคุมแบบ Closed-loop และระบบควบคุมแบบ Open-loop

ระบบควบคุมแบบ Open-loop เป็นระบบควบคุมที่เอาต์พุตของระบบจะไม่มีผลต่อการควบคุมเลย นั่นคือ ในกรณีของระบบควบคุมแบบ Open-loop นั้นเอาต์พุตของระบบจะไม่ถูกวัด หรือถูกป้อนกลับเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับอินพุต รูปที่ 2.8 เป็น Block Diagram แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต กับเอาต์พุตของระบบควบคุมแบบ Open-loop



รูปที่ 2.8 ระบบควบคุมแบบ Open-loop

ระบบควบคุมแบบ Closed-loop เป็นระบบควบคุมแบบหนึ่งซึ่งสัญญาณเอาต์พุตจะมีผลโดยตรงต่อการควบคุม ดังนั้นระบบควบคุมแบบ Closed-loop ก็คือระบบควบคุมป้อนกลับนั่นเอง สัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน (Actuating Error Signal) ซึ่งเป็นสัญญาณความแตกต่างระหว่างสัญญาณอินพุต กับสัญญาณป้อนกลับ (Feedback Signal) จะถูกป้อนให้กับตัวควบคุม (Controller) เพื่อที่จะลดค่าความคลาดเคลื่อนให้น้อยลง และทำให้เอาต์พุตของระบบมีค่าตามที่ต้องการ สัญญาณป้อนกลับนี้อาจเป็นสัญญาณเอาต์พุตโดยตรง หรือเป็นสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันหรือเป็นค่าอนุพันธ์ของสัญญาณเอาต์พุตก็ได้ รูปที่ 2.9 เป็นบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของระบบควบคุมแบบวงจรมัด



รูปที่ 2.9 ระบบควบคุมแบบ Closed-loop

การควบคุมที่นิยมใช้ในกระบวนการ (Process) ได้แก่ การควบคุมป้อนกลับ ซึ่งเป็นการควบคุมแบบ Manual หรือแบบอัตโนมัติก็ได้ ตัวอย่างเช่นในการควบคุมอุณหภูมิของน้ำในอ่างอาบน้ำ ผู้ควบคุมอาจจะใช้มือข้างหนึ่งจุ่มลงในอ่างเพื่อวัดอุณหภูมิน้ำดู และใช้มืออีกข้างปรับน้ำร้อนที่ไหลเข้าให้มาก หรือน้อย เพื่อให้ น้ำในอ่างมีอุณหภูมิที่ต้องการ การควบคุมแบบนี้จะเรียกว่าการควบคุมแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติเหเนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้อนกลับแบบ Manual ถ้าผู้ควบคุมใช้เทอร์โมมิเตอร์ในการวัดอุณหภูมิแล้ว เขาก็จะสามารถควบคุมอุณหภูมิของน้ำในอ่างได้เที่ยงตรงมากขึ้น ซึ่งจะเห็นว่าถ้าทำการวัดได้อย่างเที่ยงตรงแล้ว ก็จะสามารถทำให้ควบคุมได้ดีขึ้น สำหรับในกรณีของการควบคุมป้อนกลับแบบอัตโนมัตินั้นจะต้องใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิของน้ำในอ่างแทนคนควบคุม จากนั้นจึงส่งค่าของอุณหภูมิของน้ำร้อนที่วัดได้ไปยังตัวควบคุมด้วยเครื่องส่งสัญญาณ เพื่อไปทำการเปรียบเทียบกับค่าของอุณหภูมิของน้ำที่ต้องการ และตัวควบคุมก็จะสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อไปควบคุมการเปิดปิดของวาล์วควบคุมที่ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณของน้ำร้อนที่ไหลเข้าอ่างให้มากขึ้น หรือน้อยลง เพื่อให้ให้น้ำในอ่างมีอุณหภูมิตามต้องการ

ชนิดต่างๆ ของตัวควบคุมอัตโนมัติที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม จำแนกออกได้ตามลักษณะของวิธีการควบคุมดังนี้

1. ตัวควบคุมแบบ 2 ตำแหน่ง (Two-position) หรือแบบ On-Off
2. ตัวควบคุมแบบ Proportional
3. ตัวควบคุมแบบ Integral
4. ตัวควบคุมแบบ Proportional + Integral หรือ ตัวควบคุมแบบ PI
5. ตัวควบคุมแบบ Proportional + Derivative หรือ ตัวควบคุมแบบ PD
6. ตัวควบคุมแบบ Proportional + Integral + Derivative หรือ ตัวควบคุมแบบ PID

2.3.1 การควบคุมแบบ ON-OFF หรือ 2 ตำแหน่ง

ในระบบควบคุมแบบ 2 ตำแหน่งการควบคุมจะทำงานในตำแหน่งที่คงที่เพียง 2 ตำแหน่งเท่านั้น ในบางครั้งจึงมีชื่อเรียกว่า ON และ OFF การควบคุมแบบ 2 ตำแหน่ง หรือแบบ ON-OFF นี้จะเป็นการควบคุมแบบง่าย ๆ และราคาไม่แพง ดังนั้นจึงนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในงานควบคุมทางอุตสาหกรรม และในกรณีที่ผลจากการ Oscillate นั้นเป็นที่ยอมรับได้

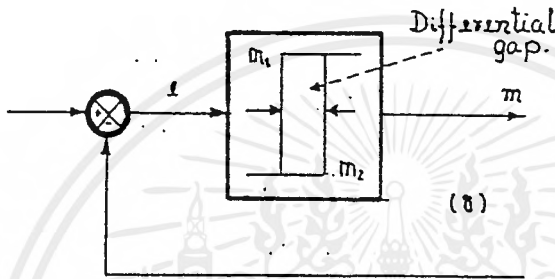
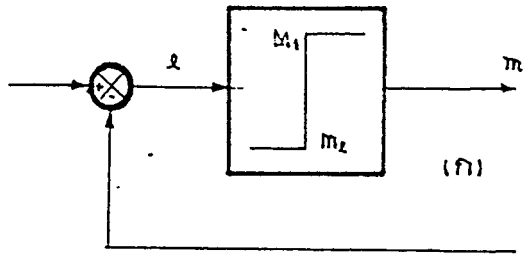
กำหนดให้สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมเป็น $m(t)$ และสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนเป็น $e(t)$ ฉะนั้นในการควบคุมแบบ 2 ตำแหน่งนั้นสัญญาณ $m(t)$ จะมีค่าอยู่เพียงค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดเท่านั้น โดยจะขึ้นอยู่กับว่าสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเป็น + หรือเป็น - นั่นคือ

$$M(t) = M_1 \quad \text{สำหรับ } E(t) > 0 \quad ; \text{ โดยที่ } M_1 \text{ และ } M_2 \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$= M_2 \quad \text{สำหรับ } E(t) < 0$$

รูปที่ 2.10 แสดงถึง Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ 2 ตำแหน่ง และสำหรับช่วงซึ่งสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนแปลงไปก่อนเกิดการเปลี่ยนตำแหน่ง (Switching) ของการควบคุมนั้นเรียกว่า Differential Gap ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) ช่วง Differential Gap นี้บางครั้งเป็นการทำให้เกิดขึ้นเพื่อป้องกันการ ON-OFF บ่อยเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 หากมีกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ 2 ตำแหน่ง หรือแบบ ON-OFF

2.3.2 การควบคุมแบบ Proportional

ในกระบวนการบางอย่างการควบคุมแบบ 2 ตำแหน่งจะไม่ใช่วิธีที่ดี ดังนั้นถ้าต้องการความแม่นยำในการควบคุมพลังงานไหลเข้าเพื่อให้เป็นสัดส่วน (Proportional) กับค่าที่ต้องการ เราต้องใช้การควบคุมแบบ Proportional ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุม (หรือเอาต์พุตของตัวควบคุม) $m(t)$ กับสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ คือ

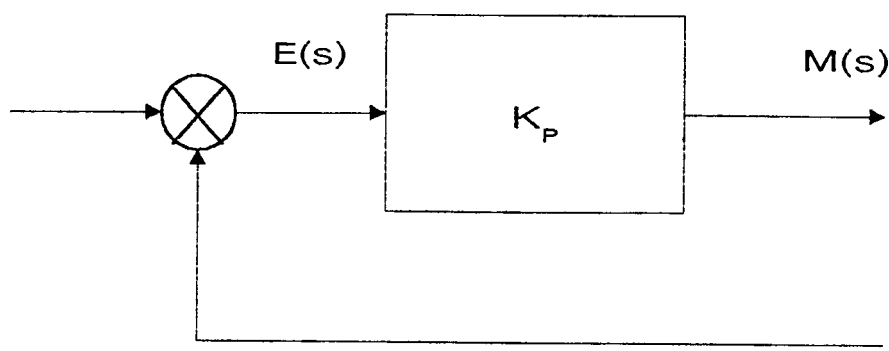
$$m(t) = K_p e(t)$$

หรือ $M(s) / E(s) = K_p$

โดยที่ K_p จะอยู่ในเทอมของ Proportional Sensitivity หรือ Gain

ตัวควบคุมแบบ Proportional จึงห้องเป็นแอมพลิฟายที่สามารถปรับค่าของ Gain ได้ รูปที่

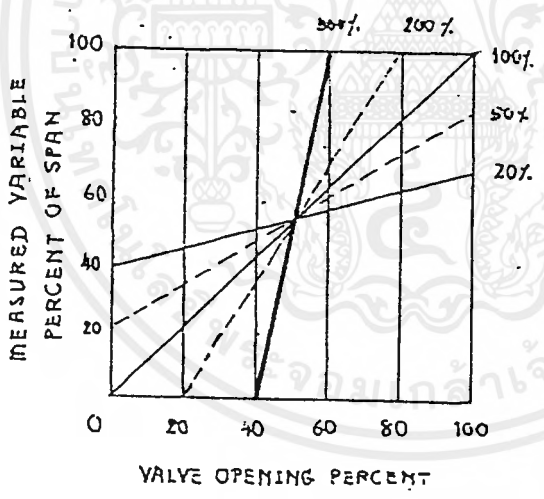
2.11 แสดงถึง Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ Proportional



รูปที่ 2.11 Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ Proportional

สมมติว่า เอาท์พุทที่ได้จากตัวควบคุม นำไปควบคุมช่วงชักของวาล์วในการควบคุมแบบ Proportional นั้นโดยทั่วไปแล้วช่วงชักของวาล์วจะถูกแบ่งเป็นส่วนๆ เท่ากับจำนวนส่วนของการเพิ่มทีละส่วนในช่วงการวัด เช่นถ้าช่วงของการวัดมีค่า 100° F ค่าของการวัดจะเปลี่ยนแปลงทีละ 1° F ซึ่งหมายความว่าช่วงของการวัดจะถูกแบ่งออกเป็น 100 ส่วน ดังนั้นช่วงชักวาล์วจะถูกแบ่งออกเป็น 100 ส่วนด้วย

ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการวัดกับช่วงชักของวาล์วแบบอื่นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งมี Proportional Bands (PB) ต่างๆ กันตั้งแต่ 20% ถึง 500%



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการวัด กับช่วงชักของวาล์วเมื่อมีค่า PB ตั้งแต่ 20% ถึง 500%

ตัวควบคุมแบบ Proportional ก็คือแอมพลิฟายด์วหนึ่งที่ตั้งอยู่ระหว่างอุปกรณ์วัดกับวาล์วควบคุม เมื่อปรับค่าของ Proportional Band ก็เท่ากับปรับค่าของ Gain ของแอมพลิฟายด์ ทั้งนี้เพราะค่าของ Gain ก็คือส่วนกลับของ Proportional Band การปรับค่าของ Gain จะทำให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการวัดกับช่วงของวาล์วเปลี่ยนแปลงไปตามความต้องการได้

การเกิด Offset เป็นคุณลักษณะของระบบควบคุมแบบ Proportional ทั้งหมดทั้งนี้เนื่องจากการทำงานของระบบควบคุมแบบ Proportional นั้นไม่สามารถควบคุมระบบที่มี Load เปลี่ยนแปลงได้ดีเท่าที่ควร และในกรณีที่ Load คงที่แต่เปลี่ยนค่าของระดับของเหลวที่ถูกควบคุมไปก็เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือจะเกิดมี Offset ขึ้น และเมื่อระบบควบคุมที่มีการควบคุมแบบ Proportional เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่นั้น Offset จะต้องมีขนาดไม่เกินครึ่งหนึ่งของ Proportional Band แล้ววาล์วควบคุมก็จะเปิดเต็มที่หรือปิดสนิท และตัวควบคุมก็จะไม่สามารถควบคุมกระบวนการได้อีก ดังนั้นการควบคุมแบบ Proportional โดยทั่วไปจึงเหมาะสำหรับกระบวนการที่ต้องการ Proportional Band แคบๆ

2.3.3 การควบคุมแบบ Integral

ในการควบคุมแบบ Integral ค่าของเอาต์พุตของตัวควบคุม $m(t)$ จะมีความสัมพันธ์กับค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ ดังนี้

$$dm(t) / dt = K_i e(t)$$

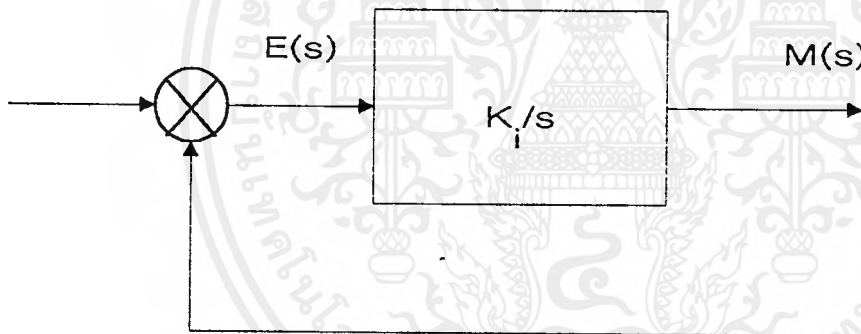
$$\text{หรือ } m(t) = K_i \int e(t) dt$$

โดยที่ K_i เป็นค่าคงที่ที่สามารถปรับค่าได้

Transfer Function ของตัวควบคุมแบบ Integral คือ

$$M(s) / E(s) = K_i / s$$

Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ Integral แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ Integral

การปฏิบัติการควบคุมแบบ Integral นี้ บางครั้งเรียกว่า Reset Control

2.3.4 การควบคุมแบบ Proportional + Integral (PI)

การปฏิบัติการควบคุมแบบ PI สามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

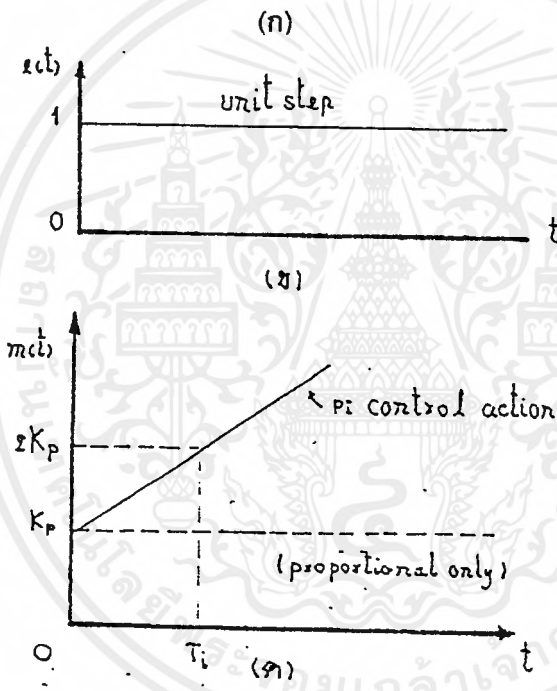
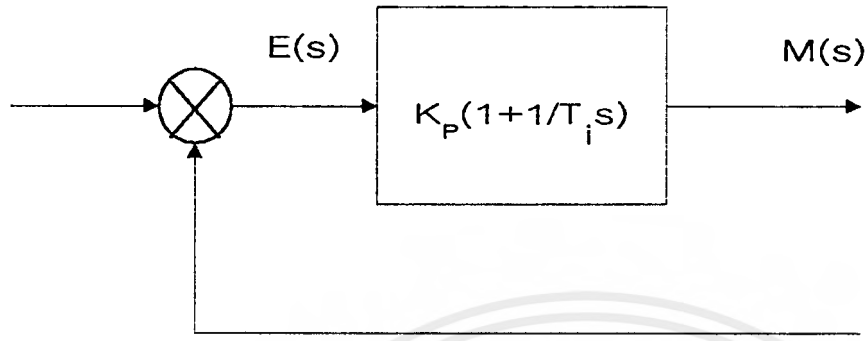
$$m(t) = K_p e(t) + K_p / T_i (\int e(t) dt)$$

$$\text{หรือ } M(s) / E(s) = K_p (1 + 1 / T_i s)$$

โดยที่ K_p เป็นค่าของ Proportional Sensitivity หรือ Gain

T_i เป็นค่าของ Integral Time

ทั้ง K_p และ T_i เป็นค่าที่ปรับได้ ค่าส่วนกลับของ T_i นั้นจะเรียกว่า "Reset rate" รูปที่ 2.14 (ก) แสดงถึง Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ Proportional + Integral ถ้าสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ เป็นสัญญาณแบบ unit step ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ข) แล้ว สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PI จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 (ค)



รูปที่ 2.14 ก) Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ PI
 ข) อินพุตของตัวควบคุมซึ่งเป็นแบบ Unit step
 ค) เอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PI เมื่ออินพุตเป็นแบบ Unit step

2.3.5 การควบคุมแบบ Proportional + Derivative (PD)

กิริยาการควบคุมแบบ PD สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังต่อไปนี้

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d de(t) / dt$$

Transfer function คือ

$$M(s) / E(s) = K_p (1 + T_d s)$$

โดยที่ K_p เป็นค่าของ Proportional Sensitivity หรือ Gain

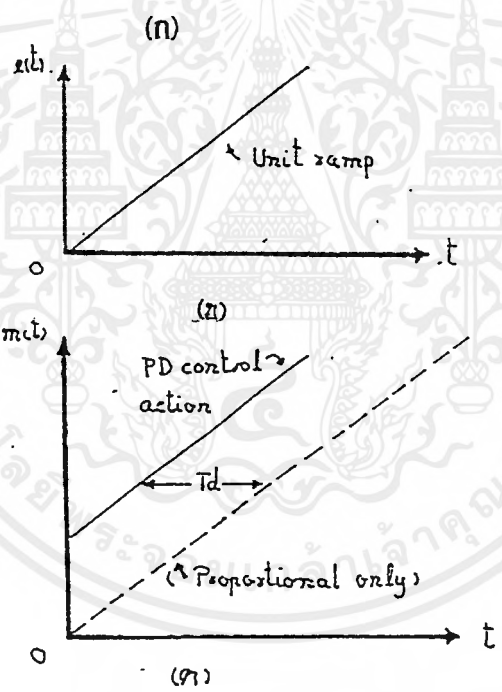
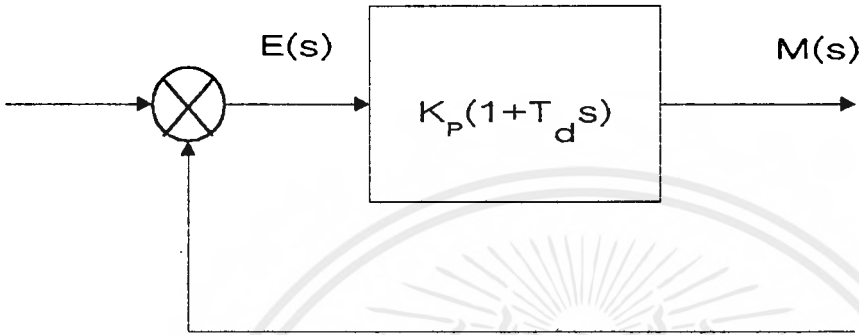
T_d เป็นค่าของ Derivative Time

ค่าของ K_p และ T_d นั้นจะเป็นค่าที่สามารถปรับได้ และในบางครั้งจะเรียกกริยาควบคุมแบบ

Derivative ว่า "rate Control" ทั้งนี้เพราะขนาดของสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็น สัดส่วน

กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน รูปที่ 2.15 (ก) แสดงถึง Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ PD ถ้าสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ เป็น unit ramp ดังแสดง

ในรูปที่ 2.15 (ข) แล้วสัญญาณเอาต์พุต $m(t)$ ของตัวควบคุมแบบ PD จะเป็นดังรูปที่ 2.15 (ค)



รูปที่ 2.15 ก) Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ PD

ข) อินพุตของตัวควบคุมซึ่งเป็นแบบ Unit step

ค) เอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ PD

กระบวนการจำนวนมากอาจจะมี ความจุ และความต้านทานมากกว่าหนึ่ง ดังนั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นในกระบวนการจึงอาจทำให้เกิดมี Time Lag ที่มีค่ามากพอได้ กระบวนการที่มีปัญหาเกี่ยวกับ Time Lag มากก็คือกระบวนการที่เกี่ยวกับความร้อนการควบคุมแบบ Derivative นี้ จะแก้ไขเกี่ยวกับระบบที่มี Time Lag มากๆ ได้ ในบางครั้งกริยาควบคุมแบบ Derivative นี้จะเรียกว่า กริยาควบคุมแบบ "คาดการณ์ ล่วงหน้า"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2.3.6 การควบคุมแบบ Proportional + Integral + Derivative (PID)

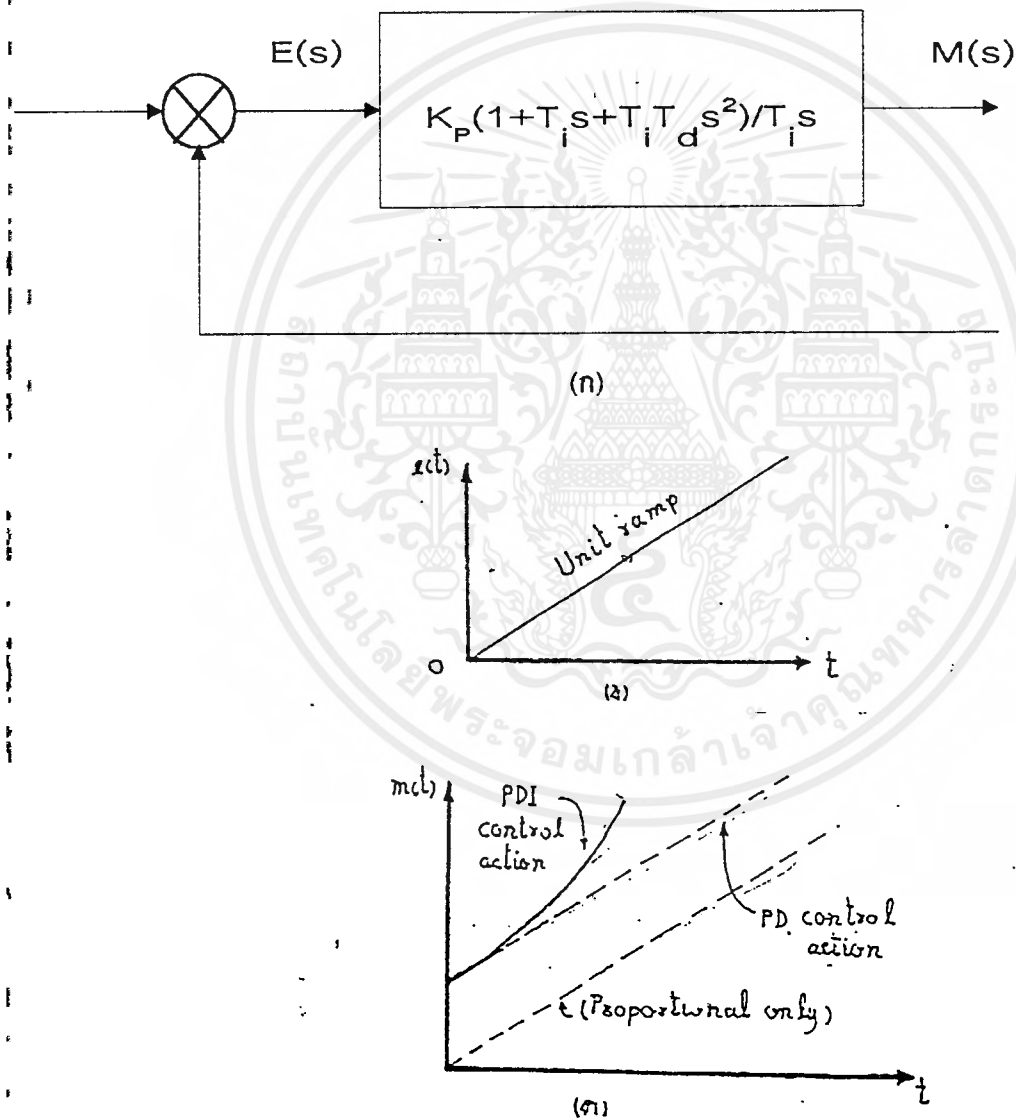
การควบคุมแบบ PID นี้ได้จากการรวมเอาการควบคุมแบบ Proportional การควบคุมแบบ Integral และการควบคุมแบบ Derivative เข้าด้วยกัน การควบคุมแบบ PID ของตัวควบคุมอัตโนมัตินี้สามารถแสดงในรูปของสมการต่อไปนี้

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + K_p / T_i \left(\int e(t) dt \right)$$

Transfer function คือ

$$M(s) / E(s) = K_p (1 + T_d s + 1 / T_i s)$$

Block Diagram อินพุต และ เอาท์พุท ของตัวควบคุมแบบ PID แสดงได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ก) Block Diagram ของตัวควบคุมแบบ PID

ข) อินพุตของตัวควบคุมซึ่งเป็นแบบ Unit step

ค) เอาท์พุทของตัวควบคุมแบบ PID

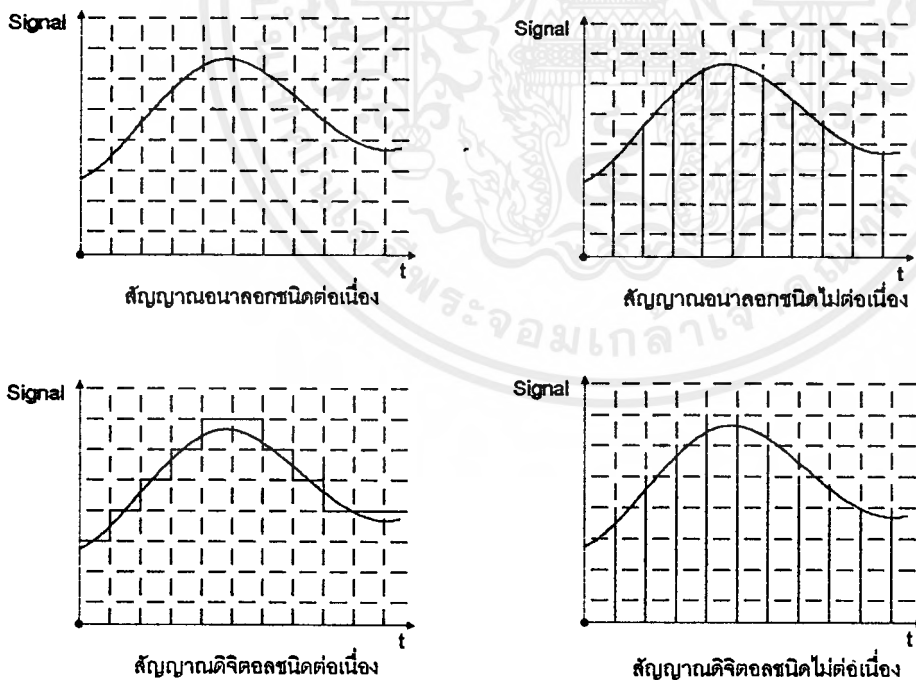
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 SIGNAL TYPE

ชนิดของสัญญาณถูกแบ่งออกได้ด้วยหลายลักษณะ ในทาง Control สัญญาณถูกแบ่งออกด้วย 2 เกณฑ์ คือ

- ความต่อเนื่องของสัญญาณ แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ
1. สัญญาณชนิดต่อเนื่อง (Continuous Time Signal) คือสัญญาณที่ทราบค่า หรือ สัญญาณที่มีระดับการเปลี่ยนแปลง อย่างต่อเนื่องไม่ขาดหาย
 2. สัญญาณชนิดไม่ต่อเนื่อง (Discrete Time Signal) คือสัญญาณที่ ปรากฏค่า หรือสามารถตรวจสอบค่าได้เฉพาะบางเวลาเท่านั้น
- ชนิดของตัวเลขที่ใช้ในการแสดงค่าสัญญาณ แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ
1. สัญญาณอนาลอก (Analog Signal) คือสัญญาณที่ต้องแสดงค่าระดับของสัญญาณนั้นโดยใช้ตัวเลขจำนวนไม่รู้จบ จึงจะสามารถแสดงค่าของระดับสัญญาณได้อย่างถูกต้อง
 2. สัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) คือสัญญาณที่แสดงค่าระดับสัญญาณด้วยตัวเลขรู้จบ ทำให้บางครั้งไม่สามารถแสดงค่าที่อยู่ระหว่างตัวเลขรู้จบ 2 จำนวนได้ จำเป็นต้องใช้ตัวเลขรู้จบที่ใกล้เคียงที่สุด

สามารถแสดงลักษณะต่างๆของสัญญาณ ได้ดังรูปที่ 2.8



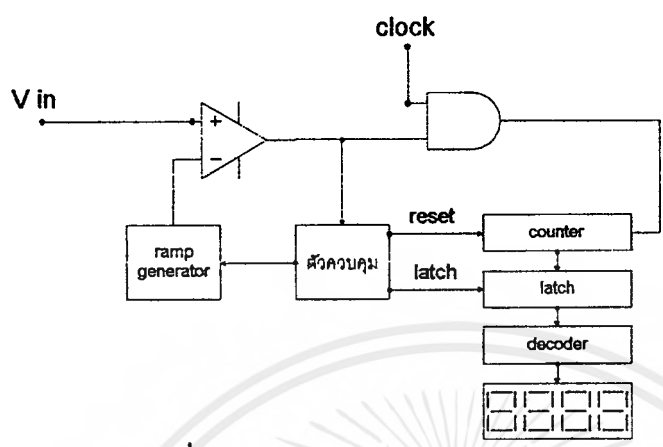
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์สัญญาณชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 Analog to Digital Converter (ADC,A/D)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณอนาลอก เป็นสัญญาณดิจิทัล มีหลายชนิด ดังนี้

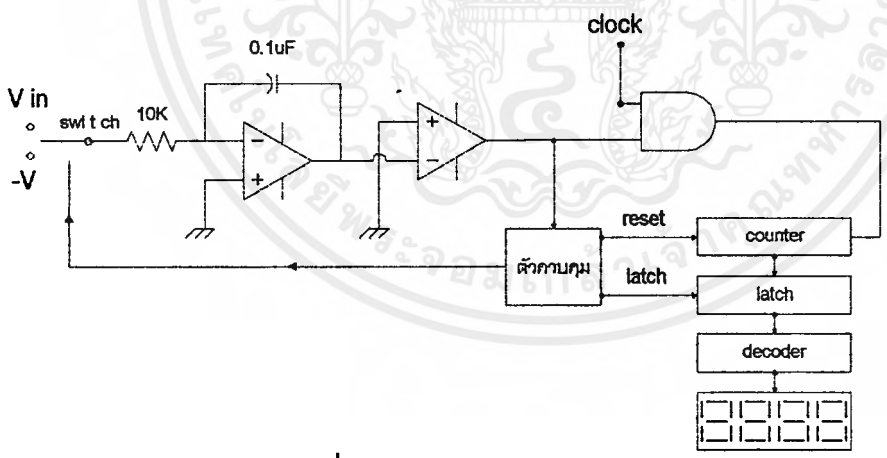
2.5.1 Single Slope A/D Converter



รูปที่ 2.18 Single Slope A/D Converter

จากรูป ถ้า Vin มีค่ามากกว่าค่า V_{ramp} เริ่มต้น (0) แล้ว Output ของ Comparator จะเป็นบวก เมื่อนำไป AND กับสัญญาณ Clock จะทำให้ Counter นับไปเรื่อยๆ จนกว่า Output ของ Comparator จะเป็นลบ (หรือ 0) นั่นคือจนกว่า Vin จะน้อยกว่า V_{ramp} นั้นเอง แล้วค่าใน Counter จะถูก Latch ไปแสดงผล และตัวควบคุมจะ Reset Ramp Generator กับ Counter ใหม่

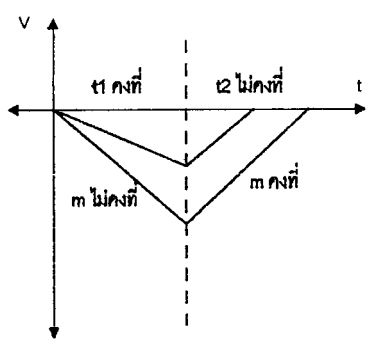
2.5.2 Dual Slope A/D Converter



รูปที่ 2.19 Dual Slope A/D Converter

จากรูป เมื่อ Vin เป็นบวก V_{output} ของ Integrator จะเป็นลบมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ Output ของ Comparator เป็นบวก และ Counter นับเป็นเวลา t₁ คงที่จนครบ Switch จะเปลี่ยนจาก Vin เป็น V- พร้อมกับ Reset Counter ทำให้ V_{output} ของ Integrator ค่อยๆเพิ่มขึ้นด้วยความชัน $m = V_{ref} / RC$ คงที่จน V_{Output} ของ Integrator เป็น 0 (Ground) อีกครั้ง Switch จะสลับไปที่ Vin เพื่อเริ่มใหม่ ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 การทำงานของ Dual Slope A/D Converter

เนื่องจาก $Q = C \cdot V = I \cdot t$

จะได้ว่า $V/t = I/C$

$I = V_{input}/R$; $V/t = V_{input}/RC = m$

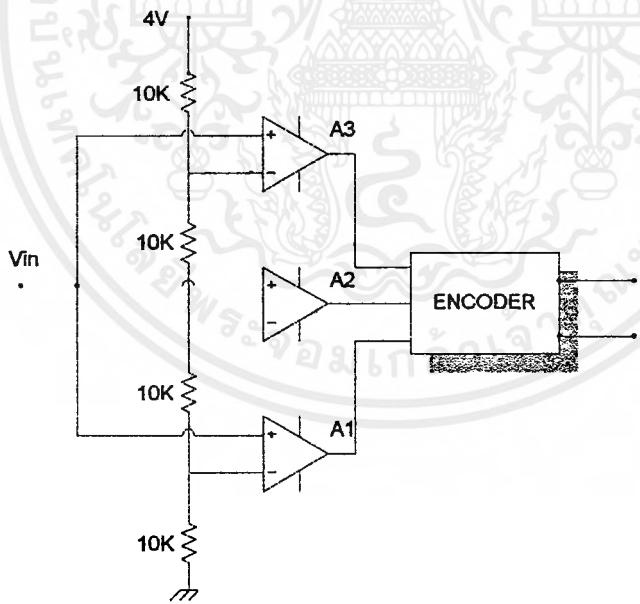
เพราะฉะนั้น $V_{in} \cdot t_1/RC = V_{ref} \cdot t_2/RC$

$t_2 = (t_1/V_{ref}) \cdot V_{in}$; $t_1/V_{ref} = \text{ค่าคงที่}$

แสดงว่า t_2 แปรผันตาม V_{in} โดยไม่ขึ้นกับ R และ C ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ทำให้ดีกว่า

ADC แบบ Single Slope

2.5.3 Parallel Comparator A/D Converter



รูปที่ 2.21 Parallel Comparator A/D Converter

เป็น ADC แบบพื้นฐาน โดยใช้หลักการของ Voltage Divider ผ่าน Comparator ที่

Vreference ต่างๆกัน สำหรับ ADC n Bit จึงต้องใช้ Comparator จำนวน $(2 \text{ ยกกำลัง } n) - 1$ ตัว

ดังรูป เป็น ADC 2 บิต ใช้ Comparator จำนวน $4 - 1 = 3$ ตัว ที่ชาลบของ A3,A2,A1 จะมีค่า

Vreference เป็น 3V,2V,1V ตามลำดับ ผลของการ Compare แสดงได้ ดังตารางนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

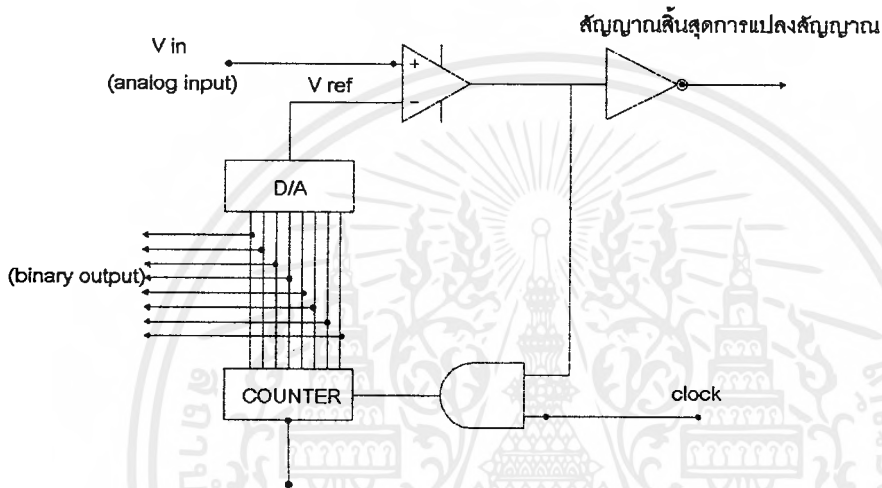
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Vin	A3	A2	A1	D1	D0
0-1	0	0	0	0	0
1-2	1	0	0	0	1
2-3	1	1	0	1	0
3-4	1	1	1	1	1

ตารางที่ 2-3 แสดง Output ของ Paralell Comparator ADC

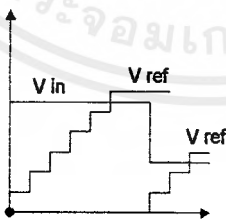
2.5.4 ADC ชนิดที่มี D/A ภายใน

ชนิด Counter



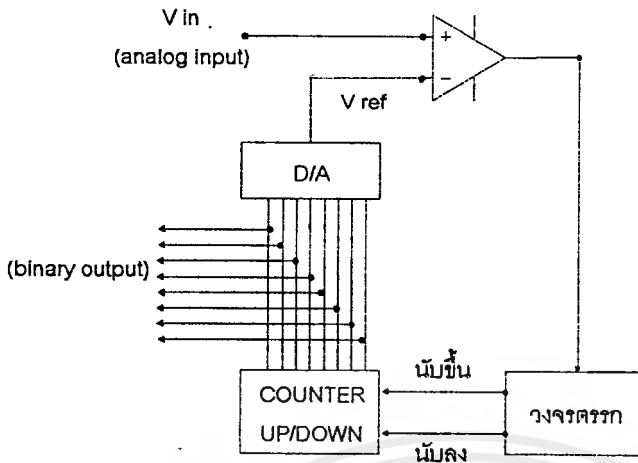
รูปที่ 2.22 A/D Converter ชนิด Counter

จากรูป เมื่อสัญญาณ Vin มากกว่า Vref แล้ว Output ของ Comparator จะทำให้ Counter นับ แล้ว Output ของ Counter จะถูกส่งเข้า D/A เพื่อแปลงสัญญาณกลับเป็นอนาลอกเป็น Vref ไปเปรียบเทียบกับ Vin จนกว่า Vin จะน้อยกว่า Vref ค่า Binary Output จึงจะถูก Latch ออกไป แสดงได้ดังรูป



รูปที่ 2.23 การทำงานของ A/D Converter ชนิด Counter

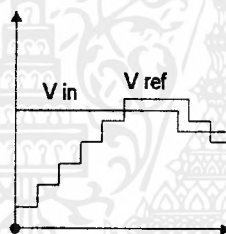
ชนิด Up-Down Counter



รูปที่ 2.24 A/D Converter ชนิด UP-Down Counter

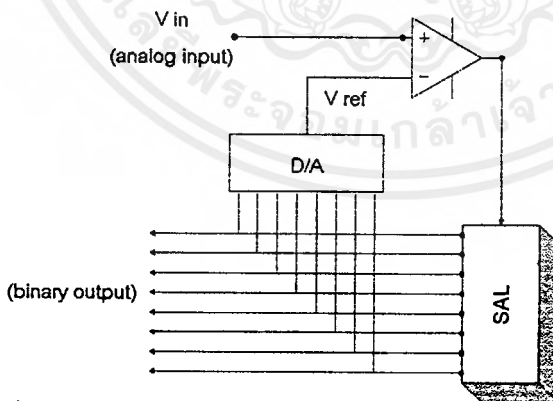
การทำงานจะมีลักษณะเดียวกับ ADC ชนิด Counter เพียงแต่เนื่องจาก Counter นับลง

ได้ การนับจึงไม่ต้องเริ่มจากศูนย์ทุกครั้ง ทำให้แปลงสัญญาณได้เร็วกว่า แสดงได้ดังรูป



รูปที่ 2.25 การทำงานของ A/D Converter ชนิด UP-Down Counter

ชนิด Successive Approximation



รูปที่ 2.26 A/D Converter ชนิด Successive Approximation

การแปลงสัญญาณจะเกิดขึ้นภายใต้การทำงานของ SAL (Successive Approximation Logic) หลักการคือ SAL จะ Set ให้ MSB (Most Significant Bit) เป็น 1 ถ้า Vin มากกว่าหรือเท่ากับ Vref, MSB จะเป็น 1 ถ้า Vin น้อยกว่า Vref MSB จะถูก Clear เป็น 0 เสร็จแล้วจะเลื่อน Bit ลงไปเรื่อยๆ จนถึง LSB (Least Significant Bit)

ตัวอย่าง เช่น สมมติ Range ของ Voltage Input เป็น 0 – 255 V และมี Vin เข้ามาเป็น 75 V

การทำงานที่ละ Step จะเป็นดังนี้

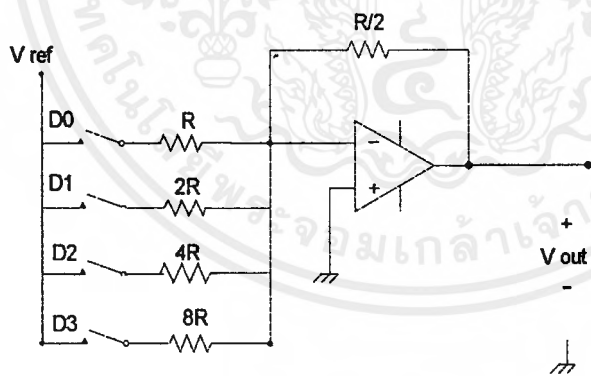
เริ่มต้น;	1 0 0 0 0 0 0 0	;75 < 128 , Bit8 = 0
1;	0 1 0 0 0 0 0 0	;75 > 64 , Bit7 = 1
2;	0 1 1 0 0 0 0 0	;75 < 96 , Bit6 = 0
3;	0 1 0 1 0 0 0 0	;75 < 80 , Bit5 = 0
4;	0 1 0 0 1 0 0 0	;75 > 72 , Bit4 = 1
5;	0 1 0 0 1 1 0 0	;75 < 76 , Bit3 = 0
6;	0 1 0 0 1 0 1 0	;75 > 74 , Bit2 = 1
7;	0 1 0 0 1 0 1 1	;75 = 75 , Bit1 = 1
8;	0 1 0 0 1 0 1 1	;Binary Output

ข้อดีของ ADC ชนิดนี้คือ เวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณไม่ขึ้นกับขนาดของ Voltage Input นั่นคือ ไม่ว่า Input มีขนาดเท่าใด ก็ใช้เวลาในการแปลงสัญญาณเท่ากันตลอด (มีคาบการสุ่มสัญญาณคงที่) ทำให้ ADC ชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป

2.6 Digital to Analog Converter (DAC,D/A)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณดิจิทัล เป็นสัญญาณอนาลอก มีหลายชนิด ดังนี้

2.6.1 Binary Weighted Resistors



รูปที่ 2.27 Binary Weighted Resistors D/A Converter

จากรูป กระแส Output จะมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแส ณ ขาลบของ Op-Amp นั่นคือ

$$\begin{aligned}
 I_{out} &= I_3 \cdot D_3 + I_2 \cdot D_2 + I_1 \cdot D_1 + I_0 \cdot D_0 \\
 &= V_{ref} \cdot D_3 / R + V_{ref} \cdot D_2 / 2R + V_{ref} \cdot D_1 / 4R + V_{ref} \cdot D_0 / 8R \\
 &= [D_3 / R + D_2 / 2R + D_1 / 4R + D_0 / 8R] \cdot V_{ref}
 \end{aligned}$$

กำหนด $D = [D_3/2 + D_2/4 + D_1/8 + D_0/16]$

$$= [D_3/2R + D_2/4R + D_1/8R + D_0/16R] \cdot 2V_{ref}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

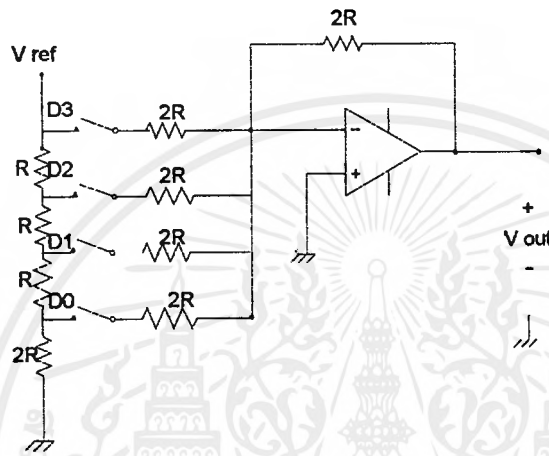
$$= D \cdot 2V_{ref}/R$$

$$V_{out} = -I_{out} \cdot R/2$$

$$= -D \cdot V_{ref}$$

ข้อเสียของ DAC ชนิดนี้คือ ค่า R แต่ละค่าต้องเป็น 2 เท่ากันไปเรื่อยๆ ทำให้ลำบากแก่การออกแบบ เช่น DAC 8 Bit สมมติออกแบบได้ค่า R เป็น 500 โอห์ม ค่า R ที่ต้องใช้ทั้งหมด คือ 250 , 500 , 1K , 2K , 4K , 8K , 16K , 32K และ 64K โอห์ม

2.6.2 R/2R Ladder



รูปที่ 2.28 R/2R Ladder D/A Converter

จากรูป

$$I_3 = 2 \cdot I_2 ; \quad I_2 = 2 \cdot I_1 ; \quad I_1 = 2 \cdot I_0$$

$$I_3 = 2 \cdot I_2 = 4 \cdot I_1 = 8 \cdot I_0$$

$$I_{out} = I_3 \cdot D_3 + I_2 \cdot D_2 + I_1 \cdot D_1 + I_0 \cdot D_0$$

$$= I_3 \cdot D_3 + I_3 \cdot D_2/2 + I_3 \cdot D_1/4 + I_3 \cdot D_0/8$$

$$= [D_3 + D_2/2 + D_1/4 + D_0/8] \cdot I_3$$

$$I_3 = V_{ref}/2R = [D_3/2 + D_2/4 + D_1/8 + D_0/16] \cdot 2 \cdot V_{ref}/2R$$

$$= D \cdot V_{ref}/R$$

$$V_{out} = -I_{out} \cdot 2R$$

$$= -D \cdot 2V_{ref}$$

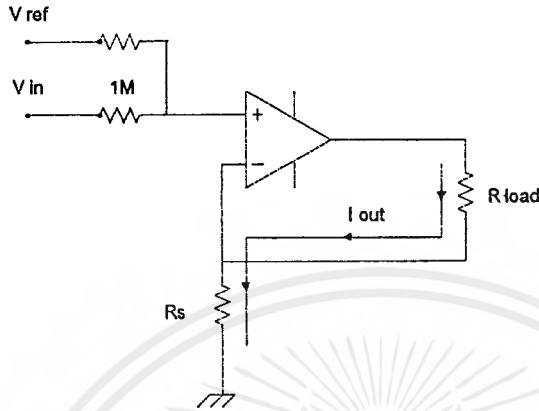
DAC ชนิดนี้จะไม่เกิดปัญหาเหมือนที่เกิดกับ Binary Weighted Resistors D/A Converter

เนื่องจากค่า R ที่ใช้มีเพียง 2 ค่าเท่านั้น จึงง่ายต่อการออกแบบและนำไปใช้งาน

2.7 Voltage to Current Converter (V/I)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงแรงดัน เป็นกระแส มักจะมี คุณสมบัติในการปรับ Span และ Zero ได้ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของโหลด (Load) คือ

2.7.1 Offset V/I Converter (floating Load)



รูปที่ 2.29 V/I Converter (floating Load)

จากรูป จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{in} และ I_{out} ดังสมการ

$$I_{out} = (V_{in} + V_{ref})/2R_s$$

$$= (1/2R_s)V_{in} + V_{ref}/2R_s$$

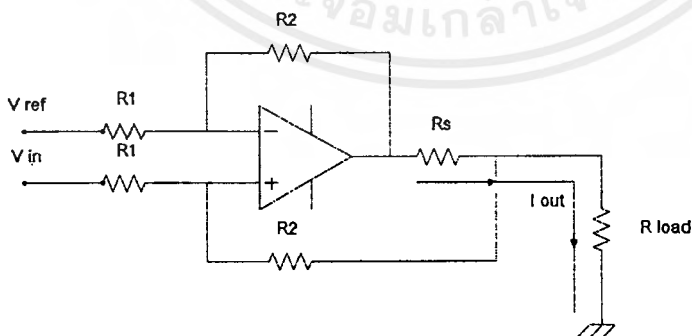
I_{out} มีความสัมพันธ์กับ V_{in} เป็นสมการเส้นตรงเหมือนสมการพื้นฐาน

$$Y = mX + b$$

โดยมี $m = 1/2R_s$ และ $b = V_{ref}/2R_s$ แสดงว่าสามารถปรับ Span และ Zero ได้ โดยการ

ปรับ R_s และ V_{ref} ให้ได้ค่าตามที่ต้องการ

2.7.2 V/I Converter (Grounded Load)



รูปที่ 2.30 V/I Converter (Grounded Load)

จากรูป จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{in} และ I_{out} ดังสมการ

$$I_{out} = (V_{in} - V_{ref})/R_s$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

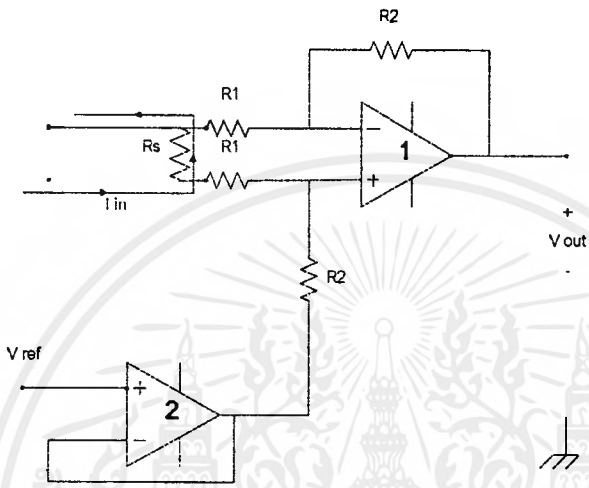
$$= (1/R_s)V_{in} - V_{ref}/R_s$$

สามารถปรับ Span และ Zero ได้ โดยการปรับค่า R_s และ V_{ref}

2.8 Current to Voltage Converter (I/V)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงกระแสเป็นแรงดัน มักจะมีคุณสมบัติในการปรับ Span และ Zero ได้ เช่นเดียวกับกับ V/I แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของโหลด (Load) คือ

2.8.1 Floating I/V Converter



รูปที่ 2.31 Floating I/V Converter

จากรูป จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{in} และ V_{out} ดังสมการ

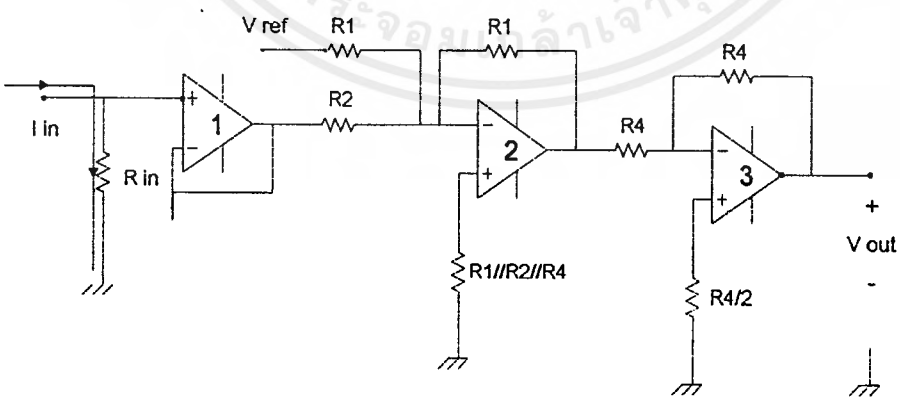
$$V_{out} = (R_2/R_1) * V_{in} + V_{ref}$$

$$V_{in} = I_{in} * R_s;$$

$$= (R_2 * R_s / R_1) * I_{in} + V_{ref}$$

สามารถปรับ Span และ Zero ได้

2.8.2 Grounded-referenced I/V Converter



รูปที่ 2.32 Grounded-referenced I/V Converter

จากรูป เป็นการนำ 2 วงจรมาต่อกัน โดยวงจรของ Op-Amp ตัวแรกเป็นวิธีในการแปลงกระแสเป็นแรงดัน แต่ไม่สามารถปรับ Span และ Zero ได้ ค่า Voltage Output ของ Op-Amp ตัวที่ 1 เป็นดังนี้

$$V_{out1} = I_{in1} * R_{in}$$

วงจรของ Op-Amp ตัวที่ 2 คือวงจรที่ใช้ในการปรับ Span กับ Zero

$$V_{out2} = -[(R1/R2) * V_{in2} + V_{ref}]$$

และ Op-Amp ตัวที่ 3 ใช้เพื่อกลับเฟส นั่นคือ

$$V_{out3} = -V_{in3}$$

เนื่องจาก $I_{in1} = I_{in}$, $V_{out1} = V_{in2}$, $V_{out2} = V_{in3}$ และ $V_{out3} = V_{out}$ จะได้ความสัมพันธ์

ของ V_{out} และ I_{in} เป็น

$$V_{out} = (R1 * R_{in} / R2) * I_{in} + V_{ref}$$



บทที่ 3

หลักการทํางานของ

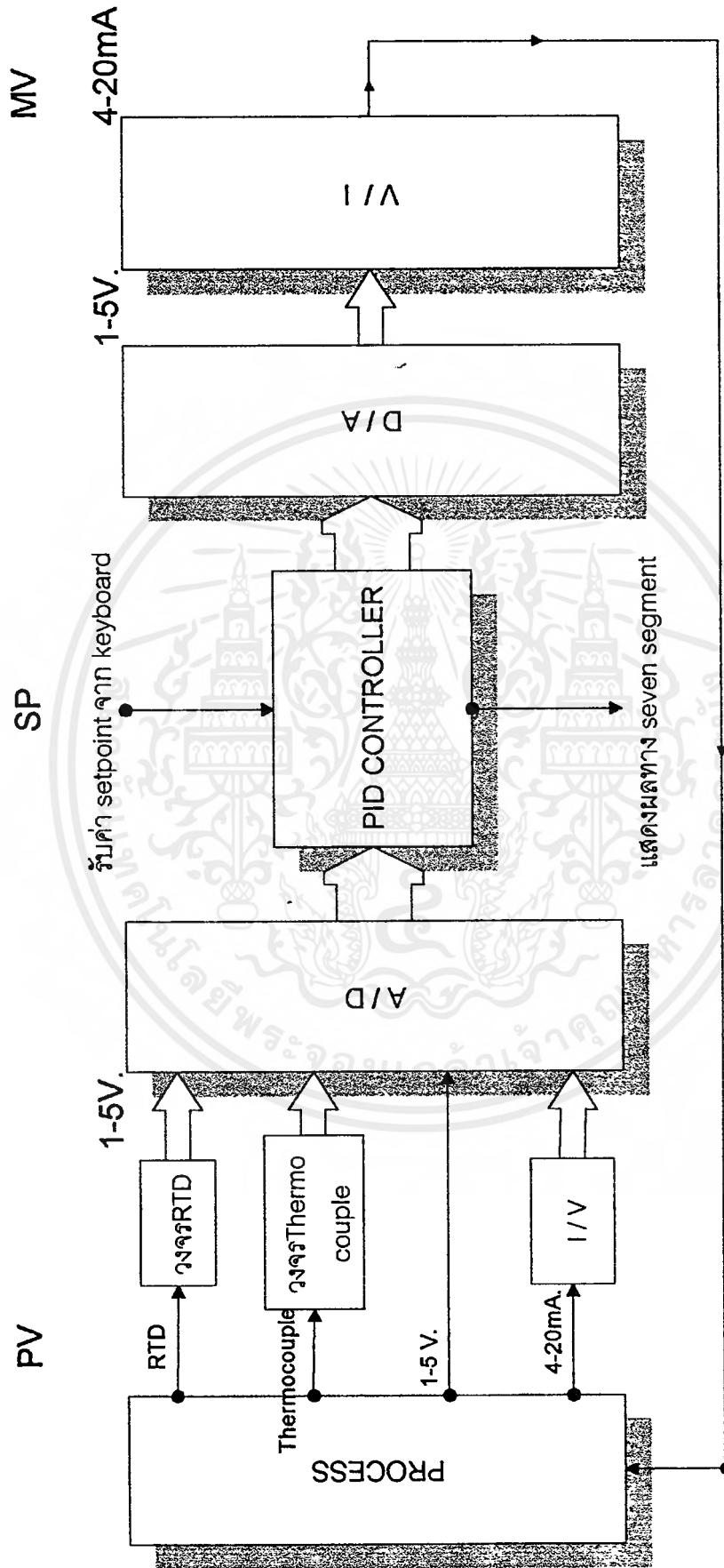
UNIVERSAL INPUT PID CONTROLLER

3.1 โครงสร้างโดยรวม

จาก รูปที่ 3.1 สัญญาณที่รับมาจาก Process (PV หรือ Process Variable) เป็น Analog Signal ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้ใน Controller ที่มีลักษณะเป็น Digital Signal ได้โดยตรง จึงต้องแปลงสัญญาณจาก Analog เป็น Digital โดยผ่าน A/D (ADC หรือ Analog to Digital Converter) ก่อน แต่เนื่องจาก Controller รับ Input ได้ 4 ชนิด คือ RTD , Thermocouple , สัญญาณมาตรฐาน 1-5 V และ สัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA และเนื่องจาก A/D รับ Input เป็นแรงดัน 0-5 V จึงต้องแปลงสัญญาณ Input ทั้งสี่ให้อยู่ในรูปเดียวกันก่อน คือ สัญญาณ 0-5 V โดยผ่านวงจรในบทที่ 4 รูปที่ 4.1 ถึง 4.4 ตามลำดับ แล้วจึงนำสัญญาณที่ได้ผ่าน A/D เป็น Digital Input ให้แก่ Controller

Controller สามารถเปลี่ยนค่า PID Parameter ซึ่งได้แก่ K_p (Proportion Gain) , K_i (Integration Constant) และ K_d (Derivative Constant) ได้ทาง Software และสามารถเลือก Input mode พร้อมกับรับค่า Set Point. (SP) ได้จากการป้อนทาง Keyboard โดยตรง โดย Keyboard มีวงจรดังรูปที่ 4.6 และจะแสดง Process Value ณ เวลานั้น ออกทาง Seven – Segment ดังรูปที่ 4.5 ตลอดเวลา

สัญญาณควบคุมที่ออกจาก Controller เป็น Digital Signal แต่สัญญาณของระบบจริงเป็น Analog Signal จึงต้องนำสัญญาณผ่าน D/A (DAC หรือ Digital to Analog Converter) เพื่อแปลงสัญญาณกลับเป็น Analog อีกครั้งก่อนนำไปใช้ เนื่องจากสัญญาณ Output จาก D/A เป็น ± 10 V ถึง 10 V และสัญญาณมาตรฐานโดยทั่วไปทาง Control เป็น 4-20 mA. จึงต้องแปลงแรงดัน 20 Vp-p จาก D/A ให้เป็น กระแส 4-20 mA. โดยผ่านวงจร Output ในบทที่ 4 รูปที่ 4.7 ซึ่งสัญญาณที่ได้นี้คือ MV หรือ (Manipulated Variable) ที่ส่งไปควบคุม Process



รูปที่ 3.1 Block Diagram ของ Universal Controller

3.2 PID CONTROLLER สำหรับ DIGITAL SIGNAL

เนื่องจากสัญญาณที่ Controller นำมาคำนวณนี้ เป็นสัญญาณ Digital ดังนั้น สมการในการคำนวณ PID เดิม ที่ใช้สำหรับสัญญาณอนาลอก จึงไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรง สามารถพิจารณาได้ดังนี้

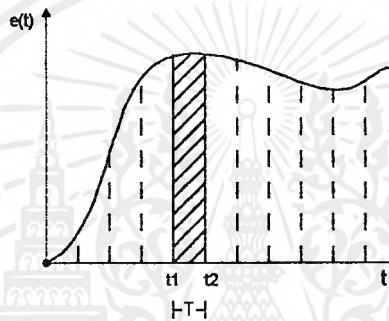
สัญญาณควบคุม (Control Signal) จาก PID Controller สามารถคำนวณได้จาก

$$M(e(t)) = K_p.e(t) + K_i.\int e(t) dt + K_d.(de(t)/dt)$$

โดย $e(t) = SP - PV(t)$

พิจารณาค่าเป็น 3 ส่วน คือ

$$M(t) = M_p(t) + M_i(t) + M_d(t)$$



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $e(t)$ กับ t

เมื่อพิจารณาตามรูป 3.2 จะเห็นว่าค่าในส่วนของ Proportion Controller จะคงเดิม คือ

$$M_p(t_2) = K_p.e(t_2)$$

ค่าของ Integral Controller โดยพิจารณาตามรูป จะเห็นว่าค่าในส่วนของ $\int e(t) dt$ ก็คือพื้นที่ใต้กราฟนั่นเอง เมื่อกำหนด T เป็นคาบในการ Sampling มีค่าน้อยมากๆแล้ว จะคิดพื้นที่ที่เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้ นั่นก็คือ

$$M_i(t_2) = K_i.e(t_2).T + M_i(t_1)$$

ค่าของ Derivative Controller จากรูป ค่าในส่วนของ $de(t)/dt$ ก็คือความชัน (Slope) ของกราฟนั่นเอง เพราะฉะนั้น

$$M_d(t_2) = K_d.[e(t_2) - e(t_1)]/T$$

เมื่อรวมเข้าด้วยกัน จะได้ว่า สัญญาณควบคุมที่เป็น Digital Signal สามารถคำนวณได้จาก สมการ

$$M(t) = K_p.e(t) + K_i.e(t) \cdot T + K_d.[e(t) - e(t-1)]/T + M_i(t-1)$$

สมการนี้จะอยู่ในส่วนของโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณหา Manipulated Value จากค่า Error โดยมีความสัมพันธ์ของคาบเข้ามาเกี่ยวข้อง นั้นแสดงว่า ในการทำงานจริง คาบที่ใช้ในการคำนวณของ Controller จะต้องเท่ากับคาบในการนำสัญญาณ Input เข้ามาของ A/D จริงๆ มิฉะนั้น ค่าที่คำนวณออกมาจะผิดพลาด และอาจทำให้ระบบไม่เสถียรได้ เช่น ถ้ากำหนดคาบในการคำนวณเป็น 0.1 วินาที แต่คาบในการสุ่มสัญญาณจริงจะสุ่มทุกๆ 0.01 วินาที นั้นแสดงว่า ค่าที่คำนวณได้ในส่วนของ Integral จะมากกว่าความเป็นจริง แต่ในส่วนของ Derivative จะน้อยกว่าความเป็นจริง ตลอดทุกๆคาบ ซึ่งจะส่งผลทำให้ระบบ Unstable ได้

3.3 การควบคุม Calculating Period และ Sampling Period

วิธีที่จะทำให้คาบในการคำนวณ เท่ากับคาบในการสุ่มสัญญาณ เพื่อให้ค่า MV เป็นค่าที่สามารถใช้งานได้จริงสามารถทำได้โดยการตรวจสอบหาเวลาในการทำงานจริงของ Program โดยการนับจำนวน Machine Cycle ของคำสั่งทั้งหมดที่อยู่ใน Program แล้วคูณด้วยเวลาที่ใช้ใน 1 Machine Cycle (T_m) ก็จะได้เวลาทั้งหมดของ Program (คาบในการคำนวณ) ซึ่งนำมากำหนดเป็นคาบในการสุ่มสัญญาณได้

แต่เนื่องจากในความเป็นจริงแล้ว เวลาในการทำงานแต่ละรอบของ Program จะไม่เท่ากันทุกครั้ง อันมีสาเหตุมาจากใน Program จะต้องมีการดำเนินการให้ตัดสินใจอยู่เสมอ (Condition Statement ได้แก่ If-Then-Else , While Loop , Repeat Loop) และแต่ละรอบของ Program บางกรณีจะถูกทำ บางกรณีไม่ถูกทำ ยิ่งถ้า Program มี Condition Statement มาก เวลาที่ใช้ในแต่ละรอบก็ยังมีโอกาสที่จะแตกต่างกันสูงขึ้น จึงไม่สามารถทำให้คาบในการคำนวณเท่ากับคาบในการสุ่มสัญญาณได้ทุกครั้ง วิธีนี้จึงยังไม่ดีพอ เราสามารถทำให้คาบในการคำนวณเท่ากับคาบในการสุ่มสัญญาณจริงได้ ด้วยวิธีการ 2 วิธี คือ

1. Polling

ทำได้โดยกำหนดคาบในการสุ่มสัญญาณขึ้นมาก่อน กำหนดให้ที่ต้น Program มีการอ่านค่าเวลาเข้ามาเก็บไว้ และที่ท้าย Program มีการอ่านค่าเวลาเข้ามาตรวจสอบไปเรื่อยๆจนกว่าจะครบ (นั่นคือ เวลาที่ท้าย Program - เวลาที่ต้น Program = คาบในการสุ่มสัญญาณ) จึงจะเริ่มทำ Program ใหม่อีกครั้ง จากการทำต้องมีการอ่านค่าเวลาเข้ามา แสดงว่าต้องมี Timing Device ตัวหนึ่ง ในการสร้างเวลาให้ CPU ของ Controller ใช้ตรวจสอบ

ข้อเสียของวิธีนี้ คือ CPU ของ Controller ต้องเสียเวลาไปโดยเปล่าประโยชน์ในการเฝ้าตรวจสอบว่าเวลาครบตามที่กำหนดไว้หรือยัง ซึ่งเวลาในส่วนี้ CPU ของ Controller น่าจะใช้งานอย่างอื่นได้

2. Interrupting

ทำได้โดยกำหนดคาบในการสุ่มสัญญาณขึ้นมาก่อน และมี Timing Device เช่นเดียวกันกับวิธี Polling ซึ่งค่าใน Timer จะถูก Set ไว้แน่นอนแล้ว เพื่อให้ได้เท่ากับคาบในการสุ่มสัญญาณ เมื่อ Timer นับครบจะส่งสัญญาณมา Interrupt CPU ของ Controller ดังนั้น Program ทั้งหมดจะถูกนำมาไว้ใน Interrupt Service Routine ของ CPU ที่ซึ่งจะถูก Interrupt โดย Timer แทนที่จะนำไปไว้ใน Main Program

เพราะฉะนั้น ตราบใดที่ Timer ยังคง Interrupt CPU ด้วยคาบคงที่ (ที่เท่ากับคาบในการสุ่มสัญญาณ) Program ก็จะถูกทำด้วยคาบคงที่นั้นด้วยเช่นกัน และขณะเดียวกัน ณ เวลาใดๆที่ CPU ไม่ถูก Interrupt CPU ก็สามารถทำงานอื่นไปได้ด้วย ซึ่งเป็นข้อดีที่เหนือกว่าวิธี Polling แต่ข้อเสียก็คือ ถ้า CPU ไม่มี Timer ภายในจะต้องเสียเวลา Interrupt ไป 1 วนในการรับสัญญาณ Interrupt จากภายนอก

3.4 UNIVERSAL INPUT PID CONTROLLER กับ MCS51

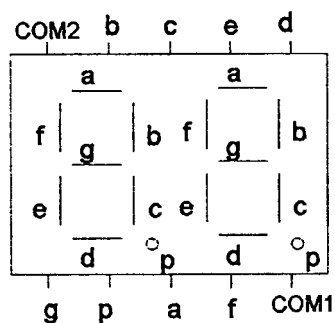
3.4.1 SAMPLING PERIOD

เนื่องจาก CPU ที่ใช้ใน Universal Input PID Controller นี้ คือ 89C51 ซึ่งมี Timer ภายใน 2 ตัว จึงสามารถเลือกใช้วิธี Interrupt ในการควบคุมคาบได้โดยไม่ต้องเสียเวลาในการรับการ Interrupt จากภายนอกเลย กำหนดคาบในการ Sampling เป็น 10 mSec หรือ 0.1 Sec

1 Machine Cycle ใน 89C51 ประกอบด้วย 6 State State ละ 2 Clock นั่นคือ 1 Machine Cycle ประกอบด้วย Clock 12 ลูก เมื่อใช้ Crystal 12 MHz เป็นตัวสร้าง Clock ให้แก่ 89C51 ทำให้ความถี่ของ Machine Cycle เป็น $12 \text{ MHz} / 12 = 1 \text{ MHz}$ เพราะฉะนั้น 1 Machine จะมีคาบเท่ากับ $1 / 1 \text{ MHz} = 1 \text{ uSec}$ หลักการทํางานของ Timer ใน 89C51 คือ เมื่อ Clock เข้ามา 1 ลูก Timer จะเพิ่มค่าขึ้น 1 จนกว่าจะเต็มจึง Interrupt นั่นคือ หากต้องการให้ Timer Interrupt ทุกๆ 10 mSec จะต้อง Mov ค่า 10000(2710Hex) ไปไว้ใน Timer ก่อนเริ่มนับ ($10000 * 1 \text{ uSec} = 10 \text{ mSec}$) แต่เนื่องจาก Timer ใน 89C51 เป็นชนิด Count Up นั่นคือ Timer จะนับจากค่าใน Timer ไปจนเต็ม FFFFHex ดังนั้น ค่าที่จะต้อง Mov ลงไปใน Timer คือ FFFF-2710 หรือค่า Complement ของ 2710Hex นั่นเอง คาบที่เกิดขึ้นนี้สามารถตรวจสอบได้โดย ที่ท้าย Program ของ Interrupt Service Routine จะมีการส่งค่า On สลับ Off ไปที่ Port1 Bit7 ซึ่งเมื่อนำ Scope ไปวัดก็ได้คาบเท่ากับ 20 mSec ซึ่งถูกต้อง (1คาบ คือ On กับ Off ต้อง Interrupt 2 ครั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 SEVEN-SEGMENTS



รูปที่ 3.3 แสดงขาของ 7-Segments

Seven-Segments ใช้ในการแสดง Process Value ที่เวลาใดๆ มีลักษณะ ดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วย 8 Segments คือ a,b,c,d,e,f,g และ p โดยมี p เป็นจุด (Point) Data 8 Bit นี้ ต่อเข้าโดยตรงกับ Port3 ของ 89C51 โดยตรง หากต้องการให้ Segment ใดติด ก็ส่ง 1 (5 V) ไปที่ Segment นั้น หากต้องการให้ดับ ก็ส่ง 0 (0V) ตัวเลข 0-9 ไม่รวมจุดแสดงได้ดังตาราง 3.1

ตัวเลข	p e d c b a	Hex
0	0 0 1 1 1 1 1 1	3F
1	0 0 0 0 0 1 1 0	06
2	0 1 0 1 1 0 1 1	5B
3	0 1 0 0 1 1 1 1	4F
4	0 1 1 0 0 1 1 0	66
5	0 1 1 0 1 1 0 1	6D
6	0 1 1 1 1 1 0 1	7D
7	0 0 0 0 0 1 1 1	07
8	0 1 1 1 1 1 1 1	7F
9	0 1 1 0 0 1 1 1	67

*หากต้องการให้มีจุดด้วยให้บวกค่า Hex ด้วย 80Hex

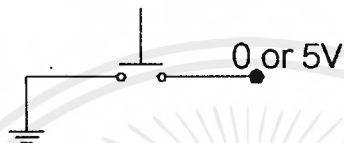
ตารางที่ 3.1 แสดง Data ของ Seven-Segments

สำหรับขา Com1 และ Com2 เป็นขาที่ใช้เลือกบิต (Bit Select) ที่จะแสดงผล หากต้องการให้บิตใดติด ให้ส่ง 0 (Common Ground) ไปที่ขานั้น พร้อมกับ Data 8 Bit ใน Universal Input PID Controller นี้ ใช้ Seven-Segments ขนาด 4 Bit จึงต้องมี Bit Select 4 Bit คือ Port1 Bit7,6,5,4 โดยไล่จาก MSB มา LSB ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการที่ Data 8 Bit ส่งออก Port 3 เพียง Port เดียว ทำให้ไม่สามารถส่งค่าที่แตกต่างกัน ออกไปพร้อมกัน 4 Bit ได้ การทำงานจริงๆแล้ว จึงเป็นลักษณะของการส่ง Data พร้อมกับ Bit Select ไปทีละชุดแล้วไล่ไปที่ละบิตด้วยความถี่ที่สูง ทำให้ดูเหมือนติดหลายบิตพร้อมกัน หากต้องการให้ค่าแตกต่างกัน 4 Bit ติดพร้อมกันจริงๆ จะต้องใช้ Port ถึง 4 Port และ เสียส่วนของ Bit Select อีก 4 Bit ในขณะที่วิธีนี้ เสียเพียง 1 Port กับ 4 Bit และเพื่อให้ได้แรงดัน 5 V เต็มที่ทุก Bit จึงให้สัญญาณที่ออกจาก 89C51 ผ่าน Buffer ก่อนเข้า 7-Segments

3.4.3 KEYBOARD

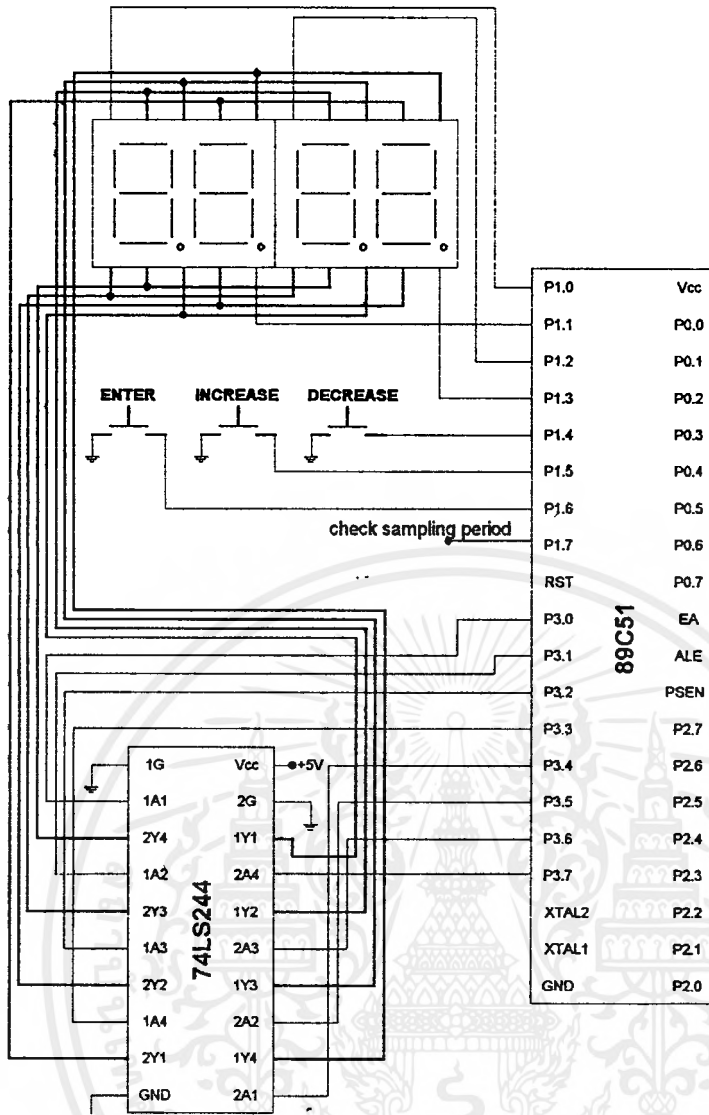


รูปที่ 3.4 แสดงการทำงานของ Switch

จากรูปที่ 3.4 แสดงการทำงานของ Switch ที่ใช้เป็น Keyboard ใน Universal Input PID Controller เมื่อ Switch ไม่ถูกกด ค่าได้จะเป็น 5V เนื่องจากสถานะลอยของขาของ 89C51 และเมื่อ Switch ถูกกด ค่าจะเป็น 0V (Ground)

ใน Universal Input PID Controller นี้ ใช้ Switch 3 ตัวเป็น Keyboard คือ Key ENTER , Key INCREASE และ Key DECREASE โดยต่อเข้ากับ Port 1 Bit 4 , 5 และ 6 ตามลำดับ

การเชื่อมต่อระหว่าง 89C51กับ Seven-Segments และ Keyboard Switch แสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงการเชื่อมต่อ 89C51 กับ 7-Segments และ Switches

3.4.4 PORT

89C51 มี Port อยู่ 4 Port คือ Port 0 Port 1 Port 2 และ Port 3 โดย Port 3 ถูกใช้ในการส่ง Data 8 Bit ไปที่ 7-Segments Port 1 Bit 0-3 ถูกใช้เป็น Bit Select ของ 7-Segments Port 1 Bit 4-6 ใ้รับ Input จาก Keyboard Switch ส่วน Port 1 Bit 7 ถูกใช้ในการตรวจสอบค่า โดยการส่งค่า On สลับ Off จริงๆแล้วเป็น Bit ที่ว่างอยู่ นำไปใช้งานได้

จะเห็นว่า มี Port ว่างอยู่ 2 Port คือ Port 0 และ Port 2 ซึ่งพอดีสำหรับการรับ Input จาก A/D และส่ง Output ไป D/A แต่เนื่องจากต้องมีการส่งสัญญาณไปที่ A/D ด้วย สำหรับการสั่งให้เริ่มแปลงสัญญาณ และการเลือก Channel ของ A/D จึงทำให้ต้องมีการขยาย Port เพิ่ม โดยการนำ 8255 มาใช้

8255 มี Port ให้เลือกใช้ได้ 3 Port คือ Port A Port B และ Port C ซึ่งสามารถกำหนดให้ Port ใดเป็น Input Port หรือ Output Port ก็ได้ โดยการส่ง Control Word ไปที่ 8255 ที่ตอนเริ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ Program ใน Universal Input PID Controller นี้ กำหนดให้ Port A เป็น Output Port ส่งข้อมูลไป D/A Port B เป็น Input Port รับข้อมูลจาก A/D ส่วน Port C ไม่มีการใช้งานแต่กำหนดไว้เป็น Output Port

การเชื่อมต่อ 89C51 กับ 8255 ทำได้โดยต่อ Port2 ของ 89C51 เข้ากับ Data Byte (D0-D7) ของ 8255 และส่งสัญญาณไปควบคุม 8255 อีก 5 Bit ดังตาราง 3.2 ส่วนขา Cs (Chip Select) จะลง Ground ตลอดเวลา (Active Low)

89C51	8255
Port 0 Bit 0	A0
Port 0 Bit 1	A1
Port 0 Bit 2	RESET
Port 0 Bit 3	RD
Port 0 Bit 4	WR

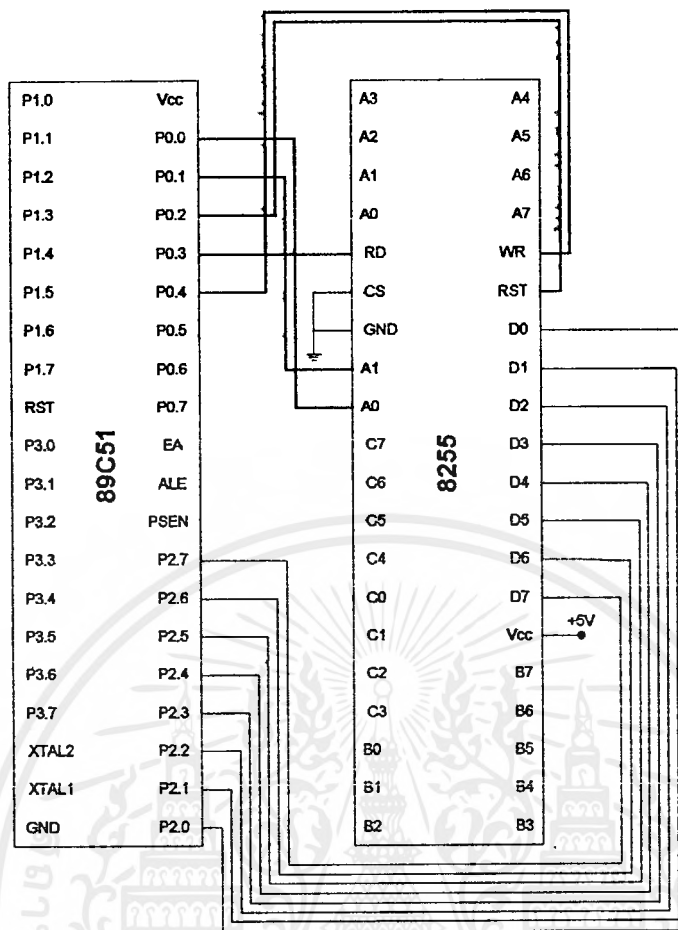
ตารางที่ 3.2 แสดงการเชื่อมต่อขา 89C51 กับ 8255

การ Reset 8255 จะทำที่ตอนต้นของ Program ครั้งเดียว เมื่อใดที่ต้องการติดต่อกับ 8255 จะต้องส่งสัญญาณ 4 Bit ไปก่อนดังตาราง 3.3

WR	RD	A1	A0	ความหมาย
0	1	0	0	ส่ง Data ไป Port A
1	0	0	1	รับ Data จาก Port B
0	1	1	1	ส่ง Control Word

ตารางที่ 3.3 แสดงค่า Select Bit ที่ส่งไป 8255

การเชื่อมต่อระหว่าง 89C51 กับ 8255 แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงการเชื่อมต่อ 89C51 กับ 8255

3.4.5 A/D

ใน Universal Input PID Controller นี้เลือกใช้ ADC เบอร์ 0809 เพราะมี Multiplexer ในตัว 8 Channel ซึ่งต้องใช้ในการเลือก Input 0-5 V ที่จะรับเข้ามาแปลงสัญญาณ จึงใช้เพียง 4 Channel เพื่อรองรับ 4 Input จาก RTD , Thermocouple , สัญญาณมาตรฐาน 1-5 V และ สัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA

ADC 0809 ต้องการ Clock ความถี่ 500 kHz ซึ่งสามารถสร้างได้จาก 74LS14 (Schmitt Trigger Inverter) ด้วยวงจรในบทที่ 4 รูปที่ 4.9 การทำงานของ A/D ทำได้โดยการส่งสัญญาณเลือก Channel จาก 89C51 ไปก่อน แล้วส่งสัญญาณ Start ออกไปเพื่อให้ A/D เริ่มแปลงสัญญาณตาม Channel ที่เลือก เราเลือก Channel A/D ต่ออยู่กับ Port 0 Bit 7 ของ 89C51 และ เรา Start ต่ออยู่กับ Port 0 Bit 5 และ 6 ตามลำดับ เรา OE (Output Enable) ของ A/D ต่อด้วย 5V ตลอดเวลาเพื่อให้เมื่อ A/D แปลงข้อมูลเสร็จแล้วส่งออกทันที Digital Output 8 Bit ของ A/D ต่ออยู่กับ Port A ของ 8255 แล้วจึงนำเข้ามาคำนวณใน 89C51

3.4.6 D/A

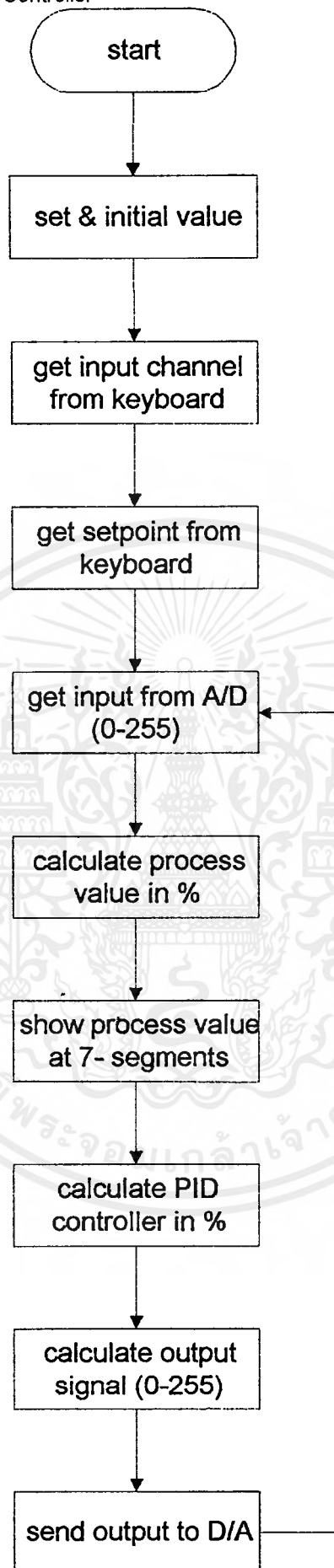
ใช้ DAC เบอร์ 0800 ซึ่งทำการแปลงสัญญาณโดยไม่ต้องมีสัญญาณใดๆไปควบคุม Digital Input 8 Bit ต่ออยู่กับ Port B ของ 8255 แต่สัญญาณที่ออกจาก DAC0800 จะมีขนาด $\pm 10V$ ถึง $10V$ ต้องแปลงให้เป็นสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA ด้วยวงจรในบทที่ 4 รูปที่ 4.7

3.4.7 PROGRAMMING

Software เขียนด้วยภาษา Assembly ที่ใช้กับ Microcontroller ตระกูล MCS51 และเนื่องจากการคำนวณสัญญาณควบคุมแบบ PID Controller เกี่ยวข้องกับตัวเลขทศนิยมหลายตำแหน่งจำนวนมาก ทำให้สัญญาณควบคุมที่ได้จากการคำนวณด้วยภาษา Assembly นี้ อาจมีค่าผิดพลาด (Error) อันเกิดจากการที่ไม่สามารถเก็บค่าทศนิยมเหล่านั้นได้อย่างสมบูรณ์

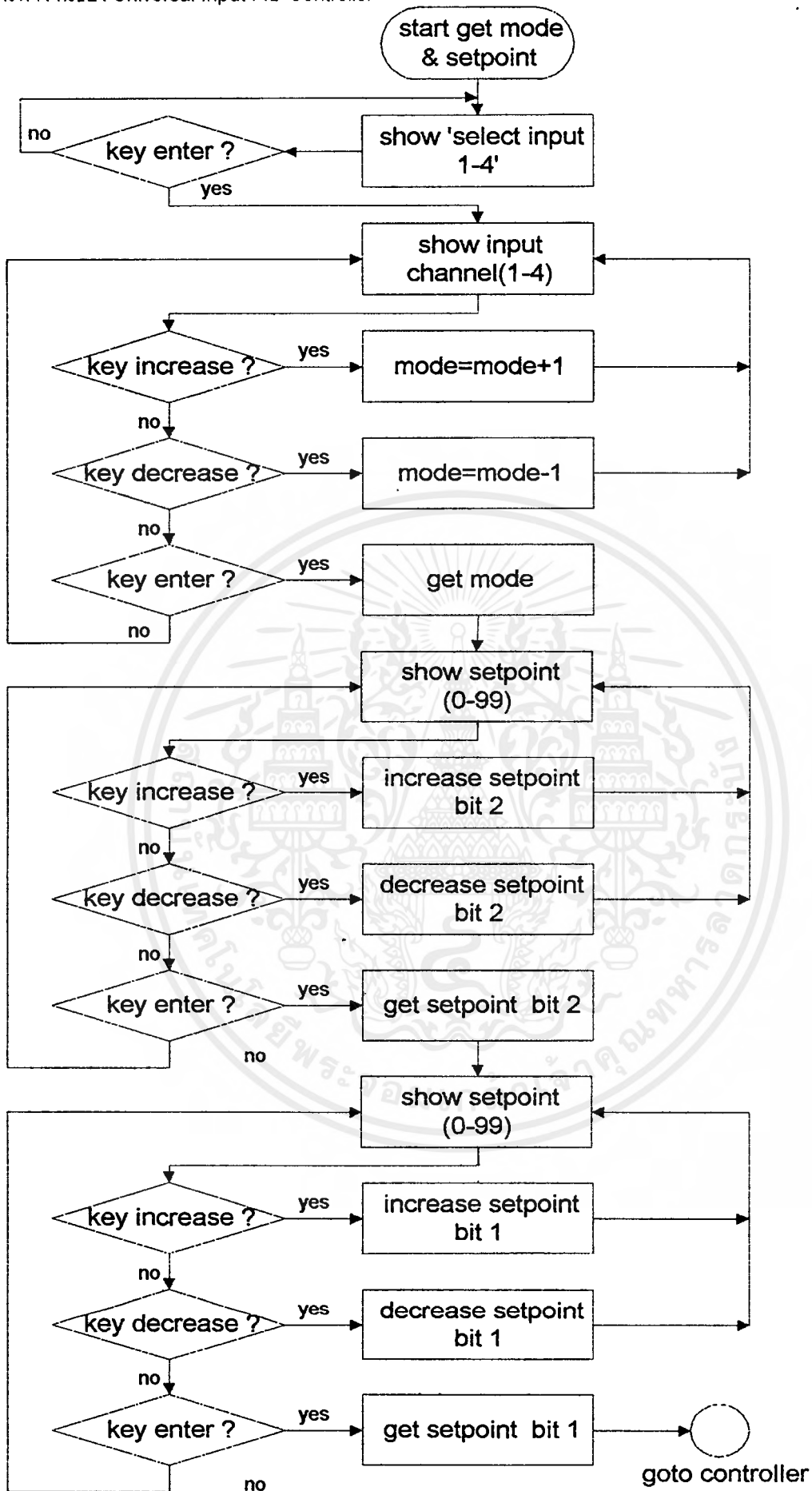
Program ที่เขียนสามารถอ้างอิงได้จากภาคผนวก ข. หลักการของ Program สามารถแสดงได้ด้วย Flowchart ดังรูปที่ 3.7 , 3.8 และ 3.9





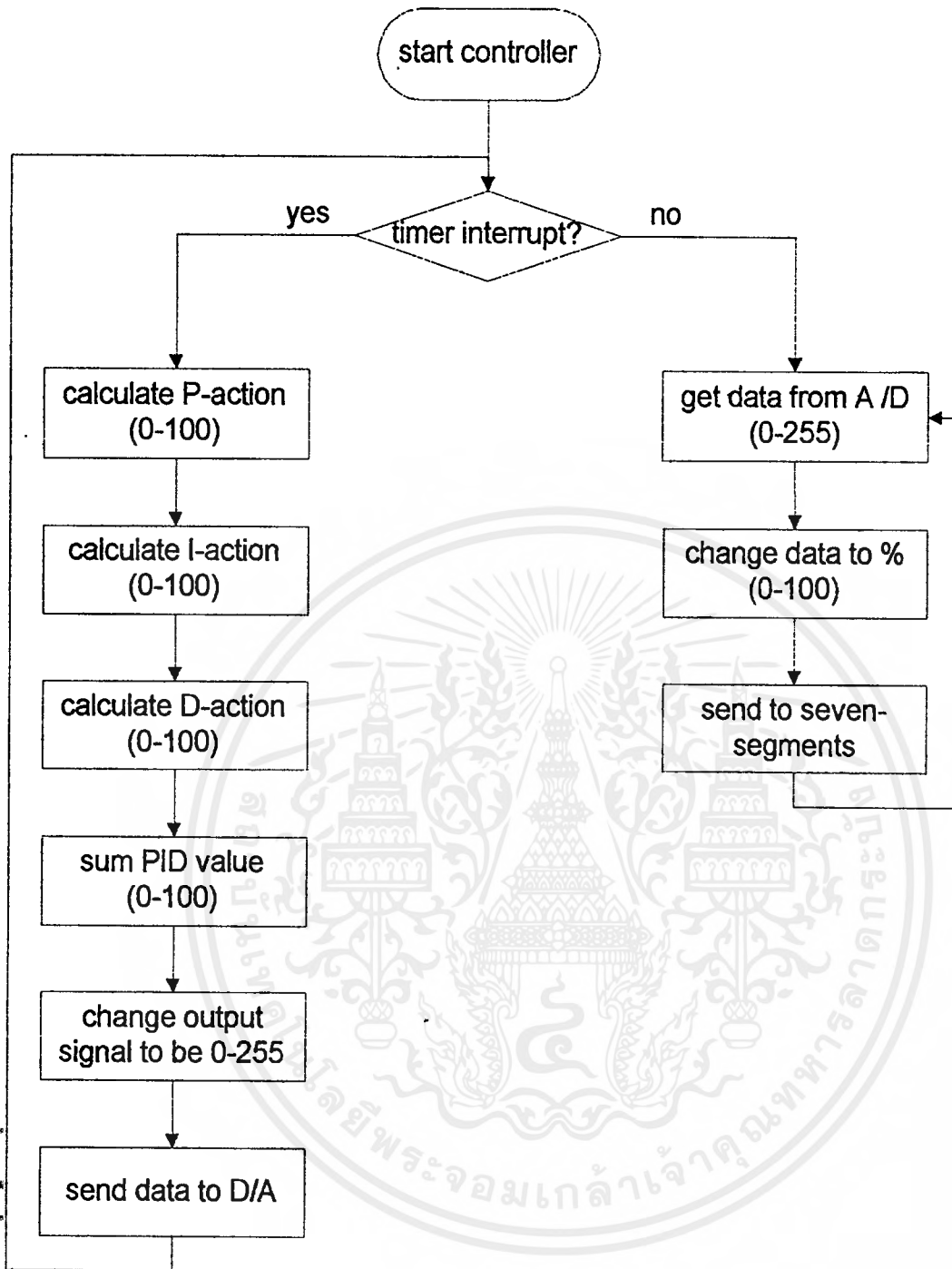
รูปที่ 3.7 flowchart แสดง Main Program

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 flowchart แสดงส่วนรับ Input Channel และ setpoint

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

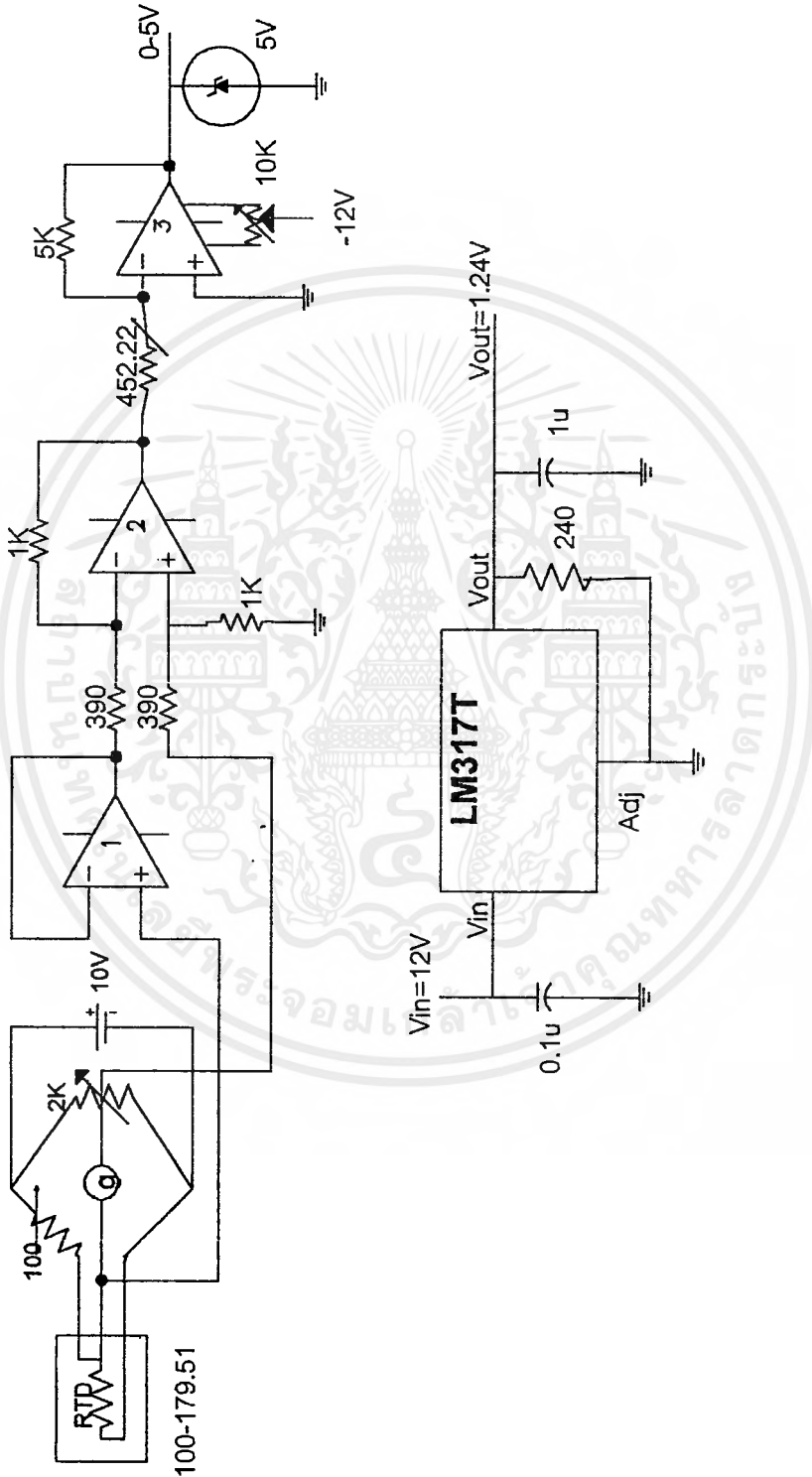


รูปที่ 3.9 Flowchart แสดงส่วน Process value และ PID Controller

บทที่ 4

การออกแบบวงจร

4.1 วงจร RTD



รูปที่ 4.1 วงจร RTD

input : RTD

output : 0 – 5 V

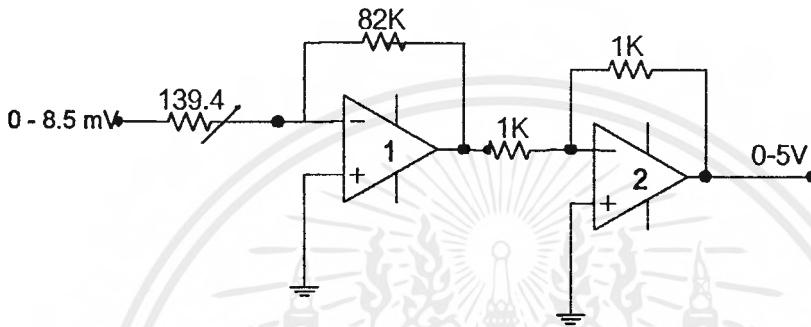
ใช้แปลงสัญญาณ INPUT MODE1 ก่อนเข้า A/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร RTD รับ Input จากตัว RTD โดยมีย่านอุณหภูมิตั้งแต่ 0-210°C (100-179.51 โอห์ม) ผ่านเข้าวงจร Bridge ซึ่งรับไฟเลี้ยง 1.24 V (สร้างจาก LM317T) แล้วนำ Voltage จากวงจร Bridge ไปผ่าน Op-Amp 3 ตัว โดย Op-Amp ตัวที่ 1 ทำหน้าที่เป็น Buffer Op-Amp ตัวที่ 2 เป็นวงจร Diff และ Op-Amp ตัวที่ 3 เป็นตัวปรับ Span และ Zero ให้ Output เป็น 0-5 V โดยมี Zener Diode 5 V ต่อไว้เพื่อควบคุมเวลาที่ไม่มี Input เข้ามาสัญญาณที่ส่งออกไป จะต้องไม่มากกว่า 5 V

4.2 วงจร Thermocouple

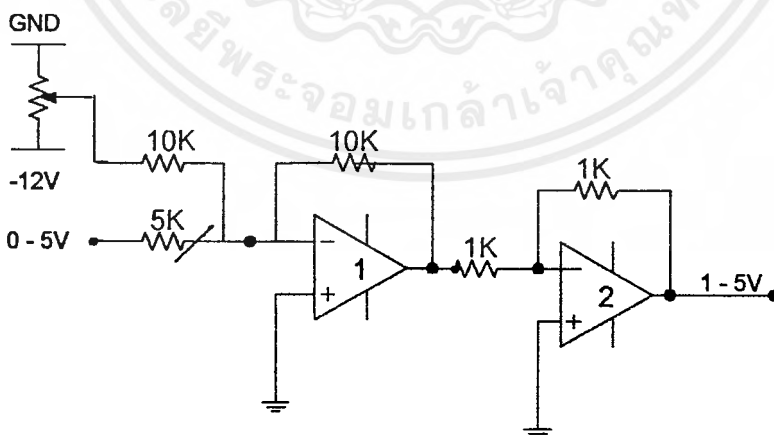


รูปที่ 4.2 วงจร Thermocouple

input : Thermocouple output : 0 – 5 V ใช้แปลงสัญญาณ INPUT MODE2 ก่อนเข้า A/D

วงจร Thermocouple รับ Input จากตัว Thermocouple โดยมีย่านอุณหภูมิตั้งแต่ 0-209 °C (0-8.5 mV) ผ่าน Op-Amp 2 ตัว โดย Op-Amp ตัวแรก ทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณเป็น 0-5 V Op-Amp ตัวที่ 2 ทำหน้าที่เป็น Inverter เพื่อกลับเฟสให้เป็นบวก

4.3 วงจรแปลงสัญญาณ 1-5V เป็น 0-5V

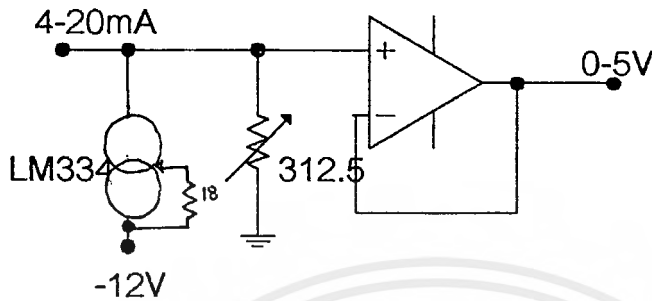


รูปที่ 4.3 วงจร Voltage Input

input : 1 – 5 V output : 0-5V ใช้แปลงสัญญาณ INPUT MODE3 ก่อนเข้า A/D

เมื่อรับสัญญาณมาตรฐาน 1-5 V แล้ว Op-Amp ตัวที่1 ซึ่งเป็น Summing Amp จะทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณ Input ให้เป็น 0-5 V Op-Amp ตัวที่2 ทำหน้าที่เป็น inverter กลับเฟสให้สัญญาณเป็นบวก

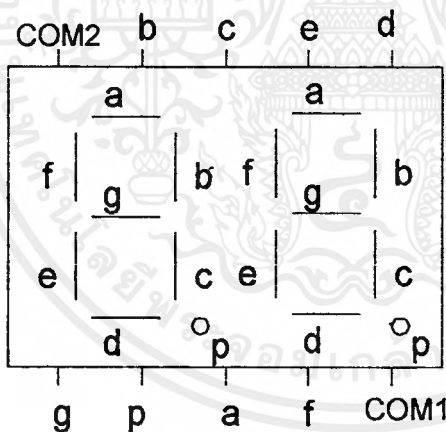
4.4 วงจรแปลงสัญญาณ 4-20mA เป็น 0-5V



รูปที่ 4.4 วงจร Current Input

input : 4 – 20 mA output : 0 – 5 V ใช้แปลงสัญญาณ INPUT MODE4 ก่อนเข้า A/D เป็นวงจร I/V (Current to Voltage Converter) โดยรับสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA ผ่าน LM334 ซึ่งเป็น Current Source ทำให้สัญญาณกลายเป็น 0-16 mA แล้วผ่านวงจร I/V เป็น 0-5 V

4.5 วงจร 7 segments

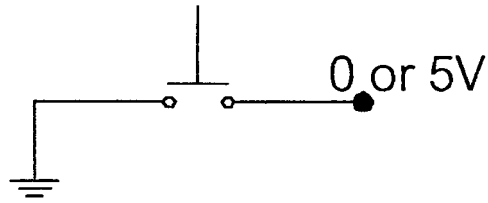


รูปที่ 4.5 วงจร 7 segments

เป็นส่วนแสดงผลทางหน้าจอในการแสดงค่า Mode , Setpoint และค่า Process Value

โดยใช้ data bit ร่วมกัน และเลือกบิตที่จะแสดงผลโดย select ขา com1 หรือ com2

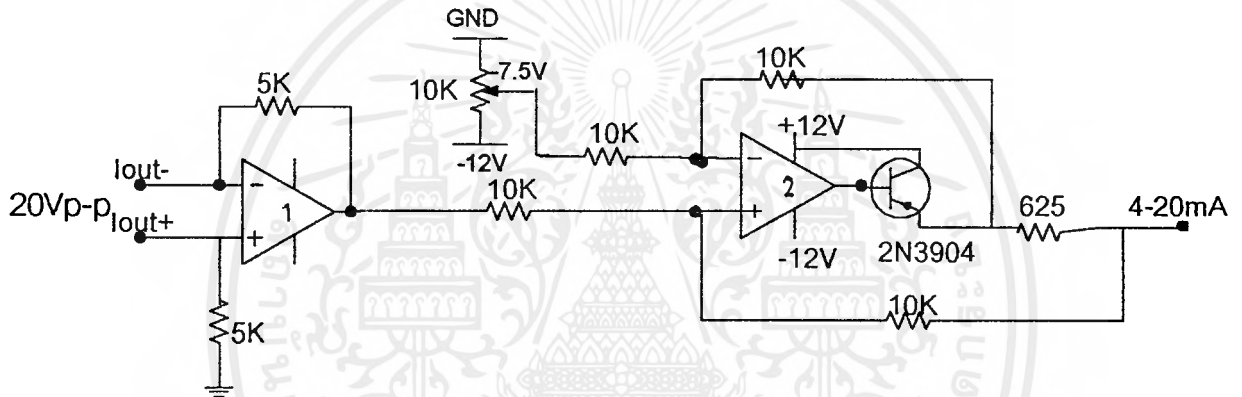
4.6 วงจร SWITCH



รูปที่ 4.6 วงจร SWITCH

เป็นส่วนของ keyboard ประกอบด้วย Switch ชนิด Normally-Open (NO) 3 ตัว กดเป็น 0 V (Ground) ปลดเป็น 5 V (สถานะลอย)

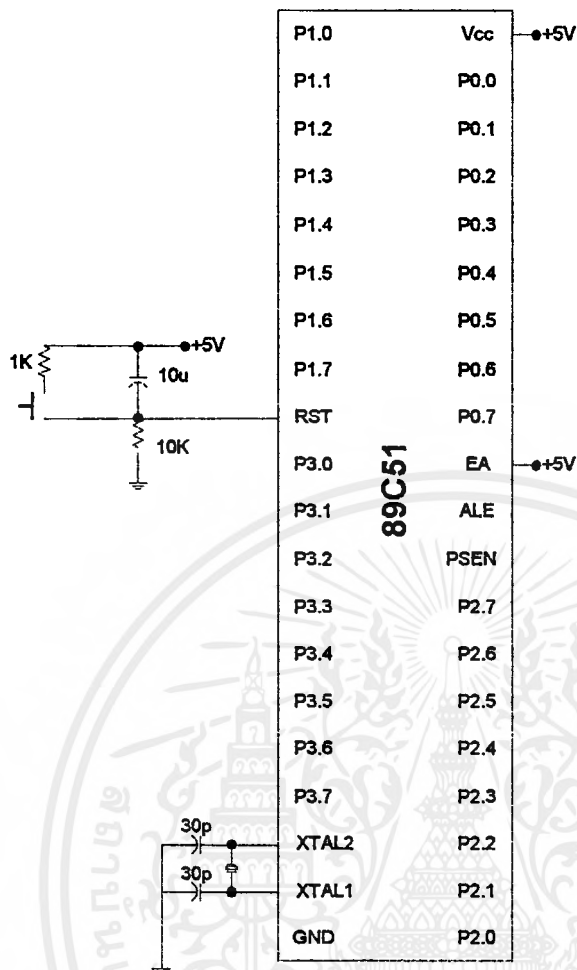
4.7 วงจรแปลงสัญญาณ OUTPUT เป็น 4-20 mA



รูปที่ 4.7 วงจร Output

input : 20Vp-p output : 4-20mA ใช้แปลงสัญญาณ output จาก D/A เป็น สัญญาณมาตรฐาน วงจร Output รับสัญญาณ 20 Vpp จาก DAC0800 ผ่าน Op-Amp ตัวที่ 1 กลายเป็น -5 ถึง 5 V แล้วเข้าวงจร V/I (Voltage to Current Converter) เพื่อแปลงสัญญาณเป็น 4-20 mA

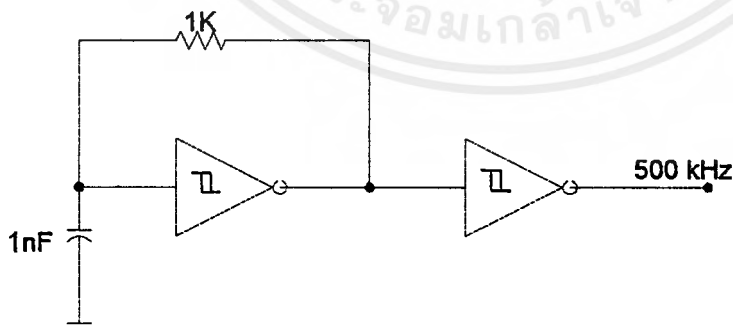
4.8 วงจร CPU



รูปที่ 4.8 วงจร CPU

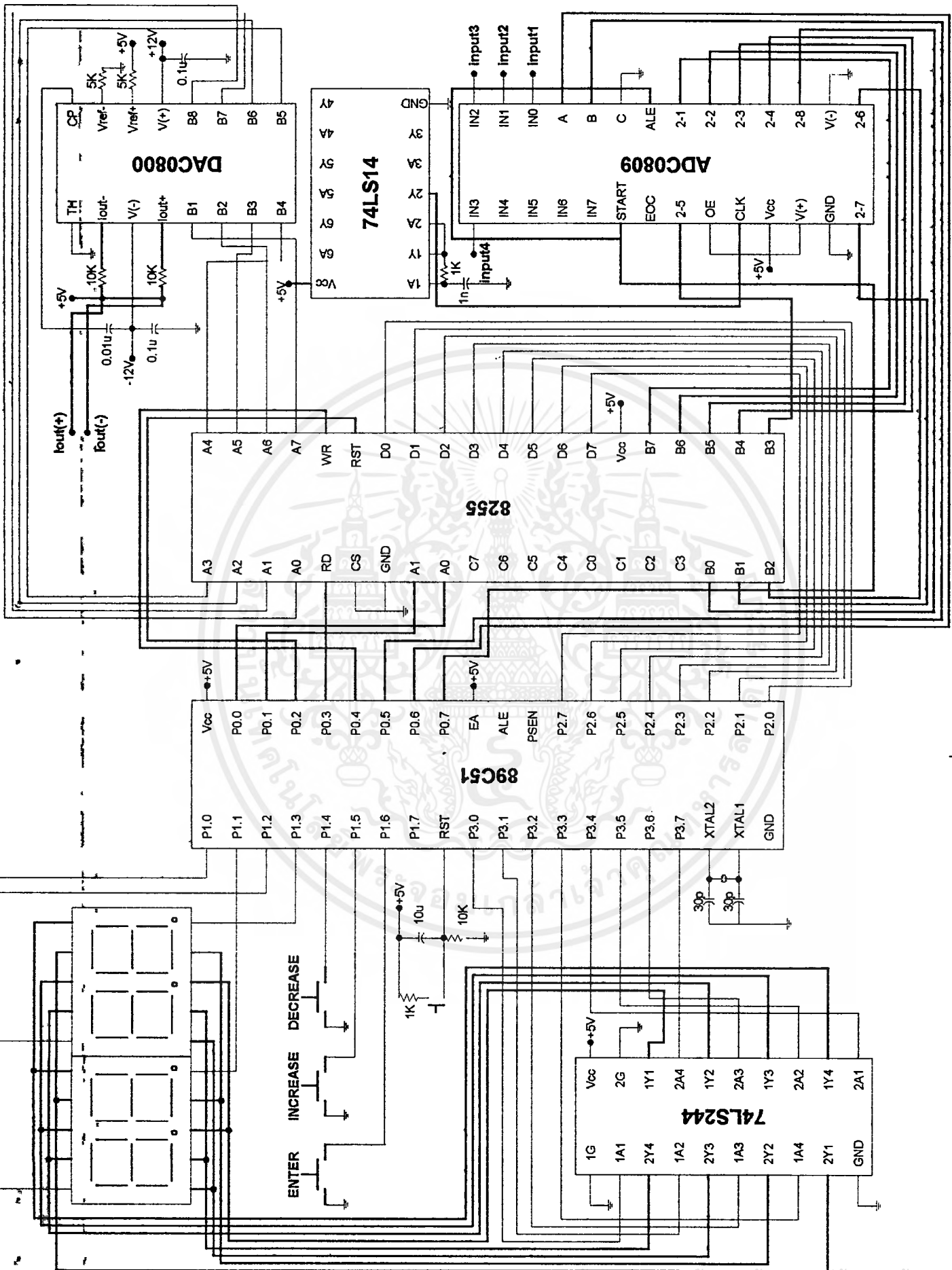
เป็นวงจรใช้งาน 89C51 รวมทั้งวงจร Reset ด้วยโดยเลือกให้ Crystal ความถี่ 12 MHz

4.9 วงจรกำเนิด CLOCK ให้ A/D



รูปที่ 4.9 วงจรกำเนิด clock 500KHz

เป็น Chip เบอร์ 74LS14 (Schmitt Trigger Converter) ใช้เป็นฐานเวลาให้แก่ ADC0809



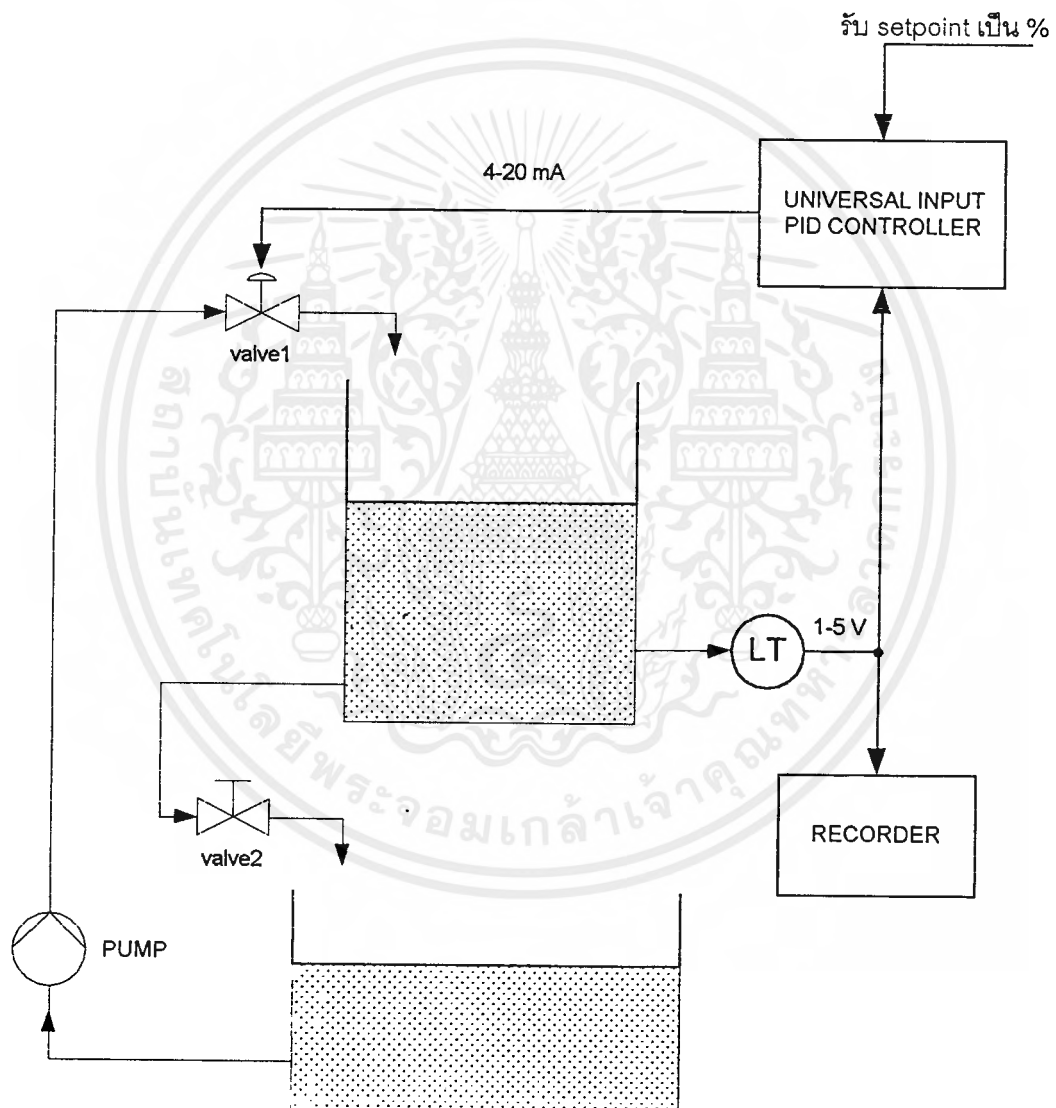
รูปที่ 4.10 วงจรในส่วนของ digital signal

บทที่ 5

การทดลอง และผลการทดลอง

5.1 การทดลอง

ได้ทำการทดสอบ Control Signal ของ Universal Input PID Controller โดยทำการต่อ Controller เข้ากับ Process ความคุมระดับน้ำ (Level Process) ดังรูปที่ 5.1

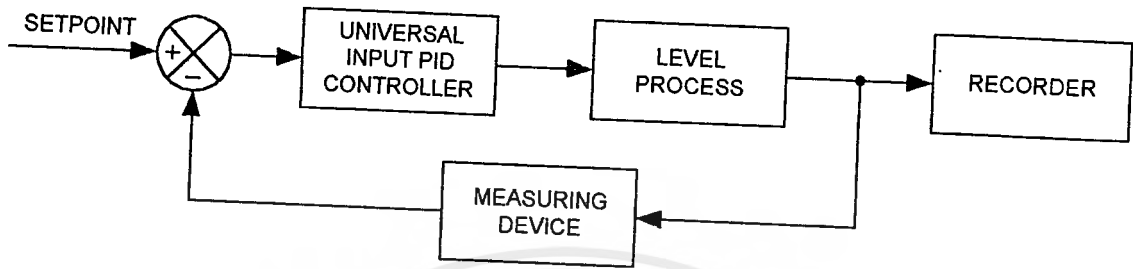


รูปที่ 5.1 Level Process

จากรูป Level Transmitter จะส่งสัญญาณจาก Process เป็นสัญญาณมาตรฐาน 1-5 V. ป้อนกลับเข้าสู่ Channel3 ของ Universal Input PID Controller และสัญญาณมาตรฐานนี้ จะถูกส่งตรงไปยัง Recorder เพื่อบันทึกผลด้วย สัญญาณ Output ของ Controller คือสัญญาณควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 Universal Input PID Controller
 ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Control Signal) เป็นสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA.ถูกส่งไปควบคุม Valve1 (Control Valve) เพื่อควบคุมอัตราการปล่อยน้ำที่ไหลเข้าแทงค์ ส่วนอัตราการไหลออกของน้ำที่ Valve2 (manual Valve) ถูกควบคุมไว้ให้คงที่ Process ทั้งหมดสามารถแสดงในรูปของ Block Diagram ได้ดังนี้

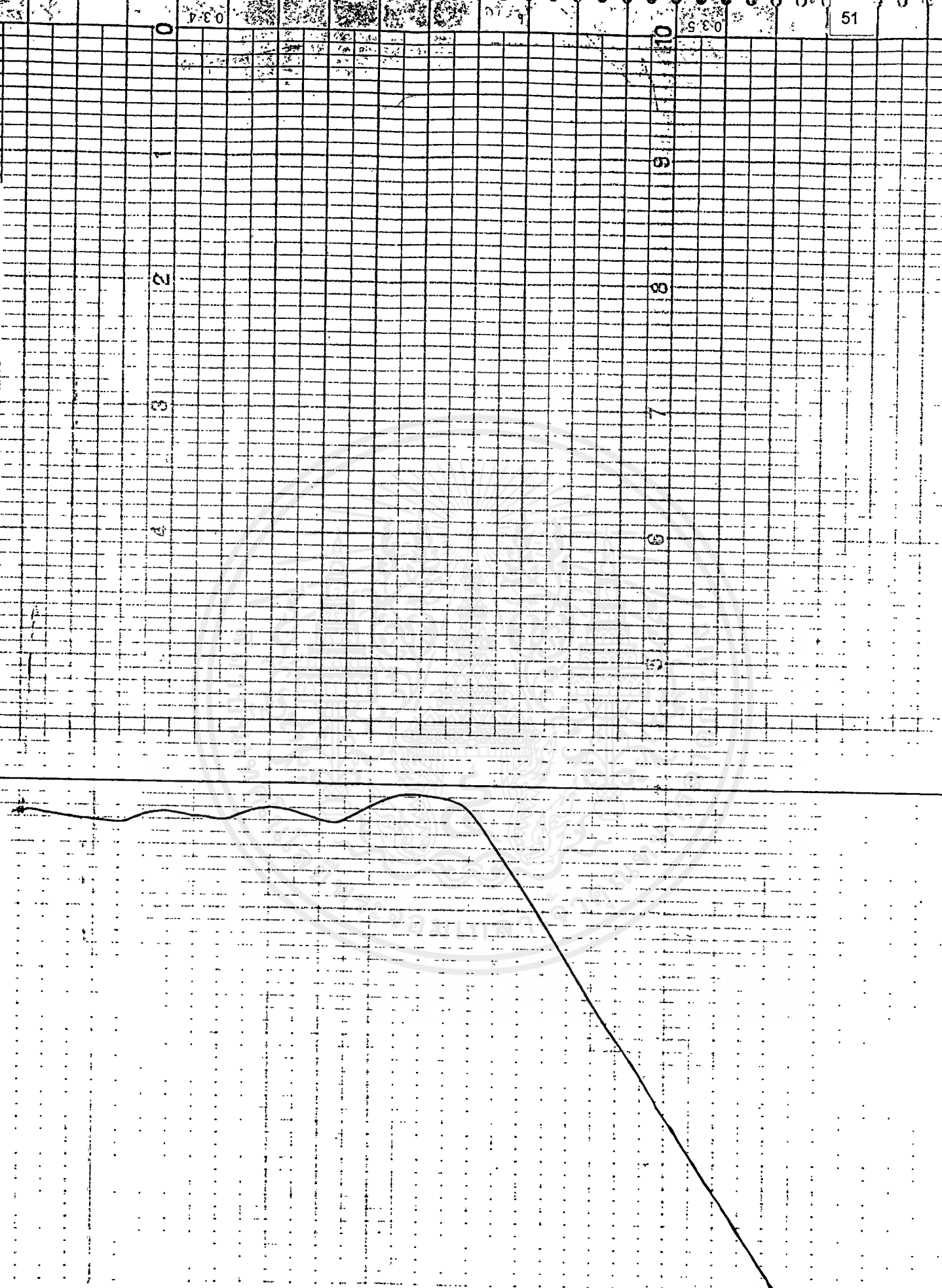


รูปที่ 5.2 Block Diagram ของ Level Process

5.2 ผลการทดลอง

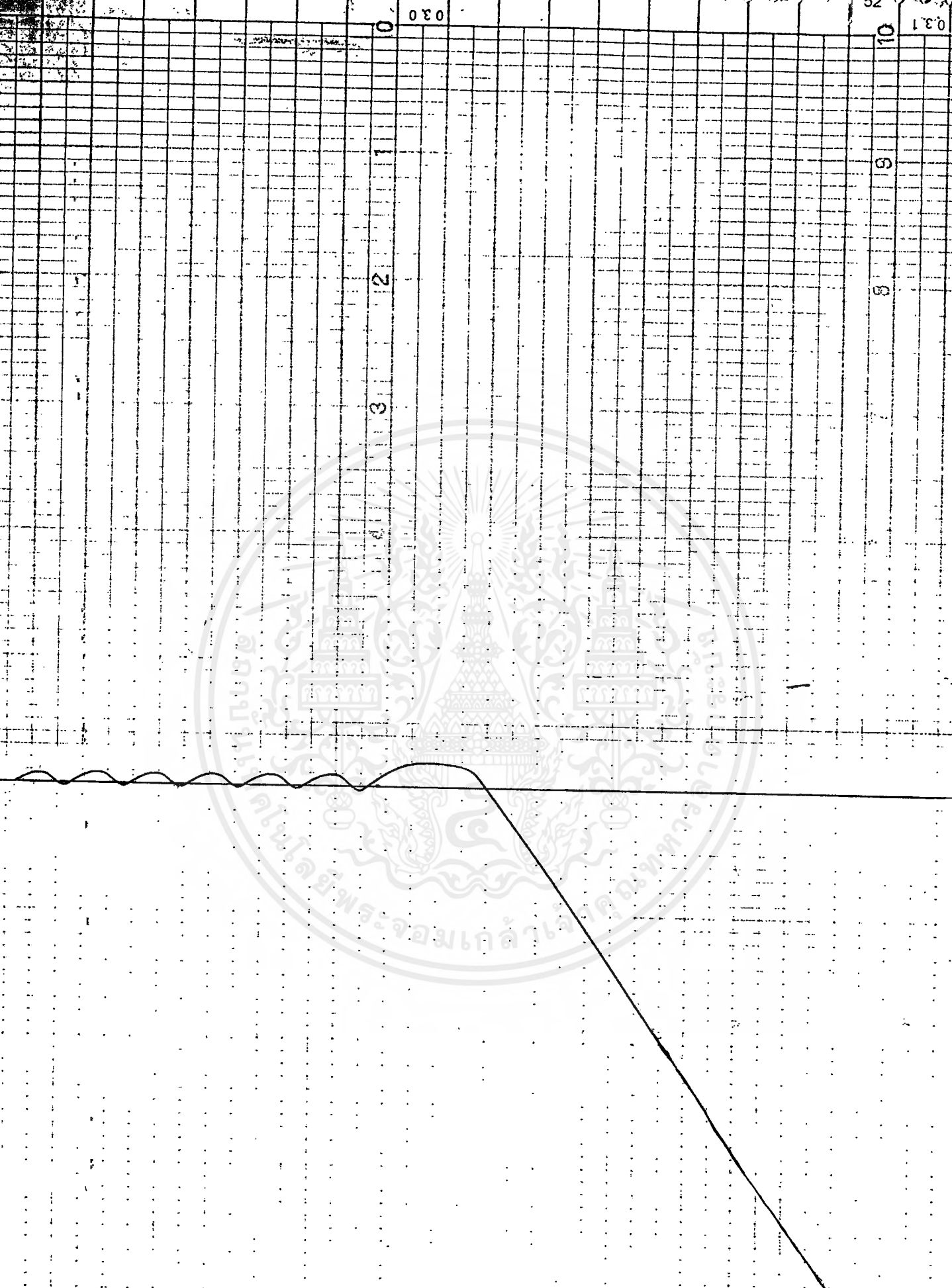
ทำการทดสอบโดยเลือก Input Channel3 ป้อนค่า Set point เป็น 40% แล้วลองการควบคุมใน mode ต่างๆ คือ P-Controller, PI-Controller และ PID-Controller รวมทั้งลองเปลี่ยนค่า Parameter ต่างๆอันได้แก่ K_p , K_i และ K_d ซึ่งผลของการควบคุมจะเป็นไปตามกราฟในรูปที่ 5.3 , 5.4 และ 5.5

จากกราฟในรูปที่ 5.3 เป็นผลการทดลองที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมแบบ P-Control ซึ่งมีค่า Offset เกิดขึ้นที่ Steady State ในกราฟรูปที่ 5.2 เป็นผลการทดลองที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมแบบ PI-Control โดยการป้อนค่า K_p เท่าเดิม ซึ่งการเพิ่มส่วนของ Integral Action สามารถแก้ Offset ที่เกิดขึ้นได้ ส่วนกราฟในรูปที่ 5.3 เป็นผลการทดลองที่เกิดจากการใช้ตัวควบคุมแบบ PID-Control ซึ่ง Overshoot จะลดลงต่ำกว่าเมื่อใช้ PI-Control จะเห็นว่าการควบคุมโดยใช้ Universal Input PID Controller สามารถควบคุมระบบให้มีเสถียรภาพที่ Setpoint ได้ โดยการ Set ค่า K_p , K_i , K_d ที่เหมาะสม ส่วนของการแกว่งที่ Setpoint นั้น มีสาเหตุมาจากการกระเพื่อมของผิวน้ำ เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของแทงค์น้ำใน Process ที่ใช้ทดลองมีขนาดเล็ก มีผลทำให้น้ำกระเพื่อมอยู่ตลอดเวลา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.3 กราฟผลการทดลอง $K_p=10$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 5.4 กราฟผลการทดลอง $K_p=10$ $K_i=3$

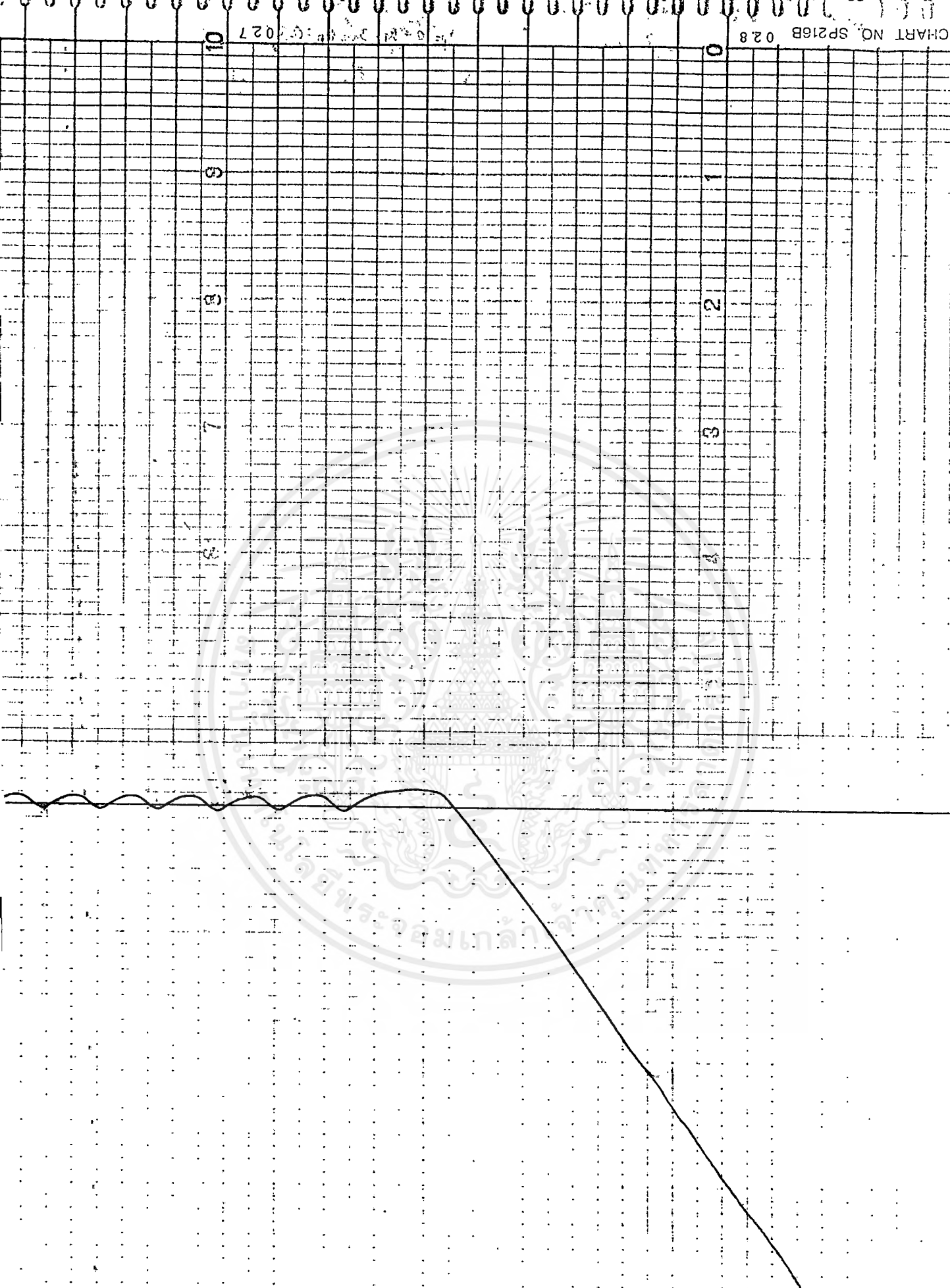


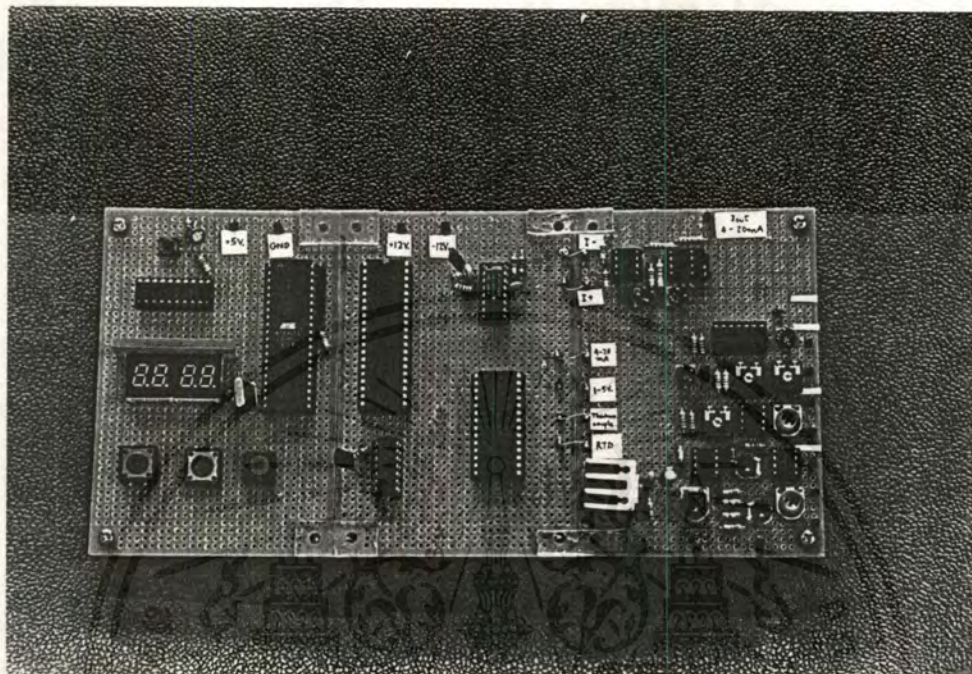
CHART NO. SP216B 028

027

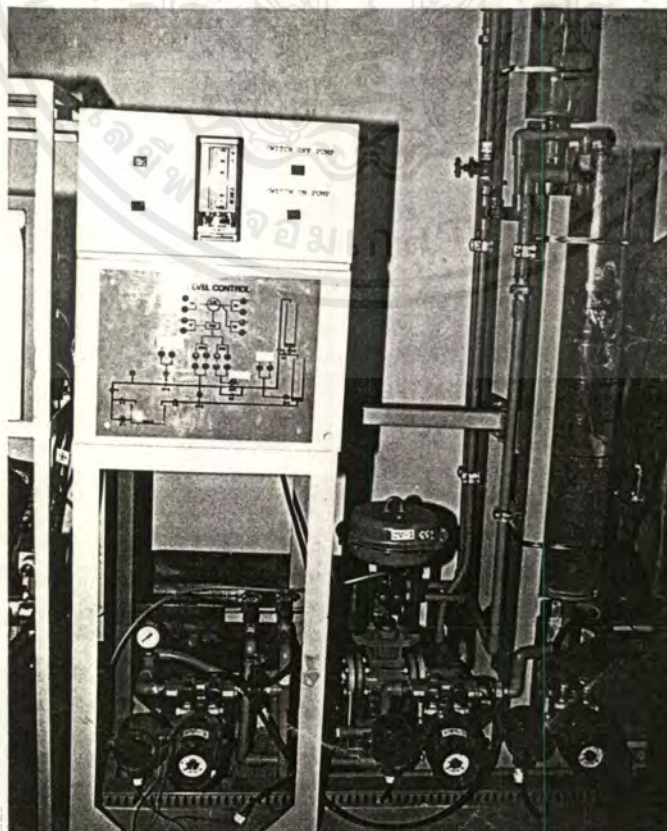
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.5 กราฟผลการทดลอง $K_p=10$ $K_i=3$ $K_d=0.2$

5.3 Universal Input PID Controller และ Level Process



รูปที่ 5.6 Universal Input PID Controller



รูปที่ 5.7 Level Process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก... ไปยังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุป และวิเคราะห์

สรุปผลการดำเนินงาน

ในการดำเนินงานตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา สามารถสรุปงานการทำงานทั้งหมด ได้ดังนี้

1. ส่วนรับ Input

ศึกษาการทำงาน และชนิดของ Temperature Sensor Device ซึ่งได้แก่ RTD และ Thermocouple

ศึกษาและออกแบบวงจร V/I (Voltage to Current Converter) และ I/V (Current to Voltage Converter)

ทำการปรับ และจูนค่าต่างๆ เพื่อที่จะรับค่า Input ทั้ง 4 ชนิดเข้ามา และแปลงให้อยู่ในรูปของความต่างศักย์ 0-5 V. เพื่อที่จะนำเข้าสู่ A/D ต่อไป

ศึกษาการทำงานของ A/D (Analog to Digital Converter) แบบต่างๆ และเลือกใช้ ADC0809 ซึ่งมี Multiplexer ในตัวเพื่อใช้ในการเลือก Channel ของ Input เพื่อที่จะนำเข้าสู่ส่วนคำนวณต่อไป

สำหรับวงจรที่รับค่า Input นั้นได้พยายามปรับให้มีค่า Error น้อยที่สุดเท่าที่อุปกรณ์และผู้ปฏิบัติจะทำได้ในขอบเขตหนึ่งๆ

2. ส่วน Program

ศึกษาและเลือกใช้ Microcontroller เบอร์ 89C51 ซึ่งประกอบด้วย ROM ขนาด 4K , RAM 128 Byte ซึ่งพอเพียงแก่การใช้งาน

ทำการขยาย Port โดยศึกษาการทำงานของ 8255 และใช้งานร่วมกับ 89C51 ทำให้มี port พอเพียงแก่การใช้งาน และยังมี Port เหลืออีก 1 Port

ศึกษาการคำนวณ PID Controller สำหรับ Digital Signal ว่ามีความแตกต่างกับสมการที่ใช้กับ Analog Signal อย่างไร รวมทั้งคิดสมการที่จะต้องใช้ในการเขียน Program ด้วย

ศึกษาและออกแบบการควบคุมคาบการสุ่มสัญญาณ (Sampling Period) ให้เท่ากับคาบการคำนวณใน Program (Calculating Period) เพื่อให้สัญญาณควบคุมมีความถูกต้อง

เขียน Program ในการรับค่า Set Point และ Mode จากทางคีย์บอร์ด และรับค่า Input จาก A/D รวมทั้งการส่งค่าสัญญาณควบคุมออกทาง D/A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียน Program คำนวณหาสัญญาณควบคุมด้วยหลักการของ PID Controller สำหรับ Digital Signal โดยออกแบบและมีการชดเชยให้ Error มีค่าน้อยที่สุด

3. ส่วน Output

ศึกษาการทำงานของ D/A (Digital to Analog Converter) แบบต่างๆ และเลือกใช้ DAC0800 เป็นตัวส่งสัญญาณควบคุมออกไป

ทำการปรับและจูนค่าต่างๆ ที่ได้จาก D/A ซึ่งมีขนาด $-10V - 10V$ เพื่อแปลงให้เป็นสัญญาณมาตรฐาน $4-20\text{ mA}$.

ปัญหาที่เกิดขึ้น และแนวทางการแก้ไข

1. ส่วนรับ Input

ปัญหาที่เกิดขึ้น และพบบ่อยที่สุด คือ ค่า Error ที่เกิดขึ้นจากค่าความผิดพลาดของตัว R และการปรับแต่งให้ได้ค่าที่ถูกต้อง (การหมุนปรับค่า R ปรับค่าได้) นอกจากนี้ยังมีในกรณีที่เมื่อมีความร้อนเพิ่มขึ้นจากการจ่าย Supply มีผลทำให้ค่า R มีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย

ซึ่งปัญหาในส่วนนี้อาจทำการแก้ไขได้โดยใช้ R ที่มีค่าความผิดพลาด น้อยๆ และใช้ R ปรับค่าได้ที่มีความละเอียด และมีการเปลี่ยนแปลงตาม อุณหภูมิน้อยมาก มาใช้แทน

นอกจากนี้ในส่วนของ ตัวรับ Input จาก Thermocouple นั้นยังมีจุดที่ซึ่งทำให้การใช้งานจริงยังไม่สมบูรณ์ เช่น ตัว Thermocouple ที่แท้จริงจะไม่ส่ง Current ออกมาด้วยซึ่งทำให้เราต้องสร้าง Current Source ขึ้นมาเอง และนอกจากนี้ยังต้องทำในส่วนของวงจร ที่ใช้เป็นตัวชดเชย อุณหภูมิห้อง เนื่องจากปรกติแล้ว Thermocouple จะต้องมี Reference Junction อยู่ที่ 0°C เสมอ ซึ่งในส่วนของการชดเชยนี้ RTD อาจจะต้องนำไปพิจารณาด้วย

2. ส่วน Program

เนื่องจากในส่วนของการคำนวณ PID Controller ต้องเกี่ยวข้องกับตัวเลขทศนิยมหลายตำแหน่ง ทำให้เกิดปัญหาในการเขียน Program ด้วย Software ภาษา Assembly เพราะการเปรียบเทียบมากกว่า-น้อยกว่า, ลักษณะการเก็บข้อมูลเป็น Byte, รวมทั้งการคิดเครื่องหมายวงเล็บในภาษา Assembly ค่อนข้างยุ่งยาก ทำให้การเก็บและคำนวณข้อมูล ทั้งตัวเลขจำนวนเต็ม จำนวนมาก ๆ และตัวเลขทศนิยมหลายตำแหน่ง เป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์ ซึ่งการคำนวณ PID Controller ให้มีประสิทธิภาพที่สุดนั้น ต้องสามารถเก็บค่า Error ที่ Process ได้ด้วยความละเอียด สูงๆ ดังนั้น ค่าต่างๆที่คำนวณได้ในภาษา Assembly นี้จึงยังไม่สมบูรณ์ โดยจะมี Error จากการเก็บและคำนวณข้อมูล อยู่ด้วยเสมอ ซึ่งต้องทำการชดเชยให้ Error เหล่านี้ มีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. อนุญาตให้ใช้ฟรีเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ส่วน Output

ปัญหาที่พบไม่ต่างจากส่วนของ input มากนัก คือ จะมีปัญหาเรื่องการจูนค่าให้ได้ถูกต้อง เนื่องจากตัว R มีค่าความผิดพลาดในตัวเอง และ ตัวผู้ปฏิบัติเองก็ไม่สามารถที่จะปรับค่าให้ได้ละเอียดอย่างที่ต้องการได้

4. ส่วนการทดลอง

ปัญหาที่พบในการทดลอง ส่วนแรก คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งคใน Process ที่ทดลอง มีขนาดเล็กเกินไป ทำให้ระดับน้ำใน Tank (ค่า Process Value) เปลี่ยนแปลงเร็ว จึงเกิดการแกว่งรอบ SET Point ที่ Steady State ตลอดเวลา ปัญหาอีกข้อที่พบในการทดลอง เกิดจากตัว Transmitter ของ Tank เนื่องจากที่เวลาเริ่มต้น ขณะที่ Tank ไม่มีน้ำอยู่เลย Transmitter น่าจะส่งค่า 1 V ออกมา แต่ในการทดลองจริงขณะไม่มีน้ำในถัง Transmitter ส่งค่าออกมาเกือบ 2 V ทำให้ในกราฟที่บันทึกจาก Recorder ในที่ PV น้อยกว่า 25% ต้องลากเส้นต่อลงไปเอง

อย่างไรก็ตาม การทำงานแบบ PID Controller ที่เขียนด้วย Software ภาษา Assembly ใน Universal Input PID Controller นี้ ก็ยังไม่สมบูรณ์ตามลักษณะของ PID Controller ทั้งหมด อันมีผลมาจากการที่ไม่สามารถเก็บ Error ได้ครบสมบูรณ์ จึงเป็นส่วนที่ต้องได้รับการพัฒนาต่อไป

แนวทางการพัฒนาในอนาคต

สำหรับการที่จะทำให้ Universal Input PID Controller สมบูรณ์ได้นั้น นอกจากจะต้องแก้ไขในส่วนที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ "ปัญหาที่เกิดขึ้น และแนวทางการแก้ไข" แล้ว ยังมีส่วนที่จะต้องได้รับการพัฒนาอีก ได้แก่ การเพิ่ม Option ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Auto-Turning ซึ่งจะมีบทบาทอย่างมากที่จะทำให้ตัว Universal Input PID Controller นั้นมีความหลากหลายมากขึ้น นอกจากนี้ยังอาจเพิ่ม Option ในส่วนของการคำนวณ โดยอาจใช้วิธี Optimal Control, Fussy Control ฯลฯ ซึ่งก็必将มีความสลับซับซ้อนเพิ่มขึ้นไป



ภาคผนวก ก

ผลการปรับแต่ง Input

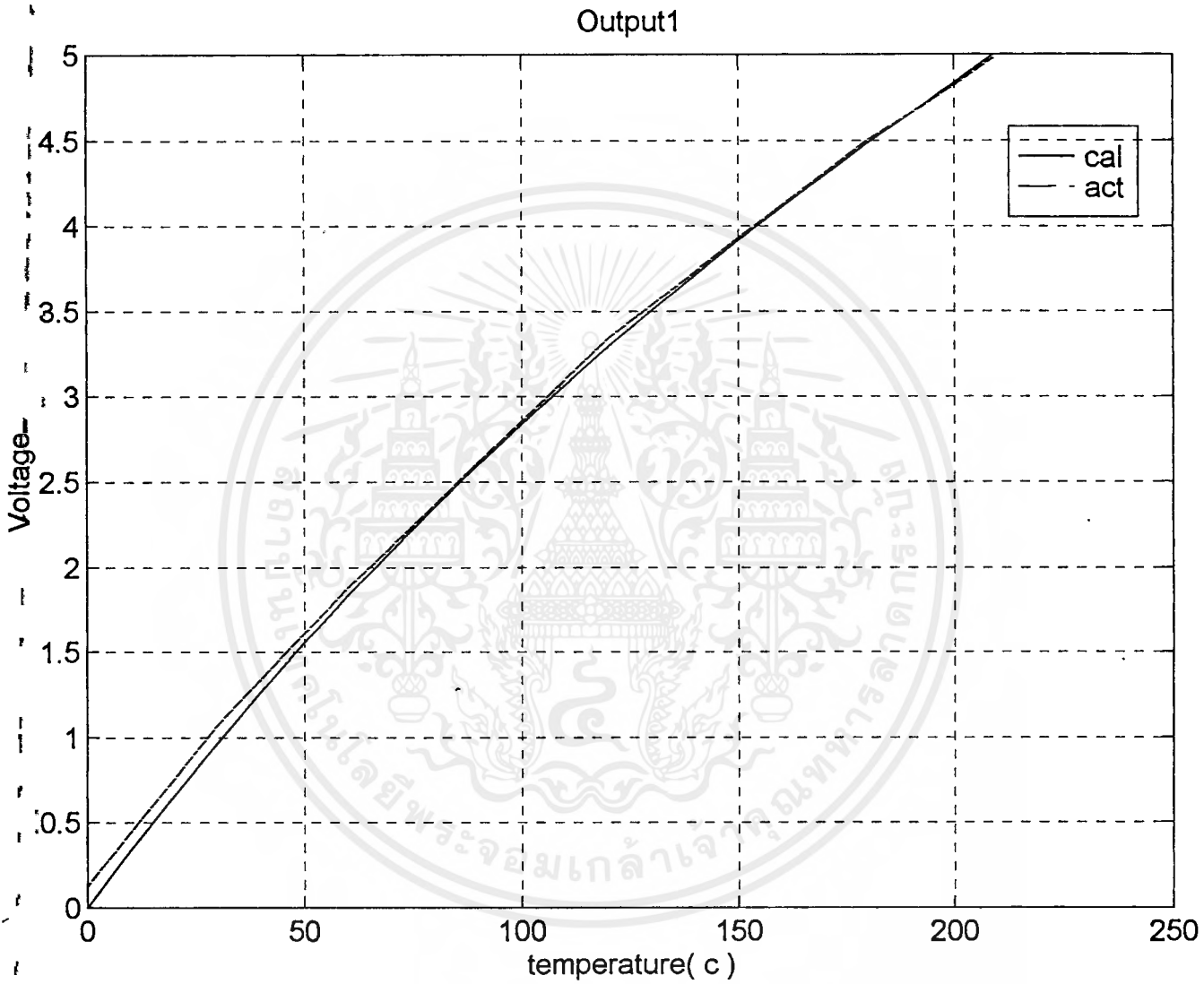
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Universal Input PID Controller ที่ได้ทำขึ้นสามารถรับ Input 4 ชนิด ซึ่ง Input 1 คือ RTD (pt100) โดยกำหนดให้รับค่าในช่วงอุณหภูมิ 0-210 °C (100-179.51Ω) โดยเมื่อผ่านวงจรรับ Input แล้ว จะได้ค่า Output 1 ออกเป็น Voltage 0-5 V ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-1

ตารางที่ ก.1 แสดงผลของวงจรส่วนรับ Input จาก RTD ชนิด pt100

อุณหภูมิ (°C)	Ohm (Ω)	Output 1 (V) (คำนวณ)	Output 1 (V) (วัดจริง)
0	100	0	0.125
10	103.90	0.336	0.442
20	107.79	0.659	0.758
30	111.67	0.969	1.075
40	115.54	1.267	1.342
50	119.40	1.554	1.609
60	123.24	1.830	1.876
70	127.07	2.095	2.121
80	130.89	2.352	2.366
90	134.70	2.599	2.611
100	138.50	2.837	2.854
110	142.28	3.067	3.097
120	146.06	3.290	3.34
130	149.82	3.505	3.537
140	153.57	3.713	3.733
150	157.32	3.915	3.93
160	161.05	4.111	4.12
170	164.76	4.299	4.31
180	168.47	4.483	4.50
190	172.16	4.660	4.66
200	175.84	4.833	4.82
210	179.51	5.000	4.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 กราฟแสดงผลระหว่าง Output ของวงจรรับ Input จาก RTD ที่มาจากการคำนวณ (Cal) และจากการวัดจริง (Act)

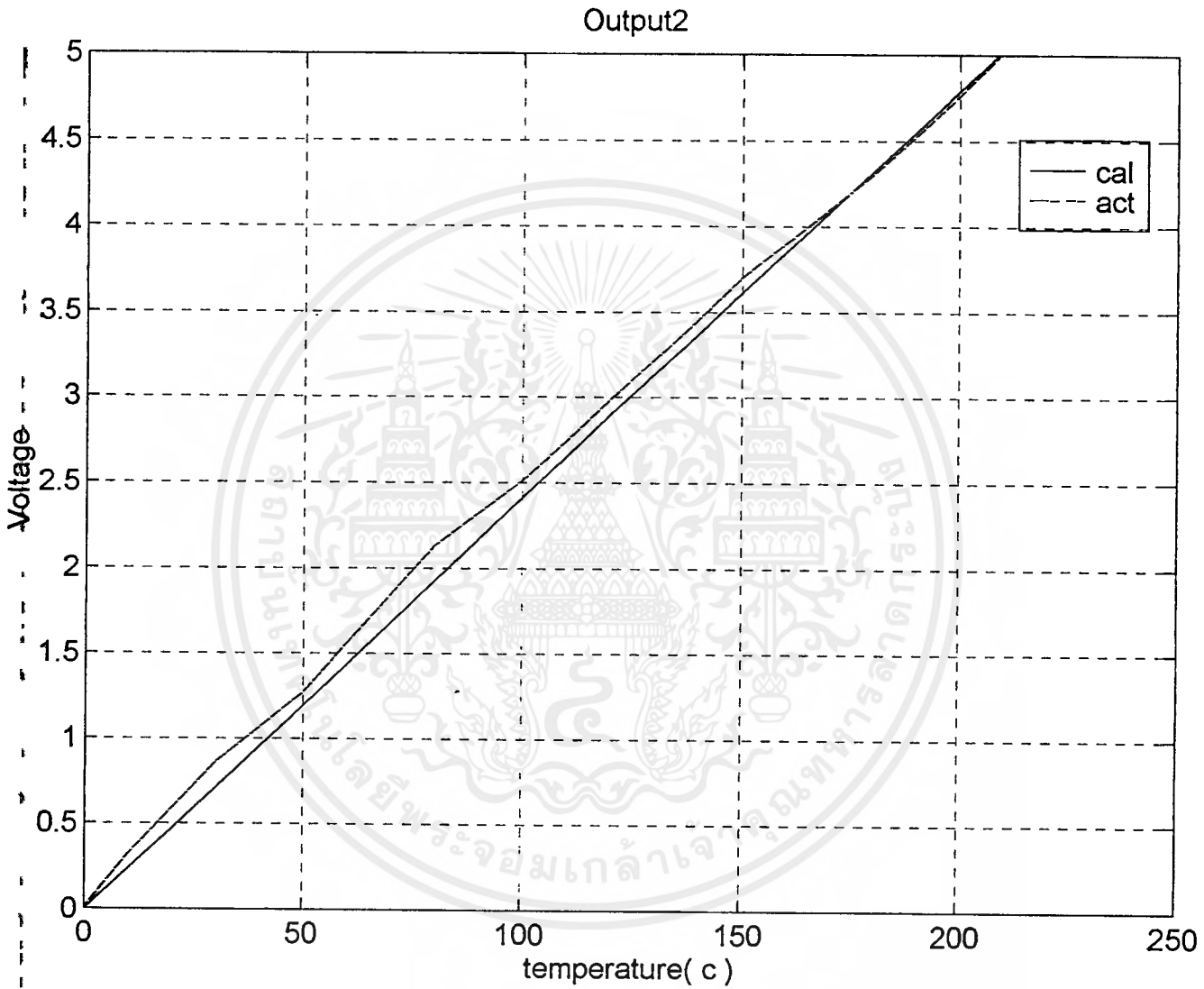
สำหรับ Input 2 ได้แก่ Thermocouple (K Type) โดยค่าที่รับได้จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 0-209 °C (0-8.497 mV) โดยเมื่อรับค่าผ่าน วงจร Input แล้วจะได้ค่า Output 2 ออกมาดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ ก.2 แสดงผลส่วนรับ Input จาก Thermocouple ชนิด K-Type

อุณหภูมิ (°C)	ค่าเอาต์พุตจาก Thermocouple (mV)	Output 2 (V) (คำนวณ)	Output 2 (V) (วัดจริง)
0	0	0	0.01
10	0.397	0.234	0.32
20	0.798	0.470	0.59
30	1.203	0.708	0.86
40	1.611	0.948	1.065
50	2.022	1.190	1.27
60	2.436	1.433	1.557
70	2.850	1.677	1.843
80	3.266	1.922	2.13
90	3.681	2.166	2.32
100	4.095	2.410	2.51
110	4.508	2.653	2.747
120	4.919	2.894	2.983
130	5.327	3.135	3.22
140	5.733	3.373	3.46
150	6.137	3.611	3.7
160	6.539	3.848	3.9
170	6.939	4.083	4.1
180	7.388	4.318	4.3
190	7.737	4.553	4.53
200	8.137	4.788	4.76
209	8.497	5	4.99

หมายเหตุ ค่า Output 2 ที่ได้นี้ เป็นการเทียบในกรณีที่ Reference Junction นั้นอยู่ที่ 0 °C และไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิห้อง(แต่ปรกติแล้ววงจรที่ได้จัดทำขึ้นไม่สามารถรับค่าที่ส่งออกมาจากตัว Thermocouple จริงๆ ได้ เนื่องจากไม่มีแหล่งจ่าย Current นั้นเอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่นำไปสู่การเผยแพร่เพื่อการศึกษานานาชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่วากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 กราฟแสดงผลระหว่าง Output ของวงจรรับ Input จาก Thermocouple ที่มาจากการคำนวณ (Cal) และจากการวัดจริง (Act)

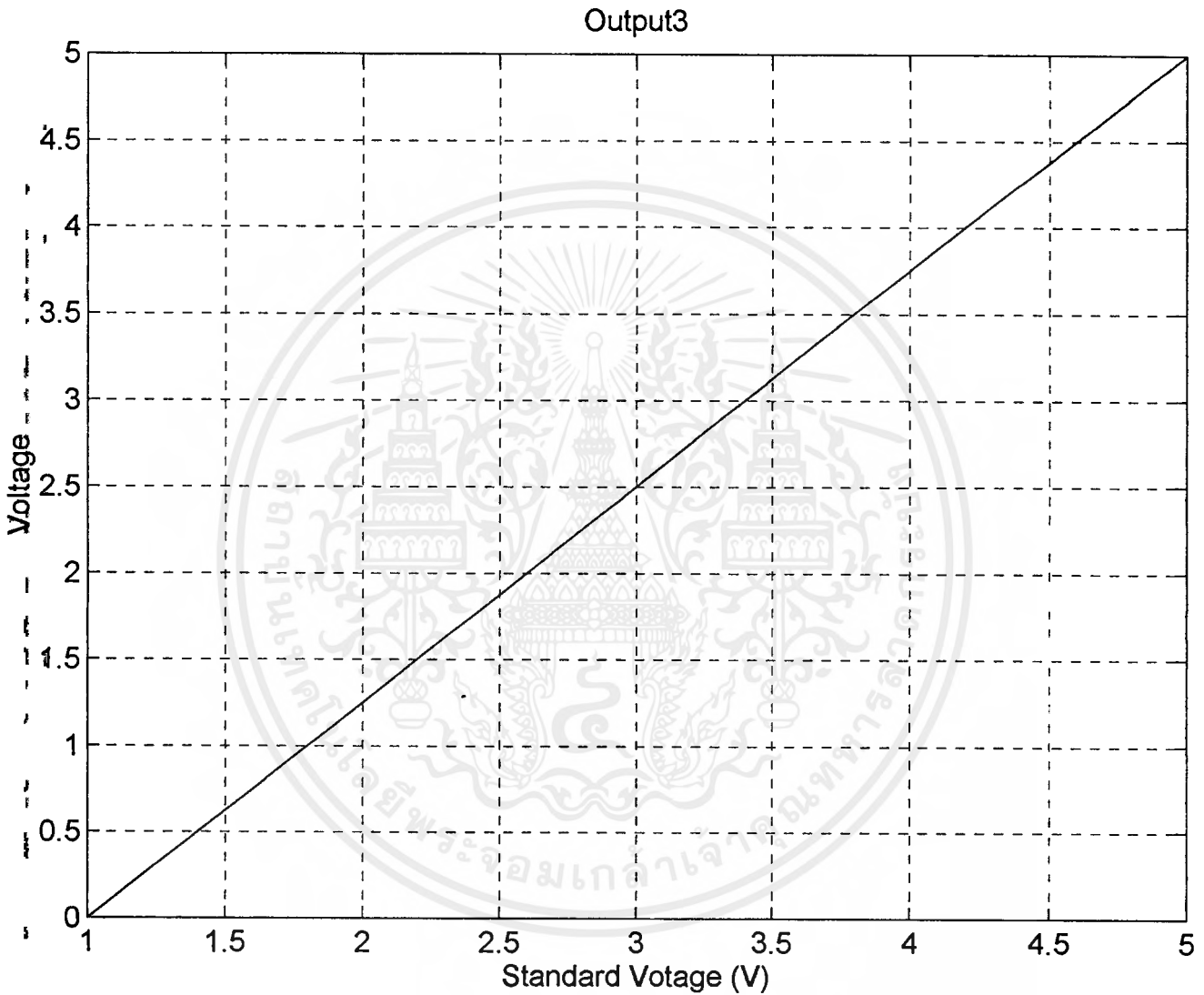
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วน Input ที่ 3 และ 4 คือ สัญญาณมาตรฐาน 1-5 V และสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA ตามลำดับ ซึ่งในส่วนนี้ค่าที่ได้จากการคำนวณ และการวัดจริงมีผลไม่ต่างกันมากนัก จึงจะขอแสดงให้เห็น เฉพาะค่าที่ได้จากการคำนวณเท่านั้น

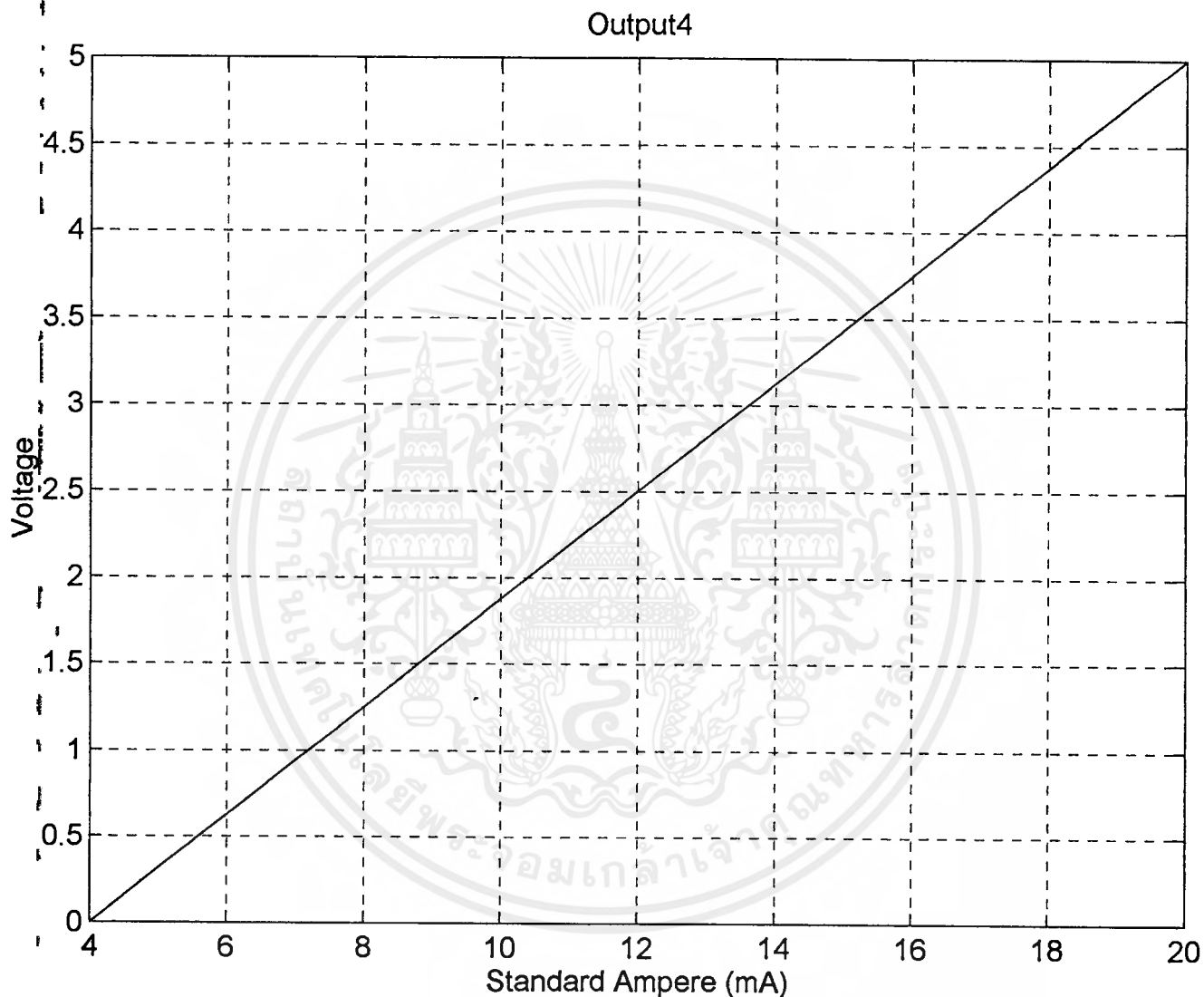
ตารางที่ ก.3 แสดงผลส่วนรับ Input จาก สัญญาณมาตรฐาน 1-5 V และ 4-20 mA

ค่า Voltage ที่รับมา (V)	Output 3 (V)	ค่า Ampere ที่รับมา (mA)	Output 4 (V)
1	0	4	0
1.4	0.5	5.5	0.469
1.8	1.0	7	0.9375
2.2	1.5	8.5	1.406
2.6	2.0	10	1.875
3.0	2.5	11.5	2.344
3.4	3.0	13	2.8125
3.8	3.5	14.5	3.281
4.2	4.0	16	3.75
4.6	4.5	17.5	4.219
5.0	5	20	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 กราฟแสดงผล Output จากการคำนวณของวงจรรับ Input จากสัญญาณมาตรฐาน 1-5 V.



รูปที่ ก.4 กราฟแสดงผล Output จากการคำนวณของวงจรรับ Input จากสัญญาณมาตรฐาน 4-20 mA.

เทอร์โมคัปเปิลแบบ K โครเมอ-อลูเมอ

หน่วยของการวัดเป็นองศาเซลเซียสจัดเทียบกับ Reference Junction 0° C

DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DEG C
THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS												
-270	-6.458											-270
-260	-6.441	-6.444	-6.446	-6.448	-6.450	-6.452	-6.453	-6.455	-6.456	-6.457	-6.458	-260
-250	-6.404	-6.408	-6.413	-6.417	-6.421	-6.425	-6.429	-6.432	-6.435	-6.438	-6.441	-250
-240	-6.344	-6.351	-6.358	-6.364	-6.371	-6.377	-6.382	-6.388	-6.394	-6.399	-6.404	-240
-230	-6.262	-6.271	-6.280	-6.289	-6.297	-6.306	-6.314	-6.322	-6.329	-6.337	-6.344	-230
-220	-6.158	-6.170	-6.181	-6.192	-6.202	-6.213	-6.223	-6.233	-6.243	-6.253	-6.262	-220
-210	-6.035	-6.048	-6.061	-6.074	-6.087	-6.099	-6.111	-6.123	-6.135	-6.147	-6.156	-210
-200	-5.891	-5.907	-5.922	-5.936	-5.951	-5.965	-5.980	-5.994	-6.007	-6.021	-6.036	-200
-190	-5.730	-5.747	-5.763	-5.780	-5.796	-5.813	-5.829	-5.845	-5.860	-5.876	-5.891	-190
-180	-5.550	-5.569	-5.587	-5.606	-5.624	-5.642	-5.660	-5.676	-5.695	-5.712	-5.730	-180
-170	-5.354	-5.374	-5.394	-5.414	-5.434	-5.454	-5.474	-5.493	-5.512	-5.531	-5.550	-170
-160	-5.141	-5.163	-5.185	-5.207	-5.226	-5.249	-5.271	-5.292	-5.313	-5.333	-5.354	-160
-150	-4.912	-4.936	-4.959	-4.983	-5.006	-5.029	-5.051	-5.074	-5.097	-5.119	-5.141	-150
-140	-4.669	-4.694	-4.719	-4.743	-4.766	-4.792	-4.817	-4.841	-4.865	-4.889	-4.912	-140
-130	-4.410	-4.437	-4.463	-4.489	-4.515	-4.541	-4.567	-4.593	-4.618	-4.644	-4.669	-130
-120	-4.136	-4.166	-4.193	-4.221	-4.246	-4.276	-4.303	-4.330	-4.357	-4.384	-4.410	-120
-110	-3.852	-3.881	-3.910	-3.939	-3.968	-3.997	-4.025	-4.053	-4.082	-4.110	-4.138	-110
-100	-3.553	-3.584	-3.614	-3.644	-3.674	-3.704	-3.734	-3.764	-3.793	-3.823	-3.852	-100
-90	-3.242	-3.274	-3.305	-3.337	-3.368	-3.399	-3.430	-3.461	-3.492	-3.523	-3.553	-90
-80	-2.920	-2.953	-2.985	-3.018	-3.050	-3.082	-3.115	-3.147	-3.179	-3.211	-3.242	-80
-70	-2.586	-2.620	-2.654	-2.687	-2.721	-2.754	-2.788	-2.821	-2.854	-2.887	-2.920	-70
-60	-2.243	-2.277	-2.312	-2.347	-2.381	-2.416	-2.450	-2.484	-2.518	-2.552	-2.586	-60
-50	-1.889	-1.925	-1.961	-1.996	-2.032	-2.067	-2.102	-2.137	-2.173	-2.208	-2.243	-50
-40	-1.527	-1.563	-1.600	-1.636	-1.673	-1.709	-1.745	-1.781	-1.817	-1.853	-1.889	-40
-30	-1.156	-1.193	-1.231	-1.268	-1.305	-1.342	-1.379	-1.416	-1.453	-1.490	-1.527	-30
-20	-0.777	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.966	-1.005	-1.043	-1.081	-1.118	-1.156	-20
-10	-0.392	-0.431	-0.469	-0.508	-0.547	-0.586	-0.624	-0.662	-0.701	-0.739	-0.777	-10
0	0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353	-0.392	0
DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DEG C
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.236	0.277	0.317	0.357	0.397	0
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798	10
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.162	1.203	20
30	1.203	1.244	1.285	1.325	1.366	1.407	1.448	1.489	1.529	1.570	1.611	30
40	1.611	1.652	1.693	1.734	1.776	1.817	1.858	1.899	1.940	1.981	2.022	40
50	2.022	2.064	2.105	2.146	2.188	2.229	2.270	2.312	2.353	2.394	2.436	50
60	2.436	2.477	2.519	2.560	2.601	2.643	2.684	2.726	2.767	2.809	2.850	60
70	2.850	2.892	2.933	2.975	3.016	3.058	3.100	3.141	3.183	3.224	3.266	70
80	3.266	3.307	3.349	3.390	3.432	3.473	3.515	3.556	3.598	3.639	3.681	80
90	3.681	3.723	3.764	3.805	3.847	3.888	3.930	3.971	4.012	4.054	4.095	90
100	4.096	4.137	4.178	4.219	4.261	4.302	4.343	4.384	4.426	4.467	4.508	100
110	4.508	4.549	4.590	4.632	4.673	4.714	4.755	4.796	4.837	4.878	4.919	110
120	4.919	4.960	5.001	5.042	5.083	5.124	5.164	5.205	5.246	5.287	5.327	120
130	5.327	5.368	5.409	5.450	5.490	5.531	5.571	5.612	5.652	5.693	5.733	130
140	5.733	5.774	5.814	5.855	5.895	5.936	5.976	6.016	6.057	6.097	6.137	140
150	6.137	6.177	6.218	6.258	6.298	6.338	6.378	6.419	6.459	6.499	6.539	150
160	6.539	6.579	6.619	6.659	6.699	6.739	6.779	6.819	6.859	6.899	6.939	160
170	6.939	6.979	7.019	7.059	7.099	7.139	7.179	7.219	7.259	7.299	7.338	170
180	7.338	7.378	7.418	7.458	7.498	7.538	7.578	7.618	7.658	7.697	7.737	180
190	7.737	7.777	7.817	7.857	7.897	7.937	7.977	8.017	8.057	8.097	8.137	190
200	8.137	8.177										200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สอบเทียบค่าของอาร์ทีคัทกับอุณหภูมิ (DIN 43760)

แบบพลาคินัม 100 Ω ที่ 0°C								
°C Ohm Ohm/°C			°C Ohm Ohm/°C			°C Ohm Ohm/°C		
-10	96.07	0.393	280	204.88	0.358	570	303.95	0.325
± 0	100.00	0.390	290	208.46	0.357	580	307.20	0.323
10	103.90	0.389	+300	212.03	0.355	590	310.43	0.322
20	107.79	0.388	310	215.58	0.355	+600	313.65	0.321
30	111.67	0.387	320	219.13	0.353	610	316.86	0.319
40	115.54	0.386	330	222.66	0.352	620	320.05	0.319
50	119.40	0.386	340	226.18	0.351	630	323.24	0.317
60	123.24	0.383	350	229.69	0.350	640	326.41	0.316
70	127.07	0.382	360	233.19	0.348	650	329.57	0.315
80	130.89	0.381	370	236.67	0.348	660	332.72	0.314
90	134.70	0.380	380	240.15	0.346	670	335.86	0.313
+100	138.50	0.378	390	243.61	0.345	680	338.99	0.311
110	142.28	0.378	+400	247.06	0.344	690	342.10	0.311
120	146.06	0.376	400	250.50	0.343	+700	345.21	0.309
130	149.82	0.375	420	253.93	0.341	710	348.30	0.308
140	153.57	0.375	430	257.34	0.341	720	351.38	0.307
150	157.32	0.373	440	260.75	0.339	730	354.45	0.306
160	161.05	0.371	450	264.14	0.338	740	357.51	0.304
170	164.76	0.371	460	267.52	0.337	750	360.55	0.304
180	168.47	0.369	470	270.89	0.336	760	363.59	0.304
190	172.16	0.368	480	274.25	0.335	770	366.61	0.302
+200	175.84	0.367	490	277.60	0.333	780	369.62	0.301
210	179.51	0.366	+500	280.93	0.332	790	372.62	0.300
220	183.17	0.365	510	284.25	0.332	+800	375.61	0.299
230	186.82	0.364	520	287.57	0.330	810	378.59	0.298
240	190.46	0.362	530	290.87	0.329	820	381.55	0.296
250	194.08	0.362	540	294.16	0.327	830	384.50	0.295
260	197.70	0.360	550	297.43	0.327	840	387.45	0.295
270	201.30	0.358	560	300.70	0.325	850	390.38	0.293



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DB	06H	;1
DB	40H	;-
DB	66H	;4
DB	00H	;
DB	00H	;
DB	00H	;

END



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

; ##### UNIVERSAL INPUT PID CONTROLLER #####

;P0=SELECT BIT 8255,A/D
 ;P1=INPUT FROM SWITCHES & OUTPUT TO BIT SELECTOR
 ;P2=CONNECT 8255 :INPUT FROM A/D & OUTPUT TO D/A
 ;P3=OUTPUT TO 7-SEGMENTS
 ;ASSIGN Ts=0.01Sec (10mS) :KP=3 :KI=2 :KD=0.1

MODE	EQU	20H
STEP	EQU	21H
SETPOINT	EQU	22H
OEDIV	EQU	23H
OEMOD	EQU	24H
EDIV	EQU	25H
EMOD	EQU	26H
PDIV	EQU	27H
PMOD	EQU	28H
IDIV	EQU	29H
IMOD	EQU	30H
DDIV	EQU	31H
DMOD	EQU	32H
KP	EQU	33H
KI	EQU	34H
KDTs	EQU	35H
STEP7	EQU	36H
INDIV	EQU	37H
INMOD	EQU	38H

JMP START
 ORG 000BH
 JMP CONTROLLER

; ##### START PROGRAM #####

```
START:
MOV    KP,#3D
MOV    KI,#2D
MOV    KDTs,#10D

MOV    SP,#50H           ;STACK POINTER
MOV    TMOD,#11H        ;TIMER MODE
MOV    IE,#82H          ;INTERUPT ENABLE
MOV    IP,#02H          ;INTERUPT PRIORITY
MOV    IDIV,#0D
MOV    IMOD,#0D
MOV    OEDIV,#0D
MOV    OEMOD,#0D
MOV    STEP,#1D         ;INITIAL STEP
MOV    R0,#0D           ;SET FOR RUNNING STRING
MOV    R2,#0D
CLR    PSW.3            ;USES BLANK1
CLR    PSW.4
MOV    A,#27H           ;SET TIMER0 TO INTERRUPT
CPL    A                ;EVERY 10mS
MOV    TH0,A
MOV    A,#10H
CPL    A
MOV    TL0,A
SETB   P0.2            ;RESET 8255
```

```

MOV     P0,#0BH           ;SELECT TO BE CONTROL WORD
SETB   P0.3             ;CLEAR 8255
SETB   P0.4

;MOV    P2,#0AAH         ;MOV DATA TO PORT A
;CLR    P0.0             ;SELECT PORT A
;CLR    P0.1
;CLR    P0.4
;SETB   P0.3             ;CLEAR 8255
;SETB   P0.4

```

```

FIRST:  MOV     STEP7,#0BFH ;SHOW RUNNING 'SELECT
        MOV     A,R2        ;INPUT 1-4'
        CALL    TABLE2
        MOV     R1,A
        INC     R2
        MOV     A,R2
        CALL    TABLE2
        MOV     R3,A
        INC     R2
        MOV     A,R2
        CALL    TABLE2
        MOV     R5,A
        INC     R2
        MOV     A,R2
        CALL    TABLE2
        MOV     R7,A

```

```

; ##### CONNECT 7-SEGMENTS #####

```

```

DATAOUT: CLR     PSW.3      ;USES BLANK1
          CLR     PSW.4
          MOV     P3,R1     ;SEND NUMBER DATA TO EACH BIT
          CLR     P1.0
          CALL    DELAY
          SETB   P1.0
          MOV     P3,R3
          CLR     P1.1
          CALL    DELAY
          SETB   P1.1
          MOV     P3,R5
          CLR     P1.2
          CALL    DELAY
          SETB   P1.2
          MOV     P3,R7
          CLR     P1.3
          CALL    DELAY
          SETB   P1.3
          MOV     A,STEP
          CJNE   A,#7D,CHK
          DJNZ   STEP7,DATAOUT
          JMP    PV
CHK:     JNB    P1.4,SW1   ;CHECK KEY ENTER
          JNB    P1.5,SW2J ;CHECK KEY INCREASE
          JNB    P1.6,SW3J ;CHECK KEY DECREASE
          MOV     A,STEP   ;CHECK FOR RUNNING WORDS
          CJNE   A,#1D,DATAOUT
          MOV     A,R0
          CJNE   A,#18D,FST ;IF END MAKE LOOP
          MOV     R0,#0D
          MOV     R2,#0D
          JMP    FIRST

```

```

MOV    A, R0
MOV    R2, A
JMP    FIRST
JMP    SW2
    
```

SW2J:

; ##### CONNECT KEYBOARD #####

```

SW1:    JNB    P1.4, $
        MOV    A, STEP
        CJNE   A, #1D, ENTER2          ; IF STEP1
        MOV    R1, #00H                ; NONE
        MOV    R3, #00H                ; NONE
        MOV    R5, #00H                ; NONE
        MOV    R6, #01H                ; KEEP VALUE 1
        MOV    R7, #06H                ; 1
        INC    STEP
        JMP    DATAOUT                ; WAIT FOR MODE
ENTER2: MOV    A, STEP
        CJNE   A, #2D, ENTER3          ; IF STEP2
        MOV    MODE, R6                ; KEEP MODE
        MOV    R5, #6DH                ; S
        MOV    R7, #0F3H               ; P.
        INC    STEP
        JMP    DATAOUT
ENTER3: MOV    A, STEP
        CJNE   A, #3D, ENTER4          ; IF STEP3
        MOV    R4, #5D                 ; 5
        MOV    R5, #6DH                ; 5
        MOV    R7, #6DH                ; 5
        INC    STEP
        JMP    DATAOUT                ; WAIT FOR SETPOINT BIT2
SW3J:   JMP    SW3
ENTER4: MOV    A, STEP
        CJNE   A, #4D, ENTER5          ; IF STEP4
        MOV    A, R4                   ; KEEP SETPOINT BIT2
        MOV    B, #10D
        MUL   AB
        MOV    SETPOINT, A
        INC    STEP
        JMP    DATAOUT                ; WAIT FOR SETPOINT BIT1
ENTER5: MOV    A, STEP
        CJNE   A, #5D, ENTER6          ; IF STEP5
        MOV    A, R6
        ADD    A, SETPOINT              ; KEEP SETPOINT BIT1
        MOV    SETPOINT, A             ; GET SETPOINT 2 BITS
        MOV    R3, #6EH                ; Y
        MOV    R5, #79H                ; E
        MOV    R7, #6DH                ; S
        INC    STEP
DATAOUTJ: JMP    DATAOUT
ENTER6: MOV    A, STEP
        CJNE   A, #6D, DATAOUTJ       ; IF STEP6
        SETB   TR0                     ; START TIMER0
        INC    STEP                    ; STEP=7
        JMP    DATAOUT
SW2:    JNB    P1.5, $
        MOV    A, STEP
        CJNE   A, #2D, INC3            ; IF STEP2
        INC    R6
        CJNE   R6, #5D, BIT4           ; IF BIT4 > 4 THEN BIT4 = 4
        MOV    R6, #4D
    
```

SW2:

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามละเมิดเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV      P2,#0FFH      ;CLEAR PORT2 TO BE INPUT
SETB    P0.0           ;CHOOSE 8255 PORT B
CLR     P0.1           ;
SETB    P0.4           ;DISABLE WRITE
CLR     P0.3           ;READ
MOV     A,P2           ;MOVE DATA FROM A/D
SETB    P0.3           ;CLEAR 8255
SETB    P0.4
MOV     B,#10D        ;%INPUT=(99/255) INPUT
DIV     AB             ;%INPUT=0.4*INPUT
MOV     R0,A          ;IF %INPUT>30% %INPUT-=1
MOV     R1,B          ;IF %INPUT>70% %INPUT-=2
MOV     A,R0
MOV     B,#4D
MUL     AB
MOV     R0,A
MOV     A,R1
MOV     B,#4D
MUL     AB
MOV     B,#10D
DIV     AB
MOV     R1,B
ADD     A,R0
MOV     R0,A
MAKEUP:  CLR     C             ;MAKE UP ERROR
MOV     A,R0
SUBB    A,#30D        ;IF>30% THEN -1
JC      LESS30
MOV     A,R0
SUBB    A,#70D        ;IF>70% THEN -2
JC      LESS70
MOV     A,R0
CJNE   A,#102D,LESS100 ;IF>100% THEN =100.0
MOV     R0,#100D
MOV     R1,#0D
JMP     LESS30
LESS100: DEC     R0
DEC     R0
JMP     LESS30
LESS70:  DEC     R0
LESS30:  MOV     INDIV,R0
MOV     INMOD,R1
NEXT:    MOV     A,R0             ;SHOW PV AND POINT
CJNE   A,#100D,NXT    ;IF PV=100 THEN 100.0
MOV     R1,#06H
MOV     R3,#3FH
MOV     R5,#0BFH
MOV     R7,#3FH
JMP     DATAOUT
NXT:     MOV     B,#10D
DIV     AB
MOV     R4,B             ;VALUE BIT3
MOV     B,#10D
DIV     AB
MOV     R2,B             ;VALUE BIT2
MOV     R0,A             ;VALUE BIT1
MOV     A,R1
MOV     R6,A             ;VALUE BIT4
MOV     A,R0
CJNE   A,#0D,NXT1
MOV     R1,#0H           ;IF BIT1=0 THEN NO DATA
JMP     NXT2

```

```

NXT2:      MOV      A,R2
           CJNE     A,#0D,NXT3
           MOV      R3,#0H                ;IF BIT2=0 THEN NO DATA
           JMP      NXT4
NXT3:      CALL     TABLE
           MOV      R3,A                ;GET NUMBER DATA BIT2
NXT4:      MOV      A,R4
           CALL     TABLE
           ORL      A,#80H              ;MAKE POINT
           MOV      R5,A                ;GET NUMBER DATA BIT3
           MOV      A,R6
           CALL     TABLE
           MOV      R7,A                ;GET NUMBER DATA BIT4
           MOV      STEP7,#3FH         ;SET SENSIBILITY OF PV
           JMP      DATAOUT

```

```

; ##### FIND CONTROLLER SIGNAL #####

```

```

CONTROLLER:  PUSH     ACC
             SETB    PSW.3              ;USES BLANK2
             CLR     PSW.4
             MOV     R2,#0D              ;SET FLAG FOR I-ACTION ONLY
             MOV     R3,#0D              ;SET FLAG FOR NEGATIVE ERROR
             MOV     R4,#0D              ;SET FLAG FOR NEG-D
             MOV     R5,#0D
             MOV     A,#27H              ;START TIMER0 AGAIN
             CPL     A
             MOV     TH0,A
             MOV     A,#10H
             CPL     A
             MOV     TL0,A
             SETB    TR0
             CLR     C

             MOV     A,SETPOINT          ;ERROR=SETPOINT-INPUT
             SUBB    A,INDIV
             JNC     NEXT1
             MOV     A,INDIV              ;IF NEGATIVE ERROR
             SUBB    A,SETPOINT          ;R3=1
             MOV     R3,#1D
NEXT1:       MOV     EDIV,A
             MOV     A,INMOD
             CJNE    A,#0D,NEXT2         ;IF INPUT HAS NO MOD
             MOV     EMOD,#0D
             JMP     NEXT3
NEXT2:       MOV     A,#10D              ;IF INPUT HAS MOD
             SUBB    A,INMOD
             MOV     EMOD,A
             DEC     EDIV
NEXT3:       CJNE    R3,#1,P_CONTROLLER  ;IF NEGATIVE ERROR
             MOV     R7,#00D             ;OUTPUT=0
             MOV     R2,#2D             ;R2=2
             JMP     I_CONTROLLER

```

```

P_CONTROLLER:  MOV     A,EDIV            ;P-ACTION
             MOV     B,KP
             MUL     AB
             MOV     PDIV,A
             MOV     A,B

```

```

             CJNE    A,#0H,OVERP        ;IF PDIV<255
             MOV     A,PDIV
             SUBB    A,#100D

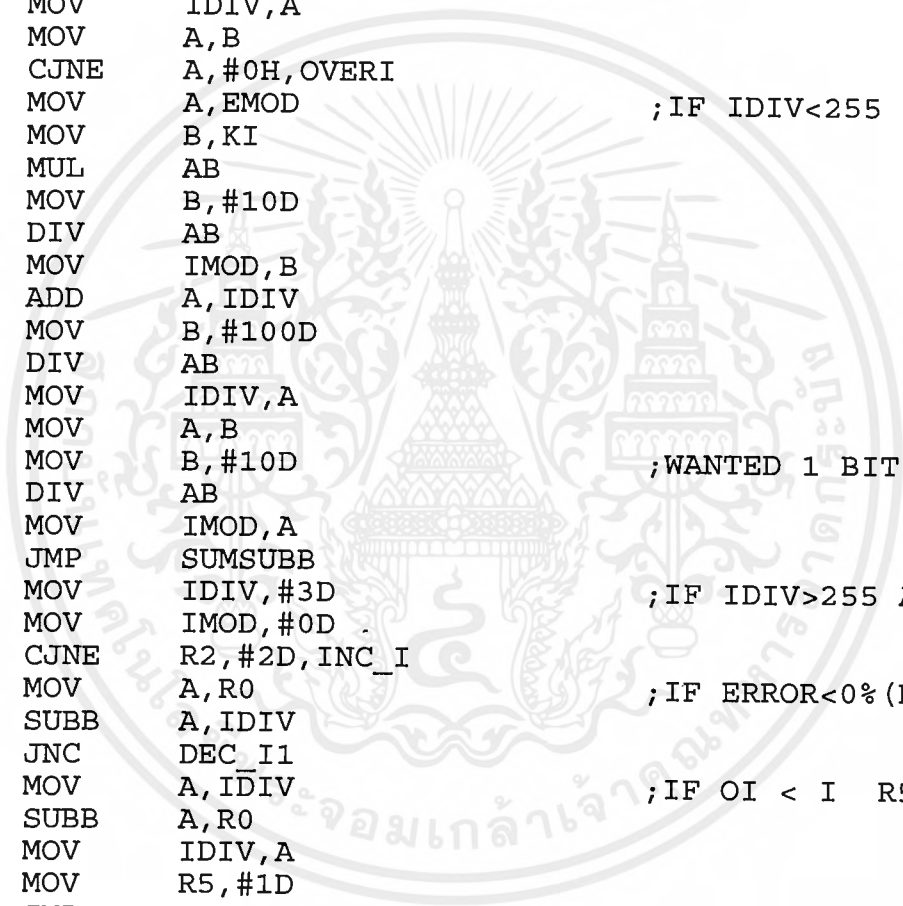
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

WORKP:  MOV      A,EMOD                ;IF PDIV<100
        MOV      B,KP                ;CALCULATE P
        MUL      AB
        MOV      B,#10D
        DIV      AB
        MOV      PMOD,B
        ADD      A,PDIV
        MOV      PDIV,A
        JMP      I_CONTROLLER
OVERP:  MOV      R7,#100D              ;IF PDIV>100 THEN OUTPUT=255
        MOV      R2,#1D                ;R2=1
I_CONTROLLER:  MOV      R0,IDIV          ;I-ACTION
        MOV      R1,IMOD              ;KEEP OLD I-DATA
        MOV      A,EDIV
        MOV      B,KI
        MUL      AB
        MOV      IDIV,A
        MOV      A,B
        CJNE     A,#0H,OVERI
WORKI:  MOV      A,EMOD                ;IF IDIV<255
        MOV      B,KI
        MUL      AB
        MOV      B,#10D
        DIV      AB
        MOV      IMOD,B
        ADD      A,IDIV
        MOV      B,#100D
        DIV      AB
        MOV      IDIV,A
        MOV      A,B
        MOV      B,#10D                ;WANTED 1 BIT AFTER POINT
        DIV      AB
        MOV      IMOD,A
        JMP      SUMSUBB
OVERI:  MOV      IDIV,#3D              ;IF IDIV>255 ASSUME 300/100=3
        MOV      IMOD,#0D
SUMSUBB:  CJNE     R2,#2D,INC_I
DEC_I:  MOV      A,R0                  ;IF ERROR<0% (R2=2) DEC OLD I
        SUBB     A,IDIV
        JNC      DEC_I1
        MOV      A,IDIV                ;IF OI < I  R5=1
        SUBB     A,R0
        MOV      IDIV,A
        MOV      R5,#1D
        JMP      DECIDE
DEC_I1:  MOV      IDIV,A                ;IF I>0 KEEP I
        MOV      A,R1
        SUBB     A,IMOD
        JC       DEC_I2
        MOV      IMOD,A                ;IF MOD OI > MOD I KEEP I
        JMP      DECIDE
DEC_I2:  DEC      IDIV                  ;IF MOD OI < MOD I DEC I
        MOV      A,IMOD
        SUBB     A,R1
        MOV      IMOD,A
        MOV      A,#10D
        SUBB     A,IMOD
        MOV      IMOD,A
        JMP      DECIDE
INC_I:  MOV      A,R0                  ;IF R2=0 AND R2=1 INC OLD I
        ADD      A,IDIV

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ในการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเปิดเผยเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

JNC      INC_I1
MOV      A,R1                      ;IF 0<I<100 KEEP I
ADD      A,IMOD
MOV      B,#10D
DIV      AB
ADD      A,IDIV
MOV      IDIV,A
MOV      IMOD,B
JMP      DECIDE
INC_I1:  MOV      IDIV,#100D          ;IF I>100 I=100
DECIDE:  MOV      IMOD,#0D
CJNE     R2,#0D,OUTJ                ;IF R2=1 OR R2=2 SKIP TO OUT

D_CONTROLLER: MOV      A,EDIV
SUBB     A,OEDIV
JNC      NEXTD1
MOV      A,OEDIV                    ;IF NEGATIVE D
SUBB     A,EDIV                      ;R4=1
MOV      DDIV,A
MOV      R4,#1D
JMP      NEXTD3
NEXTD1:  MOV      DDIV,A
MOV      A,EMOD                      ;POSITIVE D
SUBB     A,OEMOD
JNC      NEXTD2
DEC      DDIV
MOV      A,OEMOD
SUBB     A,EMOD
MOV      DMOD,A
MOV      A,#10D
SUBB     A,DMOD
NEXTD2:  MOV      DMOD,A
JMP      NEXTD5
NEXTD3:  MOV      A,EMOD              ;NEGATIVE D
SUBB     A,OEMOD
JC       NEXTD4
MOV      DMOD,A
DEC      DDIV
MOV      A,#10D
SUBB     A,DMOD
MOV      DMOD,A
JMP      NEXTD5
OUTJ:    JMP      OUT
NEXTD4:  MOV      A,OEMOD
SUBB     A,EMOD
MOV      DMOD,A
NEXTD5:  MOV      A,DDIV              ;*KD*Ts
MOV      B,KDTs
MUL      AB
MOV      DDIV,A
MOV      A,B
CJNE     A,#0H,OVERD                ;IF DDIV<255
MOV      A,DDIV
SUBB     A,#100D
JC       WORKD
JMP      OVERD
WORKD:   MOV      A,DMOD              ;IF D<100
MOV      B,KDTs                      ;CALCULATE D
MUL      AB
MOV      B,#10
DIV      AB
ADD      A,DDIV

```

```

OVERD:      JMP      SUM
            MOV      DDIV,#100D      ;IF D>100 D=100
            MOV      DMOD,#0D

SUM:        MOV      A,R5
            CJNE     A,#0,SUB
            MOV      A,PDIV          ;P+I
            ADD      A,IDIV
            MOV      R7,A
            SUBB     A,#100D
            JNC      EXCEED
            MOV      A,PMOD          ;IF SUM<100 KEEP SUM
            ADD      A,IMOD
            MOV      B,#10D
            DIV      AB
            ADD      A,R7
            MOV      R7,A
            JMP      OUT

EXCEED:    MOV      R7,#100D        ;IF SUM>100 SUM=100
            JMP      OUT

SUB:        MOV      A,PDIV          ;P-I
            SUBB     A,IDIV
            JC       LESS
            MOV      R7,A            ;IF P>I
            MOV      A,PMOD
            SUBB     A,IMOD
            JNC      OUT
            DEC      R7              ;IF PMOD<IMOD DEC SUM
            JMP      OUT

LESS:      MOV      R7,#0D
            JMP      OUT

SUMPID:    MOV      A,R4
            CJNE     A,#0,SUBPID
            MOV      A,R7            ;PI+D
            ADD      A,DDIV
            MOV      R7,A
            SUBB     A,#100D
            JNC      EXCEEDPID
            MOV      A,DMOD          ;IF SUM<100 KEEP SUM
            SUBB     A,#5D
            JC       OUT
            INC      R7
            JMP      OUT

EXCEEDPID: MOV      R7,#100D        ;IF SUM>100 SUM=100
            JMP      OUT

SUBPID:    MOV      A,R7            ;PI-D
            SUBB     A,DDIV
            JC       LESSPID
            MOV      R7,A            ;IF P>I
            MOV      A,DMOD
            SUBB     A,#5D
            JC       OUT
            DEC      R7              ;IF PMOD<IMOD DEC SUM
            JMP      OUT

LESSPID:   MOV      R7,#0D

OUT:       MOV      A,R7            ;(0-100)*2.5 = (0-255)
            MOV      B,#2D          ;/2 *5
            DIV      AB
            MOV      R6,B
            MOV      B,#5D

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV    A,R6
MOV    B,#5D
MUL   AB
MOV    B,#10D
DIV   AB
ADD   A,R7

```

TO8255:

```

MOV    P2,A           ;MOV DATA TO PORT A
CLR    P0.0          ;SELECT PORT A
CLR    P0.1
SETB   P0.3
CLR    P0.4
SETB   P0.3           ;CLEAR 8255
SETB   P0.4

```

MAKEPULSE:

```

JNB    P1.7,MAKE1    ;TO CHECK SAMPLING PERIOD
CLR    P1.7
JMP    OUT1

```

MAKE1:

```

SETB   P1.7

```

OUT1:

```

POP    ACC
RETI                   ;END CONTROLLER

```

; ##### DELAY LOOP & TABLE #####

DELAY:

```

PUSH   00H           ;DELAY LOOP
MOV    R0,#0FFH
DJNZ   R0,$
POP    00H
RET

```

TABLE:

```

INC    A
MOVC   A,@A+PC      ;NUMBER DATA TABLE
RET

```

```

DB    3FH           ;0
DB    06H           ;1
DB    5BH           ;2
DB    4FH           ;3
DB    66H           ;4
DB    6DH           ;5
DB    7DH           ;6
DB    07H           ;7
DB    7FH           ;8
DB    67H           ;9

```

TABLE2:

```

INC    A           ;SELECT INPUT 1-4 TABLE
MOVC   A,@A+PC
RET

```

```

DB    00H           ;
DB    00H           ;
DB    00H           ;
DB    6DH           ;S
DB    79H           ;E
DB    38H           ;L
DB    79H           ;E
DB    39H           ;C
DB    78H           ;T
DB    00H           ;
DB    06H           ;I
DB    37H           ;N
DB    73H           ;P

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ADC0808/ADC0809 8-Bit μ P Compatible A/D Converters with 8-Channel Multiplexer

General Description

The ADC0808, ADC0809 data acquisition component is a monolithic CMOS device with an 8-bit analog-to-digital converter, 8-channel multiplexer and microprocessor compatible control logic. The 8-bit A/D converter uses successive approximation as the conversion technique. The converter features a high impedance chopper stabilized comparator, a 256R voltage divider with analog switch tree and a successive approximation register. The 8-channel multiplexer can directly access any of 8 single-ended analog signals.

The device eliminates the need for external zero and full-scale adjustments. Easy interfacing to microprocessors is provided by the latched and decoded multiplexer address inputs and latched TTL TRI-STATE® outputs.

The design of the ADC0808, ADC0809 has been optimized by incorporating the most desirable aspects of several A/D conversion techniques. The ADC0808, ADC0809 offers high speed, high accuracy, minimal temperature dependence, excellent long-term accuracy and repeatability, and consumes minimal power. These features make this device ideally suited to applications from process and machine control to consumer and automotive applications. For 16-channel multiplexer with common output (sample/hold port) see ADC0816 data sheet. (See AN-247 for more information.)

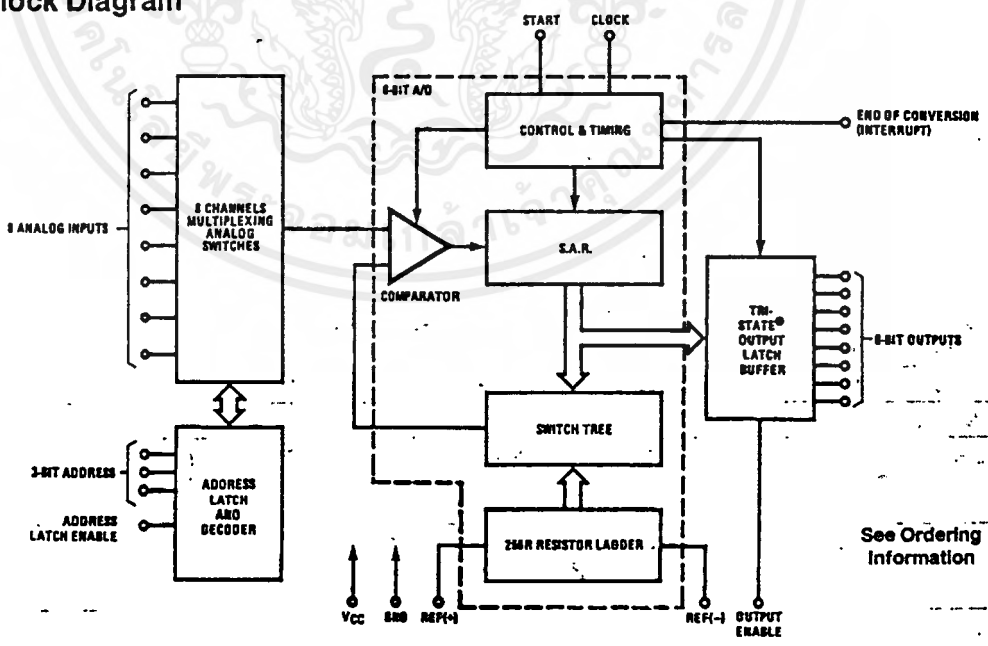
Features

- Easy interface to all microprocessors
- Operates ratiometrically or with 5 V_{DC} or analog span adjusted voltage reference
- No zero or full-scale adjust required
- 8-channel multiplexer with address logic
- 0V to 5V input range with single 5V power supply
- Outputs meet TTL voltage level specifications
- Standard hermetic or molded 28-pin DIP package
- 28-pin molded chip carrier package
- ADC0808 equivalent to MM74C949
- ADC0809 equivalent to MM74C949-1

Key Specifications

■ Resolution	8 Bits
■ Total Unadjusted Error	$\pm 1/2$ LSB and ± 1 LSB
■ Single Supply	5 V _{DC}
■ Low Power	15 mW
■ Conversion Time	100 μ s

Block Diagram



See Ordering Information

TL/H/5672-1

°C, TO +85°C
 JC0801LCN
 JC0802LCN
 JC0803LCN
 JC0805LCN

DIP

ge

DB5
 DB6
 DB7 (MSB)
 D GND
 /REF/2

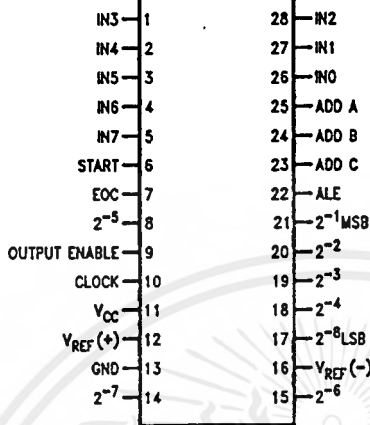
TL/H/5671-32

100
 100
 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่วากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Connection Diagrams

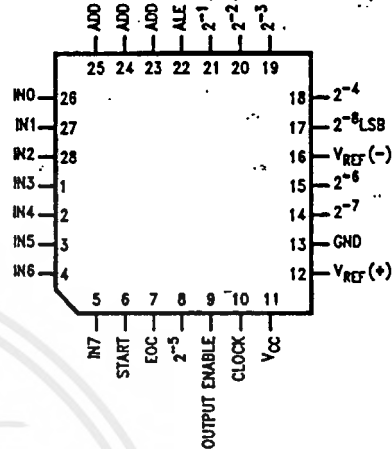
Dual-In-Line Package



TL/H/5672-11

Order Number ADC0808CCN, ADC0809CCN,
ADC0808CCJ or ADC0808CJ
See NS Package J28A or N28A

Molded Chip Carrier Package



TL/H/5672-12

Order Number ADC0808CCV or ADC0809CCV
See NS Package V28A

Timing Diagram

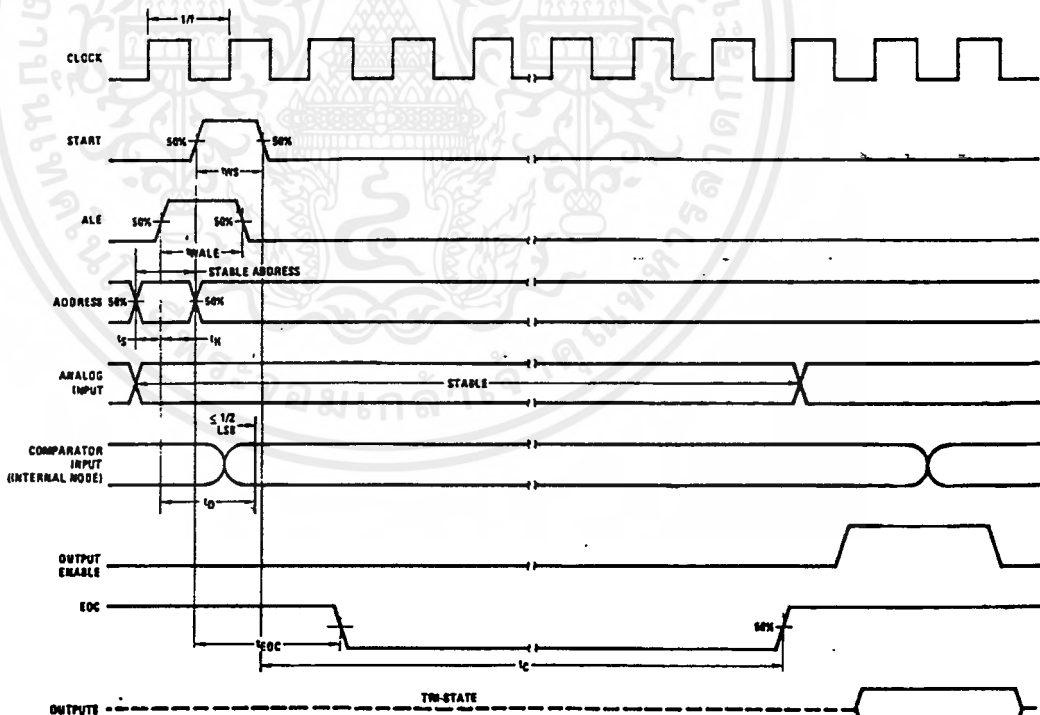
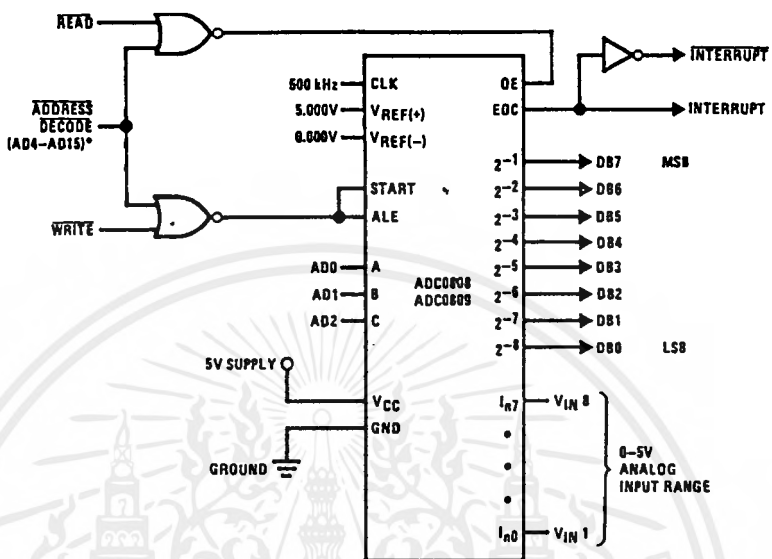


FIGURE 5

TL/H/5672-4

Typical Application



*Address latches needed for 8085 and SC/MP interfacing the ADC0808 to a microprocessor

TL/H/5672-10

MICROPROCESSOR INTERFACE TABLE

PROCESSOR	READ	WRITE	INTERRUPT (COMMENT)
8080	MEMR	MEMW	INTR (Thru RST Circuit)
8085	RD	WR	INTR (Thru RST Circuit)
Z-80	RD	WR	INT (Thru RST Circuit, Mode 0)
SC/MP	NRDS	NWDS	SA (Thru Sense A)
6800	VMA $\cdot\phi$ 2 \cdot R/W	VMA $\cdot\phi$ \cdot R/W	IRQA or IRQB (Thru PIA)

Ordering Information

TEMPERATURE RANGE		-40°C to +85°C			-55°C to +125°C
Error	$\pm 1/2$ LSB Unadjusted	ADC0808CCN	ADC0808CCV	ADC0808CCJ	ADC0808CJ
	± 1 LSB Unadjusted	ADC0809CCN	ADC0809CCV		
Package Outline		N28A Molded DIP	V28A Molded Chip Carrier	J28A Ceramic DIP	J28A Ceramic DIP

PUT
AL TO
T
3.75V

ducers

TL/H/5672-0

sed by the per-
es. These are
asistor ladder/
input as part of
parator.

current varies
shown in Fig.

inputs and the
mparator input
s, as the tran-
will die out be-

reduction and
ut the dynamic
the character-
be predicted

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DAC0800/DAC0801/DAC0802 8-Bit Digital-to-Analog Converters

General Description

The DAC0800 series are monolithic 8-bit high-speed current-output digital-to-analog converters (DAC) featuring typical settling times of 100 ns. When used as a multiplying DAC, monotonic performance over a 40 to 1 reference current range is possible. The DAC0800 series also features high compliance complementary current outputs to allow differential output voltages of 20 V_{p-p} with simple resistor loads as shown in Figure 1. The reference-to-full-scale current matching of better than ±1 LSB eliminates the need for full-scale trims in most applications while the nonlinearities of better than ±0.1% over temperature minimizes system error accumulations.

The noise immune inputs of the DAC0800 series will accept TTL levels with the logic threshold pin, V_{LC}, grounded. Changing the V_{LC} potential will allow direct interface to other logic families. The performance and characteristics of the device are essentially unchanged over the full ±4.5V to ±18V power supply range; power dissipation is only 33 mW with ±5V supplies and is independent of the logic input states.

The DAC0800, DAC0802, DAC0800C, DAC0801C and DAC0802C are a direct replacement for the DAC-08, DAC-08A, DAC-08C, DAC-08E and DAC-08H, respectively.

Features

- Fast settling output current 100 ns
- Full scale error ±1 LSB
- Nonlinearity over temperature ±0.1%
- Full scale current drift ±10 ppm/°C
- High output compliance -10V to +18V
- Complementary current outputs
- Interface directly with TTL, CMOS, PMOS and others
- 2 quadrant wide range multiplying capability
- Wide power supply range ±4.5V to ±18V
- Low power consumption 33 mW at ±5V
- Low cost

Typical Applications

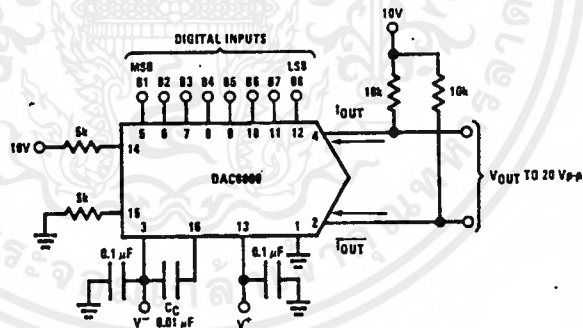


FIGURE 1. ±20 V_{p-p} Output Digital-to-Analog Converter (Note 4)

TL/H/5688-1

Ordering Information

Non-Linearity	Temperature Range	Order Numbers				
		J Package (J16A)*		N Package (N16A)*		SO Package (M16A)
±0.1% FS	0°C ≤ T _A ≤ +70°C	DAC0802LCJ	DAC-08HQ	DAC0802LCN	DAC-08HP	DAC0802LCM
±0.19% FS	-55°C ≤ T _A ≤ +125°C	DAC0800LJ	DAC-08Q			
±0.19% FS	0°C ≤ T _A ≤ +70°C	DAC0800LCJ	DAC-08EQ	DAC0800LCN	DAC-08EP	DAC0800LCM
±0.39% FS	0°C ≤ T _A ≤ +70°C			DAC0801LCN	DAC-08CP	DAC0801LCM

*Devices may be ordered by using either order number.

Electrical Characteristics (Continued)

The following specifications apply for $V_S = \pm 15V$, $I_{REF} = 2\text{ mA}$ and $T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$ unless otherwise specified. Output characteristics refer to both I_{OUT} and $\overline{I_{OUT}}$.

Symbol	Parameter	Conditions	DAC0802LC			DAC0800L/ DAC0800LC			DAC0801LC			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
P_D	Power Dissipation	$\pm 5V, I_{REF} = 1\text{ mA}$		33	48		33	48		33	48	mW
		$5V, -15V, I_{REF} = 2\text{ mA}$		108	136		108	136		108	136	mW
		$\pm 15V, I_{REF} = 2\text{ mA}$		135	174		135	174		135	174	mW

Note 1: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its specified operating conditions.

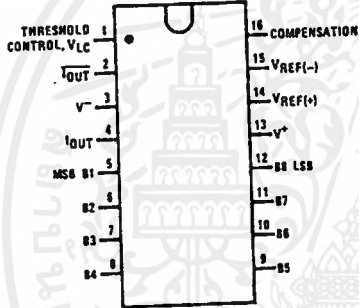
Note 2: The maximum junction temperature of the DAC0800, DAC0801 and DAC0802 is 125°C. For operating at elevated temperatures, devices in the Dual-In-Line J package must be derated based on a thermal resistance of 100°C/W, junction-to-ambient, 175°C/W for the molded Dual-In-Line N package and 100°C/W for the Small Outline M package.

Note 3: Human body model, 100 pF discharged through a 1.5 kΩ resistor.

Note 4: Pin-out numbers for the DAC080X represent the Dual-In-Line package. The Small Outline package pin-out differs from the Dual-In-Line package.

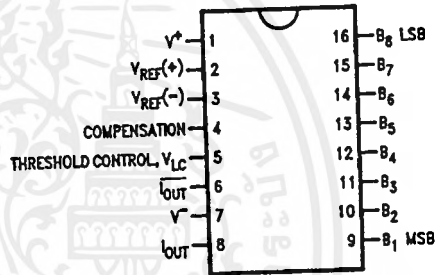
Connection Diagrams

Dual-In-Line Package



Top View

Small Outline Package



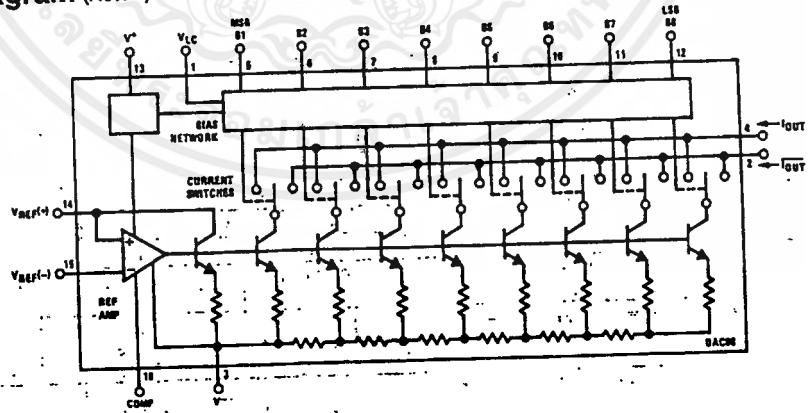
Top View

TL/H/5686-13

TL/H/5686-14

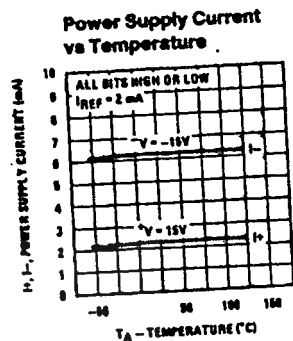
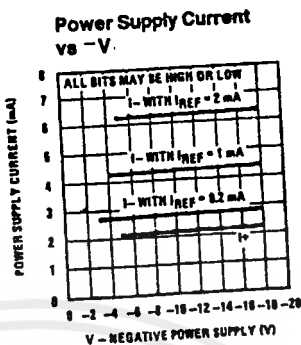
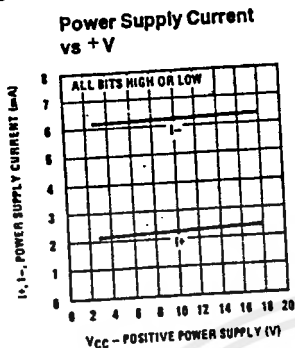
See Ordering Information

Block Diagram (Note 4)



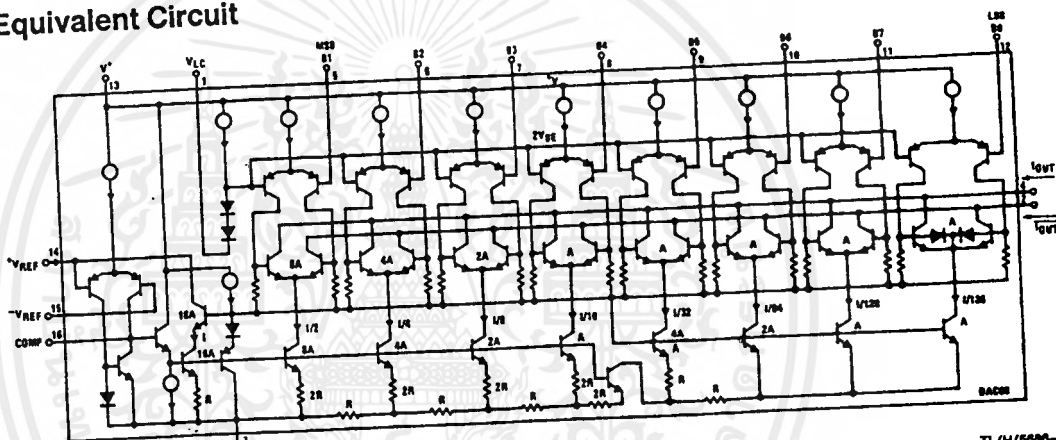
TL/H/5686

Typical Performance Characteristics (Continued)



TL/H/5686-4

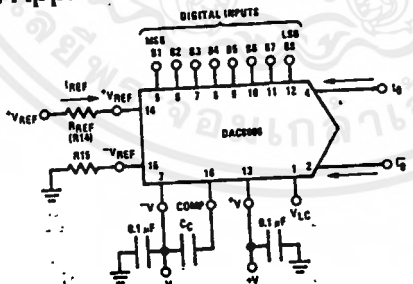
Equivalent Circuit



TL/H/5686-15

FIGURE 2

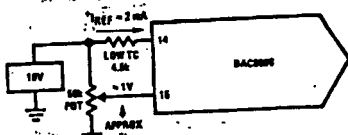
Typical Applications (Continued)



$I_{FS} \approx \frac{+V_{REF}}{R_{REF}} \times \frac{255}{256}$
 $I_0 + I_7 = I_{FS}$ for all logic states
 For fixed reference, TTL operation, typical values are:
 $V_{REF} = 10.000V$
 $R_{REF} = 5.000k$
 $R_{15} \approx R_{REF}$
 $C_c = 0.01 \mu F$
 $V_{LC} = 0V$ (Ground)

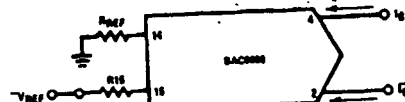
TL/H/5686-5

FIGURE 3. Basic Positive Reference Operation (Note 4)



TL/H/5686-21

FIGURE 4. Recommended Full Scale Adjustment Circuit (Note 4)

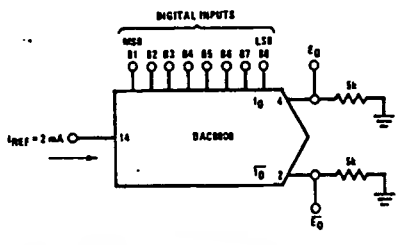


TL/H/5686-14

$I_{FS} = \frac{-V_{REF}}{R_{REF}} \times \frac{255}{256}$
 Note: R_{REF} sets I_{FS} ; R_{15} is for bias current cancellation

FIGURE 5. Basic Negative Reference Operation (Note 4)

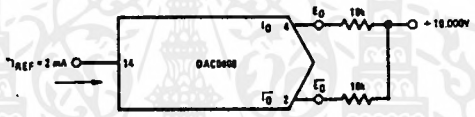
Typical Applications (Continued)



TL/H/5686-17

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	I ₀ mA	I ₀ mA	E ₀	E ₀
Full Scale	1	1	1	1	1	1	1	1	1.992	0.000	-9.960	0.000
Full Scale-LSB	1	1	1	1	1	1	1	0	1.984	0.008	-9.920	-0.040
Half Scale+LSB	1	0	0	0	0	0	0	1	1.008	0.984	-5.040	-4.920
Half Scale	1	0	0	0	0	0	0	0	1.000	0.992	-5.000	-4.960
Half Scale-LSB	0	1	1	1	1	1	1	1	0.992	1.000	-4.960	-5.000
Zero Scale+LSB	0	0	0	0	0	0	0	1	0.008	1.984	-0.040	-9.920
Zero Scale	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	1.992	0.000	-9.960

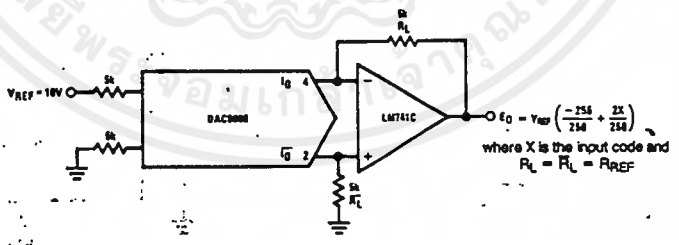
FIGURE 6. Basic Unipolar Negative Operation (Note 4)



TL/H/5686-6

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	E ₀	E ₀
Pos. Full Scale	1	1	1	1	1	1	1	1	-9.920	+10.000
Pos. Full Scale-LSB	1	1	1	1	1	1	1	0	-9.840	+9.920
Zero Scale+LSB	1	0	0	0	0	0	0	1	-0.080	+0.160
Zero Scale	1	0	0	0	0	0	0	0	0.000	+0.080
Zero Scale-LSB	0	1	1	1	1	1	1	1	+0.080	0.000
Neg. Full Scale+LSB	0	0	0	0	0	0	0	1	+9.920	-9.840
Neg. Full Scale	0	0	0	0	0	0	0	0	+10.000	-9.920

FIGURE 7. Basic Bipolar Output Operation (Note 4)



TL/H/5686-18

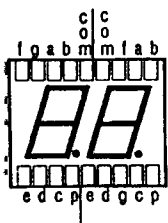
If $R_L = R_L$ within $\pm 0.05\%$, output is symmetrical about ground

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	E ₀
Pos. Full Scale	1	1	1	1	1	1	1	1	+9.960
Pos. Full Scale-LSB	1	1	1	1	1	1	1	0	+9.880
(+)Zero Scale	1	0	0	0	0	0	0	1	+0.040
(-)Zero Scale	0	1	1	1	1	1	1	1	-0.040
Neg. Full Scale+LSB	0	0	0	0	0	0	0	1	-9.880
Neg. Full Scale	0	0	0	0	0	0	0	0	-9.960

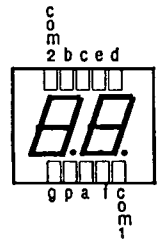
FIGURE 8. Symmetrical Offset Binary Operation (Note 4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

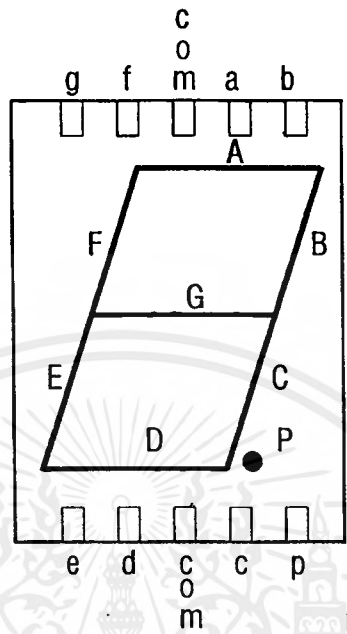
B-7SEG1
(0.56")



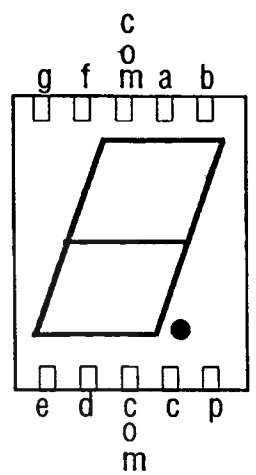
B-7SEG2
(0.3")



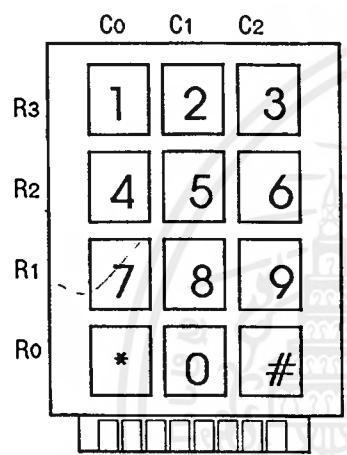
B-7SEG3
(2.3")



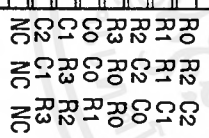
B-7SEG4
(1")



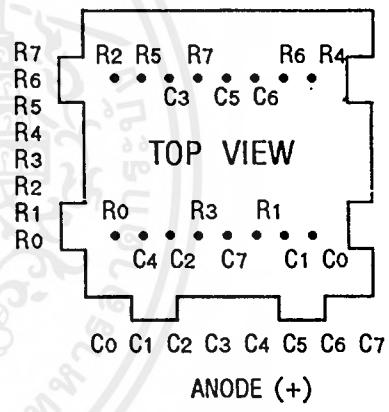
E-SWTEL



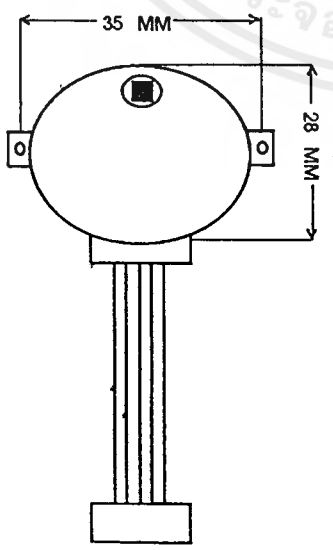
รุ่นเล็กสีดำ
รุ่นใหญ่สีเทา (เก่า)
รุ่นใหญ่สีเทา (ใหม่)
มีปุ่มที่เลข 5



B-LED8X8



D-MOTORST
(ST28)



สาย	DESC.
แดง	COM
ส้ม	A
เหลือง	B
ชมพู	C
น้ำเงิน	D

SPECIFICATIONS

Rated Voltage	12 VDC
Current	32 mA
Impedance	300 Ω
Phase	4
Step Angle	5.625/64
Reduction Ratio	1/64
Detent Torque	310 gfcM
Pull-in Torque	360 gfcM
Starting Pulse Rate	700 pps (MAX)
Slewing Pulse Rate	1400 pps (MAX)
Temperature Rise	25 deg
Noise	23 dB
(Test condition 12V 100 pps 25°C)	

หนังสืออ้างอิง

สมศักดิ์ กীরตวุฒิสเรษฐ, "หลักการ และการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม", สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

สุเชียร เกียรติสุนทร, "พื้นฐานวิศวกรรมระบบควบคุมในกระบวนการอุตสาหกรรม เล่ม 3", สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

ปรเมษฐ์ ประยานันท์ และ ปิยพงศ์ เผ่าวณิช, "คู่มือ และการประยุกต์ใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51", บริษัท ซีอีดูเคชั่น จำกัด (มหาชน)

Willis J. Tompkins, "Interfacing sensor to IBM PC"

