



ปีการศึกษา 2531

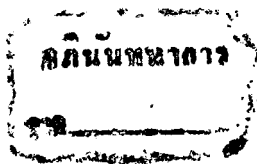
เครื่องควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์  
(ELECTRONICS CONTROLLER)



โดย

นายสุรพล	สงวนพรรค	28.6818
นายนราชัย	จำแจ้งมใส	28.6805
นายยงยุทธ	ชินโพธิ์กลาง	28.6809
นายธวัช	คำเหน็ดเกิด	28.6803

อาจารย์ที่ปรึกษา



อาจารย์ธนิตย์ ดร.สุวรรณีวัฒน์

ปริญญาโทการศึกษา 2531

ภาควิชา เทคโนโลยีการวัดและควบคุมทางอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ (ELECTRONICS CONTROLLER)

ผู้จัดทำ

1. นายสุรพล สงวนพรรค 28.6816
2. นายนราชัย จั่วแจ่มใส 28.6805
3. นายยงยุทธ ชินโพธิ์กลาง 28.6809
4. นายธวัช กำเนิดเกิด 28.6803



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(นายวิทยา ทิพย์สุวรรณภาพร)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(นายธนิตย์ ตรีสุวรรณวัฒน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(นายกิตติ ตรีเศรษฐ์)

# เครื่องควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์

นายสุรพล สวงนพรรค  
นายนราชัย จั่วแจ่มใส  
นายยงยุทธ ชินโพธิ์กลาง  
นายธวัช กำเหนิดเกิด

อาจารย์ธนิศย์ ตรีสุวรรณวัฒน์ ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2531

## บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เรียบเรียงขึ้นจากผลงานที่ได้พัฒนาเป็นเครื่องควบคุมขบวนการ (Process) โดยอาศัยหลักการของออปแอมป์ (Operational Amplifier) มาประยุกต์ใช้กับงานประกอบเป็นวงจรแบบ Differential, Integrate และ Derivative เครื่องควบคุมขบวนการจะรับสัญญาณเข้าจากการวัดและทำการเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย (Set Point) ผลต่างของค่าทั้งสอง (Control Derivative) จะถูกส่งไปให้ภาคคำนวณและผลิตสัญญาณควบคุมขาออกซึ่งจะส่งไปให้ส่วนขับเคลื่อนอีกทีหนึ่ง เครื่องควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์นี้สร้างขึ้นด้วยหลักการง่ายและมีขีดความสามารถดี ราคาอุปกรณ์ถูกเหมาะสมกับงานด้านการสอนและสาธิตสำหรับนักศึกษาและผู้สนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ELECTRONICS CONTROLLER

Suraphon Sanguanpuk

Narachai Chuachaemsai

Yongyut Chinpoklang

Thawat Kamnoetkoet

Tanit Trisuwanawat      Advisor

1988

### ABSTRACT

This thesis is an electronics controller to develop principle of operational amplifier such as differential circuit, integrating circuit and derivative circuit.

An electronics controller is received the measuring signal from transmitter. It must compare between set point signal and measuring signal. The error that called control derivative is flowthrough the control function and produce control signal to operate the actuator or final element. This electronics controller is develop as low cost and moderate security for teaching and simulating.

## สารบัญ

		หน้า
บทที่ 1	ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับตัวควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์	1
	1.1 Operational Amplifier	1 - 10
	1.2 วงจรเบื้องต้นของตัวควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์	19
บทที่ 2	ตัวควบคุมและแบบการควบคุม	19
	2.1 ON - OFF Control (2 - Position Actions)	20 - 21
	2.2 Proportional action	21 - 23
	2.3 Offset	23
	2.4 Reset Action (Integral Action)	24
	2.5 PI Action	25
	2.6 Derivative Action (Rate Action)	25 - 26
	2.7 PID Action	27
บทที่ 3	การออกแบบและสร้างอิเล็กทรอนิกส์ คอนโทรลเลอร์	28
	3.1 ภาค Power Supply ของคอนโทรลเลอร์	28
	3.2 ภาค Power Supply ของ Display	29
	3.3 ภาคคอนโทรลเลอร์	29 - 30
	3.4 ภาคแสดงผล	30 - 31
บทที่ 4	การทดลองอิเล็กทรอนิกส์ คอนโทรลเลอร์	32
	4.1 วงจรขยายความแตกต่าง	32 - 33
	4.2 กระบวนแบบปกติและแบบกลับ	34 - 35
	4.3 การทดลองควบคุมด้วยมือ	35 - 36
	4.4 การควบคุมแบบสัดส่วน	37 - 38
	4.5 การควบคุมแบบเปิด-ปิด (ON - OFF)	38 - 40
	4.6 การควบคุมแบบอินทิกรัล	40 - 41
	4.7 การควบคุมแบบอนุพันธ์	42

บทที่ 5	ผลการทดลองและสรุป	43
5.1	วงจรขยายความแตกต่าง	43 - 44
5.2	กระบวนแบบปกติและแบบกลับ	44 - 45
5.3	การทดลองควบคุมด้วยมือ	45 - 47
5.4	การควบคุมแบบสัดส่วน	47 - 49
5.5	การควบคุมแบบเปิด-ปิด	49 - 50
5.6	การควบคุมแบบอินทิกรัล	51 - 52
5.7	การควบคุมแบบเดรีเวทีฟ	53 - 55
บทที่ 6	การปรับ PID	56
6.1	ผลตอบแทนของการควบคุมที่ดี	56 - 58
6.2	ความยากง่ายในการควบคุมโปรเซส	58 - 59
6.3	ผลของ PID ต่อเสถียรภาพของระบบ	59 - 62
6.4	คุณภาพของการควบคุม	63
6.5	วิธีการปรับ	64 - 71

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง

## บทนำ

ตัวควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Controller) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมงาน (Process) โดยจะรับสัญญาณจากงานควบคุม (Sensor) มาแปลงเป็นสัญญาณที่เหมาะสมกับการใช้งาน (Standard Signal) โดยอาศัยอุปกรณ์ที่เรียกว่าตัวส่ง (Transmitter) ส่งมายังตัวควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์นี้ สัญญาณที่เข้ามาเรียกว่าค่าวัด (Measurement Value)

ตัวควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์จะสร้างสัญญาณที่เราสามารถปรับได้ด้วยมือเรียกว่าสัญญาณเป้าหมาย (Set Point Value) สัญญาณทั้งสองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน ผลต่างของการเปรียบเทียบ (Control Deviation) จะถูกนำไปใช้ในภาคคำนวณซึ่งจะส่งไปเป็นสัญญาณควบคุม (Control Signal) อีกที่หนึ่งเพื่อส่งไปให้ส่วนขับเคลื่อน (Actuator)

ความสัมพันธ์ของผลต่างกับสัญญาณควบคุมกำหนดโดยภาคคำนวณความสัมพันธ์นี้เรียกว่า การควบคุมการกระทำ (Control Action) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ชนิดคือ

- On-Off Action
- Proportional Action (P Action)
- Integral or Reset Action (I Action)
- Derivative Action (D Action)

การควบคุมจะใช้การกระทำแต่ละชนิดหรือหลายชนิดผสมกัน เช่น On-Off, P, PI, PD และ PID ส่วนการควบคุมด้วยมือนั้นถ้าคนงานมีความชำนาญ การปรับจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับการควบคุมการกระทำแบบข้างต้น

ตัวควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์จะอาศัยการทำงานของ Operational Amplifier โดยนำมาต่อกันแบบ differential, Derivative และ Integral ที่จะทำให้สัญญาณออกมาในรูปแบบต่าง ๆ กัน ดังจะกล่าวในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

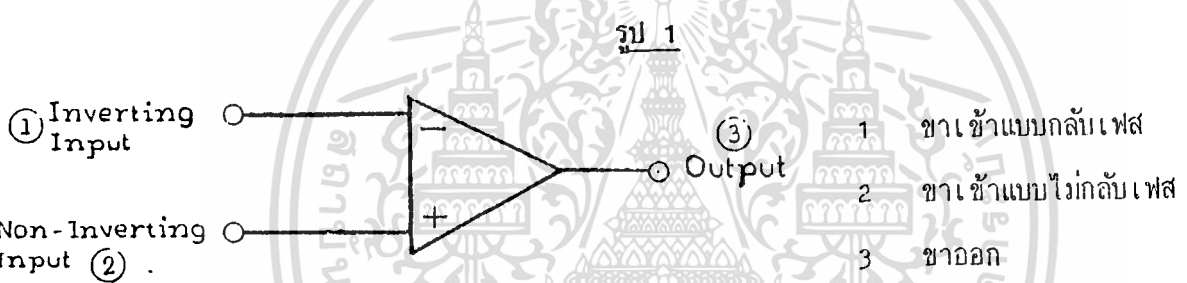
ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับตัวควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์

1.1 Operational Amplifier

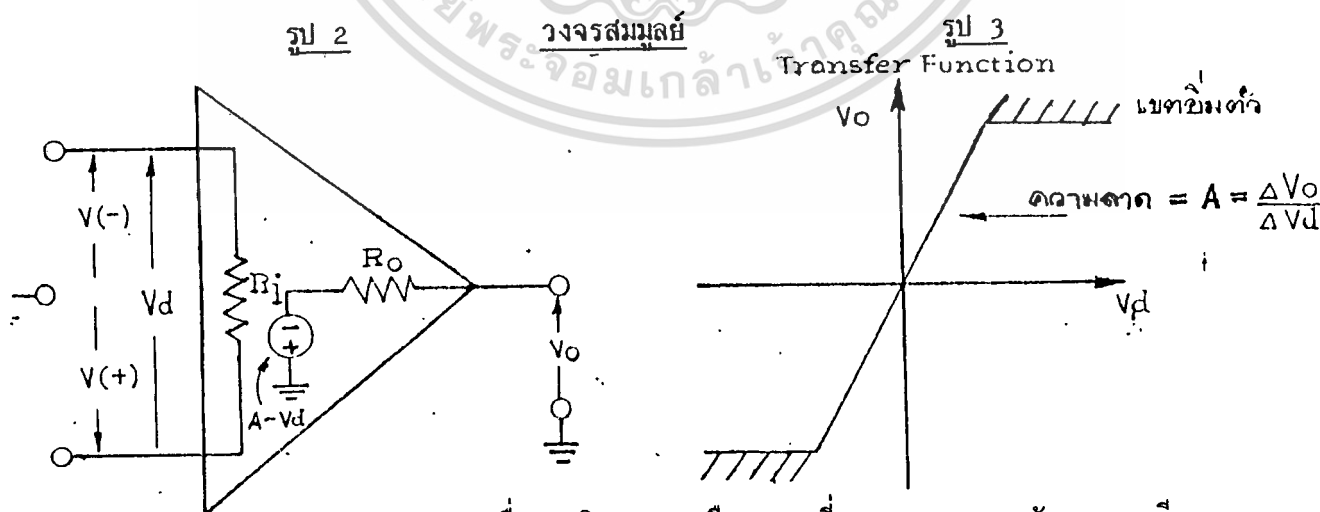
วงจรรขยายออปแอมป์ที่ใช้มีลักษณะสมบัติดังต่อไปนี้

1. อัตราขยายแรงดัน (ขณะที่ลู่เปิด) มีค่าสูงมาก (ปกติ  $5 \times 10^4$ ) A
2. วงจรต่อ (เข้าด้วยกัน) โดยตรง (Direct coupled)
3. มีอิมพีแดนซ์ด้านเข้าสูง (ปกติ  $1\text{M}\Omega$ )  $R_i$
4. มีอิมพีแดนซ์ด้านออกต่ำ (ปกติ  $100\Omega$ )  $R_o$

ภาพข้างล่างแสดงไคโอะแกรมของวงจรรขยายออปแอมป์



วงจรมูลยทางไฟฟ้าของวงจรรขยายออปแอมป์ รวมทั้งความสัมพันธ์ ขาเข้า-ขาออก (บางครั้งเรียกว่า transfer function) ได้แสดงไว้ในรูปข้างล่าง



อัตราขยายแรงดันเมื่อลู่เปิด (A) คือการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขาออกเทียบ

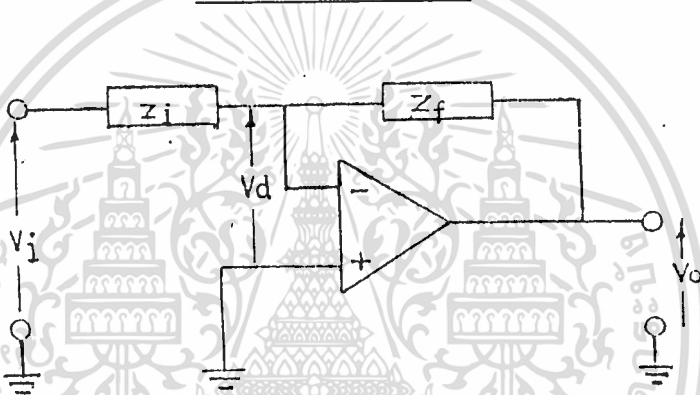
กับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันดิฟเฟอเรนเชียล (differential) ขาเข้า ( $V_d$ ) กล่าวคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เมื่อแรงดันขาออกยังไม่อิ่มตัว (non-saturated) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี่ก็คือความลาด (slope) ของ transfer function นั้นเอง เนื่องจากแรงดันขาออกสูงสุด มีค่าปกติ 10 โวลต์ และ A มีขนาดใหญ่่มาก จึงเห็นได้ชัดว่าสัญญาณขาออกเพียงประมาณ 1 mV ก็เพียงพอที่จะทำให้วงจรขยายอยู่ในสภาพอิ่มตัว ดังนั้น โดยพื้นฐานวงจรขยายออปแอมป์จึงเป็นอุปกรณ์ที่มีสองสภาวะ (two-state device) หากเราใช้ในภาวะลูปเปิด อย่างไรก็ตามการใช้งานหลักของวงจรมักควบคู่กับการป้อนกลับด้วย

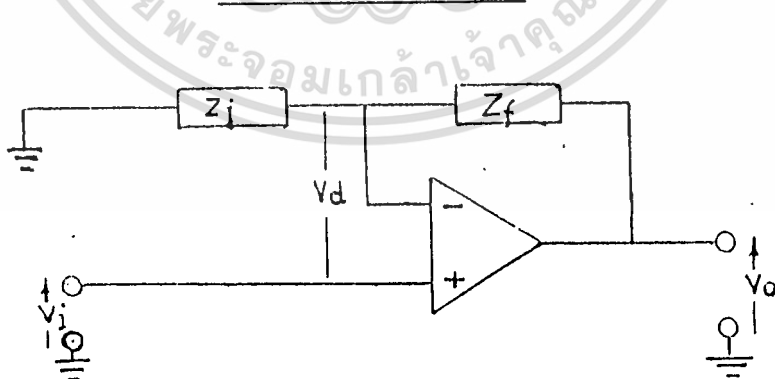
ลักษณะสมบัติทั่วไปของวงจรในขณะใช้เป็นวงจรป้อนกลับ จะถูกกำหนดโดยอุปกรณ์ที่ต่อภายนอกต่อไปนี้เป็นตัวอย่างการต่อป้อนกลับที่สำคัญสองชนิด

วงจรขยายแบบกลับเฟส



รูป 4

วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

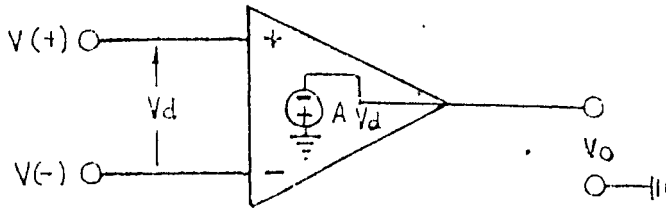


รูป 5

การป้อนกลับมีผลที่น่าสนใจต่ออิมพีแดนซ์ขาเข้าและขาออกของวงจรทั้งวงจร กล่าวคืออิมพีแดนซ์ขาเข้าจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยมีขนาดเป็นหน่วยเมกะโอห์ม (megohm) ส่วนอิมพีแดนซ์ขาออกจะลดลงอย่างมาก โดยมีขนาดเป็นหน่วยมิลลิโอห์ม (milliohm) ค่าอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขาออกและขาเข้าอาจละเลยได้เมื่อพิจารณาโดยสัมพันธ์กับอุปกรณ์ภายนอก วงจรสมมูลอย่างง่ายจะเป็นดังรูปข้างล่างนี้



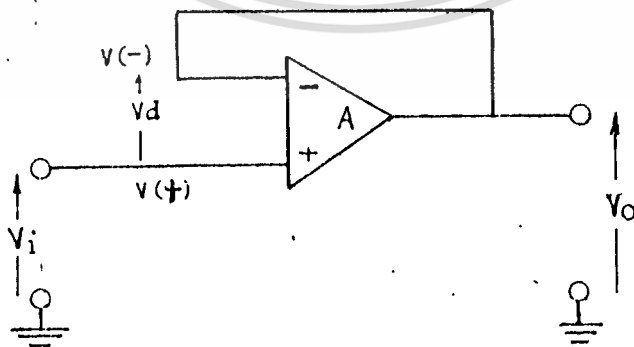
รูป 6

ในที่นี้ควรจะกล่าวไว้ว่า การวิเคราะห์วงจรที่มีการย้อนกลับแบบลบนั้น

1. มีกระแสขนาดน้อยมากไหลเข้าทางขั้วขาเข้า (ทั้งนี้ก็เป็นเพราะอิมพีแดนซ์ขาเข้ามีขนาดใหญ่มาก) ค่ากระแสอาจละเลยถือว่าเป็นศูนย์ได้
2. แรงดันความแตกต่างขาเข้ามีค่าน้อยมาก (น้อยกว่าหนึ่งมิลลิโวลต์) ถ้าหากวงจรขยายทำงานอยู่ในช่วงเชิงเส้น (linear region) ดังนั้นค่าอาจถือเป็นศูนย์ได้

คุณสมบัติทั้งสองประการดังกล่าว จะช่วยทำให้การคำนวณในการวิเคราะห์ของเราง่ายขึ้นมาก ขึ้นส่วนที่บ่งชี้ด้วย  $Z_i$  และ  $Z_f$  อาจเป็นได้ทั้ง ค่าความต้านทาน, ค่าแคปาซิทีฟหรืออินดักทีฟก็ได้ เราจะลองพิจารณาจากกรณีที่คำนวณเป็นตัวต้านทานล้วน ๆ ก่อน

### 1.1.1 Voltage follower ซึ่งมีอัตราขยายเป็น 1



รูป 7

วงจรข้างบนนี้เป็นเพียงกรณีพิเศษหนึ่งของวงจรในรูป 5

(กล่าวคือ  $Z_i \rightarrow \infty$ ,  $Z_f \rightarrow 0$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์จะเป็นดังนี้

$$V (+) = V_i$$

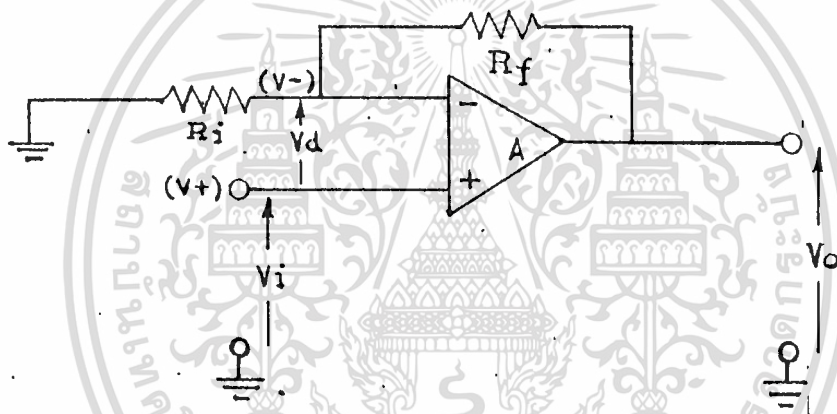
สมมติว่า  $V_d$  มีค่าเล็กและใกล้เคียง 0

$$\therefore V (-) = V_o$$

$$\text{แต่ } V_d = V (-) - V (+) = V_o - V_i = 0 : \therefore V_o = V_i$$

วงจรโวลเตจโฟลโลเวอร์ (Voltage follower) จะใช้เป็นตัวกันชนระหว่างแหล่งจ่ายที่มีอิมพีแดนซ์สูงกับโหลดอิมพีแดนซ์

1.1.2 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส



รูป 8

วงจรในรูป 8 เป็นกรณีทั่วด้านทานล้วน ๆ ของวงจรในรูป 5  $V (+) = V_i$

ในกรณีนี้  $V_d$  ก็มีขนาดเล็กเช่นเดียวกันโดย  $V_d \approx 0 \therefore V (-) = V (+)$

$$\text{แต่ } V (-) = \frac{V_o \cdot R_i}{R_i + R_f} = V (+) = V_i$$

$$\text{ดังนั้น } V_i = V_o \cdot \frac{R_i}{R_i + R_f}$$

$$\therefore V_o = \frac{(R_i + R_f)}{R_i} V_i$$

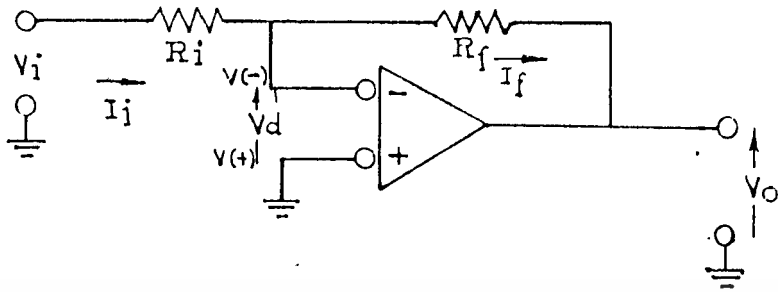
$$= 1 + \frac{R_f}{R_i} , V_i$$

$$A = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R_i}$$

วงจรมีลักษณะพิเศษที่มีอิมพีแดนซ์ขาเข้าสูงและอิมพีแดนซ์ขาออกต่ำ เช่นเดียวกับ

วงจรโวลเตจโฟลโลเวอร์ ขณะที่ม้อัตราขยาย A สูงกว่าหนึ่ง ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.1.3 วงจรขยายแบบกลับเฟส



รูป 9

วงจรในรูป 9 เป็นกรณีตัวต้านทานล้วน ๆ ของวงจรในรูป 4  $v(+) = 0$  เนื่องจาก  $v_d$  มีค่าเล็กซึ่งอาจถือเป็นศูนย์ได้

$$\therefore v(-) = 0$$

เนื่องจากไม่มีกระแสไหลเข้าทางขั้วขาเข้า

$$\therefore I_i = I_f$$

แต่

$$I_i = \frac{+V_i}{R_i}$$

และ

$$I_f = \frac{-V_o}{R_f}$$

$\therefore$  เมื่อแทนค่าในสมการข้างบน

$$\frac{+V_i}{R_i} = \frac{-V_o}{R_f}$$

$$\therefore V_o = -\frac{R_f}{R_i} \cdot V_i$$

$$A = \text{Gain} = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_i}$$

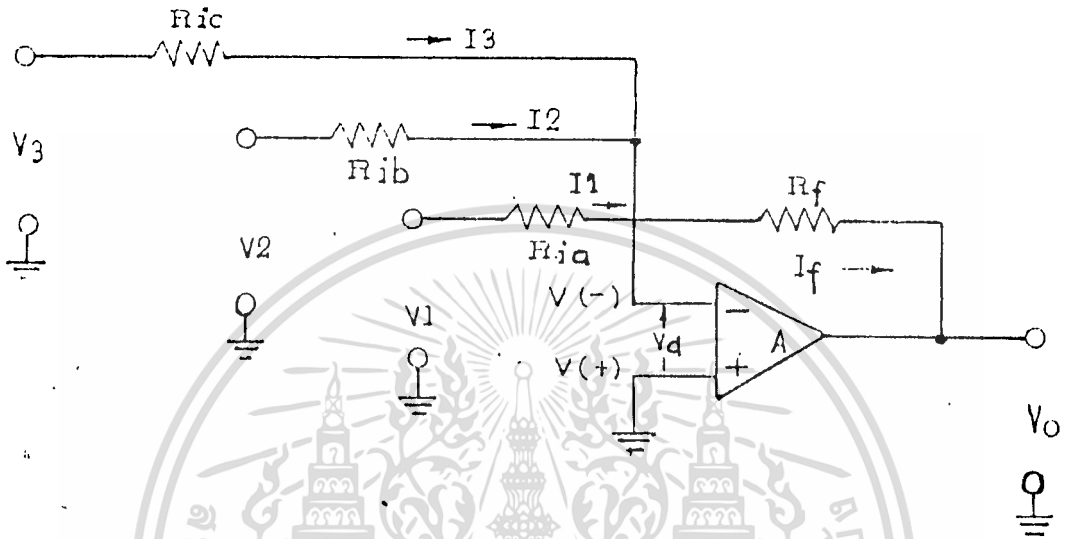
ให้สังเกตว่าแรงดันขาออก ( $V_o$ ) มีค่าเป็น  $R_f/R_i$  เท่าของ  $V_i$  และค่า  $V_o$  เป็นลบ (กล่าวคือถูกกลับเฟส) วงจรขยายกลับเฟสจะมีค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าที่มีขีดจำกัดซึ่งจะแตกต่างจากกรณีวงจรไม่กลับเฟส

$$R_{in} = V_i / I_i$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.1.4 วงจรรวมยอด (Summing Circuit)

เราสามารถป้อนสัญญาณขาเข้าหลาย ๆ สัญญาณไปที่ขั้วเข้าของวงจรมายพร้อม ๆ กันแล้วรวมยอดเป็นผลออกมาที่ขาออก ดังแสดงในรูป 10



รูป 10

$$v(+) = 0$$

$v_d$  มีขนาดเล็กและอาจถือว่าเท่ากับศูนย์

$$\therefore v_d = v(-) - v(+) = 0 \quad v(-) - 0$$

$$\therefore v(-) = 0$$

เนื่องจากไม่มีกระแสไหลเข้าทางขั้วขาเข้า ดังนั้น

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_f$$

$$\text{แต่ว่า} \quad I_1 = \frac{V_1}{R_{1a}} \quad I_2 = \frac{V_2}{R_{1b}} \quad I_3 = \frac{V_3}{R_{1c}}$$

$$\text{และ} \quad I_f = -\frac{V_o}{R_f}$$

$\therefore$  เมื่อแทนค่าลงไป

$$-\frac{V_o}{R_f} = \frac{V_1}{R_{1a}} + \frac{V_2}{R_{1b}} + \frac{V_3}{R_{1c}}$$

ดังนั้นแรงดันขาออกจึงเป็นการรวมยอดสัดส่วนของแรงดันขาเข้า และถ้าหากว่า

$$R_{ia} = R_{ib} = R_{ic} = R_i$$

$$V_o = - \frac{R_f}{R_i} (V_1 + V_2 + V_3)$$

ดังนั้นจะได้วงจรรวมยอด ซึ่งมีอัตราขยาย =  $- R_f/R_i$

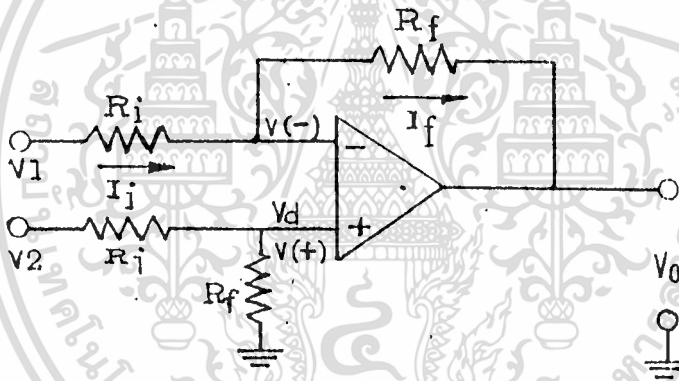
ถ้าหากว่า  $R_{ia} = R_{ib} = R_{ic} = R_i = R_f$

$$\therefore V_o = - (V_1 + V_2 + V_4)$$

ซึ่งจะเป็นตัวบวกที่กลับเครื่องหมาย

### 1.1.5 วงจรขยายความแตกต่าง (Difference Amplifier)

ความแตกต่างระหว่างแรงดันขาเข้าสองแรงดัน สามารถหาได้จากวงจรดังแสดงในรูป 11



รูป 11

$$V (+) = V_2 \cdot \frac{R_f}{R_f + R_i}$$

$V_d$  มีค่าน้อยมากถือเป็นศูนย์

$$V (-) = V (+) = \frac{R_f}{R_f + R_i} \cdot V_2$$

$$I_i = \frac{1}{R_i} \left( V_1 - \frac{R_f}{R_f + R_i} \cdot V_2 \right) \quad I_f = \frac{1}{R_f} \left( \frac{R_f}{R_f + R_i} \cdot V_2 - V_o \right)$$

$$\text{แต่ } I_i = I_f$$

$$\therefore \frac{1}{R_f} \left( \frac{R_f}{R_f + R_i} V_2 - V_o \right) = \frac{1}{R_i} \left( V_1 - \frac{R_f}{R_f + R_i} \cdot V_2 \right)$$

$$-\frac{1}{R_f} V_o + \frac{1}{R_f + R_i} V_2 = \frac{V_1}{R_i} - \frac{V_2}{R_f + R_i} \cdot \frac{R_f}{R_i}$$

$$\therefore -\frac{1}{R_f} V_o = \frac{V_1}{R_i} + V_2 \left( \frac{-1}{R_f + R_i} - \frac{R_f}{R_i} \cdot \frac{1}{R_f + R_i} \right)$$

$$\therefore V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_1 + \frac{R_f}{R_f + R_i} \left( 1 + \frac{R_f}{R_i} \right) V_2$$

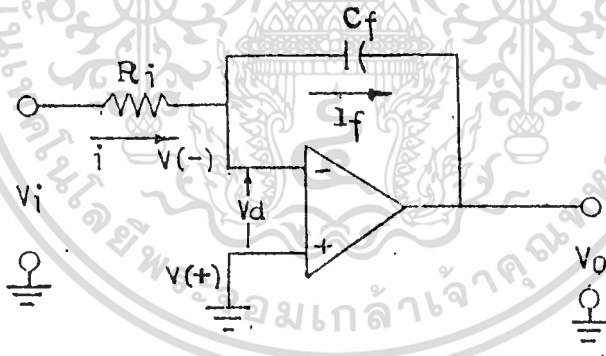
วงจรนี้จะมีขาออกที่เป็นสัดส่วนกับความแตกต่างระหว่างแรงดันขาเข้าทั้งสอง

ถ้าเราให้  $R_f = R_i$   $\therefore V_o = V_2 - V_1$

ซึ่งก็คือคุณสมบัติของวงจรขยายความแตกต่างที่แท้จริง

### 1.1.6 ตัวอินทิเกรเตอร์ (Integrator)

วงจรดังแสดงในรูป 12 อาจใช้เพื่อหาค่าอินทิกรัล (integral) ตามแกนเวลาของแรงดันขาเข้า



รูป 12

$$V(+) = 0$$

$V_d$  มีขนาดเล็กและอาจถือว่าเป็นศูนย์ได้

$$\therefore V(-) = V(+) - V_d = 0$$

เนื่องจาก  $I_b = 0$   $I_i = I_f$

$$I_i = \frac{V_i}{R_i} \quad I_f = -C_f \frac{dV_o}{dt}$$

$$\therefore -C_f \frac{dV_o}{dt} = \frac{V_i}{R_i}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแบบ  $\frac{dV_o}{dt} = -\frac{1}{R_i C_f} V_i$  และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เมื่อทำการอินทิเกรต (integrate) ตามแกนเวลา

$$V_o = \frac{-1}{R_i C_f} \int_0^t V_i dt$$

characteristic time หรือค่าคงตัวเวลา (time constant) ของตัวอินทิเกรเตอร์หาได้ โดย  $\tau = 1/R_i C_f$  ซึ่งแสดงถึง "อัตราขยาย" ในพจน์ (term) ของการเพิ่มของแรงดันขาออก ต่อวินาที เทียบกับแรงดันแต่ละโวลต์ของสัญญาณขาเข้า

ถ้าหากว่า  $V_i =$  ค่าคงที่  $= V_k$

$$\therefore V_o = \frac{-1}{R_i C_f} V_k \cdot t$$

ถ้าเรารู้ค่า  $R_i, C_f, V_k$  เราสามารถคำนวณหาแรงดันขาออกที่เวลา  $t$  ใด ๆ ได้ดังนี้

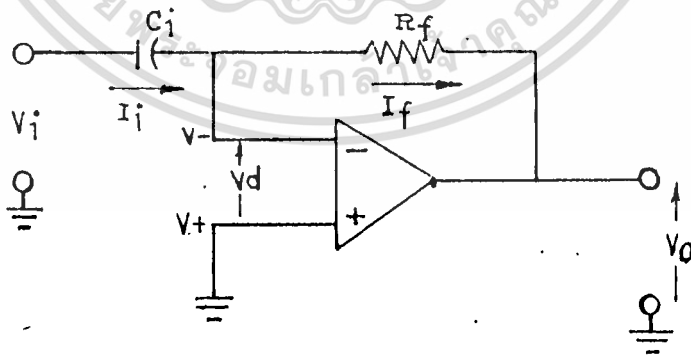
$$V_o = \left( \frac{-V_k}{R_i C_f} \right) t$$

### 1.1.7 ตัวดิฟเฟอเรนเชียลเอเตอร์ (Differentiator)

วงจรดังแสดงในรูป 13 อาจใช้เพื่อหาค่า time derivative ของแรงดัน

ขาเข้าได้

รูป 13



$$V (+) = 0$$

$v_d$  มีค่าน้อย ถือว่าเป็นศูนย์ได้

$$\therefore V (-) = V (+) - v_d = 0$$

$$\text{เนื่องจาก } I_b = 0$$

$$I_f = I_i$$

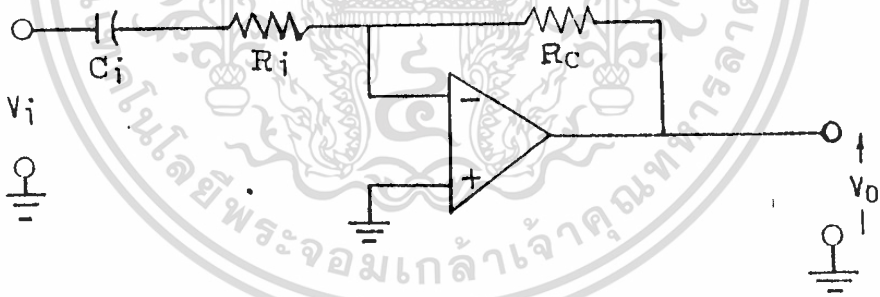
$$\text{แต่ } I_i = C_i \frac{dV_i}{dt}$$

$$I_f = -\frac{V_o}{R_f}$$

$$\text{เมื่อแทนค่าลงไป } -\frac{V_o}{R_f} = C_i \frac{dV_i}{dt}$$

$$\therefore V_o = -R_f C_i \frac{dV_i}{dt}$$

ค่าคงตัวเวลาของวงจร  $\tau = R_f C_i$  แสดงอัตราส่วนของแรงดันขาออกเทียบกับ อัตราการลดของแรงดันขาเข้าที่ป้อนเข้ามา ในทางปฏิบัติวงจรดังที่เห็นจะไม่ค่อยมีเสถียรภาพ ทั้งนี้ เพราะมีแรงดันของสัญญาณรบกวน (แรงดันของสัญญาณรบกวนมีค่า  $dv/dt$  สูง) เรามักต่อความ ต้านทานตัวหนึ่งเป็นอนุกรมกับ  $C_i$  เพื่อที่จะจำกัด "อัตราขยายความถี่สูง" และช่วยทำให้วงจรมี เสถียรภาพดังรูป 14



รูป 14

$$V_o = -\frac{R_f}{R_i} e^{-(t/R_c) V_i}$$

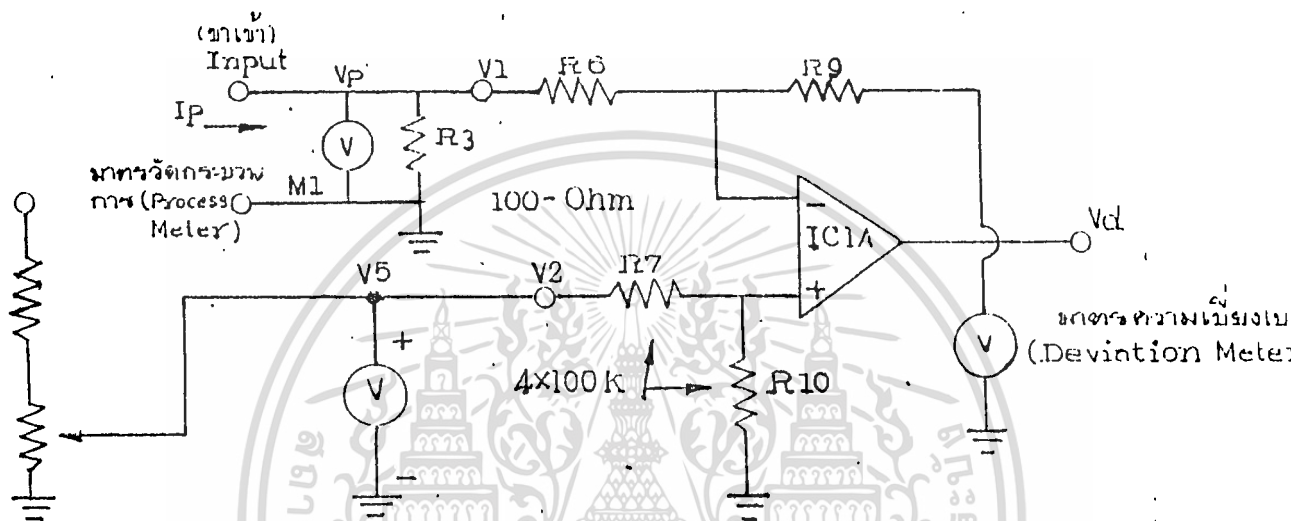
$$RC \ll t$$

## 1.2 วงจรเบื้องต้นของตัวควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์

### 1.2.1 วงจรขยายความแตกต่าง (difference Amplifier circuit)

รูป HF 1/1 แสดงวงจรขยายความแตกต่าง เมื่อตัวควบคุมทำงานในระบวมแบบ (mode)ปกติ

รูป HF 1/1



วงจรขาเข้าประกอบด้วย ความต้านทานขาเข้า (R3) 100 โอห์ม โดยต่อขนานกับมาตรวัดกระบวนการ (M1) ความต้านทานนี้จะทำให้เกิดแรงดันขาเข้าที่เป็นสัดส่วนกับกระแสขาเข้า สัญญาณขาเข้าโดยปกติจะได้ออกมาจากขาออกของ transmitter ซึ่งมีกระแสขาออกเป็น

$$I_p = \frac{V_p}{R_3} = \frac{V_p}{100} \quad \text{สมการ HE 1/1}$$

ในกรณีที่กระแสโปรเซสส์ (Process) ขาเข้าเป็น 50 mA แรงดันโปรเซสส์ขาเข้า (Vp) จะเป็น  $V_p = I_p \cdot 100 = 0.05 \text{ A} \cdot 100 = 5.0 \text{ V}$ .

ค่าเปรียบเทียบหรือแรงดันจุดกำหนด  $V_s$  ถูกป้อนเข้าทางขั้วเข้าแบบไม่กลับเฟส (non-inverting) เนื่องจากแรงดันโปรเซสส์ ( $V_p$ ) มีค่าตั้งแต่ 0-5 โวลต์ เราจึงอาจเขียนสมการเพื่อหาค่าแรงดันเบี่ยงเบน (deviation voltage) ดังนี้

$$V_d = V_2 - V_1 = V_s - V_p \quad \text{สมการ HF 1/2}$$

ดังนั้นแรงดันเบี่ยงเบนจึงเป็นความแตกต่างระหว่างค่าที่จุดกำหนดกับค่าโปรเซสส์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะโดยวิธีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.2.2 กระบวนแบบปกติและแบบกลับ (Normal and Invert Mode)

ตัวควบคุมแทบทั้งหมดสามารถปรับให้ทำงานในกระบวนแบบปกติหรือแบบกลับอย่างหนึ่งอย่างใดได้ กรณีการทำงานในกระบวนแบบปกติ (ดังในการทดลอง H1) แรงดันเบี่ยงเบนเป็นความแตกต่างระหว่างค่าจุดกำหนด กับค่าโปรเซส

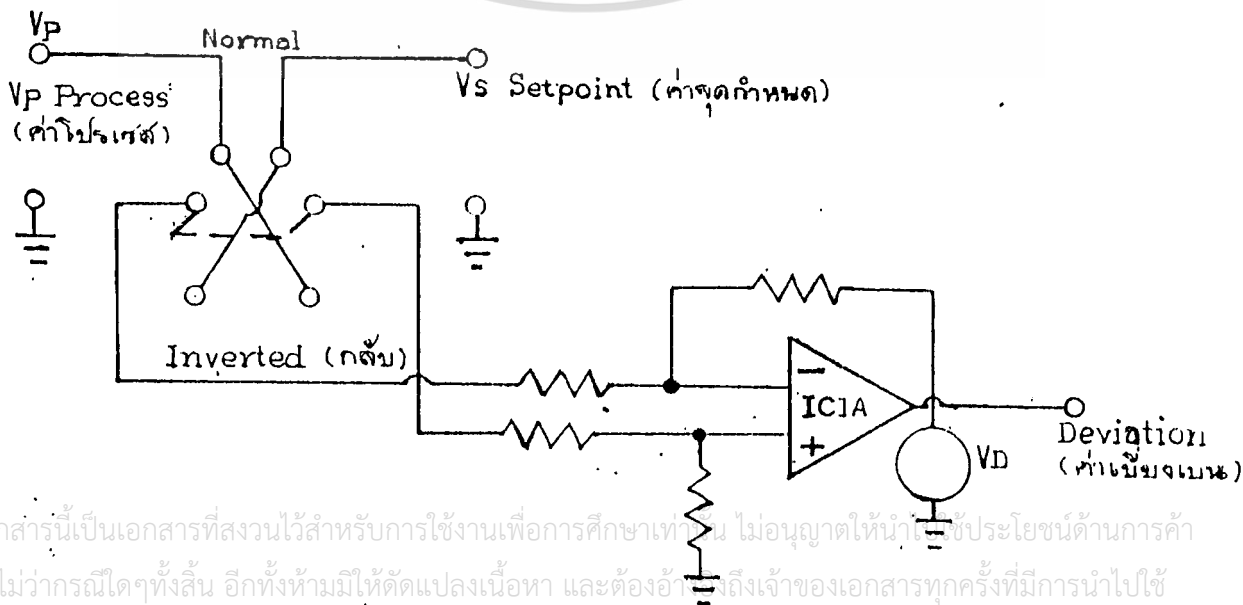
$$\text{ค่าเบี่ยงเบน} = \text{ค่าจุดกำหนด} - \text{ค่าโปรเซส} \quad \text{สมการ HE 2/1}$$

ในกรณีการทำงานในกระบวนแบบกลับ ความสัมพันธ์อันนี้จะถูกกลับตำแหน่งไป

$$\text{ค่าเบี่ยงเบน} = \text{ค่าโปรเซส} - \text{ค่าจุดกำหนด} \quad \text{สมการ HE 2/2}$$

การที่ตัวควบคุมจะทำงานในกระบวนแบบปกติหรือแบบกลับนั้น จะขึ้นอยู่กับข้อเรียกร้องของอุปกรณ์ควบคุมขั้นสุดท้าย (final control element) ถ้าหากว่าการเพิ่มขาเข้าให้แก่อุปกรณ์ควบคุมขั้นสุดท้ายทำให้ตัวแปรที่ควบคุม (controlled variable) เพิ่มขึ้น ตัวควบคุมก็ควรทำงานในกระบวนแบบปกติเพื่อที่จะทำให้สัญญาณคลาดเคลื่อน (error signal) กลับเป็นศูนย์โดยการลบค่าโปรเซสออกจากค่าจุดกำหนด แต่ถ้าหากว่าอุปกรณ์ควบคุมขั้นสุดท้ายทำงานในลักษณะที่กลับกัน ตัวควบคุมก็ต้องเปลี่ยนไปทำงานในกระบวนแบบกลับ การเปลี่ยนจากกระบวนแบบปกติเป็นแบบกลับสามารถทำได้ด้วยสวิตช์ S2 เมื่อ S2 อยู่ในตำแหน่งกระบวนแบบปกติ สัญญาณโปรเซสจะถูกป้อนไปยังขั้วขาเข้ากลับเฟส และสัญญาณค่าจุดกำหนดจะถูกป้อนไปยังขั้วขาเข้าไม่กลับเฟส ทั้งนี้เพื่อให้ได้เงื่อนไขตามสมการ HE 2/1 เมื่อ S2 อยู่ในตำแหน่งกระบวนแบบกลับ สัญญาณขาเข้าไปยังขั้วเข้าจะกลับกัน รูป HF 2/1 แสดงวงจรรขาเข้าไปสู่วงจรรขยาย

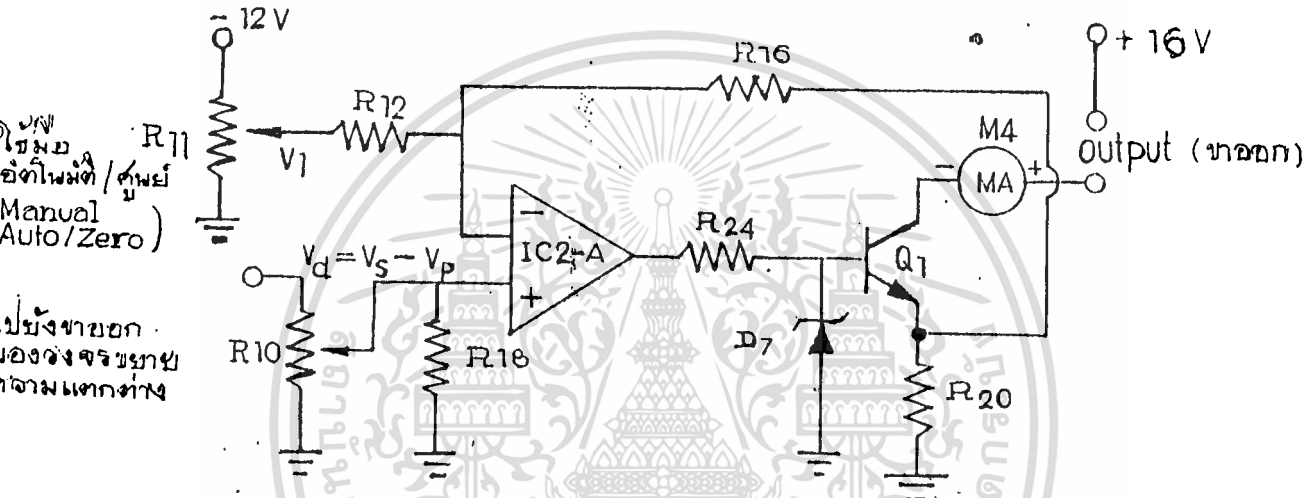
รูป HF 2/1



1.2.3 การควบคุมด้วยมือ (Manual Control)

ในกระบวนการทางการผลิตหลายกระบวนการ การเริ่มและการเดินเครื่องระยะสั้นควรทำโดยใช้การควบคุมด้วยมือ ก่อนที่จะปล่อยให้คำเห็นการภายใต้การควบคุมอัตโนมัติ นอกจากนี้ในกรณีที่การควบคุมอัตโนมัติเกิดปัญหาไม่ทำงาน ก็จำเป็นต้องต้องหันกลับมาควบคุมโดยใช้มือ (Manual) วงจรขาออกของตัวควบคุม ได้แสดงไว้ในรูป HF 3/1

รูป HF 3/1



ใช้โหมดอัตโนมัติ/ด้วยมือ (Manual Auto/Zero)  
ป้อนขั้วขาออกของวงจรขยายจากจาลมแตกต่างกัน

วงจรประกอบด้วยวงจรขยายอินเวอร์ต (IC 2-A) ซึ่งทำงานขยายแบบกลับเฟส เพื่อให้ได้กระแสขาออก (I<sub>o</sub>) ออกมา ดังนั้นวงจรจะให้กระแสขาออกซึ่งเป็นสัดส่วนกับแรงดัน V<sub>1</sub> ดังนั้น I<sub>o</sub> (mA) = K · V<sub>1</sub> (Volts) สมการ HE 3/1 โดยที่ K เป็นค่าคงที่

ตัวต้านทาน R24 และไดโอดซีเนอร์ D7 ทำหน้าที่ป้องกันมาตร M4 โดยจำกัดค่ากระแสขาออกสูงสุดให้อยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย

การทำงานของ Auto-Zero

การควบคุมด้วยมือยังสามารถใช้เพื่อจ่ายกระแสขาออก ค่าระหว่าง 0 ถึง 50 เมื่อมันทำงานในกระบวนการแบบสัดส่วน (Proportional mode) ในขณะที่แรงดันเบี่ยงเบนเป็นศูนย์มันเป็นการปรับแต่งเพื่อให้ขาออกเป็นศูนย์ด้วย เมื่อเราใช้การควบคุมด้วยมือ ดังนั้น กระแสขาออกจะทำได้โดยสมการ

$$I_o = I_p (V_s - V_p) + K \cdot V_1 \quad \text{สมการ HE 3/2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่  $I_o$  เป็นกระแสขาออก (mA)
- $A_p$  เป็นอัตราขยายสัดส่วน (Proportional gain) (mA/Volt)
- $V_s$  เป็นค่าแรงดันจุดกำหนด
- $V_p$  เป็นแรงดันโปรเซส
- $K.V_1$  เป็นกระแสค่าศูนย์ทางขาออก

(กล่าวคือกระแสขาออกจะถูกกำหนดโดยการปรับแต่ง การควบคุมอัตโนมัติ/ด้วยมือ auto/man) เมื่อ  $V_s = V_p$ )

### 1.2.4 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)

สมการของหัวขาออกของตัวควบคุม ดังแสดงไว้ในสมการ HT3/2 เป็นดังนี้

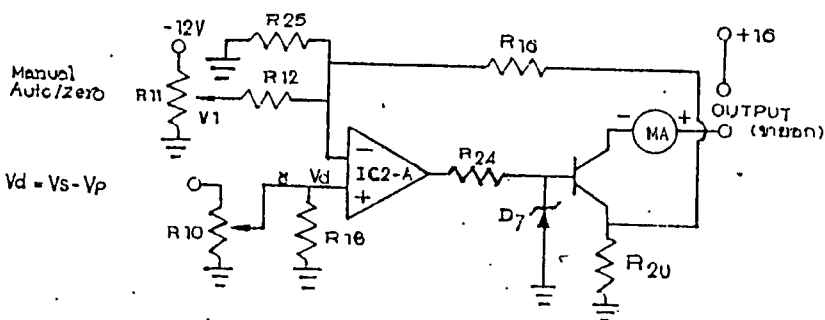
$$I_o = A_p (V_s - V_p) + I_Z \quad \text{สมการ HE 4/1}$$

- โดยที่  $A_p$  เป็นอัตราขยายสัดส่วน (proportional gain)
- $V_s$  เป็นค่าแรงดันจุดกำหนด
- $V_p$  เป็นแรงดันโปรเซส
- $I_Z$  เป็นกระแสขาออกเมื่อ  $V_s = V_p$  ซึ่งกำหนดโดยการปรับตั้ง manual/auto - zero control

เป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของกระแสขาออก เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างแรงดันขาเข้า ( $V_s - V_p$ )

$$\therefore A_p = \frac{\Delta I_o}{\Delta (V_s - V_p)} \frac{\text{mA}}{\text{Volt}} \quad \text{สมการ HE 4/2}$$

รูป HF 4/1



เนื่องจากหลักการป้อนกลับรับเอาแรงดันจาก  $R_{20}$  ดังนั้นวงจรนี้จึงแปลงแรงดันให้กลายเป็นกระแสขาออกที่  $I_o$  ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากว่า  $(V_s - V_p)$  มีค่าคงที่ สมการ HE 6/1 จะกลายเป็น

$$I = \frac{1}{\tau} (V_s - V_p) \cdot t \quad \text{หรือ} \quad t = \frac{I_o \tau}{(V_s - V_p)} \quad \text{สมการ HE 6/2}$$

โดยที่  $I_o$  เป็นค่ากระแสขาออก ถ้าหากต้องการหา จากสมการ HE 6/2 เรา

จะได้ 
$$\tau = \frac{(V_s - V_p) \cdot t}{I_o} \quad \text{สมการ HE 6/3}$$

หน่วยของ  $\tau$  เป็น (volt-sec)/mA

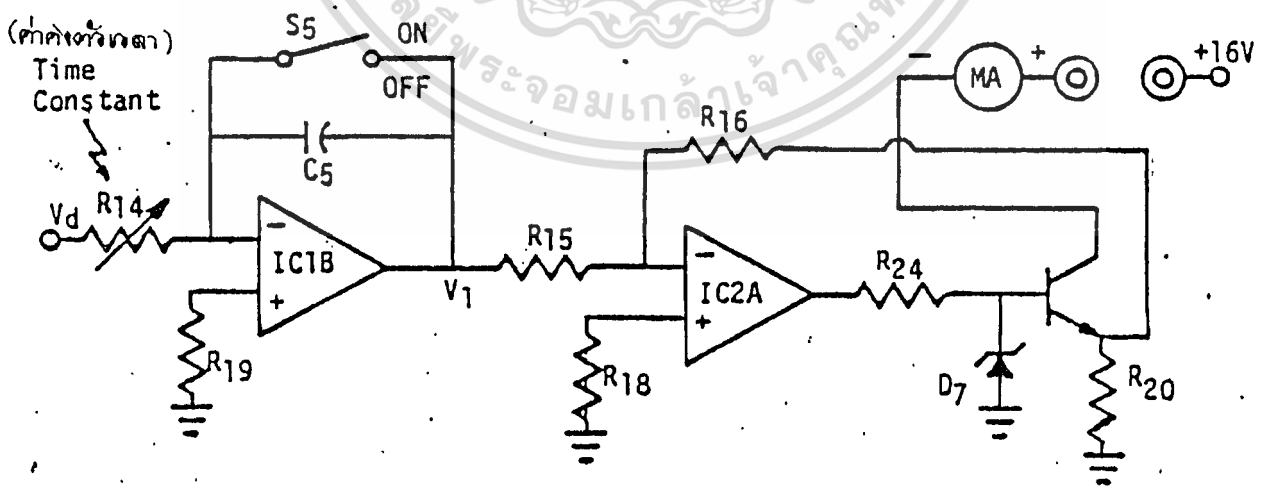
ค่าคงที่เวลา  $\tau$  สามารถแปรได้ โดยการปรับตำแหน่งของตัวควบคุมค่าคงที่เวลา วงจรสมมุติของอินทิเกรเตอร์ได้แสดงไว้ในรูป HF 6/1

IC1B ทำหน้าที่เป็นอินทิเกรเตอร์โดยมีค่าคงตัวเวลา

$$\tau = R_{14} \cdot C_5 \quad \text{สมการ HE 6/4}$$

สวิตช์  $S_5$  เป็นสวิตช์สำหรับ reset โดยทำหน้าที่คายประจุของอินทิเกรตติ้งแคปซิเตอร์ (intergrating capacitor)  $C_5$  สำหรับ IC-2A ทำหน้าที่แปลงแรงดันขาออก  $V_1$  ให้เป็นกระแสขาออก  $I_o$

รูป HF 6/1



1.2.7 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

การควบคุมแบบอนุพันธ์หรือ reset action มักใช้กันเพื่อเพิ่มความเร็วในการทำงานของตัวควบคุม ตัวควบคุมแบบ rate action (หรืออนุพันธ์) ตอบสนองแต่เฉพาะอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าเบี่ยงเบน โดยทางเลขจะได้ดังนี้

$$I_o = \tau \frac{dV_d}{dt} \quad \text{สมการ HE 7/1}$$

โดยที่  $I_o$  เป็นกระแสขาออก (mA)

$\tau$  เป็นค่าคงที่เวลาอนุพันธ์

$V_d$  เป็นแรงดันเบี่ยงเบน

เนื่องจาก  $V_d = V_s - V_p$  . . . สมการ HE 7/1 เขียนใหม่เป็น

$$I_o = \tau \frac{d(V_s - V_p)}{dt} \quad \text{สมการ HE 7/2}$$

แต่เนื่องจากค่า  $V_s$  คงที่ . . . สมการ HE 7/2 จะเป็น

$$I_o = \tau \left[ \frac{dV_s}{dt} - \frac{dV_p}{dt} \right]$$

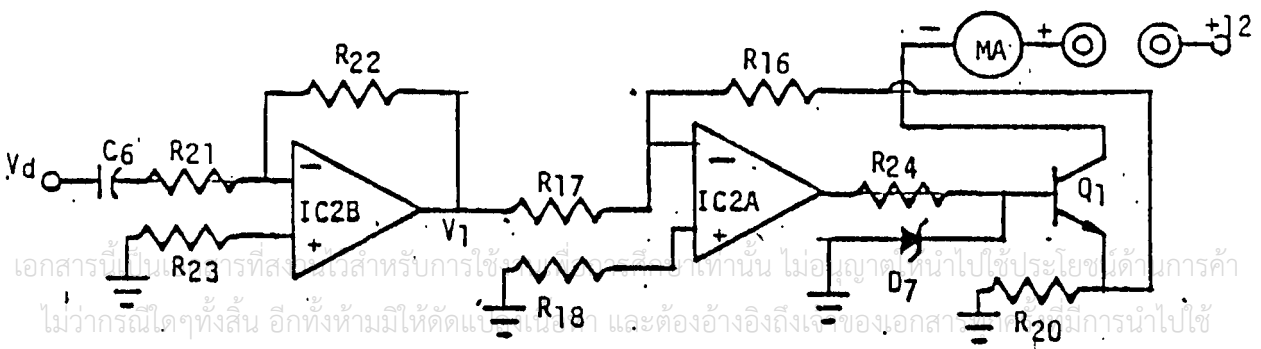
$$= -\tau \frac{dV_p}{dt} \quad \text{สมการ HE 7/3}$$

สำหรับค่าที่ไม่ต่อเนื่อง  $I_o = -\tau \frac{\Delta V_p}{\Delta t}$  . . . สมการ HE 7/4

$\tau$  คือค่าคงที่เวลาอนุพันธ์ (derivative time constant) และสามารถแปรเปลี่ยนได้ โดยปรับตำแหน่งของตัวควบคุมค่าคงที่เวลา หน่วยของ  $\tau$  เป็น (mA . sec) / Volt.

วงจรสมมูลอนุพันธ์ อาจแสดงได้ดังวงจร HF 7/1

รูป HF 7/1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้เฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแต่งแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ที่มีการนำไปใช้

IC2B, C6, R21, R23 และ  $R_{22}$  ประกอบขึ้นเป็นวงจรตรีเวทไฟโดยมีค่าคงตัวเวลา

$$\tau = R_{22} \cdot C_6$$

IC 2A และชิ้นส่วนประกอบอื่น ๆ ทำหน้าที่แปลงขาออกของคิฟเฟอเรนเชียลเอเตอร์ (Differentiator) เป็นกระแสขาออก  $I_o$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

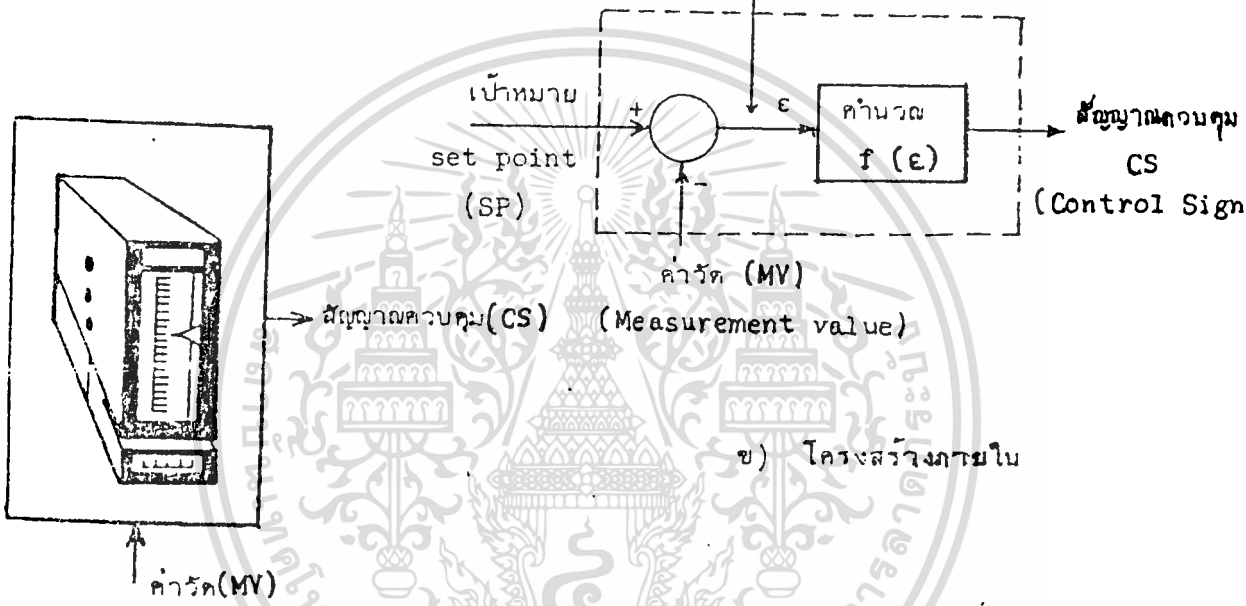
บทที่ 2

ตัวควบคุมและแบบการควบคุม (Controller and Control action)

ตัวควบคุมจะรับสัญญาณเข้าจากการวัด เพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายหรือ Set point ผลต่างของค่าทั้งสองจะถูกส่งให้ภาคคำนวณ เพื่อผลิตสัญญาณควบคุมขาออกซึ่งจะส่งออกไปให้ส่วนขับเคลื่อนอีกทีหนึ่ง โครงสร้างภายในตัวควบคุมแสดงในรูปที่ 2.1

ผลต่าง

(Control deviation)



ค) สัญญาณเข้าออก

รูปที่ 2.1 ตัวควบคุม

ความสัมพันธ์ของผลต่างกับสัญญาณควบคุมขาออก กำหนดโดยภาคคำนวณ ความสัมพันธ์นี้เรียกว่า Control action, Control action แบ่งออกเป็น 4 ชนิดคือ

ON-OFF action

Proportional action (P action)

Integral หรือ Reset action (I action)

Derivative action (D action)

การควบคุมจะใช้ action แต่ละชนิด หรือหลายชนิดผสมกัน เช่น ON-OFF, P, PI, PD, และ PID การควบคุมด้วยมือนั้นถ้าคนงานมีความชำนาญงาน การปรับจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับ

Control action เหล่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะโดยทางใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

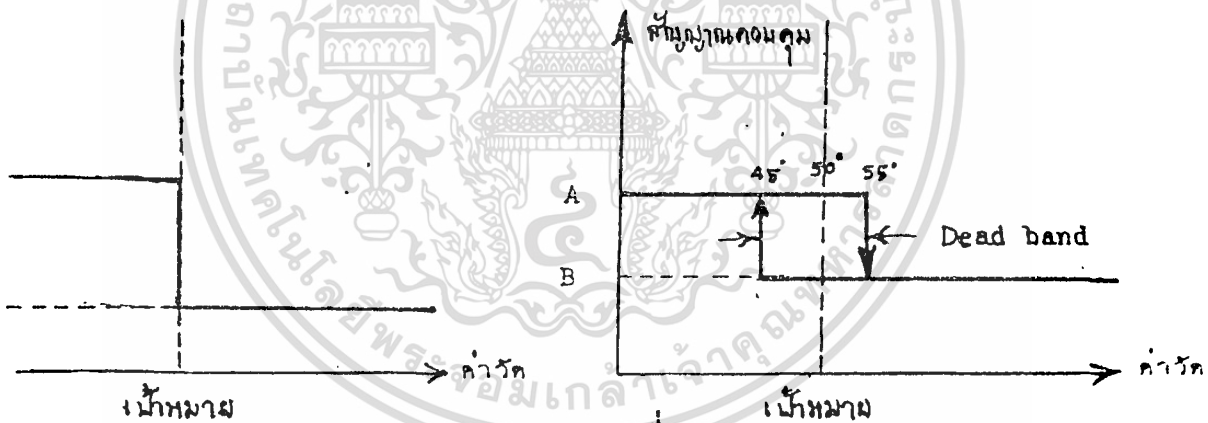
## 2.1 ON-OFF Control (2 - position action)

ON-OFF action คือ action ที่จะทำให้ความสัมพันธ์ของผลต่าง  $\epsilon$  กับ สัญญาณควบคุม (CS) ดังนี้

$$\text{เมื่อ } \epsilon \geq 0, \quad CS = A$$

$$\text{เมื่อ } \epsilon \leq 0, \quad CS = B$$

ตัว A และ B คือ ค่าใด 2 ค่าของ CS หรือสัญญาณควบคุม ดังนั้นการควบคุมแบบนี้ CS จะมีค่าเพียง 2 ค่าเท่านั้น บางครั้งจึงเรียกว่า 2 - position action เช่น ให้ความเร็วเปิดเต็มที่หรือปิดเต็มที่ เป็นต้น จากความสัมพันธ์ จะเห็นว่าเมื่อค่าวัด (MV) มีขนาดน้อยกว่าค่าเป้าหมาย (SP) ผลต่าง ( $\epsilon$ ) จะเป็นบวก สัญญาณควบคุมจะมีค่าใดค่าหนึ่ง (A หรือ B) ซึ่งจะทำให้โปรเซสเปลี่ยนไปในทางที่ค่าวัดจะสูงขึ้น ยกตัวอย่างเช่น เมื่ออุณหภูมิของน้ำร้อนที่ออกจาก Heat exchanger เกินกว่าเป้าหมาย วาล์วจะถูกควบคุมให้ปิด เมื่ออุณหภูมิของน้ำร้อนลดลงแต่ถ้าลดลงกว่าเป้าหมายให้เปิดวาล์ว เพื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นมา



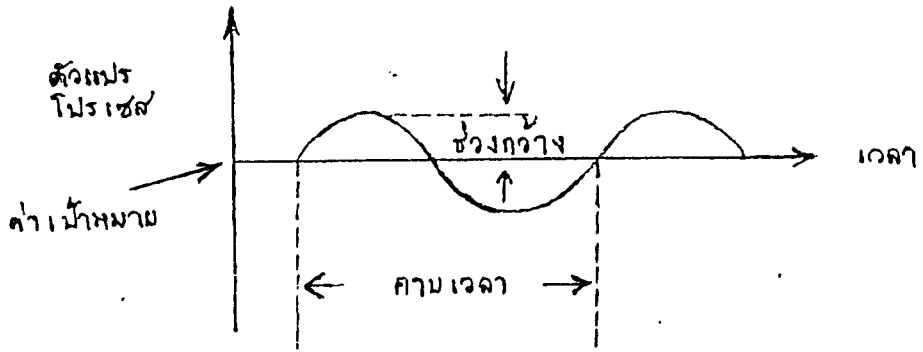
รูปที่ 2.2

ตามปกติการควบคุมแบบ ON-OFF จะมี Dead band ซึ่งเป็นอาณาเขตของค่าเป้าหมายซึ่งจะยอมให้ค่าวัดผิดพลาดไปจากค่าเป้าหมายได้บ้างก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม

การควบคุมแบบ ON-OFF เป็นการเปิดปิดพลังงานที่เข้าโปรเซสเป็น Cycle ดังนั้นผลของการควบคุมอาจทำให้โปรเซสเกิดการแกว่ง (Cycling) ขึ้นได้ ช่วงกว้าง (Amplitude) และคาบเวลา (period) ในการแกว่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของโปรเซสเอง เช่น Dead time, ค่า Resistance หรือ Capacitance

"การควบคุมแบบ ON-OFF จะได้ผลต่อเมื่อโปรเซสนั้นมีค่าคงตัวเวลายาวมากแต่มี dead time สั้นเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

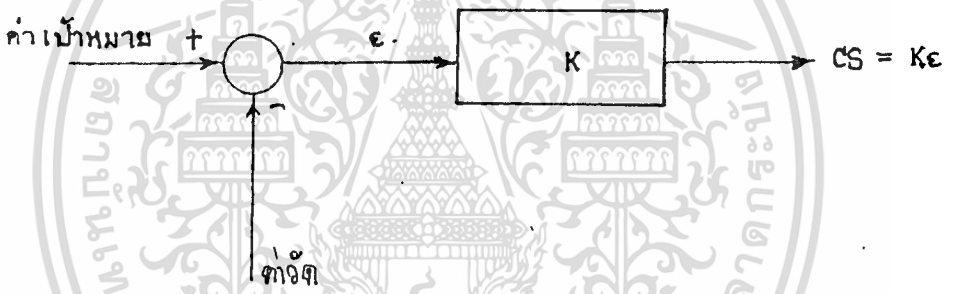


รูปที่ 2.3 การแกว่งของผลของการควบคุม

2.2 Proportional action

Proportional action คือ action ที่ทำให้สัญญาณควบคุมแปรผันโดยตรงกับ

ผลต่าง



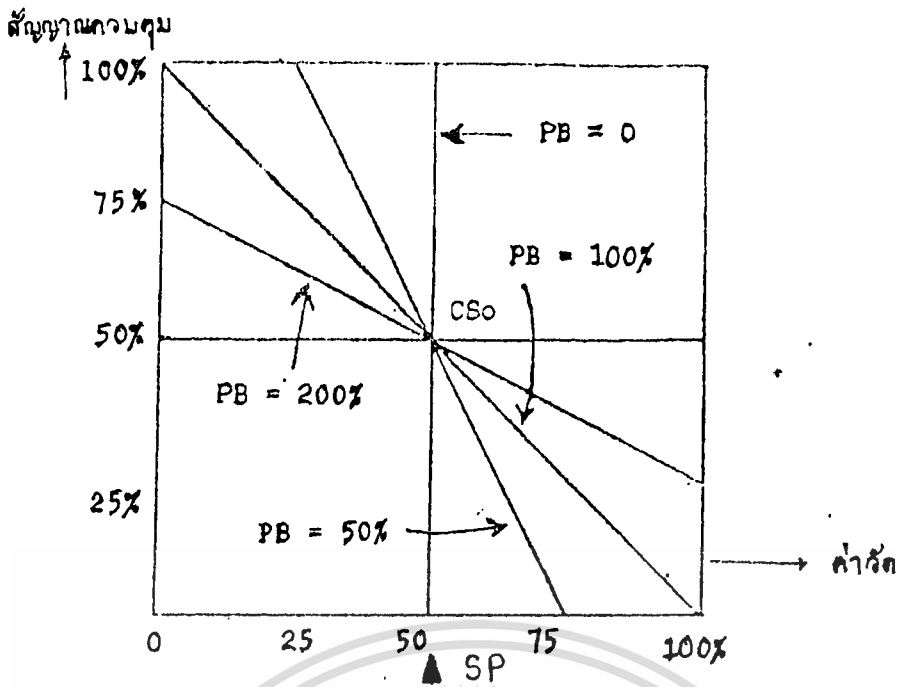
รูปที่ 2.4

I คือ Proportional gain สัญญาณควบคุมก็คือ การขยายผลต่างด้วยอัตราขยาย K นั้นเอง ตามปกติในระบบการควบคุมมักจะไม่นิยมใช้ K แต่จะให้ Proportional Band (PB) แทน โดยที่

$$PB = \frac{1}{K} \times 100\%$$

PS มีความหมายคือ ผลต่าง  $\epsilon$  จะต้องเปลี่ยนไป PB% จึงจะต้องพอที่ทำให้สัญญาณควบคุม เปลี่ยนจาก 0 ถึง 100%

รูปที่ 2.5 แสดงความหมายของ PB นี้



รูปที่ 2.5. ความหมายของ Proportional band

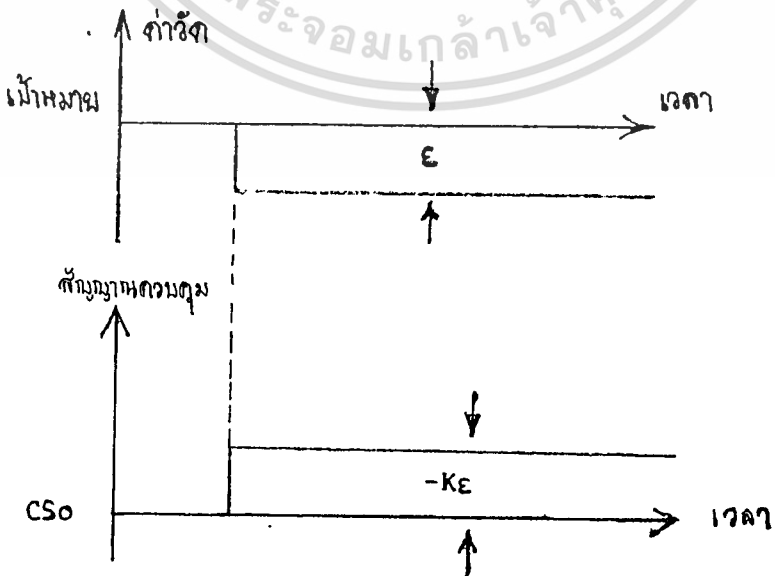
จะเห็นได้ว่าเมื่อ PB มีค่าเล็กลง อัตราขยายจะสูงขึ้น และเมื่อ  $PB = 0\%$  อัตราขยายเป็นอนันต์ การทำงานของ Proportional action จะกลายเป็น ON-OFF

ในรูปที่ 2.5 ถ้าค่าเป้าหมายอยู่ที่ 50% และค่าวัดได้ 50% ผลต่างจะเท่ากับ ศูนย์ ขณะนั้น สัญญาณควบคุมจะมีค่า  $CS_0$  ดังนั้น สัญญาณควบคุมจะถูกกำหนดจากความสัมพันธ์ดังนี้

$$CS = -KE + CS_0$$

การที่จำเป็นต้องมี  $CS_0$  หรือที่เรียกว่า ไบแอส (Bias) นั้น เพื่อให้ผลต่างเท่ากับศูนย์สัญญาณควบคุม CS จะได้ไม่เท่ากับศูนย์ไปด้วยเพราะจะทำให้ควบคุมโปรเซสไม่ได้

รูปที่ 2.6 แสดงผลตอบแทนของ Proportional action เมื่อผลต่างเป็น Step input



รูปที่ 2.6 ผลตอบแทนของ Proportional action

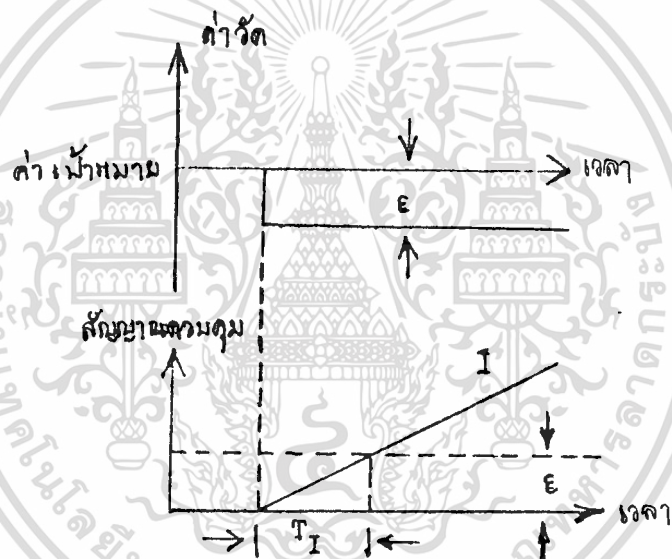
## 2.4 Reset action (Integral action)

Reset action คือ action ที่ทำให้เกิดความสัมพันธ์ดังนี้

$$CS = \frac{1}{T_I} \cdot \int \epsilon dt$$

โดยที่  $T_I$  คือ Reset time มีหน่วยเป็น นาที

การควบคุมแบบสัดส่วนควบคุมจะแปรตามค่าอินทิเกรตต่อเวลาของผลต่าง เมื่อผลต่างเปลี่ยนเป็น Step สัดส่วนควบคุมจะค่อย ๆ เพิ่มค่าขึ้นตามเวลา ดังรูปที่ 2.8

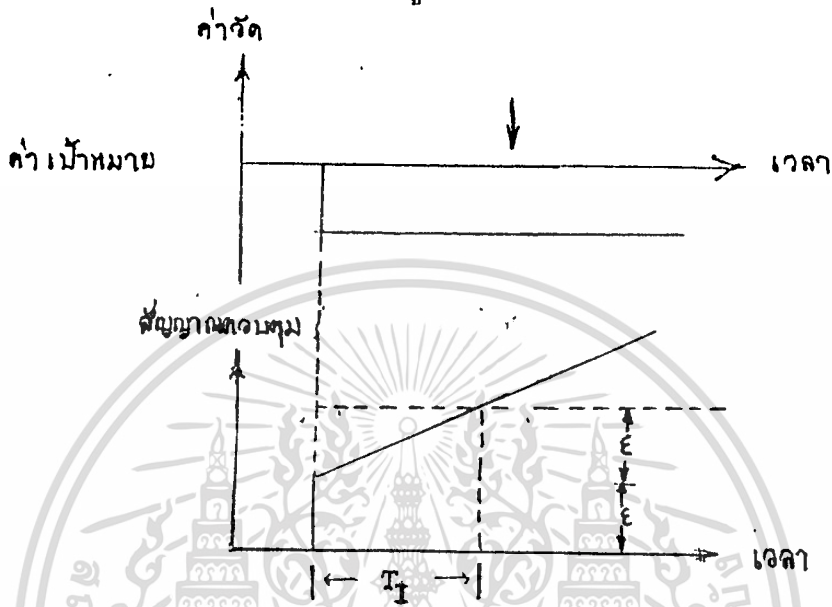


รูปที่ 2.8 ผลตอบของ Reset action

ตามรูปความหมายของ Reset time ( $T_I$ ) คือเวลาที่ใช้ไปในการเพิ่มค่าของสัดส่วนควบคุมจนมีขนาดเท่าผลต่าง  $\epsilon$  ที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นเมื่อ  $T_I$  มีค่าน้อย ผลของ Reset action จะมากกว่าเมื่อ  $T_I$  มีค่ามาก

2.5 PI action

ตามปกติ Reset action มักจะไม่ใช้โดด ๆ แต่จะใช้ควบคู่กับ P เสมอ  
 ผลตอบของ PI action แสดงในรูป 2.9



คุณสมบัติของ Reset action

รูปที่ 2.9

1. Offset ที่เกิดจาก P action จะถูก Reset action แก้วจนหมดไป
2. เมื่อ  $T_I$  มีค่าน้อยลง ผลของ Reset action จะมากทำให้เกิดการแกว่งขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ (Unstable)

2.6 Derivative action (Rate action)

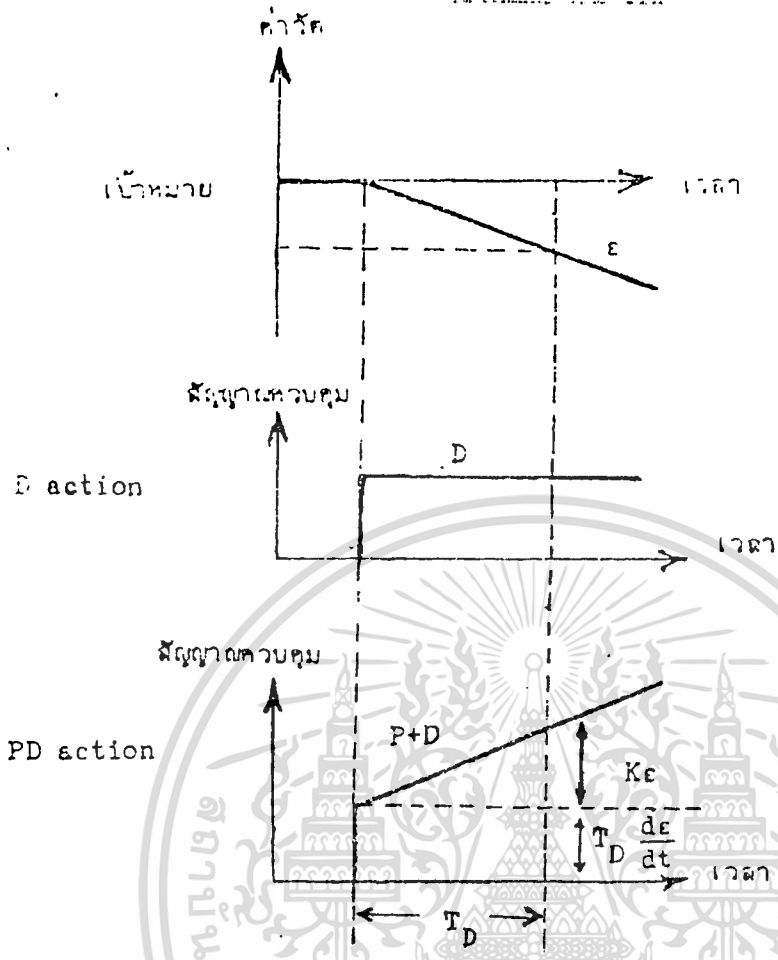
action ที่ทำให้ความสัมพันธ์ของสัญญาณควบคุมกับผลต่างเป็นไปตามสูตร

$$CS = T_D \frac{dE}{dt}$$

โดยที่  $T_D$  คือ Derivative time มีหน่วยเป็นนาที

สัญญาณควบคุมจะแปรผันตามอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของผลต่าง การควบคุมชนิดนี้มีผลในการหยุดการแปรเปลี่ยนของตัวแปรโปรเซสซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไป เมื่อตัวแปรโปรเซสเปลี่ยนไปด้วยอัตราหนึ่ง สัญญาณควบคุมจะถูกผลิตให้แปรผันกับอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้ จะถูกสร้างขึ้นเพื่อไปหยุดการเปลี่ยนแปลง D action เหมาะสำหรับไปใช้กับโปรเซสที่มี time lag มาก ๆ ผลตอบของ

D action และ PD action รับผิดชอบแสดงในรูปที่ 2.10 เขาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 D action และ PD action

จากรูปจะเห็นว่า  $T_D$  จะเท่ากับช่วงเวลาที่ผลต่าง  $\epsilon$  เปลี่ยนแปรไปจนมีค่าเท่ากับค่าความชันของการเปลี่ยนแปลงนี้ ถ้า  $T_D$  มากจะทำให้ผลของ D action มาก

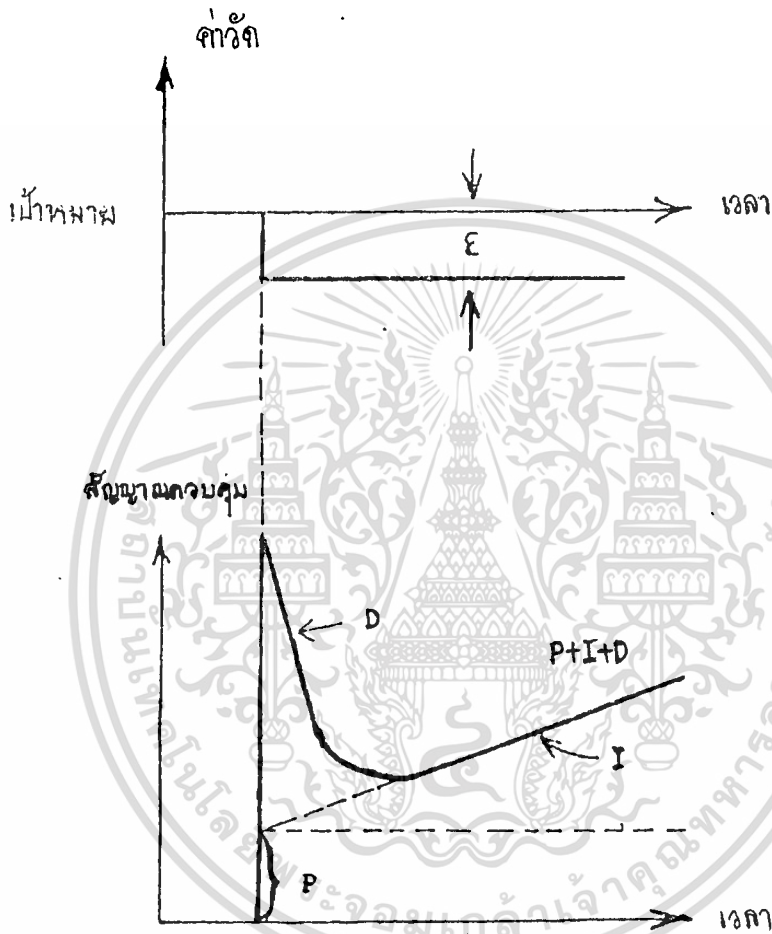
คุณสมบัติของ D action

1. เหมาะสำหรับโปรเซสที่มี Time lag จะช่วยทำให้การควบคุมถึงจุดที่ต้องการเร็วขึ้น
2. ถ้า  $T_D$  มากไป ผลของ D จะมากทำให้ระบบทั้งระบบไวขึ้น ขาดเสถียรภาพ
3. ไม่เหมาะสำหรับโปรเซสที่มี Time lag น้อยและตัวแปรโปรเซสเปลี่ยนแปลงได้ง่าย เช่น ระบบควบคุมการไหล ความดัน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 PID action

ได้แก่การรวม P, I, D action



รูปที่ 2.11 PID action

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การออกแบบและสร้างอิเล็กทรอนิกส์ คอนโทรลเลอร์

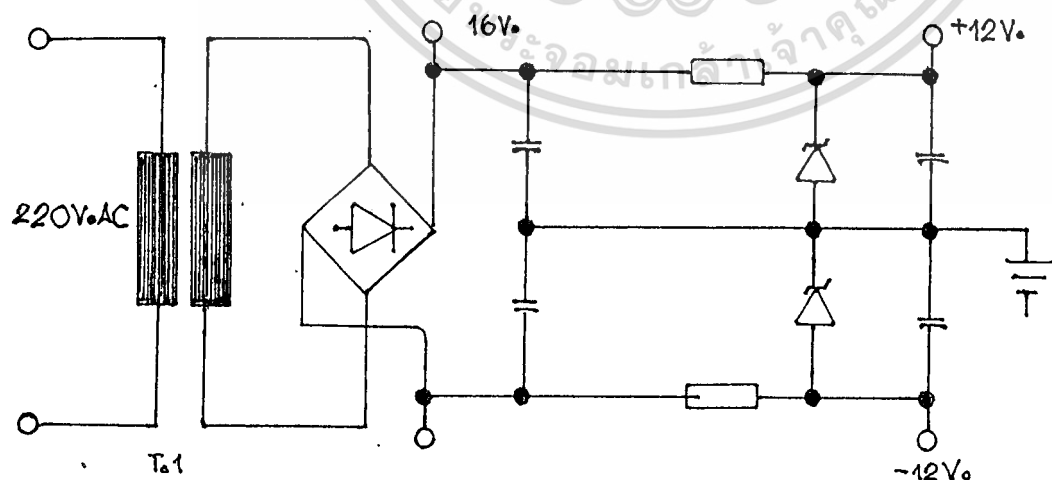
อิเล็กทรอนิกส์ คอนโทรลเลอร์ตัวนี้อาศัยการทำงานของ Operational Amplifier เป็นหลักสำคัญในการประกอบวงจร

- Difference Amplifier
- Inverting Amplifier, Noninvert Amplifier
- Integrator
- V/I Convertor

ส่วนภาคอื่น ๆ คือ ภาคแสดงผลโดยอาศัย Digital Voltmeter มีผ่านการวัดครอบคลุม 5 โวลต์ ซึ่งจะแสดงผลโดยใช้สวิทช์เลือก mode เช่น input, output, deviation และ Set Point ค่าเหล่านี้จะแสดงออกบนส่วน Digital Voltmeter ส่วนภาค Supply เรา จะแยกทั้งภาคคอนโทรลเลอร์กับภาคแสดงผลออกจากกันเป็นวงจร Convertor แบบง่ายและราคา ถูก

#### 3.1 ภาค Power Supply ของคอนโทรลเลอร์

ซึ่งใช้แรงดัน 2 ระดับ คือ 16 VDC และ  $\pm 12$ VDC โดยใช้วงจรควบคุมดังนี้

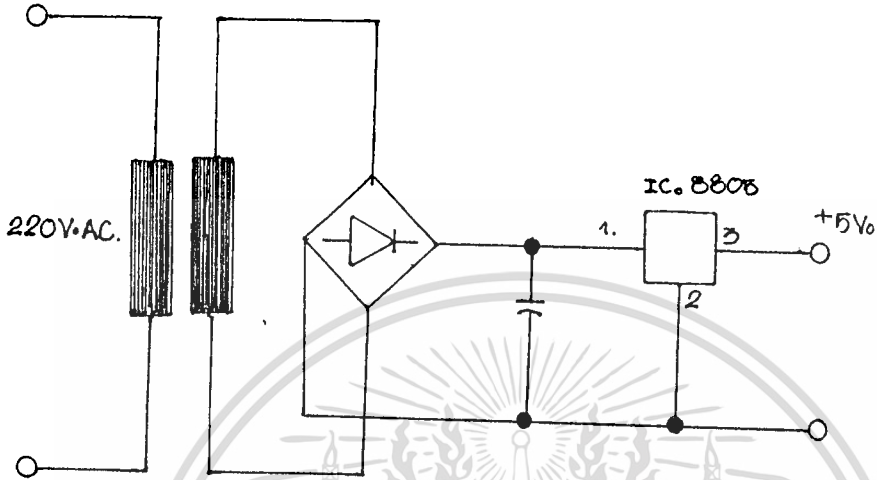


รูปที่ 3.1

จากวงจรเป็น Convertor แบบ Bridge Rectifier แบบง่าย ๆ รักษาระดับ แรงดัน  $\pm 12$  VDC โดย Zener Diode  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ภาค Power Supply ของภาค Display

โดยใช้แรงดันขนาด 5 VDC โดยใช้วงจรควบคุมดังนี้

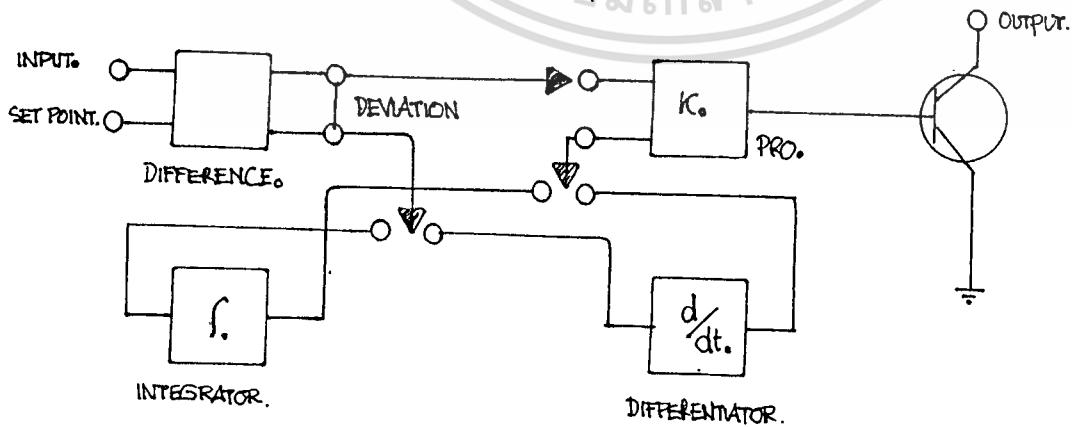


รูปที่ 3.2

จากวงจรเป็น Converter ที่อาศัยการทำงานรักษาแรงดันปรับระดับแรงดันคงที่แบบ 5 VDC Voltage Regulator แบบง่ายและถูกที่สุดเพื่อให้เหมาะสมกับงาน

3.3 ภาคคอนโทรลเลอร์

ประกอบด้วย Operational Amplifier 4 ตัวและ Transistor 1 ตัวต่อ วงจรดังรูปดูที่ภาคผนวก ส่วนนี้จะแสดง Block Diagram ให้เห็น



รูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

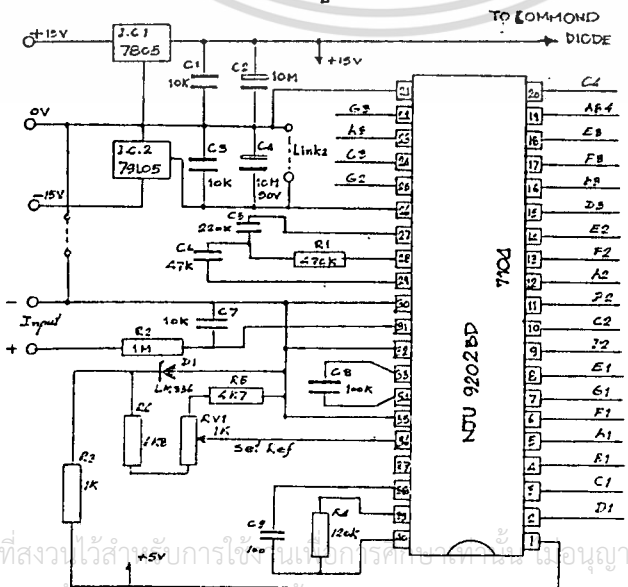
การทำงานโดยย่อ : เมื่อเรานำอิเล็กทรอนิกส์ คอนโทรลเลอร์ไปต่อใช้งานซึ่งมีสัญญาณขาเข้า (Vp) ซึ่งได้มาจากตัวส่งสัญญาณ (Transmitter) ซึ่งอาจจะได้จากการรับมาจากสื่อ (Sensor) แล้วแปลงเป็นสัญญาณมาตรฐานซึ่งเครื่องนี้จะรับ 0 - 5 V เมื่อสัญญาณรับเข้าทาง vp แล้วจะถูกนำมาเปรียบเทียบทางคณิตศาสตร์กัน โดยใช้ Operational Amplifier แบบ Difference Amplifier จะทำให้เกิดสัญญาณแตกต่าง (Deviation Signal) Vd ออกมาสัญญาณนี้จะถูกส่งเข้าภาคคำนวณที่เราคือ

- Proportional
- Derivative
- Integral

ทั้งหมดนี้เพื่อให้คุณลักษณะของการควบคุมสอดคล้องกับการควบคุมแบบ P, I และ D ที่ในวงอุตสาหกรรมต้องการ แรงดันขาออกนั้นโดยปกติแล้วเป็นสัญญาณแรงดัน แต่ถ้าต้องการส่งสัญญาณในระยะทางไกล ๆ นั้นจะทำให้แรงดันตกคร่อมในสาย จึงให้แรงดันขาออกเป็นกระแสโดยนำแรงดันขาออกแปลงเป็นกระแสโดยอาศัย transistor ซึ่งสามารถสร้างกระแสอยู่ในช่วง 0 - 50 milliamp แต่ในการทดลองเราจะแสดงแรงดันขาออกเป็น Volts โดยที่จะนำเอาความต้านทานขนาด 100 โอห์มมาต่อแทนค่าภาระ (Load) ซึ่งเป็นการทำสัญญาณกระแสเป็นสัญญาณแรงดัน (Current to Voltage Source) ซึ่งเหมาะแก่การสาธิตให้นักศึกษาได้ชมและทดลอง

3.4 ภาคแสดงผล (Display)

ประกอบด้วยวงจรที่ประกอบด้วย Ic เบอร์ 7104 และ LED แสดงผล 3 หลักครึ่ง ซึ่งแสดงผลแรงดันได้ 19.99 โวลท์ ดังวงจรรูปข้างล่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในหลักสูตรเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4

ความเหมาะสมในการใช้ภาคแสดงผลเป็นแบบ Digital สามารถใช้ Selector เลือกวัดค่าต่าง ๆ เช่น Process Voltage, Set Point Voltage, Input และ Output Voltage ถ้าเราใช้ meter แบบเข็มชี้ ซึ่งแสดงผล Volt ออกมาได้โดยใช้ Selector นั้นวัดได้เฉพาะ Voltage ข้างต้นแต่ Voltage แบบ Deviation จะแสดงไม่ได้ซึ่งต้องซื้อ Meter แบบมี 0 ตรงกลางจึงจะใช้วัด Deviation Voltage ได้ ซึ่งมีราคาสูงกว่าแบบ Digital มาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

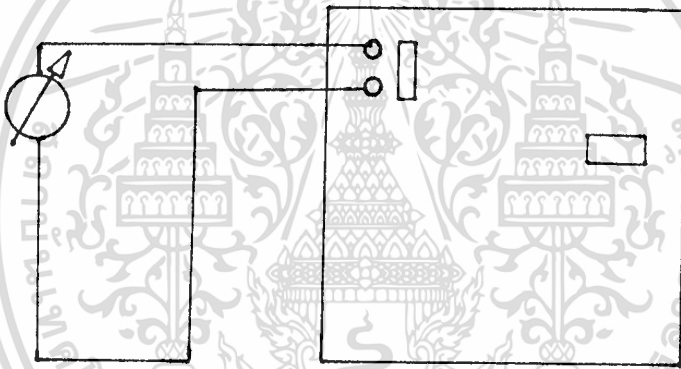
## บทที่ 4

### การทดลองอิเล็กทรอนิกส์ คอนโทรลเลอร์

#### 4.1 วงจรขยายความแตกต่าง

วัตถุประสงค์เพื่อ : เพื่อที่จะทำความเข้าใจเกี่ยวกับวงจรขยายความแตกต่างและเพื่อหาความแตกต่างระหว่างจุด Set Point กับค่าที่ได้จากขบวนการ Process Input

อุปกรณ์ที่ต้องใช้ : - อิเล็กทรอนิกส์ คอนโทรลเลอร์  
- แหล่งจ่ายแรงดันที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ 0 - 5 โวลต์



แหล่งจ่ายแรงดัน 0-5 โวลต์

อิเล็กทรอนิกส์ คอนโทรลเลอร์

รูป HF 1/2

#### ขั้นตอน

1. บ้อนแรงดันให้กับอิเล็กทรอนิกส์ คอนโทรลเลอร์
2. บ้อนแรงดัน 0 - 5 โวลต์เข้าทาง Input
3. ปรับแรงดันทางเข้าเป็นศูนย์ โวลต์
4. ปรับสวิตช์กระบวนการ (Mode) ไปที่ปกติ (Normal)
5. ปรับ Set Point ไว้ที่ 2.5 โวลต์
6. ปรับค่าแรงดันทางเข้า 0, 1, 2, 3, 4, และ 5 โวลต์
7. ตั้งแรงดันทางเข้าไว้ที่ 2.5 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. บันทึกค่าที่อ่านได้ พร้อมคำนวณตามสมการ

$$V_d = V_s - V_p$$

แรงดันขาเข้า	0	1	2	3	4	5
แรงดันกำหนด	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
แรงดันแตกต่าง	2.5	1.5	0.5	-0.5	-1.5	-2.5

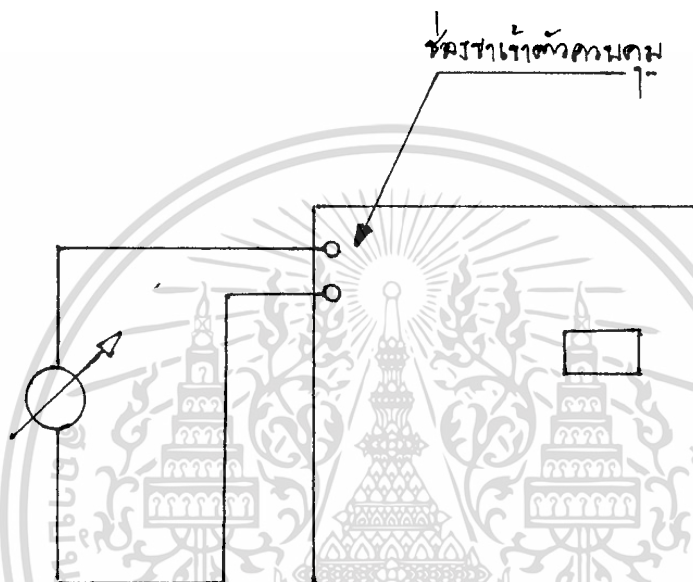


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 กระบวนการแบบปกติและแบบกลับ

วัตถุประสงค์เพื่อ : เพื่อใช้ควบคุมการทำงานกระบวนการได้ทั้งปกติและแบบกลับ

อุปกรณ์ที่ใช้ : -อิล็กทรอนิกส์ คอนโทรลเลอร์  
-แหล่งจ่ายแรงดันที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ 0 - 5 โวลต์



รูป HF 2/2

#### ขั้นตอน

1. ต่อแหล่งจ่าย 0 - 5 โวลต์ ให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์ คอนโทรลเลอร์
2. ปรับกระบวนการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์ คอนโทรลเลอร์เป็นแบบปกติ
3. จ่ายแรงดัน 220 Vac ให้กับอิเล็กทรอนิกส์ คอนโทรลเลอร์
4. ตั้งแรงดัน Set Point 2.5 โวลต์
5. ปรับแรงดันจากแหล่งจ่ายเข้าทางขาเข้า 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 โวลต์
6. บันทึกค่าที่วัดได้จากการแสดงค่าของความแตกต่าง
7. ทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตัวปรับกระบวนการเป็นกลับ
8. บันทึกค่าที่วัดได้จากการแสดงค่าของความแตกต่าง

## 9. คำนวณหาค่าแตกต่างตามสมการ

$$V_d = V_s - V_p \quad \text{แบบกระบวนปกติ}$$

แรงดันโปรเซส	0	1	2	3	4	5
แรงดันกำหนด	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
แรงดันแตกต่าง Mode Normal	2.5	1.5	0.5	-0.5	-1.5	-2.5
แรงดันแตกต่าง Mode Invert	-2.5	-1.5	-0.5	0.5	1.5	2.5

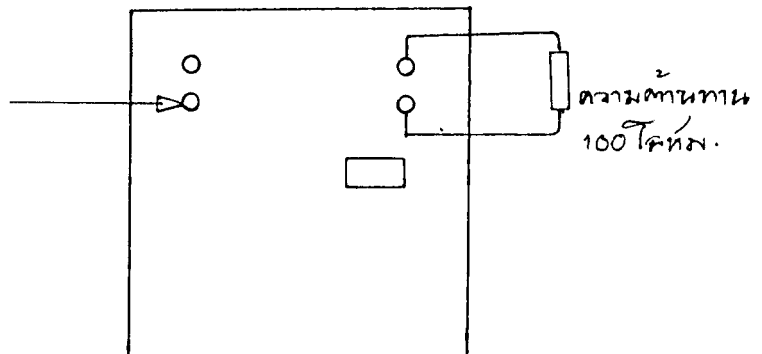
## ตารางที่ 2

## 4.3 การทดลองควบคุมด้วยมือ

วัตถุประสงค์เพื่อ : แสดงการทำงานของการทำงานการควบคุมด้วยมือและแสดงผลที่ได้จากการควบคุมทางวงจรรวชาออก

อุปกรณ์ที่ใช้ : - อิเล็กทรอนิกส์ คอนโทรลเลอร์  
- แหล่งจ่ายแรงดัน 0 - 5 โวลต์

ช่องหน้าตัวควบคุม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่อาจารย์ท่านนั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูป HF 3/2  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นตอน :

1. ต่อแหล่งจ่ายแรงดัน 0 - 5 โวลต์ เข้าทางขาเข้าของอิเล็กทรอนิกส์  
คอนโทรลเลอร์
2. ปรับสวิตช์การควบคุมไปที่ Auto
3. ปรับสวิตช์การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional) ไปที่ ON
4. ปรับสวิตช์กระบวนการแบบการทำงานไปที่ปกติ
5. ปรับ Set Point ไปที่ 2.5 โวลต์
6. ปรับ Proportional Gain Control ให้แรงดันขาออกเป็น 2.5  
โวลต์ อัตราขยายแบบสัดส่วน (Proportional Gain) จะมีขนาด  
1 เท่า
7. ปรับ Set Point ไปที่ 0 โวลต์
8. ปรับปุ่ม Manual/Auto Zero Control เพื่อให้แรงดันขาออกเป็น  
2.5 โวลต์
9. ปรับ Set Point Control ให้มีค่า 2.5 โวลต์
10. ปรับแรงดันจากขบวนการให้แรงดันขาเข้าเป็น 0, 1, 2, 3, 4 และ  
5 โวลต์
11. บันทึกค่าแรงดันขาออกและแรงดันเบี่ยงเบนตามสมการ

$$V_o = A_p (V_s - V_p) + K V_l$$

$$V_o = \text{Output Voltage}$$

$$A_p = \text{Proportional Gain}$$

$$V_s = \text{Set Point Voltage}$$

$$V_p = \text{Process Voltage}$$

$$K V_l = \text{Bias Voltage}$$

แรงดันโปรเซส	0	1	2	3	4	5
แรงดันควบคุม	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
แรงดันขาออก	5	4	3	2	1	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

## ตารางที่ 3

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. ปรับ Manual/Auto Zero Control ให้แรงดันขาออกเป็น 2.5 โวลต์
13. ปรับ Set Point Control ให้มีค่า 2.5 โวลต์
14. ปรับแรงดันขาเข้าเป็น 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 คูณด้วยแรงดันขาออกเป็นเท่าไร

แรงดันโปรเซส	0	1	2	3	4	5
แรงดันกำหนด	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
แรงดันขาออก	3.75	3.0	2.75	2.25	2.0	1.25

ตารางที่ 4

#### สมการแรงดันขาออก

$$V_o = A_p (V_s - V_p) + V_z$$

$A_p$  = อัตราขยายสัดส่วน

$V_s$  = แรงดันจุดกำหนด

$V_p$  = แรงดันโปรเซส

$V_z$  = แรงดันปรับแต่ง

$V_o$  = แรงดันขาออก

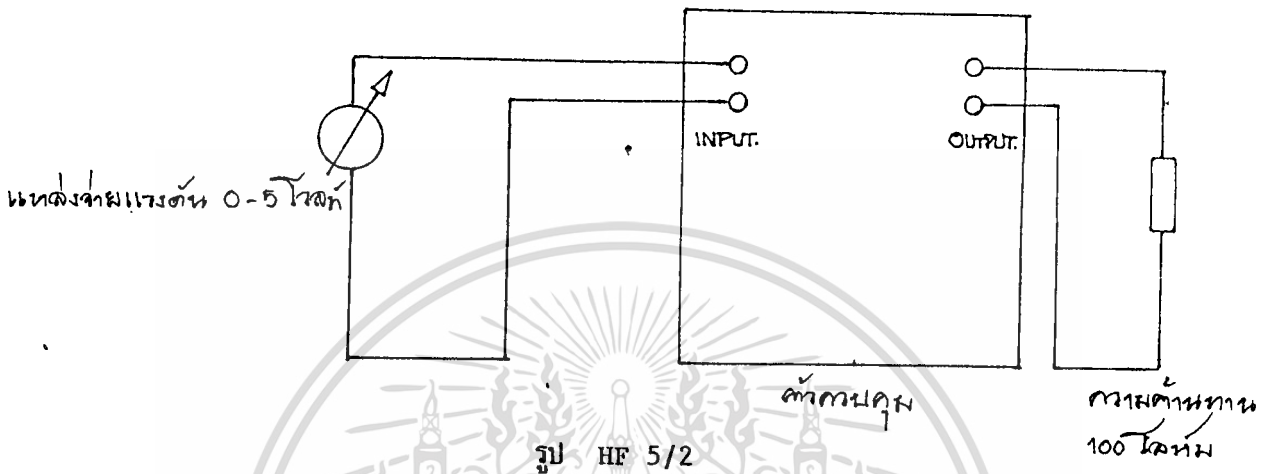
#### 4.5 การควบคุมแบบ เปิด - ปิด (ON - OFF Control)

วัตถุประสงค์ : เพื่อคุณลักษณะการทำงานแบบ เปิด - ปิด

อุปกรณ์ที่ใช้ : - ตัวควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์

- แหล่งจ่ายแรงดันขาเข้า 0 - 5 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ขั้นตอน :

1. ปรับสวิตช์ Operation Mode ไปที่ Normal
2. ปรับสวิตช์ Auto/Manual ไปที่ Auto
3. ปรับสวิตช์ Proportional Control ไปที่ตำแหน่ง ON
4. ปรับสวิตช์ Integral Control ไปที่ตำแหน่ง OFF
5. ปรับสวิตช์ Derivative Control ไปที่ตำแหน่ง OFF
6. บ้อนแหล่งจ่ายให้แก่ชุดควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์
7. ปรับ Manual/Auto - Zero Control เพื่อให้แรงดันขาออกเป็น 5 โวลต์
8. ปรับ Set Point Control เพื่อให้มีค่า 2.5 โวลต์
9. ปรับ Proportional Gain Control ไปตำแหน่ง 250
10. บ้อนแรงดันขาเข้า 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 โวลต์ตามลำดับ
11. บันทึกค่าแรงดันขาออกพร้อมทั้งคำนวณโดยใช้สมการ

$$V_o = A_p (V_s - V_p) + V_z$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_o$  = แรงดันขาออก

$V_p$  = แรงดันโปรเซส

$V_s$  = แรงดันจุดกำหนด

$A_p$  = อัตราขยายสัดส่วน

$V_z$  = แรงดันปรับแต่ง

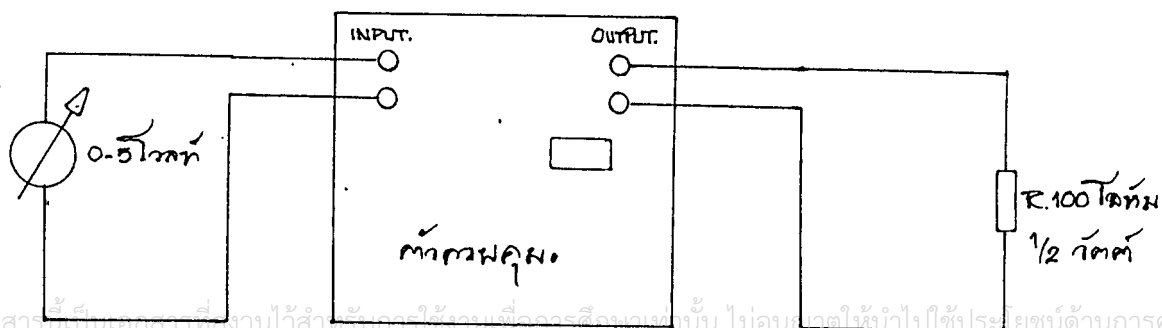
แรงดันโปรเซส	0	1	2	3	4	5
แรงดันกำหนด	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
แรงดันขาออก	5	5	5	0	0	0

ตารางที่ 5

#### 4.6 การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control)

วัตถุประสงค์ : เพื่อแสดงการทำงานของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

อุปกรณ์ที่ใช้ : - อเล็คทรอนิกส์ คอนโทรลเลอร์  
- แหล่งจ่ายแรงดันขาเข้า 0 - 5 โวลต์



ขั้นตอน :

1. ปรับสวิตช์ไปที่ Operation mode ไปที่ Normal
2. ปรับสวิตช์ Auto - Manual ไปที่ตำแหน่ง Auto
3. ปรับสวิตช์ Proportional Control ไปที่ OFF
4. ปรับสวิตช์ Integral Control ไปที่ตำแหน่ง OFF
5. ปรับสวิตช์ Derivative Control ไปที่ตำแหน่ง OFF
6. ปรับ Manual/Auto - Zero Control เพื่อให้แรงดันขาออกเป็น 5 โวลต์
7. ปรับ Set Point Control 1 โวลต์
8. ปรับ Integral Control ไปที่ตำแหน่ง ON
9. ปรับเวลาของ Integrator ให้เป็น 10 SEC
10. ปรับสวิตช์ Integrator ไปที่ตำแหน่ง OFF
11. ปรับแรงดันขาเข้าเป็น 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 โวลต์ ตามลำดับแล้ว เริ่มทดลองตั้งแต่ 7 - 10 โดยปรับแรงดันขาเข้าทีละค่า
12. บันทึกค่าเวลาที่ทำให้แรงดันขาออกมีค่าเป็น 0 ตามสมการ

$$t = \frac{V_o \tau}{V_s - V_p}$$

เมื่อ  $t$  = เวลาที่ทำให้แรงดันขาออกเป็น 0

$V_o$  = แรงดันขาออก (5 โวลต์)

$\tau$  = ค่าคงที่ของเวลา

$V_s$  = แรงดัน Set Point

$V_p$  = แรงดันโปรเซส

แรงดันโปรเซส	0	1	2	3	4	5
แรงดันกำหนด	1	1	1	1	1	1
เวลาที่ทำให้แรงดันขาออกเป็น 0	150	50	50	25	17	13

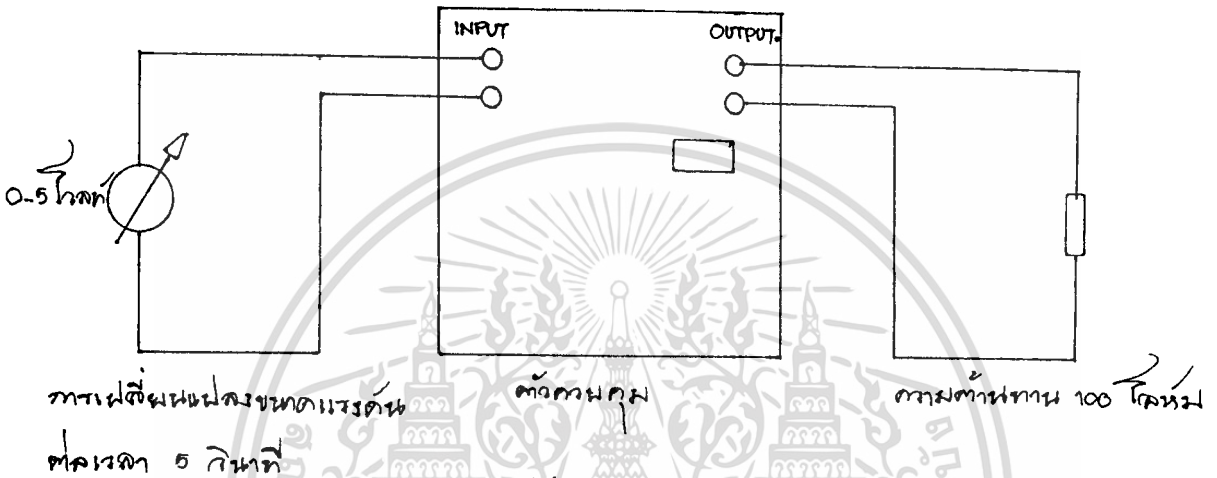
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะที่อาคารเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 การควบคุมแบบเดริเวทีฟ (Derivative Control)

วัตถุประสงค์ : เพื่อแสดงการทำงานของตัวควบคุมแบบเดริเวทีฟ

อุปกรณ์ที่ใช้ : - อิเล็กทรอนิกส์ คอนโทรลเลอร์  
- แหล่งจ่ายแรงดันแบบปรับค่าได้ 0 - 5 โวลต์.



รูป HF 7/2

ขั้นตอน :

1. ปรับสวิตช์ Operation Mode ไปที่ Normal
2. ปรับสวิตช์ Auto - Manual ไปที่ Auto
3. ปรับสวิตช์ Proportional Control ไปที่ OFF
4. ปรับสวิตช์ Integral Control ไปที่ OFF
5. ปรับค่า Set Point ไปที่ 0
6. ปรับ Manual/Auto - Zero Control ให้แรงดันขาออกเป็น 3.4 โวลต์
7. ปรับ Derivative Control ไปที่ ON
8. ค่อยปรับแรงดันขาเข้าเป็นลำดับขั้นจาก 0 - 1 โวลต์ใช้เวลา 5 วินาที
9. บันทึกค่าแรงดันขาออกที่มีการเปลี่ยนแปลง
10. ปรับแรงดันขาเข้าจาก 1 - 2 โวลต์ ใช้เวลา 5 วินาที
11. บันทึกค่าแรงดันขาออกที่มีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

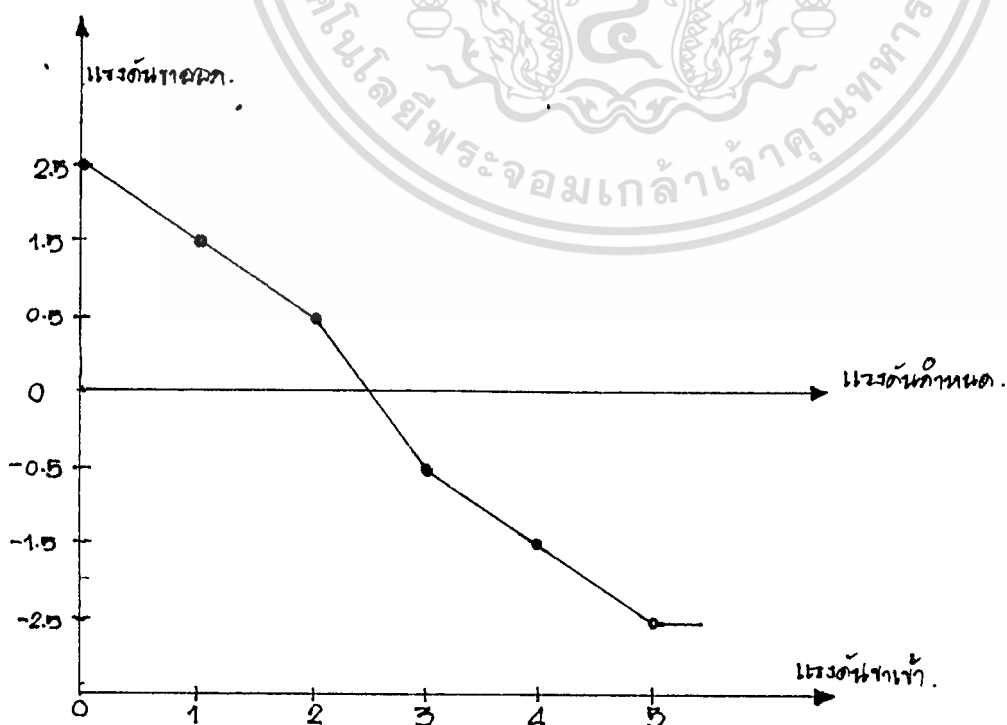
ผลการทดลองและสรุป

5.1 วงจรมหาความแตกต่าง

แรงดันขาเข้า	0	1	2	3	4	5
แรงดันกำหนด	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
แรงดันแตกต่าง	2.5	1.5	0.5	-0.5	-1.5	-2.5

ตารางที่ 1

แรงดันขาเข้าเป็นแรงดันที่รับเข้ามาจาก Transmitter มีค่าอยู่ในช่วง 1 - 5 โวลต์หรือ 4 - 20 mA และค่าแรงดันกำหนดจะมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน แรงดัน 2 ค่าจะนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าแตกต่างกัน (Error) และนำไปขยายและควบคุมแบบต่าง ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการแรงดันแตกต่าง

$$V_d = V_s - V_p$$

$$V_d = \text{แรงดันแตกต่าง}$$

$$V_s = \text{แรงดันกำหนด}$$

$$V_p = \text{แรงดันขาเข้า}$$

จาก Data ที่ได้ที่ 0 โวลต์และแรงดันกำหนด 2.5 โวลต์

$$V_d = 2.5 - 0 = 2.5 \text{ โวลต์}$$

จาก Data ที่ได้ 5 โวลต์และแรงดันกำหนด 2.5 โวลต์

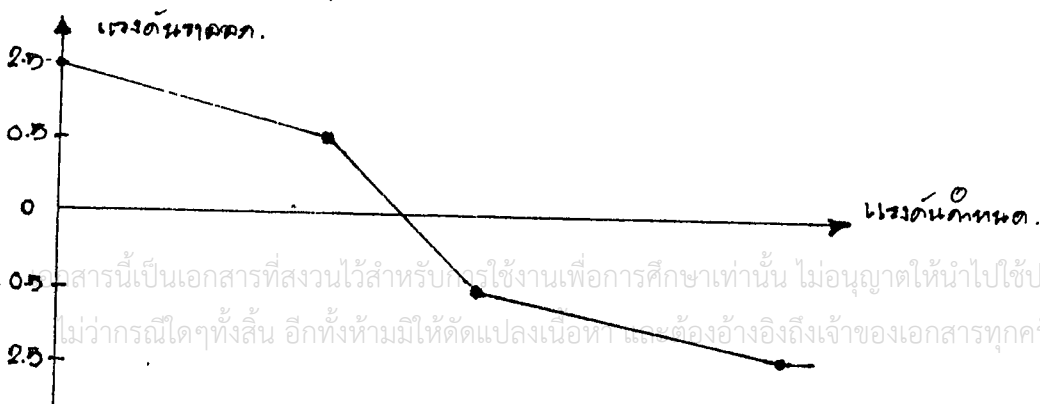
$$V_d = 2.5 - 5 = -2.5 \text{ โวลต์}$$

ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองทุก ๆ Data

## 5.2 กระบวนการแบบปกติและแบบกลับ

แรงดันโปรเซส	0	1	2	3	4	5
แรงดันกำหนด	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
แรงดันแตกต่าง Mode Normal	2.5	1.5	0.5	-0.5	-1.5	-2.5
แรงดันแตกต่าง. Mode Invert	-2.5	-1.5	-0.5	0.5	+1.5	+2.5

จากตารางที่ได้จากการทดลองจะเห็นว่า Mode ทั้งสองจะตรงกันข้ามกันเพื่อสะดวกกับการควบคุมอุปกรณ์ดิจิทัลที่เราใช้ Control ตำแหน่งทั้งทางบวกและลบเราสามารถทำได้โดยอาศัย Mode เหล่านี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการแรงดันแตกต่าง

$$V_d = V_s - V_p$$

เมื่อเป็นระบบแบบปกติจะได้ Data และผลการคำนวณสอดคล้องกับ  
เหมือนการทดลองที่ 1

ส่วนการรับเป็นระบบแบบกลับจะได้ Data ตรงกันข้ามกันดังสมการ

$$V_d = V_p - V_s$$

แทนค่าที่ได้จาก Data ที่ Set Point 2.5 โวลต์และแรงดันโปรเซส 5 โวลต์จะได้  $V_d$

$$V_d = 5 - 2.5 \text{ โวลต์}$$

$$= 2.5 \text{ โวลต์}$$

และที่ 0 โวลต์และแรงดันกำหนด 2.5 โวลต์

$$V_d = 0 - 2.5 \text{ โวลต์}$$

$$= -2.5 \text{ โวลต์}$$

### 5.3 การควบคุมด้วยมือ (Manual Control)

แรงดันขาเข้า	0	1	2	3	4	5
แรงดันควบคุม	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
แรงดันขาออกวัด	5	4	3	2	1	0
แรงดันขาออก คำนวณ	5	4	3	2	1	0

ที่  $A_p = 1$

จากสมการควบคุมด้วยมือ

$$V_o = A_p (V_s - V_p) + K \cdot V_1$$

$$V_o = \text{แรงดันขาออก}$$

$$A_p = \text{Proportional Gain ตั้งไว้ที่ 1}$$

$$V_s = \text{แรงดันกำหนด จากการทดลอง 2.5 โวลต์}$$

$$V_p = \text{แรงดันขาเข้า}$$

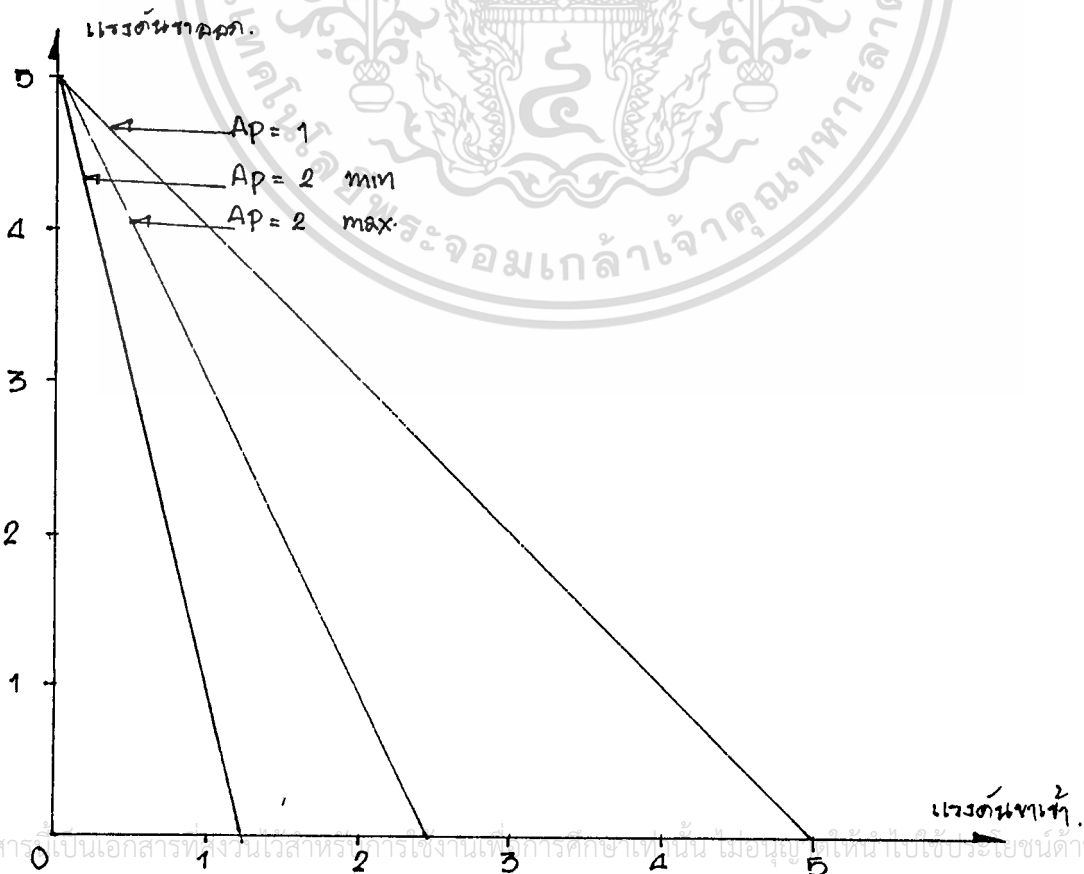
$$K V_1 = \text{Bias Voltage จากการทดลอง 2.5 โวลต์}$$

ที่แรงดันขาเข้า 0 โวลต์ จะได้แรงดันขาออก

$$\begin{aligned} V_o &= 1 (2.5 - 0) + 2.5 \\ &= 5 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

ที่แรงดันขาเข้า 5 โวลต์ จะได้แรงดันขาออก

$$\begin{aligned} V_o &= 1 (2.5 - 5) + 2.5 \\ &= -2.5 + 2.5 \\ &= 0 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$



ถ้า  $A_p = 2$  จะได้แรงดันขาออกเป็นเมื่อ  $V_{in} = 0$  และ  $V_s = 2.5$  โวลต์

$$\begin{aligned} V_o &= 2(2.5 - 0) + 2.5 \\ &= 7.5 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

และที่  $V_{in} = 5$   $V_s = 2.5$  โวลต์

$$\begin{aligned} V_o &= 2(2.5 - 5) + 2.5 \\ &= -5 + 2.5 \text{ โวลต์} \\ &= -2.5 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

ที่  $V_{in} = 1$ ,  $V_s = 2.5$

$$\begin{aligned} V_o &= 2(2.5 - 1) + 2.5 \\ &= 3 + 2.5 \\ &= 5.5 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

แสดงให้เห็นว่าถ้าเราให้ Proportional Gain มากเกินไปจะทำให้การควบคุม  
ขบวนการไม่ได้ค่าที่สามารถควบคุมได้ที่  $V_p = 1.25 - 2.5$  โวลต์ เท่านั้น

#### 5.4 การควบคุมแบบสัดส่วน

แรงดันโปรเซส	0	1	2	3	4	5
แรงดันกำหนด	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
แรงดันขาออก	3.75	3	2.75	2.2	2	1.2

จากสมการที่ได้

$$V_o = A_p (V_s - V_p) + V_z$$

$V_o$  = Output Voltage

$A_p$  = Proportional Gain  $V_o/V_s = 2/4 = 0.5$

$V_s$  = Set Point

$V_p$  = Process voltage

$V_z$  = Bias Voltage 2.5 Volt.

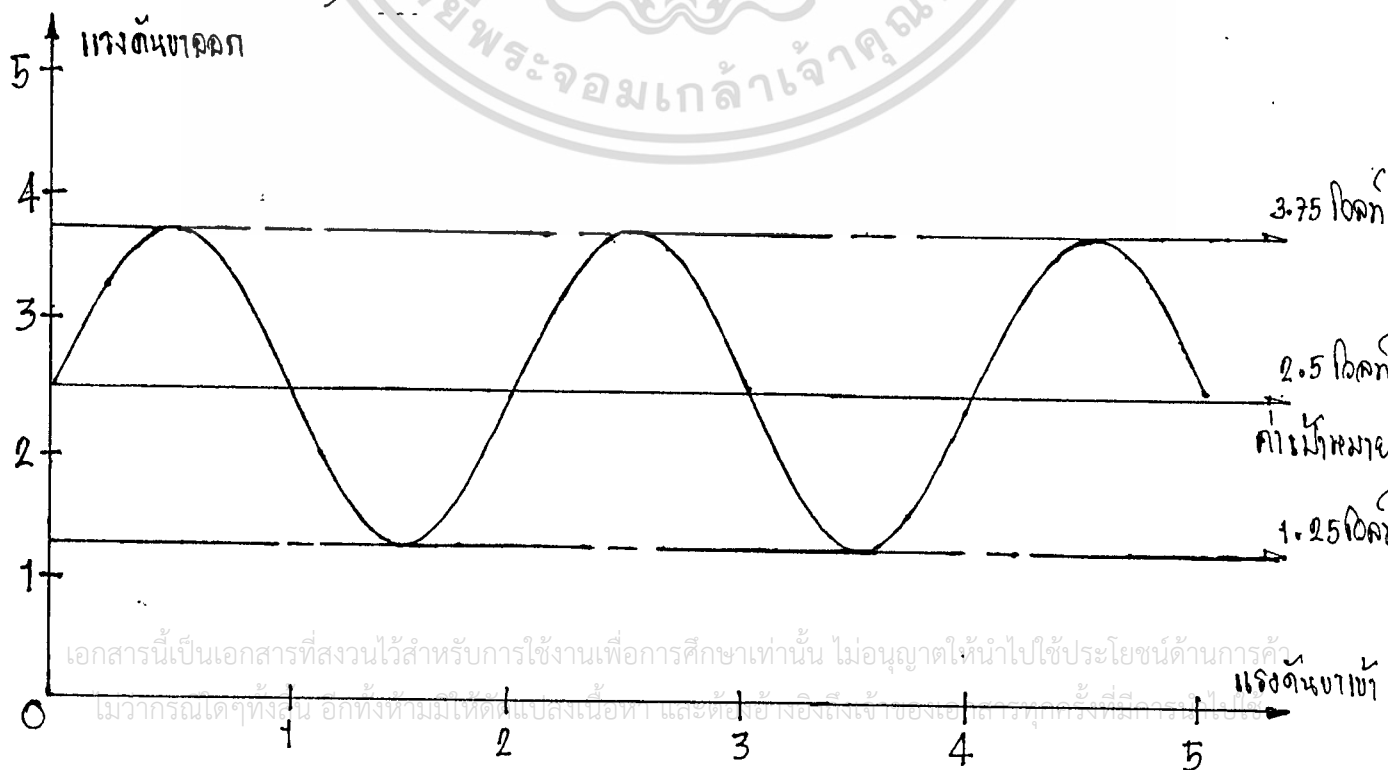
จากการคำนวณที่  $V_p$  0, 3 และ 5

$$\begin{aligned} V_o &= 0.5 (2.5 - 0) + 2.5 \\ &= 3.75 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_o &= 0.5 (2.5 - 3) + 2.5 \\ &= 2.25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_o &= 0.5 (2.5 - 5) + 2.5 \\ &= 1.25 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

จากตารางและ Data ที่ได้จะเห็นได้ว่าไม่ว่าแรงดันโปรเซสจะมีค่าน้อยสุดหรือมากที่สุดก็绝不会ทำให้ Output Voltage เป็น 0 จะแตกต่างกับ Set Point อยู่สูงสุดเท่ากับ  $\pm 1.25$  โวลต์ จะเห็นว่าค่าต่าง ๆ จะเปลี่ยนแปลงอยู่รอบ ๆ Set Point  $\pm 1.25$  โวลต์



ลักษณะข้างบนนั้นถ้ามีการ Oscillate จะทำให้การควบคุมระบบไม่ได้ จะต้อง  
 แก้ Off Set ให้แคบลงจนเท่ากับ Set Point โดยการกระทำโดยปรับ Manual Input  
 ให้มีค่าใกล้เคียง Set Point เช่นปรับมาที่ 2 - 3 โวลต์ จะได้ Off Set =  $\pm 0.25$   
 เพราะฉะนั้นทางที่ที่สุดควรปรับ Process Volt ไว้ที่ 2.5 จะทำให้  $V_o = 2.5$   
 พอดี

### 5.5 การควบคุมแบบเปิด-ปิด

แรงดันโปรเซส	0	1	2	3	4	5
แรงดันกำหนด	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
แรงดันขาออก	5	5	5	0	0	0

จากสมการ

$$V_o = A_p (V_s - V_p) + V_z$$

$$V_o = \text{แรงดันขาออก}$$

$$A_p = \text{อัตราขยายสัดส่วน } 250$$

$$V_s = \text{แรงดันกำหนด } 2.5 \text{ โวลต์}$$

$$V_p = \text{แรงดันขาเข้า}$$

$$V_z = \text{แรงดันปรับแต่ง } 2.5 \text{ โวลต์}$$

แทนค่าดูตามตารางที่ 0

$$V_o = 250(2.5 - 0) + 2.5 = 627.5 \text{ V ควบคุมได้ } 5 \text{ V}$$

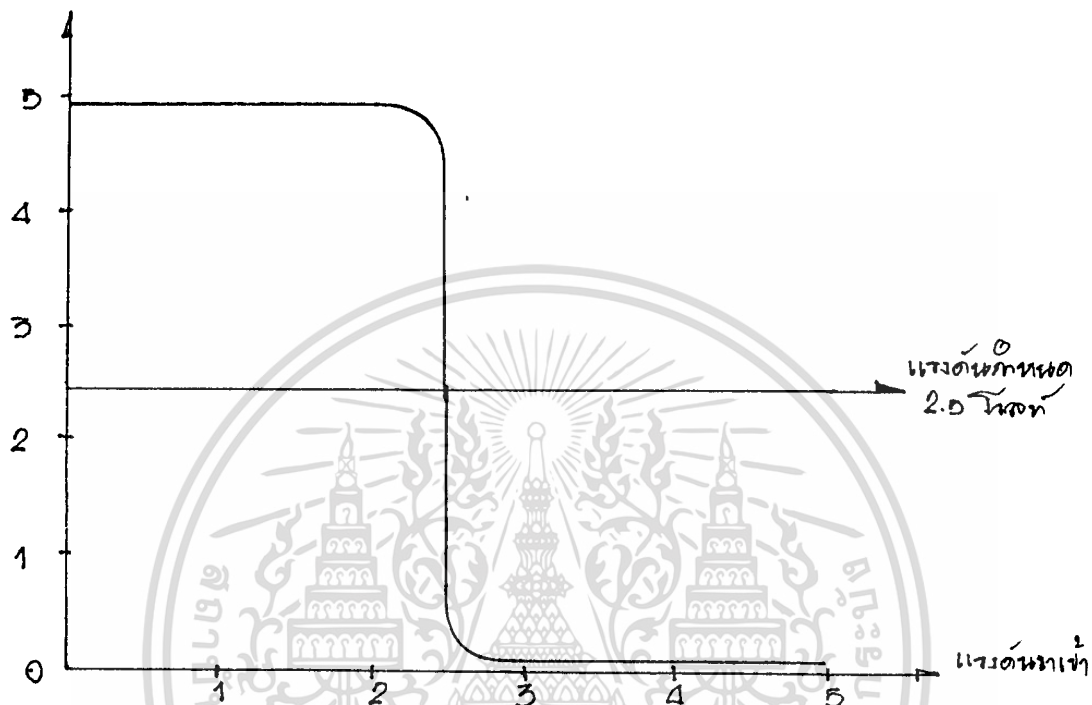
$$\text{ที่ } V_{in} = 1$$

$$V_o = 250(2.5 - 1) + 2.5 = 377.5 \text{ V ควบคุมได้ } 5 \text{ V}$$

ในทำนองเดียวกันที่ 4 และ 5V จะได้  $V_o = -377.5$  และ  $-627.5$  โวลต์  
 ซึ่งมีค่าคงที่ควบคุมได้แก่ 0 โวลต์ เพราะฉะนั้นขอบเขตการควบคุมแบบ ON-OFF มีได้แค่ 5

และ 0 โวลต์เท่านั้นซึ่งเป็นการควบคุมแบบ ON "5V" และ OFF "0 V" นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันภาค D.



ถ้า Process Voltage มีค่าที่ Off Set เล็กน้อย เช่น ดังตัวอย่างที่แล้วคือ  $\pm 0.25$  โวลต์ จะควบคุมได้ไหม

$$\begin{aligned} V_o &= 250 (0.25) + 2.5 \\ &= 65 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_o &= 250 (-0.25) + 2.5 \\ &= -60 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

ซึ่งก็อยู่นอกการควบคุมอีก ดังนั้นการควบคุมแบบนี้แรงดันควบคุมต้องเท่ากับแรงดันขาเข้าเท่านั้น ถ้าน้อยกว่า Set Point จะ On และมากกว่า Set Point จะ Off เรียกการควบคุมชนิดนี้ว่าการควบคุมแบบเปิด - ปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.6 การควบคุมแบบอินทริกัล

แรงดันขาเข้า	0	1	2	3	4	5
แรงดันกำหนด	1	1	1	1	1	1
เวลาที่ทำให้แรงดันขาออกเป็นศูนย์	50	50	50	25	17	13

จากสมการค่าเวลาการควบคุมแบบอินทริกัล

$$t = \frac{V_o \tau}{V_s - V_p}$$

$t$  = เวลาที่ควบคุม

$V_o$  = แรงดันขาออก 5 โวลต์

$V_s$  = แรงดันกำหนด 1 โวลต์

$\tau$  = เวลาคงที่ ตั้งไว้ 10 Sec

$V_p$  = แรงดันขาเข้า

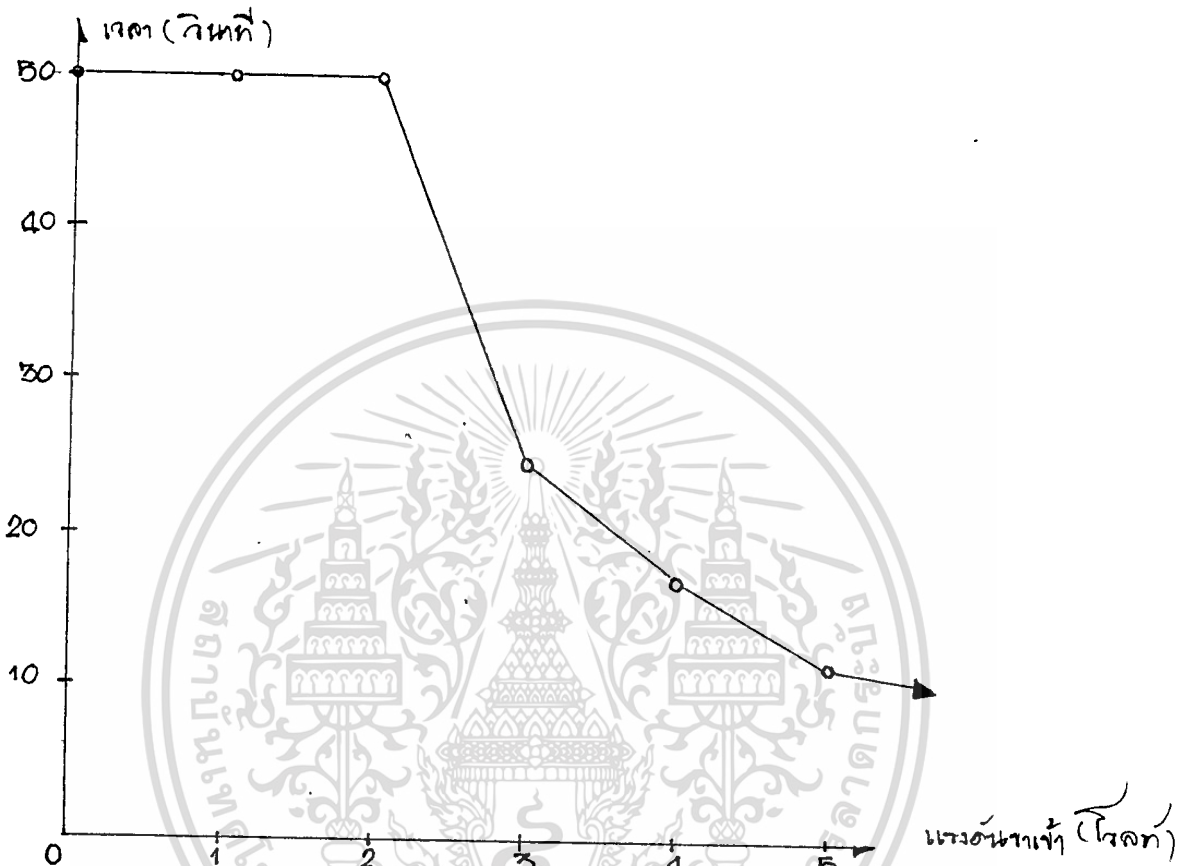
จากสมการ ลองหาค่า  $t$  ที่  $V_p$  ที่ 2 และ 3 โวลต์

$$t_1 = \frac{5 \times 10}{1} = 50 \text{ Sec}$$

$$t_2 = \frac{5 \times 10}{2} = 25 \text{ Sec}$$

ซึ่งถ้าเวลาแรงดันที่แตกต่างกันมาก ๆ ระหว่าง  $V_s - V_p$  จะทำให้แรงดัน

ตกลงมารวดเร็วตั้งกราฟ



จากกราฟ จะเห็นว่าถ้าใส่วงจรอินทิกรัลแล้ว แรงดันขาออกจะเปลี่ยนแปลงจะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับค่าเวลาคงที่และผลต่างของแรงดันขาเข้ากับแรงดันกำหนดซึ่งโดยปกติแล้วค่าเวลาการเข้าหาสู่จุด Set Point จะช้ากว่าการควบคุมแบบ ON-OFF และ Proportional แต่การควบคุมแบบ Integral จะควบคุมในระบบเพียงอย่างเดียวไม่ได้ แต่ในที่นี้เราแสดงคุณลักษณะของวงจร Integral เพียงอย่างเดียว

## 5.7 การควบคุมแบบเครื่อเวทึฟ

แรงคั้ขาคเข้า 1	0	1	2	3	4	5	4	3	2	1
แรงคั้ขาคเข้า 2	1	2	3	4	5	4	3	2	1	0
แรงคั้ขาคออก 1	3.4	3.4	2.0	2.5	2.8	2.8	2.8	2.8	3.4	3.7
แรงคั้ขาคออก 2	2.5	1.5	3.5	3.0	2.8	2.7	3.3	3.8	3.7	3.7
แรงคั้ขาคออก 3	3.4	2.0	2.5	2.8	2.8	2.8	2.8	3.4	3.4	3.3
แรงคั้ก้าหนด	0	โวลต์								

จากสมการ

$$V_o = \int \frac{d(V_s - V_p)}{dt}$$

$$V_o = \int \frac{dV_s}{dt} - \frac{dV_p}{dt}$$

ในกรณี

$$V_s = 0$$

$$V_o = -\int \frac{V_p}{dt} = -\int \frac{p}{t}$$

แทนค่าที่  $V_p = 1$  เมื่อ  $V_p = 0$ ,  $V_p = 1$  และ  $t$  เปลี่ยนจาก 0-5 Sec

$$V_o = -\frac{10 \cdot (0-1)}{0-5} = -2 \text{ V}$$

ซึ่งแรงคั้ขาคออกอ่านได้ 2.5 คลาดเคลื่อนเนื่องจากเวลา  $\Delta t$  นั้นน้อยกว่า 5

วินาทีพอสรุปได้ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงคั้ขาคเข้าของวงจร Derivative Control

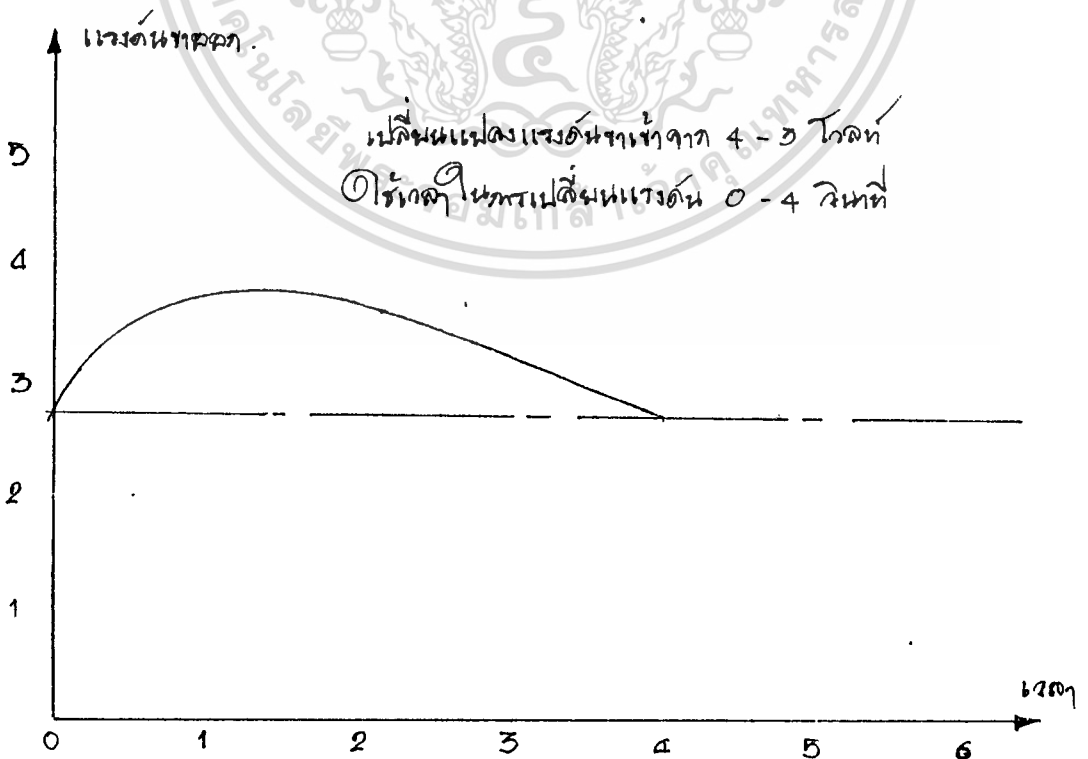
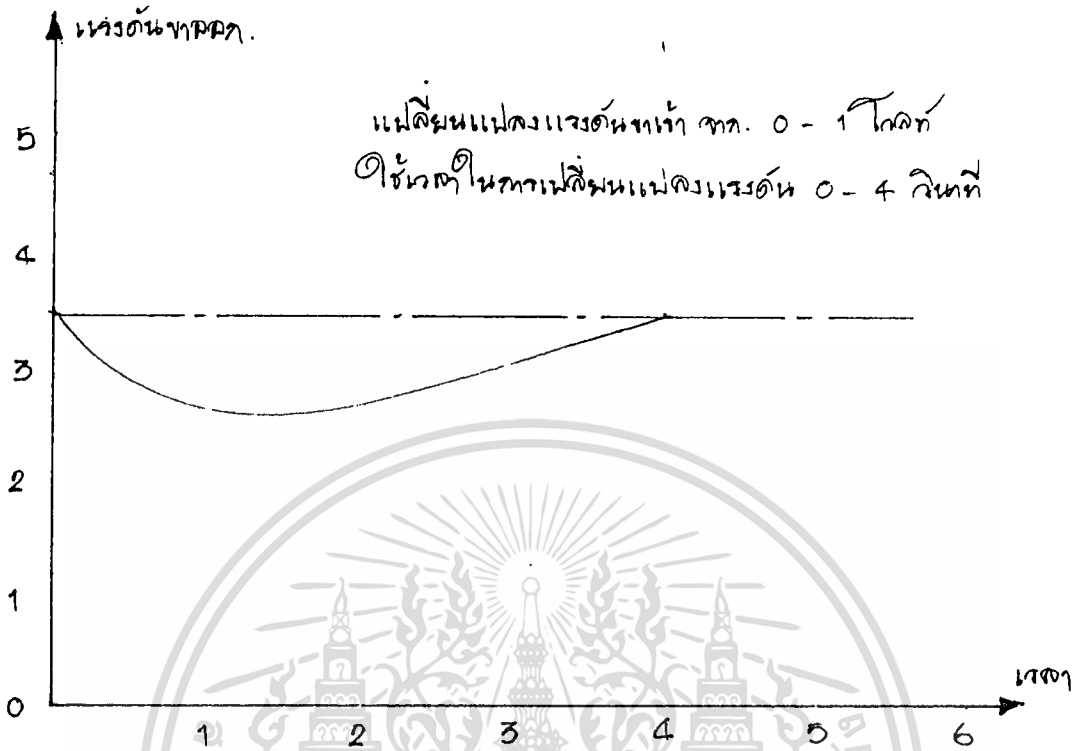
จะทำให้แรงคั้ขาคออก Response Swing หรือ Over Shoot ด้วยเวลาหนึ่งและจะกลับเข้า

หาค่าเดิมดังกราฟที่

$$\Delta V_p = 0 - 1 \text{ Volt}$$

$$\Delta t = 0 - 4 \text{ Second}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟ เราจะนำ Data เหมาะ ๆ มาพิจารณาเพราะจะได้เห็น Curve Sponse เป็นไปตาม Theory ของ Derivative Control เราจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของ Curve นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อ Input เปลี่ยนแปลง ส่วนเมื่อ Input เปลี่ยนแปลงแล้ว Output จะกลับมาตำแหน่งเดิมนั้นจะมี Data ในช่วง vp 1-2, 3-2 เท่านั้นที่การ Swing ของรูปคลื่น ไม่กลับเข้าหาจุดเดิมแต่ค่าก็พอจะสรุปเอาไว้ว่าการ Swing จะ Over Shoot และกลับมาใน ตำแหน่งใกล้เคียงกับตำแหน่งที่เริ่มต้นเสมอ



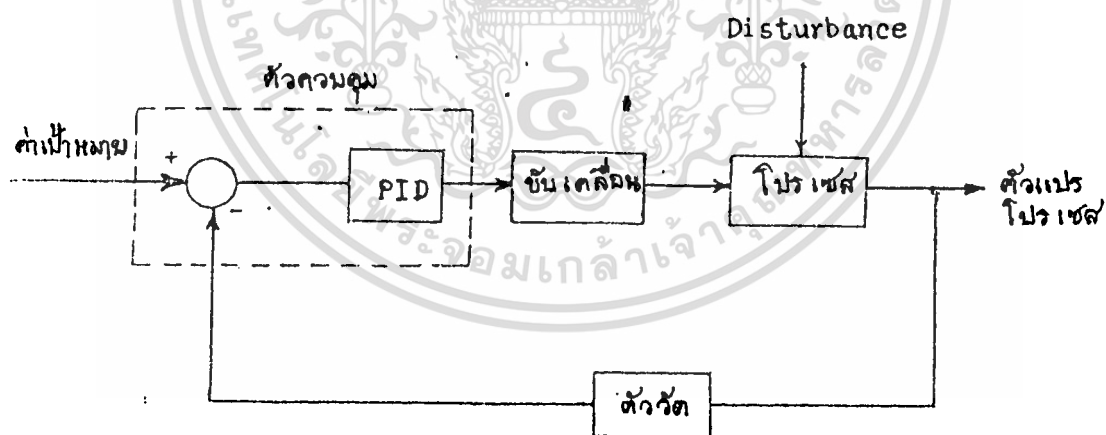
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

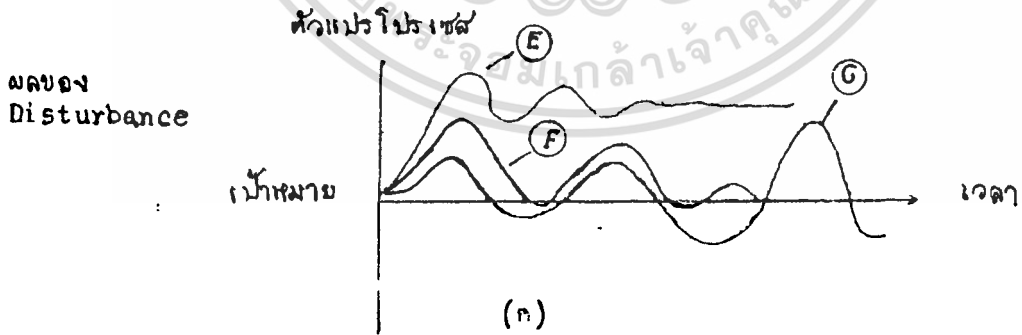
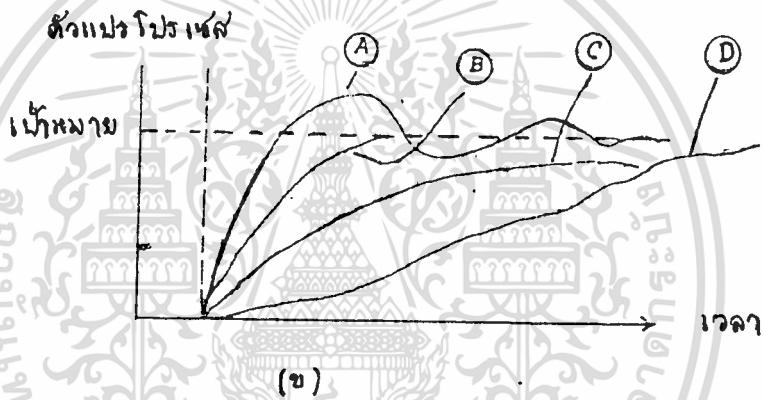
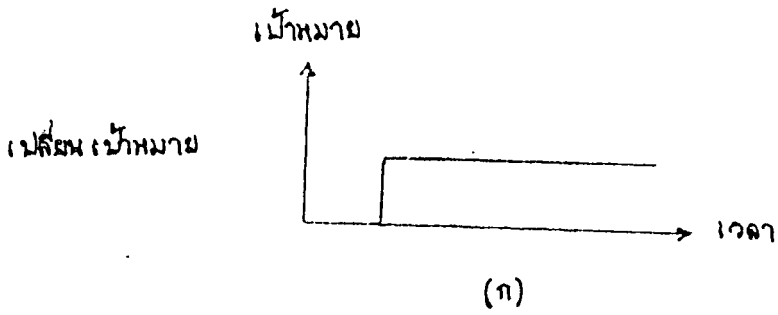
## การปรับค่า PID

## 6.1 ผลตอบของการควบคุมที่

ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ตัวควบคุมจะพยายามรักษาให้ค่าตัวแปรโปรเซสมีค่าเท่ากับค่าเป้าหมายอยู่เสมอ ในกรณีที่เกิด Disturbance ในระบบหรือมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมาย จะทำให้ตัวแปรโปรเซส มีค่าต่างจากค่าเป้าหมายไปขณะหนึ่ง ตัวควบคุมจะพยายามควบคุมให้ตัวแปรโปรเซสมีค่าเท่ากับค่าเป้าหมายนั้นในที่สุด ลักษณะการนำค่าตัวแปรโปรเซสให้เข้าใกล้ค่าเป้าหมายนี้จะแตกต่างกันตามคุณสมบัติของระบบควบคุม บางระบบควบคุมอาจควบคุมให้ตัวแปรโปรเซสส่งเข้าหาค่าเป้าหมายได้เร็ว แต่บางระบบอาจทำได้ดีกว่า เราสามารถทดสอบความสามารถของระบบควบคุมนี้ โดยดูที่ผลตอบของการควบคุม



รูปที่ 6.1 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 6.2 ผลตอบของระบบควบคุมต่าง ๆ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมในรูปที่ 6.1 ถ้าลองเปลี่ยนค่าเป้าหมาย ตัวควบคุมจะพยายามควบคุมให้ตัวแปรโปรเซสวิ่งเข้าหาค่าเป้าหมายนั้น ผลตอบของตัวแปรโปรเซสจะมีหลายแบบดังแสดงในรูป 6.2 (ข.)

- A มี Overshoot และการแกว่ง
- B ตอบรับเร็ว
- C ตัวแปรโปรเซสมีค่าไม่เท่ากับค่าเป้าหมายแม้เวลาจะผ่านพ้นไปนาน เรียกว่าเกิด offset
- D ตอบรับช้ามาก

เมื่อตัวแปรโปรเซสหยุดนิ่งที่ค่าเป้าหมาย ในขณะนั้นเกิดมี Disturbance เข้ามารบกวนโปรเซส (Disturbance ได้แก่ การเปลี่ยนของโหลดการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม) ผลตอบของโปรเซส จะมีหลายแบบ ดังแสดงในรูป 4.2 (ค)

- E เกิด offset ได้ค่าผิดไปจากค่าเป้าหมายเดิม
- F เกิดการแกว่งเล็กน้อย ก่อนกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิม
- G เกิดการแกว่งและขาดเสถียรภาพ

เมื่อพิจารณาผลตอบของการควบคุมชนิดต่าง ๆ เหล่านี้จึงพอสรุปได้ว่า ระบบการควบคุมจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- ก. มีเสถียรภาพ ไม่เกิดการแกว่ง (Oscillation) เมื่อถูกกระตุ้น
- ข. ตอบรับการเปลี่ยนค่าเป้าหมาย หรือ Disturbance ได้รวดเร็ว
- ค. ไม่เกิด Offset

## 6.2 ความยากง่ายในการควบคุมของโปรเซส

"Dead Time เป็นศัตรูตัวร้ายของการควบคุม"

ลักษณะสมบัติของโปรเซสนั้นทั่ว ๆ ไปจะมี Time lag

คลื่นผลตอบของโปรเซสต่อ Step input เราสามารถหาค่า dead time (LE) และค่าคงตัว (TE) โดยประมาณได้

อัตราส่วน  $LE/TE$  นี้จะเป็นค่าที่ใช้ประเมินความยากง่ายในการควบคุมและใช้เลือกผลการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 1

LE/TE	แบบการควบคุมที่เหมาะสมกับโปรเซสนั้น
$LE/TE < 0.2$	ON-OFF, P, PI
$0.2 < LE/TE < 1.0$	PI, PID
$1.0 < LE/TE$	Feed forward, Computer Control

$LE/TE < 1.0$  สามารถใช้การควบคุมแบบ PID ได้ตามปกติ

$0.5 < LE/TE < 1.0$  การควบคุมแบบ PID ก็ควบคุมได้ยากมาก

สาเหตุของการขาดเสถียรภาพในระบบ

- ก. ผลของระบบควบคุมข้างเดียว หรือ อื่น ๆ
- ข. Disturbance เป็น periodic
- ค. มี Nonlinear element ในระบบเอง เช่น Backlash ความผิด Dead band เป็นต้น
- ง. Process gain หรือ Loop gain มีค่าสูงเกินไป
- จ. คุณสมบัติของตัวแปรในระบบไม่คงที่แปรเปลี่ยนตาม Disturbance ค่าเป้าหมาย, เวลา เป็นต้น

### 6.3 ผลของ PID ต่อเสถียรภาพของระบบ

ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งใช้ตัวควบคุมแบบ PID นั้น ถ้าเราลองแปรค่า  $PB$ ,  $T_I$  และ  $T_D$  จะมีผลต่อผลตอบของระบบควบคุมดังนี้

#### 6.3.1 ผลของ P action

เมื่อลดค่า  $PB$  ลงทำให้อัตราขยายสูงขึ้น จะมีผลทำให้

ก. Offset ลดลง

ข. period ของการแกว่งสั้นลง

ค. อัตราส่วนของช่วงกว้างการแกว่งเพิ่มขึ้นระบบขาดเสถียรภาพมากขึ้น

### 6.3.2 ผลของ I action

เมื่อให้ P และ D action คงที่แล้ว ลองลด  $T_I$  (Reset time) จะมีผลทำให้

- ก. offset จะหายไป
- ข. ผลตอบจะเร็วขึ้น (Fast response)
- ค. อัตราส่วนของช่วงกว้างการแกว่งเพิ่มขึ้น ระบบขาดเสถียรภาพมากขึ้น

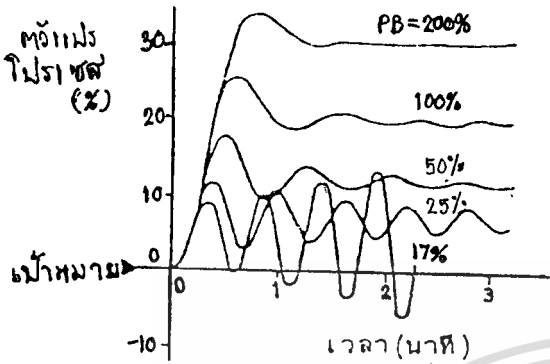
### 6.3.3 ผลของ D action

เมื่อให้ P และ I action คงที่แล้วลองเพิ่มเวลา  $T_D$  (Derivative time) ให้ยาวขึ้นจะมีผลทำให้

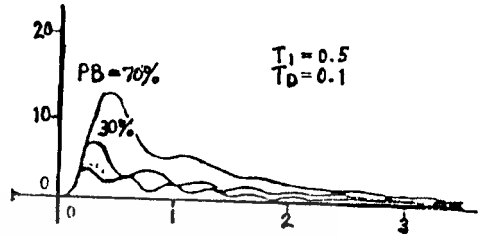
- ก. อัตราส่วนของช่วงกว้างการแกว่งลดลง ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น
- ข. period ของการแกว่งสั้นลง

ตามปกติการใช้ค่าเวลา  $T_D$  ให้ยาวมีแนวโน้มที่จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น ทำให้จุดอ่อนตรงต่อรับต่อ Noise ได้ง่าย ทำให้ผลตอบของระบบไวเกินไป ผลของการควบคุมแบบต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนค่าเป้าหมายและการเกิด Disturbance โดย PB,  $T_I$  และ  $T_D$  ต่างกัน แสดงในรูป 6.3 และ 6.4

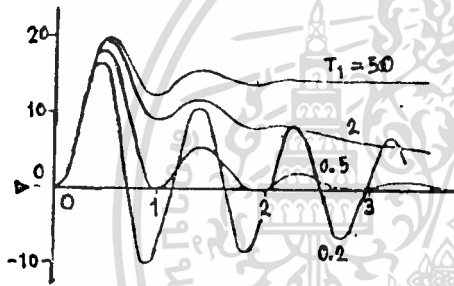
รูปที่ 6.3 ผลตอบของระบบควบคุมแบบต่าง ๆ เมื่อมี Disturbance



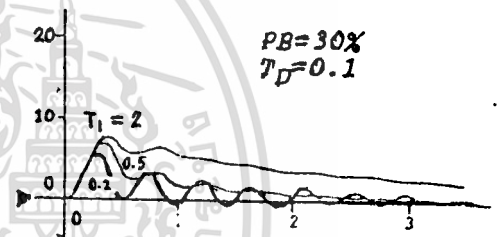
P Control เมื่อเปลี่ยน PB



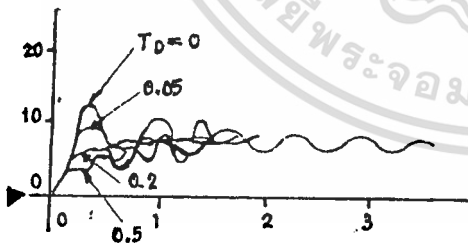
PID Control เมื่อเปลี่ยน PB



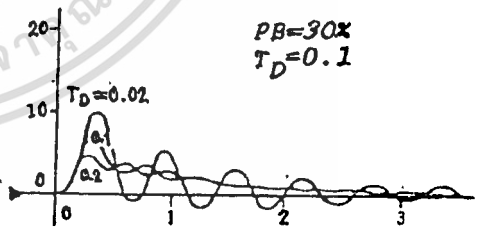
PI Control เมื่อเปลี่ยน TI



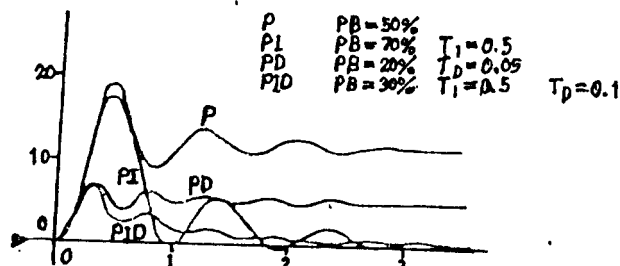
PID control เมื่อเปลี่ยน TI



PD Control เมื่อเปลี่ยน TD



PID control เมื่อเปลี่ยน TD



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในที่อาคารศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 เปรียบเทียบผลตอบของแบบควบคุมต่าง ๆ  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.5 วิธีการปรับ

ได้มีนักคณิตศาสตร์คิดวิธีที่จะหาทางหาค่า PID เพื่อให้ได้การควบคุมที่มีคุณภาพดีที่สุดหลายวิธี ดังตัวอย่างที่แสดงในตาราง 3 อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติก็ยังมีวิธีใดที่พอที่จะสามารถนำไปใช้ในทุกระบบได้

ในทางปฏิบัติวิธีที่นิยมใช้ในการปรับค่า PID สำหรับการควบคุมเพื่อให้ได้ 25% Damping ratio มี 3 วิธี คือ

1. Reaction Curve method
2. Ultimate Sensitivity method
3. Trial and error

ตาราง 2

แบบ	แบบการควบคุม	Control Action			เกณฑ์
		PB(%)	$T_I$ (นาที)	$T_D$ (นาที)	
A.B	P	2 PB	-	-	25% Damping Ratio
	PI	2.2 PB <sub>u</sub>	0.83 Pu	-	
	PID	1.7 PB <sub>u</sub>	0.5 Pu	0.125 Pu	
A.B	P	100 KpL/T	-	-	25% Damping Ratio
	PI	110 KpL/T	33 L	-	
	PID	83 KpL/T	2 L	0.5 L	
A	P	110 KpL/T	-	-	Minimum Control area
	PI	110 KpL/T	3.3 L	-	
	PID	77 KpL/T	2.2 L	0.45 L	
A	P	333 KpL/T	-	-	No Overshoot
	PI	286 KpL/T	1.2 T	-	
	PID	167 KpL/T	T	0.5 L	
A	P	143 KpL/T	-	-	20% Overshoot
	PI	167 KpL/T	T	-	
	PID	105 KpL/T	1.35 T	0.47 L	
B	P	333 KpL/T	-	-	No Overshoot
	PI	167 KpL/T	4 L	-	
	PID	105 KpL/T	2.4 L	0.4 L	
B	P	143 KpL/T	-	-	20% Overshoot
	PI	143 KpL/T	2.3 L	-	
	PID	83 KpL/T	2 L	0.42 L	
A	P	100 KpL/T	-	-	Minimum Control area
	PI	L/T = 1 167 KpL/(T+L)	T+L	-	
	PID	L/T = 1 250 KpL/(T+2L)	2 L	-	
		L/T = 1 133 KpL/(T+ $\frac{1}{3}$ L)	0.5(T+L)	0.125(T+L)	
	L/T = 1	200 KpL/(T+L)	0.25 L	0.25 L	

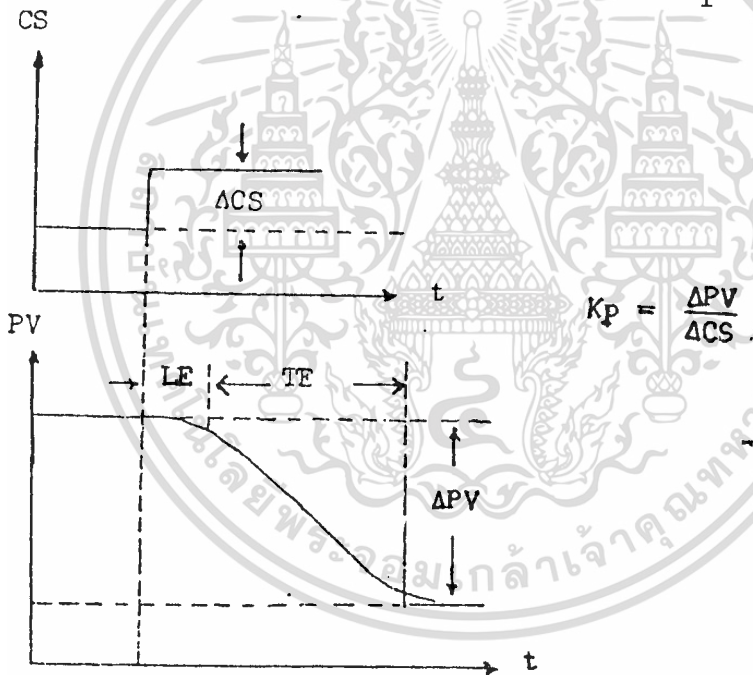
### 6.5.1 Reaction Curve method (Transient response method)

#### วิธีการ

1. ให้เปลี่ยนระบบควบคุมเป็นวงรอบเปิด (Open Loop)
2. ทา Process Characteristic โดยเปลี่ยนค่าสัญญาณควบคุมไป  $\Delta CS$  แล้วบันทึกรูปคลื่นของตัวแปรโปรเซส
3. ทา Process gain ( $K_p$ ), dead time ( $LE$ ) และค่าคงตัวเวลา ( $TE$ ) จาก Process Characteristic จากรูป 6.6

$$K_p = \frac{PV}{CS}$$

4. นำค่า  $K_p$ ,  $LE$ ,  $TE$  ที่หาได้ไปคำนวณหา  $PB$ ,  $T_I$  และ  $T_D$  จากตาราง 3



รูปที่ 6.6 Reaction curve method

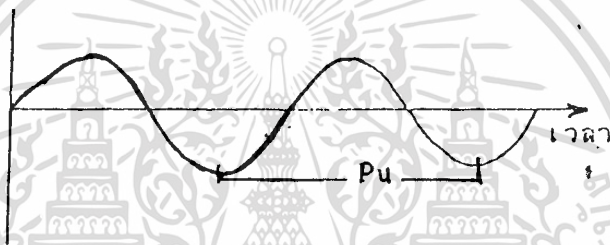
ตาราง 3 Reaction Curve method

ชนิดการควบคุม	PB(%)	$T_I$ (นาที)	$T_D$ (นาที)
P	$100 K_p \cdot LE / TE$		0
PI	$110 K_p \cdot LE / TE$	3.3 LE	0

### 6.5.2 Ultimate sensitivity method

#### วิธีการ

1. ให้ระบบควบคุมเป็นแบบวงรอบปิด (Closed loop)
2. ตั้ง  $T_I$  สูงสุด (max) และ  $T_D$  ต่ำสุด (0 หรือ min) ใช้ P action ในการควบคุมอย่างเดียว
3. ครั้งแรกตั้งค่า PB ไว้ที่ค่าสูงสุด แล้วลองลดค่า PB ลงมา ลองเปลี่ยนค่าเป้าหมายเพื่อดูผลตอบ ลดค่า PB ให้ต่ำลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าที่เมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายไปเล็กน้อย จะทำให้โปรเซสเกิดการแกว่งต่อเนื่องไปตลอดค่า PB ในขณะนั้น เรียกว่า  $PB_u$  (Ultimate proportional band)



รูปที่ 6.7

4. หากคาบเวลาในการแกว่งให้เท่ากับ  $Pu$  (ตามรูป 6.7)
5. นำค่า  $PB_u$  และ  $Pu$  ที่หาได้ไปใช้คำนวณหาค่า PB,  $T_I$  และ  $T_D$  จากตารางที่ 4

ตาราง 4 Ultimate Sensitivity method

ชนิดการควบคุม	PB	$T_I$	$T_D$
P	$2 PB_u$	—	0
PI	$2.2 PB_u$	$0.83 Pu$	0
PID	$1.7 PB_u$	$0.5 Pu$	$0.125 Pu$

### 6.5.3 Trial and error

เป็นวิธีการที่ใช้หลักการของ Ultimate Sensitivity method เพียงแต่ไม่ต้องคำนวณค่าและใช้การทดลองปรับค่าต่าง ๆ เพื่อหาผลตอบที่ดีที่สุด

#### ก. P Control

1. ปรับตัวควบคุมไปที่ Manual mode
2. ปรับ PB ไปสูงสุด  $T_I$  สูงสุด และ  $T_D$  ต่ำสุด
3. ปรับค่าเป้าหมาย (Set point) ไปสู่ค่าที่ต้องการ
4. ปรับ Manual Control จนตัวแปรโปรเซสหรือค่าวัดได้เท่ากับค่าเป้าหมาย
5. ปรับตัวควบคุมไปที่ Automatic mode
6. เปลี่ยนค่าเป้าหมายไปเล็กน้อย เมื่อค่าวัดเริ่มเปลี่ยน จึงลดค่าเป้าหมายกลับมาสู่ที่เดิม
7. ลดค่า PB ลงมา และทำขั้น 6 ใหม่ โดยสังเกตผลตอบของค่าวัด
8. ทำขั้น 6 และ 7 หลาย ๆ ครั้งจนได้อัตราส่วนช่วงกว้างการแกว่งของผลตอบเป็น 25% Damping ratio

#### ข. PI Control

1. ทำเหมือน P Control จากขั้น 1 ถึง 8 เพื่อหาค่า PB ที่ดีที่สุด
2. ลดค่า  $T_I$  จน offset หายไป
3. เพิ่มค่า  $T_I$  ถ้าเกิดการแกว่งขึ้น
4. ทำขั้น 2 และ 3 จนกว่าจะให้ผลตอบ 25% Damping ratio

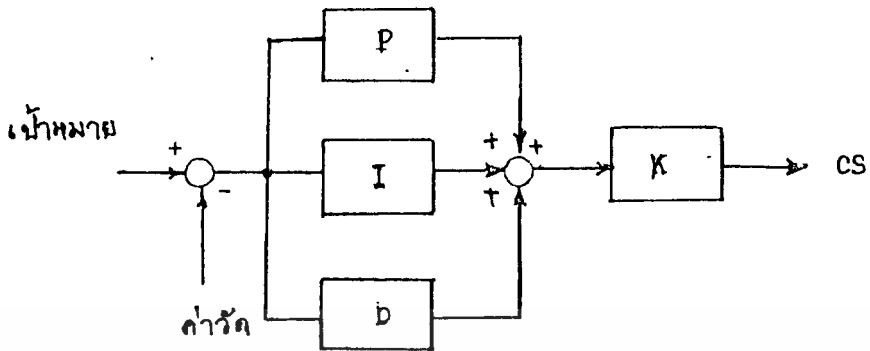
#### ค. PID Control

1. ทำเหมือน P Control จากขั้น 1 ถึง 6
2. ลดค่า PB ลงมาจนเกิดการแกว่ง
3. เพิ่ม  $T_D$  จนการแกว่งหยุด
4. ลดค่า PB จนเกิดการแกว่งใหม่อีก
5. ทำขั้น 2 ถึง 4 หลายครั้งจน  $T_D$  ไม่สามารถหยุดการแกว่งได้
6. เพิ่มค่า PB จนหยุดการแกว่ง

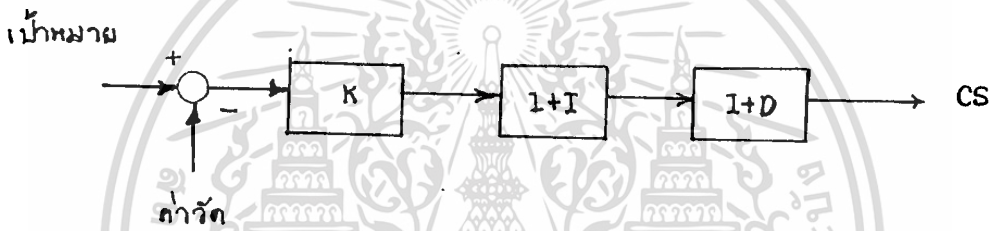
7. ตั้งค่า  $T_I$  ให้เท่ากับ  $T_D$  ค่าสุดท้าย ( $T_I = T_D$  กรณีที่ใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณ PID interfere Coefficient เท่ากับ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวบรวมขึ้นเพื่อแจกจ่ายให้บุคลากรในหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการดำเนินงานโครงการวิจัยและพัฒนาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 6.5.4 การรบกวนซึ่งกันและกันของค่า PID (PID mutual interference)



รูปที่ 6.8 ตัวควบคุมแบบที่สุก



รูปที่ 6.9 ตัวควบคุมทั่ว ๆ ไป

รูป 6.8 แสดง Block diagram ของตัวควบคุมแบบอุดมคติ ซึ่งค่า PID จะสามารถไปได้อย่างอิสระไม่มีการรบกวนซึ่งกันและกัน ตัวควบคุมแบบนี้มักจะมีราคาแพง ทั่ว ๆ ไปตัวควบคุมที่ขายในท้องตลาดมักจะดัดแปลงวงจรให้ง่ายลง โดยมี Block diagram ดังรูป 6.9 จะเห็นว่า P และ D Control ไม่ใช่ออกแบบอุดมคติ และจะมีการรบกวนซึ่งกันและกัน (Mutual interfere) ได้แก่การเปลี่ยนค่า  $T_I$  จะมีผลทำให้  $PB$  และ  $T_D$  เปลี่ยนแปลงไป หรือถ้าเปลี่ยนค่า  $T_D$  ผลทำให้  $PB$  และ  $T_I$  เปลี่ยนไปเช่นกัน

ดังนั้น เมื่อทำการปรับค่า PID ที่เหมาะสมได้ทำการคำนวณค่า  $PB$ ,  $T_I$  และจากวิธีการ Reaction Curve หรือ Ultimate Sensitivity method จะใช้ค่าเหล่านี้มาตั้งที่ตัวควบคุมไม่ได้

ให้ $PB$ , $T_I$ , $T_D$	เป็นค่าตั้งที่ตัวควบคุม (Dial Setting)
และ $PB$ , $T_I$ , $T_D$	เป็นค่าที่คำนวณได้ (Effective value)

ทั้งสองค่าจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\begin{aligned} PB &= \mu PB' \\ T_I &= \frac{1}{\mu} T_I' \quad \text{-----4.1} \\ T_D &= \mu T_D' \end{aligned}$$

โดยที่  $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์การรบกวนซึ่งกันและกัน (Mutual interfere Coefficient)

ค่า  $\mu$  นี้จะมีค่าไม่คงที่แน่นอน จะขึ้นกับอัตราส่วนของ  $T_I$  กับ  $T_D$  และขึ้นกับชนิดของตัวควบคุมด้วย  $\mu$  นี้สัมพันธ์กับค่า  $V \frac{T_D'}{T_I'}$

( $V$  ค่าคงตัวหนึ่งซึ่งบริษัทผู้ผลิตตัวควบคุมจะต้องกำหนดให้) ซึ่งแสดงตามกราฟในรูป 6.10  $V \frac{T_D'}{T_I'}$  ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.25 ถ้ามีค่ามากกว่าจะหาความสัมพันธ์ไม่ได้

วิธีการตั้งค่า PID (Dial Setting) ในตัวควบคุมที่มีการรบกวนกัน

1. คำนวณหาค่า  $PB'$ ,  $T_I'$ ,  $T_D'$  ที่ได้จาก Optimum tunign method
2. คำนวณหาค่า  $V \frac{T_D'}{T_I'}$  โดยที่  $V$  หาจากผู้ผลิตตัวควบคุม
3. หา  $\mu$  จากกราฟในรูปที่ 6.10
4. คำนวณหาค่า  $PB$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  จากสูตร 6.1
5. นำค่า  $PB$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  ที่คำนวณได้ไปตั้งที่ตัวควบคุม

$PB'$     $T_I'$     $T_D'$   
 PID   1.7PB   0.5Pu   0.125Pu

$$\mu = 1 + \nu \frac{T_D'}{T_I'} = 1 + \nu \frac{\mu T_D'}{T_I' \mu}$$

จาก Ultimate Sensitivity method  
 $T_I' = 0.5Pu$ ,  $T_D' = 0.125Pu$ ,  $\frac{T_D'}{T_I'} = 1/4$

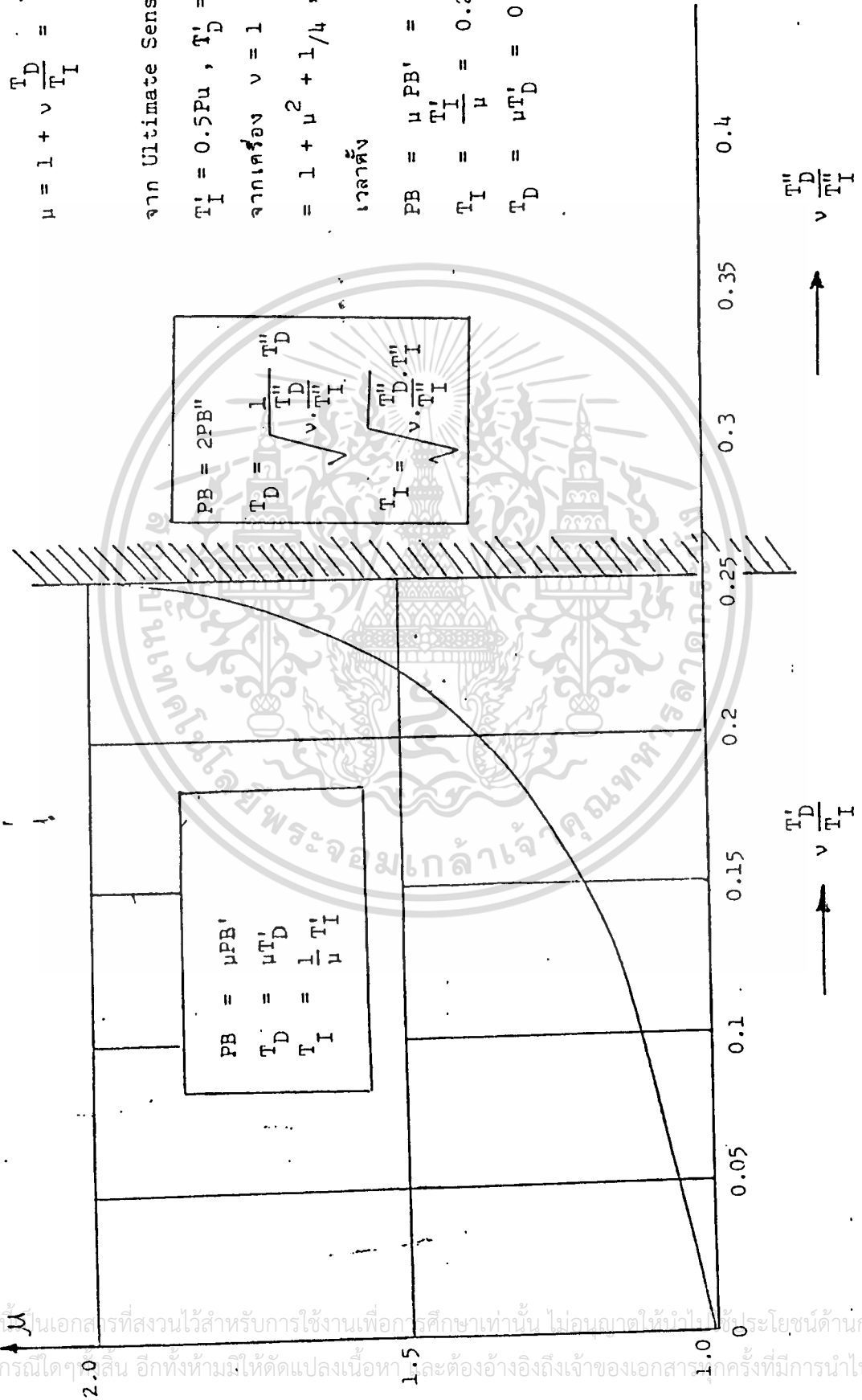
จากเครื่อง  $\nu = 1$   
 $= 1 + \mu^2 + 1/4$ ,  $\mu = 2$

เวลาตั้ง

$$PB = \mu PB' = 3.4 PB_u$$

$$T_I = \frac{T_I'}{\mu} = 0.25 PB_u$$

$$T_D = \mu T_D' = 0.25 PB_u$$



รูปที่ 6.10 Interference Coefficient

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ สัน อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.5.5 การเลือกแบบการควบคุม (Control mode selection)

ตาราง 5 ลักษณะสมบัติโปรเซสและแบบการควบคุม

	อุณหภูมิ	การไหล	ความดัน	ระดับ
ลักษณะสมบัติ	2nd order ขึ้นไป	แปรผันโดยตรง	1st order	1st order
ความเร็วของผลตอบ	ช้า, ปานกลาง	เร็วมาก	ปานกลาง เร็ว	ปานกลาง
ค่าคงตัวเวลา	ใหญ่, ปานกลาง	เล็ก	เล็กมาก	เล็ก ปานกลาง
Dead time	เล็ก, ใหญ่	เล็ก	เล็ก	เล็ก
แบบการควบคุม	ON-OFF, P, PI, PID	P, PI	ON-OFF, P, PI	ON-OFF, P, PI



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

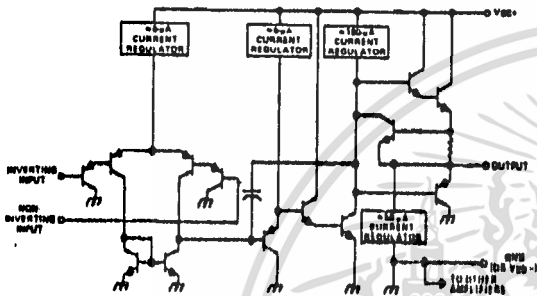
# LINEAR INTEGRATED CIRCUITS

# TYPES LM158, LM258, LM358 DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS

BULLETIN NO. DL-8 12413, JUNE 1976 - REVISED OCTOBER 1979

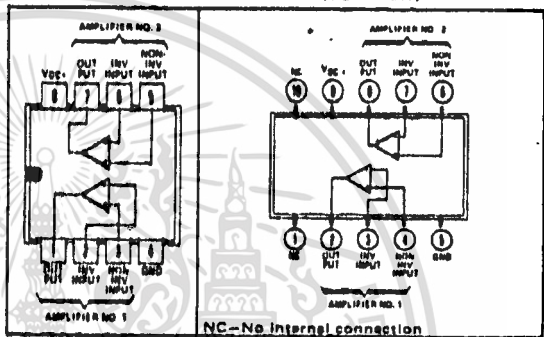
- Wide Range of Supply Voltages  
Single Supply . . . 3 V to 30 V  
or Dual Supplies
- Low Supply Current Drain  
Independent of Supply Voltage  
. . . 0.5 mA Typ
- Common-Mode Input Voltage  
Range Includes Ground Allowing  
Direct Sensing near Ground
- Low Input Bias and Offset Parameters  
Input Offset Voltage . . . 2 mV Typ  
Input Offset Current . . . 3 nA Typ (LM158)  
Input Bias Current . . . 45 nA Typ
- Differential Input Voltage Range  
Equal to Maximum-Rated  
Supply Voltage . . .  $\pm 32$  V
- Open-Loop Differential Voltage  
Amplification . . . 100 V/mV Typ
- Internal Frequency Compensation

schematic (each amplifier)



JG OR P  
DUAL-IN-LINE  
PACKAGE (TOP VIEW)

U  
FLAT PACKAGE  
(TOP VIEW)



## description

These devices consist of two independent, high-gain, frequency-compensated operational amplifiers that were designed specifically to operate from a single supply over a wide range of voltages. Operation from split supplies is also possible so long as the difference between the two supplies is 3 volts to 30 volts and Pin 4 is at least 1.5 volts more positive than the input common-mode voltage. The low supply current drain is independent of the magnitude of the supply voltage.

Applications include transducer amplifiers, d-c amplification blocks, and all the conventional operational amplifier circuits that now can be more easily implemented in single-supply-voltage systems.

## absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

Supply voltage, VCC (see Note 1)	32 V
Differential input voltage (see Note 2)	$\pm 32$ V
Input voltage range (either input)	-0.3 V to 32 V
Duration of output short-circuit (one amplifier) to ground at (or below) 25°C free-air temperature (VCC $\leq$ 15 V) (see Note 3)	unlimited
Continuous total dissipation at (or below) 25°C free-air temperature (see Note 4):	
LM258JG, LM358JG	825 mW
LM158JG, LM258P, LM358P	900 mW
LM158U, LM258U, LM358U	675 mW
Operating free-air temperature range:	
LM158	-55°C to 125°C
LM258	-25°C to 85°C
LM358	0°C to 70°C
Storage temperature range	-65°C to 150°C
Lead temperature 1/16 inch (1.6 mm) from case for 60 seconds: JG or U package	300°C
Lead temperature 1/16 inch (1.6 mm) from case for 10 seconds: P package	260°C

- NOTES:
1. All voltage values, except differential voltages, are with respect to the network ground terminal.
  2. Differential voltages are at the noninverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
  3. Short circuits from outputs to VCC can cause excessive heating and eventual destruction.
  4. For operation above 25°C free-air temperature, refer to Dissipation Derating Table. In the JG package, LM158 chips are alloy-mounted; LM258 and LM358 chips are glass-mounted.

Copyright © 1979 by Texas Instruments Incorporated

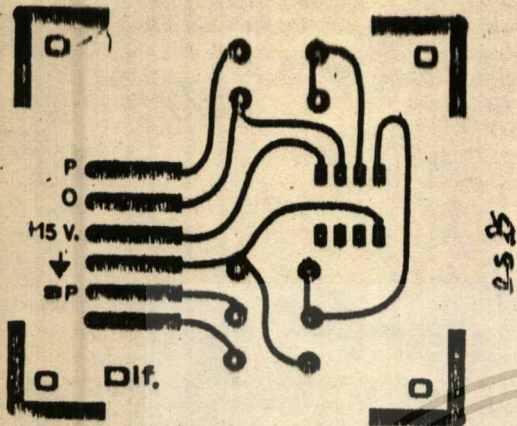
**TEXAS INSTRUMENTS**  
INCORPORATED

POST OFFICE BOX 228012 • DALLAS, TEXAS 75286

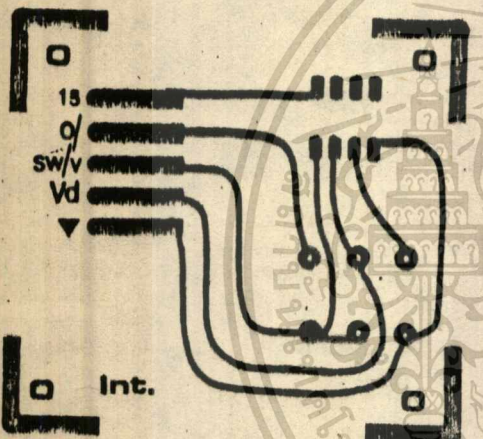
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรในหน่วยงานนั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



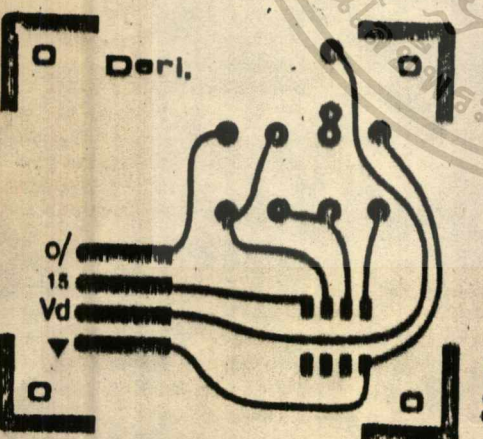
TRANSISTOR NUMBER	PN OAL	PACKAGE	LEAD INFO	VCB MAX	VCE MAX	VEB MAX	I C MAX	T J MAX	P TOT	F T MIN	C OB MAX	H FE	H FE BIAS	USE	MFR	REF. EQUIV	USA EQUIV	ISS
2N3040	PF	K11	L2	40V	30V	5V	500MA	175C	360MW	50M	40P	40MH	100MA	PM	OKS			2
2N3053	NS	T05	L04	60V	40V	5V	700MA	200C	100W	100M	15P	50MH	150MA	AM	WJF	BFY1	2N2297	2
2N3053A	NS	T039	L04	80V	60V	5V	700MA	200C	5W	100M	15P	50MH	150MA	AM	WJF	BFY1	2N2297	2
2N3053F	NS	T039	L04	60V	40V	5V	700MA	200C	1W	100M	15P	50MH	150MA	AM	WJF	BFY1	2N2297	2
2N3054	NS	T066	L43	90V	60V	7V	4A	200C	25W	750K		25/100	500MA	AM	WJF	BDY4	2N3054	2
2N3054A	NS	T066	L43	90V	60V	7V	4A	200C	25W	750K		25/100	500MA	AM	WJF	BDY4	2N3054	2
2N3054S	NS	X03	L05	90V	65V	7V	4A	200C	25W	800K		25/100	500MA	AM	WJF	BDY4	2N3054	2
2N3056	NS	T03	L05	100V	60V	7V	15A	200C	11W	200K		20/70	4A	AM	WJF	BDY20	2N3056	0
2N3056C	NS	T03	L05	80V	60V	7V	15A	200C	11W	200K		20/70	4A	AM	WJF	BDY20	2N3056	2
2N3056E	NS	T03	L05	100V	60V	7V	15A	200C	11W	200K		20/70	4A	AM	WJF	BDY20	2N3056	2
2N3056H	NS	T03	L05	100V	60V	7V	15A	200C	11W	200K		20/70	4A	AM	WJF	BDY20	2N3056	2
2N3056S	NS	T03	L05	100V	60V	7V	15A	200C	11W	200K		20/70	4A	AM	WJF	BDY20	2N3056	0
2N3056V	NS	T03	L05	100V	60V	7V	15A	200C	11W	200K		20/70	4A	AM	WJF	BDY20	2N3056	2
2N3056W	NS	T03	L05	100V	60V	7V	15A	200C	11W	200K		20/70	4A	AM	WJF	BDY20	2N3056	2
2N3056-1	NS	T03	L05	100V	60V	7V	15A	200C	11W	200K		20/70	4A	AM	WJF	BDY20	2N3056	2
2N3056-2	NS	T03	L05	100V	60V	7V	15A	200C	11W	200K		20/70	4A	AM	WJF	BDY20	2N3056	2
2N3056-3	NS	T03	L05	100V	60V	7V	15A	200C	11W	200K		20/70	4A	AM	WJF	BDY20	2N3056	2
2N3056-4	NS	T03	L05	100V	60V	7V	15A	200C	11W	200K		20/70	4A	AM	WJF	BDY20	2N3056	2
2N3056-5	NS	T03	L05	100V	60V	7V	15A	200C	11W	200K		20/70	4A	AM	WJF	BDY20	2N3056	2
2N3056-6	NS	T03	L05	100V	60V	7V	15A	200C	11W	200K		20/70	4A	AM	WJF	BDY20	2N3056	2
2N3056-7	NS	T03	L05	100V	60V	7V	15A	200C	11W	200K		20/70	4A	AM	WJF	BDY20	2N3056	2
2N3056-8	NS	T03	L05	100V	60V	7V	15A	200C	11W	200K		20/70	4A	AM	WJF	BDY20	2N3056	2
2N3056-9	NS	T03	L05	100V	60V	7V	15A	200C	11W	200K		20/70	4A	AM	WJF	BDY20	2N3056	2
2N3056D	NS	T03	L05	100V	60V	7V	15A	200C	11W	200K		20/70	4A	AM	WJF	BDY20	2N3056	2
2N3056E	NS	T046	L01	100V	60V	7V	1A	200C	400MW	80V	12P	40/120	150MA	AM	FCU	BSW64	2N2222A	0
2N3056A	NS	T046	L01	140V	80V	7V	1A	200C	400MW	80V	12P	40/120	150MA	AM	FCU	BSW66	2N1893	0
2N3056T	NS	T046	L01	100V	60V	7V	1A	200C	400MW	80V	12P	40/120	150MA	AM	FCU	BSW64	2N2222A	0
2N3057A	NS	T046	L01	140V	80V	7V	1A	200C	400MW	80V	12P	40/120	150MA	AM	FCU	BSW66	2N1893	0
2N3058	PS	T046	L01	6V	6V		100MA	200C	400MW	10M	10P	40/120	10A	ALN	OBS	BC326	2N2606	2
2N3059	PS	T046	L01	10V	10V		100MA	200C	400MW	10M	10P	100MH	10A	ALN	OBS	BC326	2N2606	2
2N3060	PS	T046	L01	70V	60V		100MA	200C	400MW	10P	10P	30/90	1A	RLN	OBS	BC326	2N3497	2
2N3061	PS	T046	L01	70V	60V		100MA	200C	400MW	10P	10P	60/180	1A	RLN	OBS	BC326	2N3497	2
2N3062	PS	T046	L01	90V	80V		100MA	200C	400MW	10P	10P	20/80	1A	RLN	OBS	BCW43	2N3930	2
2N3063	PS	T046	L01	90V	80V		100MA	200C	400MW	10P	10P	50/150	1A	RLN	OBS	BCW43	2N3930	2
2N3064	PS	T046	L01	110V	100V		100MA	200C	400MW	1M	10P	16/45	1A	RLN	OBS	BCW43	2N3930	2
2N3068	PS	T046	L01	110V	100V		100MA	200C	400MW	2V	10P	30/90	1A	RLN	OBS	BCW43	2N3930	2
2N3072	PS	T05	L04	60V	40V	4V	500MA	180C	800MW	130M	10P	30/130	50MA	AM	SGI	BF595	2N4036	0
2N3073	PG	T018	L01	60V	60V	4V	500MA	180C	360MW	130M	10P	30/130	50MA	AM	SGI	BF524	2N2907A	0
2N3074	PG	T012	L09	25V			20MA	75C	140MW	3P	25/300	3.5MA	RLA	OBS	AF124	2N990	2	
2N3076	PG	T012	L09	35V			20MA	75C	140MW	3P	20/200	3MA	RLA	OBS	AF124	2N990	2	
2N3078	NS	K47	K47	140V	80V		10A	175C	125W	50M	1K	90/90	7A	RLN	TRR			2
2N3077	NS	T018	L01	80V	60V		50MA	200C	360MW	60M	6P	80MH	100A	ALN	OBS	BC326	2N3966	2
2N3078	NS	T018	L01	80V	60V		50MA	200C	360MW	60M	6P	25MH	100A	ALN	OBS	BC326	2N3966	2
2N3079	NS	T036	L13	200V	200V	5V	5A	150C	180W			7/40	5A	AHE	OBS			2
2N3080	NS	T036	L13	300V	300V	5V	5A	150C	180W			7/40	5A	AHE	OBS			2
2N3081	PS	T05	L04	70V	50V	6V	600MA	200C	800MW	150M	13P	30/90	150MA	AM	OBS	BFX29	2N2905A	2
2N3081/46	PS	T046	L01	70V	50V	6V	600MA	200C	400MW	150M	13P	30/90	150MA	AM	OBS	BSW24	2N2907A	2
2N3081/51	PS	K41	L84	70V	50V	6V	600MA	200C	800MW	150M	13P	30/90	150MA	AM	OBS			2
2N3107	NS	T05	L04	100V	80V	7V	1A	180C	800MW	70M	20P	100MH	150MA	AM	SGI	BSW66	2N1893	0
2N3108	NS	T05	L04	100V	80V	7V	1A	180C	800MW	60M	20P	40/120	150MA	AM	SGI	BSW66	2N1893	0
2N3109	NS	T05	L04	80V	40V	7V	1A	180C	800MW	70M	25P	100MH	150MA	AM	FCU	BFY60	2N2297	0
2N3110	NS	T05	L04	80V	40V	7V	1A	180C	800MW	60M	25P	40/120	150MA	AM	SGI	BFY60	2N2297	0
2N3110S	NS	T039	L04	80V	40V	7V	1A	190C	800MW	60M	25P	40/120	150MA	AM	MOB	BFY50	2N2297	2
2N3114	NS	T05	L04	150V	150V	5V	200MA	175C	800MW	40M	9P	30/120	30MA	ALN	SGI	BSW66	2N1893	0
2N3114S	NS	T039	L04	150V	150V	5V	200MA	175C	800MW	40M	9P	30/120	30MA	ALN	MOB	BSW66	2N1893	2
2N3115	NS	T018	L01	60V	20V	5V	600MA	175C	400MW	250M	8P	40/120	150MA	AM	MOB	BSW64	2N2222A	0
2N3116	NS	T018	L01	60V	20V	5V	600MA	175C	400MW	250M	8P	100MH	150MA	AM	MOB	BSW64	2N2222A	0
2N3117	NS	T018	L01	60V	60V	6V	50MA	175C	360MW	60M	4P	280MH	100A	ALN	SGI	BC109	2N930	0
2N3118	NS	T05	L04	85V	60V	4V	500MA	200C	1W	250M	6P	50/275	25MA	VMP	OBS	ES514	2N3736	2
2N3119	NS	T05	L04	100V	80V	4V	600MA	200C	1W	250M	6P	50/100	100MA	PMH	OBS	BFT38		2
2N3120	PS	T05	L04	45V	45V	4V	600MA	180C	800MW	130M	10P	30/130	50MA	AM	SGI	BF595	2N4036	0
2N3121	PS	T018	L01	45V	45V	4V	600MA	180C	360MW	130M	10P	30/130	50MA	AM	SGI	BSW24	2N2907A	0
2N3122	NS	T05	L04	60V	30V		600MA	200C	800MW	60M	25P	25MH	300MA	AM	OBS	BFY50	2N2297	2
2N3123	NS	T05	L04	60V	30V		600MA	175C	800MW	400M	8P	100MH	150MA	LMS	OBS	BFN47	2N3553	2
2N3124	PG	X07	L05	40V			15A	100C	90W	60M		50/100	10A	PMG	OBS			2
2N3125	PG	X07	L05	80V			3A3	100C	90W	60M		30/75	3A	PMG	OBS			2
2N3126	PG	X07	L05	100V			15A	100C	90W	60M		10/30	10A	RLN	OBS			2
2N3127	PG	T072	L08	25V	20V	0V7	50MA	100C	100MW	400M	1P3	20/100	3MA	ULA	OBS	AF239		2
2N3132	PG	T03	L03	100V			5A	100C	90W	60M		40/100	2A	AHE	OBS	AS215	2N1533	0
2N3133	PS																	



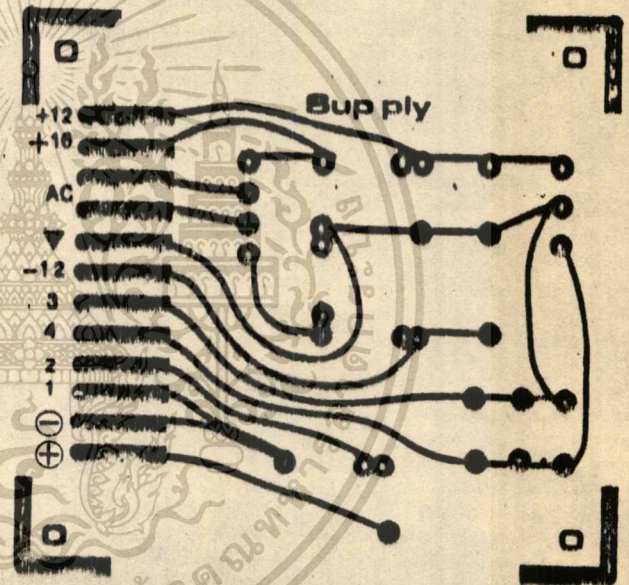
๕๕๕



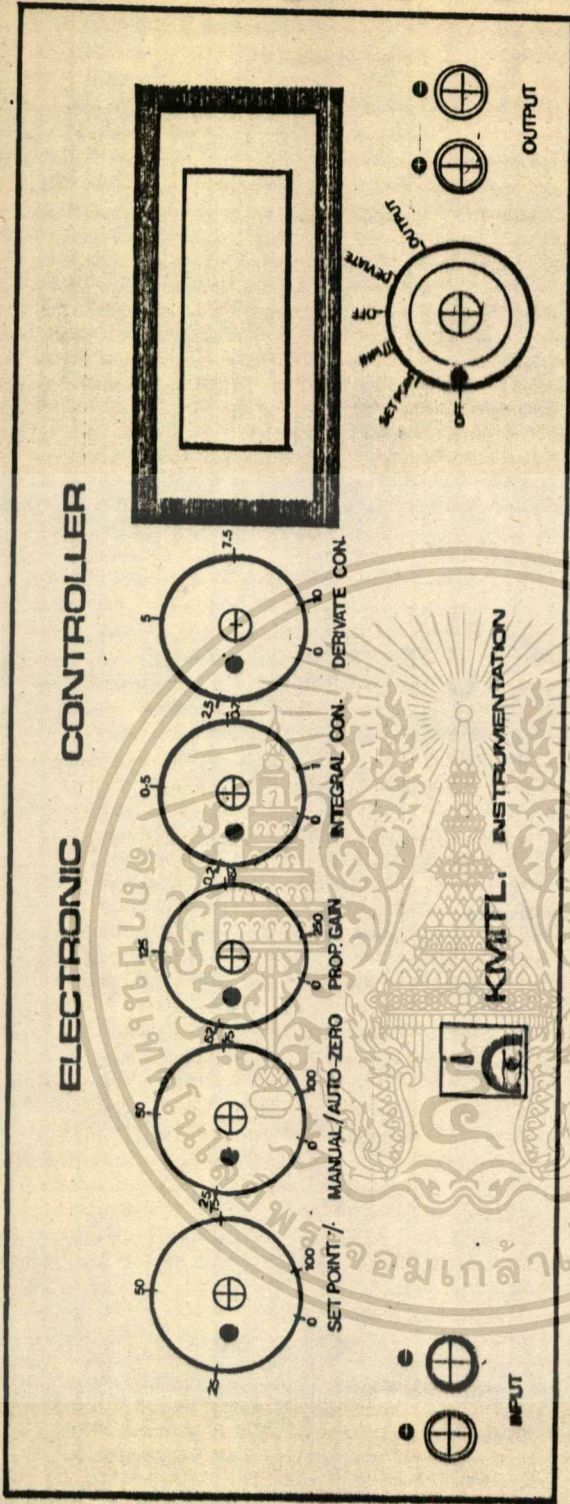
๕๕๕



๕๕๓

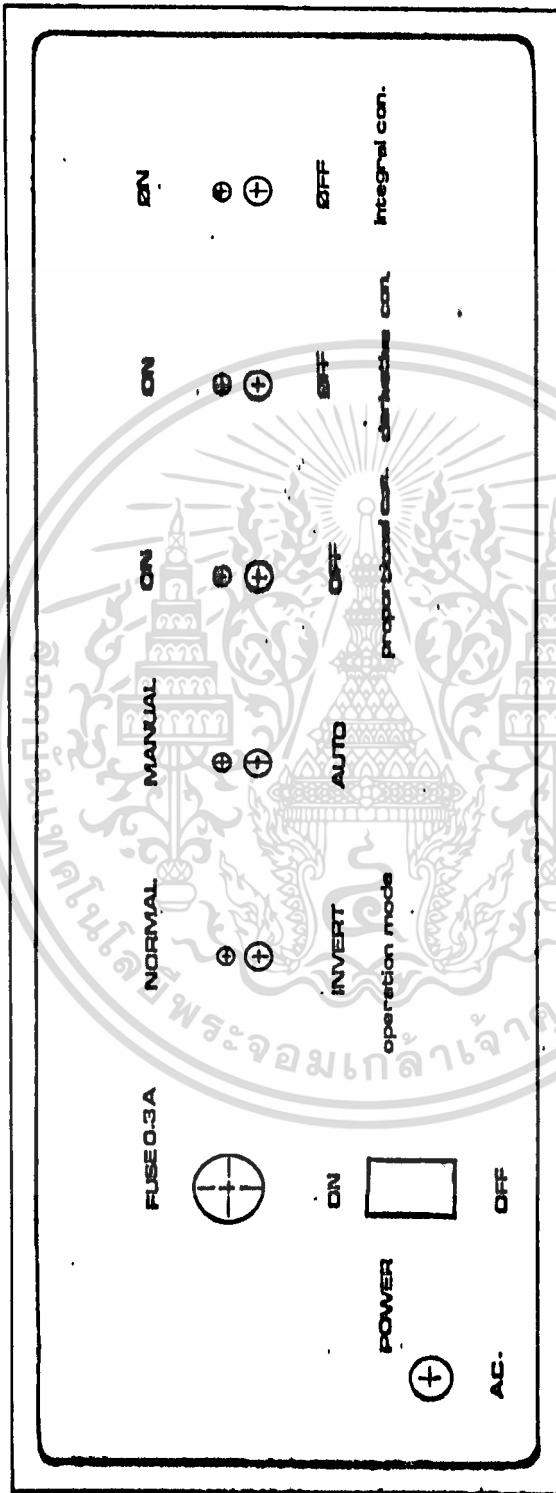


รูปแสดงลาย print ของชุดควบคุม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปหน้าปัดทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงโหมดชุดควบคุม

## กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอขอบพระคุณ

อาจารย์กิตติ ตีระเศรษฐ์

อาจารย์ธนิต ตริสุวรรณวัฒน์

ที่รับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และได้รับความอนุเคราะห์จากอาจารย์ประจำวิทยาลัย

เทคนิคคนครนายก

-แผนกพัฒนศึกษา

อาจารย์สุกัญญา ไพธิดา

อาจารย์ทัศนีย์ สุวรรณกลาง

-แผนกช่างอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์เกษม ศรีนาคา

อาจารย์ชาติ แก้วกระจ่าง

-บริษัท เซรามิกอุตสาหกรรม จำกัด

นายสุรชัย สืบวงษ์

ที่ให้ความช่วยเหลือในการพิมพ์วิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทางคณะจึง

ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

## เอกสารอ้างอิง :

1. รศ. กฤษดา วิศวธีรานนท์ "ตัวควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์" เอกสารประกอบการอบรมเรื่อง เครื่องมือวัดเบื้องต้น สมาคมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น 2519  
-ตัวควบคุมและแบบการควบคุม หน้า 25 - 40  
-การปรับ PID หน้า 34 - 48
2. George E. Neushsefer, "Laborlatory Experiment In The Industrail Process Control" Garden City, Newyork 1974  
Page 45 - 73
3. W.G. Andrew, H.B. Williams, "Applied Instrumentation In The Process Industries" Second Edition Volume 1, 2  
June 1980 Page 163 - 194

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้