

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

เครื่องปรับความต่างศักย์สำหรับเครื่องเอ็กซ์เรย์อัตโนมัติ

**AUTO-VOLTAGE CONTROLLER FOR X-RAY APPARATOR**



๒พ.  
ท523ด  
2550

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

82432

11 ก.ค. 2551

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

b. 11946004  
i. 11946004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**เครื่องปรับความต่างศักย์สำหรับเครื่องเอ็กซ์เรย์อัตโนมัติ**  
**AUTO-VOLTAGE CONTROLLER FOR X-RAY APPARATOR**



ปริญญานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ปริญญาโท ปีการศึกษา 2550**

**ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์**

**คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

เรื่อง เครื่องปรับความต่างศักย์สำหรับเครื่องเอ็กซเรย์อัตโนมัติ

AUTO-VOLTAGE CONTROLLER FOR X-RAY APPARATOR

ผู้จัดทำ 1. นายพรินทร์ สุทธิปัญญา 48015172

2. นายวสันต์ งามชื่น 48015179



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เครื่องปรับความต่างศักย์สำหรับเครื่องเอ็กซ์เรย์อัตโนมัติ

นาย พชรินทร์ สุทธิปัญญา

รหัส 48015172

นาย วสันต์ งามชื่น

รหัส 48015179

รศ.ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2550

## บทคัดย่อ

รายงานนี้ การออกแบบและการสร้าง เครื่องปรับความต่างศักย์สำหรับเครื่องเอ็กซ์เรย์อัตโนมัติ โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการกำหนดแรงดันอ้างอิงและส่งข้อมูลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งควบคุมการหมุนของมอเตอร์กระแสตรง เพื่อปรับความต่างศักย์ของวาริแอก (Variac) ตามค่าที่กำหนดในคอมพิวเตอร์ โดยที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างพัลส์วิดมอดูเลตชัน ในการควบคุมวงจรเฮช-บริดจ์ (H-bridge) ซึ่งเป็นวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงอีกทีหนึ่ง ในกระบวนการควบคุมการหมุนของมอเตอร์เราใช้การควบคุมแบบ PID ค่าความต่างศักย์ของวาริแอกสามารถปรับได้ตั้งแต่ 0-250 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# AUTO-VOLTAGE CONTROLLER FOR X-RAY APPARATOR

Mr.Phatcharin Suthipanyo 48015172

Mr.Wasan Ngamkuem 48015179

Assoc. Prof.Dr. ChuChat Pintavirooj

Educational Year 2007

## Abstract

This report aims at designing and building a Auto-Voltage Controller for X-ray apparator. Computer is used to identify referent voltage and send the data to the microcontroller, which controls the rotation of the direct current motor. This would adjust the voltage of variac according to the identified referent voltage in the computer. The microcontroller would create Pulse Width Modulation (PWM) to control the H-bridge circuit, which device the direct current motor. For the motor's rotation controlling process, the PID control is used and the voltage of variac can be adjusted from zero to 250 volts.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความร่วมมือของสมาชิกภายในกลุ่ม และผู้มีส่วนร่วมทุกท่าน

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ภาควิชา อีเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษา แนวความคิด และแนวทางแก้ไขปัญหา รวมทั้งยังอบรมสั่งสอนให้ได้รับความรู้ในเรื่องต่างๆ ในการจัดทำโครงการ

ขอขอบคุณพี่หนู พี่เบียร์ และพี่ๆทุกคน ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษา ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือพึ่งพาอาศัยกัน ตลอดจนเสร็จสิ้นโครงการนี้ไปด้วยดี

และสุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาผู้ซึ่งให้การอุปการะในการเรียน ทั้งคอยดูแลและเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

ผู้จัดทำ

นายพัชรินทร์ สุทธิปัญญา

นายวสันต์ งามขิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

สารบัญ	I
สารบัญรูปภาพ	IV
สารบัญตาราง	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
<b>บทที่ 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง</b>	2
2.1 ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	2
2.1.1 ชนิดของมอเตอร์กระแสตรง	5
2.1.2 สมการหลักของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง	12
2.2 ชุดขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง H-bridge	15
2.3 ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า ( Field-Effect Transistor; FET)	16
2.3.1 ดีมอสเฟต (D-MOSFET)	17
2.3.2 อีมอสเฟต (EMOSFET)	20
2.4 หม้อแปลงไฟฟ้า	26
2.4.1 โครงสร้างของหม้อแปลง	26
2.4.2 ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า	27
2.4.3 หลักการทำงานของหม้อแปลง	30
2.5 หลักการและทฤษฎีของการควบคุมกระบวนกรด้วยตัวควบคุม PID	32
2.5.1 ประวัติของระบบควบคุมอัตโนมัติ	32
2.5.2 ระบบควบคุมแบบเปิด	35
2.5.3 ระบบควบคุมแบบปิด หรือ ระบบควบคุมป้อนกลับ	36
2.5.4 การควบคุมอัตโนมัติ	40
2.6 สถาปัตยกรรมของ dsPIC30f2010	51
2.6.1 หน่วยประมวลผลกลาง	51
2.6.2 หน่วยความจำ	51
2.6.3 โมดูลฟังก์ชันพิเศษ	52
2.6.4 พอร์ตอินพุตเอาต์พุต	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

2.6.5	โครงสร้างทางโปรแกรม	53
2.6.6	สแต็กพอยเตอร์และเฟรมพอยเตอร์ทางซอฟต์แวร์	53
2.7	การตอบสนองทางความถี่	54
2.7.1	การกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)	54
2.7.2	การกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter)	55
2.7.3	การกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter)	57
2.7.4	การกรองความถี่แบบตัดแถบความถี่ (Band reject filter)	58
2.8	วงจรถองความถี่แบบแอคทีฟ	60
2.8.1	วงจรถองความถี่ต่ำ (Low pass Filter)	60
2.8.2	วงจรถองความถี่สูง (High pass Filter)	61
2.8.3	วงจรถองแถบความถี่ผ่าน (Band pass Filter)	62
2.8.4	วงจรถัดแถบความถี่ผ่าน (Band reject Filter)	64
<b>บทที่ 3</b>	<b>การออกแบบและการสร้าง</b>	65
3.1	ส่วนประกอบของเครื่องปรับความต่างศักย์สำหรับเครื่องเอกเรย์อัตโนมัติ	65
3.1.1	ชุดควบคุมการทำงานของมอเตอร์	65
3.1.2	ชุดขับมอเตอร์กระแสตรง (H-bridge)	69
3.1.3	มอเตอร์กระแสตรง (DC motor)	70
3.1.4	หม้อแปลงวารีแอก (Variac)	70
3.2	การทำงานของเครื่องปรับความต่างศักย์สำหรับเครื่องเอกเรย์อัตโนมัติ	71
<b>บทที่ 4</b>	<b>การทดลอง</b>	73
4.1	สัญญาณขับขาเกตของมอสเฟต	74
4.2	การตอบสนองของมอเตอร์กระแสตรง	73
4.3	ตารางแสดงผลการทดลองวงจรถองฟิลเตอร์	74
4.4	กราฟแสดงผลการทดลองวงจรถองฟิลเตอร์	76
4.5	ตารางแสดงค่าการปรับเทียบค่า(Calibrate)	78
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{out} - V_{adjust}$	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สารบัญ(ต่อ)

4.5 ตารางแสดงค่าการปรับเทียบค่า(Calibrate)	78
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Vout – Vadjust	83
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	<b>84</b>
กิตติกรรมประกาศ	
บรรณานุกรม	
ภาคผนวก	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	2
รูปที่ 2.2 โครงของมอเตอร์	3
รูปที่ 2.3 ขั้วสนามแม่เหล็ก	3
รูปที่ 2.4 แปรงถ่าน	4
รูปที่ 2.5 อาเมเจอร์	4
รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น	5
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน	6
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม	7
รูปที่ 2.9 คุณลักษณะสมบัติ แรงบิด – ความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม	9
รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของมอเตอร์แบบผสม	10
รูปที่ 2.11 คุณลักษณะสมบัติ แรงบิด – ความเร็ว	11
รูปที่ 2.12 แสดงวงจรขั้วมอเตอร์กระแสตรง	15
รูปที่ 2.13 แสดงวงจรขั้วแบบ H – Bridge	15
รูปที่ 2.14 แสดงวงจรสมมูลของวงจรรูปที่ 2.13	16
รูปที่ 2.17 คีมอสเฟตแบบเซนแนล n	17
รูปที่ 2.18 ทางเดินกระแสของมอสเฟต	18
รูปที่ 2.19 กราฟแสดงคุณสมบัติของมอสเฟต	19
รูปที่ 2.20 คีมอสเฟตแบบเซนแนล p	19
รูปที่ 2.21 สัญลักษณ์ของคีมอสเฟตแบบเซนแนล n และ p	20
รูปที่ 2.22 โครงสร้างเบื้องต้นของคีมอสเฟตแบบเซนแนล n	21
รูปที่ 2.23 ลักษณะการทำงานของคีมอสเฟตแบบเซนแนล n	22
รูปที่ 2.24 คุณสมบัติของคีมอสเฟตแบบเซนแนล n	23
รูปที่ 2.25 คุณลักษณะถ่ายโอนกระแส	24
รูปที่ 2.26 คีมอสเฟตแบบเซนแนล p	25
รูปที่ 2.27 สัญลักษณ์ของคีมอสเฟตแบบเซนแนล n และเซนแนล p	26
รูปที่ 2.28 หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีแทปแยก (Tap) ด้านทุติยภูมิ	27
รูปที่ 2.29 หม้อแปลงไฟฟ้าแยกสายกราวด์ (๙) ออกจากระบบไฟฟ้า	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่ 2.30 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับเลื่อนค่าได้	28
รูปที่ 2.31 หม้อแปลงกระแส	29
รูปที่ 2.32 เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า Clamp on Ammeter	29
รูปที่ 2.33 (a) เครื่องยนต์ไอน้ำของ Watt (b) แสดง fly ball governor	33
รูปที่ 2.34 การควบคุมระบบ	35
รูปที่ 2.35 ระบบควบคุมแบบเปิด	35
รูปที่ 2.38 ระบบควบคุมแบบเปิด	36
รูปที่ 2.39 ตัวอย่างระบบควบคุมแบบเปิด การเปิดน้ำเข้าสู่ถัง	37
รูปที่ 2.36 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	37
รูปที่ 2.37 ระบบควบคุมหลายตัวแปร	37
รูปที่ 2.40 ระบบควบคุมแบบปิด	38
รูปที่ 2.41 ระบบควบคุมการเปิดน้ำเข้าสู่ถังแบบปิด	40
รูปที่ 2.42 การกำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุต	42
รูปที่ 2.42 การกำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุต	42
รูปที่ 2.44 ระบบควบคุมแบบ proportional control	43
รูปที่ 2.45 ลักษณะการตอบสนองของคอนโทรลเลอร์แบบ integral control	44
รูปที่ 2.46 ระบบควบคุมแบบ integral control	44
รูปที่ 2.47 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วย Proportional plus Integral	45
รูปที่ 2.48 การตอบสนองของ PI controller	46
รูปที่ 2.49 การตอบสนองของ Derivative Control	48
รูปที่ 2.50 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วย Derivative Control	48
รูปที่ 2.51 Block diagram ที่ประกอบด้วย PID control	49
รูปที่ 2.52 การตอบสนองของระบบควบคุมแบบ PID	50
รูปที่ 2.53 ลักษณะของการกรองความถี่ต่ำ	54
รูปที่ 2.54 การกรองความถี่ต่ำ (ก) อัตราการสูญเสีย (ข) การพล็อตค่าโพลและซีโร	55
รูปที่ 2.55 ลักษณะของการกรองความถี่สูง	56
รูปที่ 2.56 การกรองความถี่สูง (ก) การพล็อตค่าโพลและซีโร (ข) อัตราการสูญเสีย	56
รูปที่ 2.57 รูปแบบการกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่ 2.58 การกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน (ก) การพล็อตโพลและซีโร (ข) อัตราการสูญเสีย	57
รูปที่ 2.59 รูปแบบการกรองความถี่แบบตัดแถบความถี่	58
รูปที่ 2.60 การกรองแบบตัดแถบความถี่ผ่าน (ก) การพล็อตโพลและซีโร (ข) อัตราการสูญเสีย	59
รูปที่ 2.61 (ก) low pass notch	59
รูปที่ 2.62 (ข) high pass notch	60
รูปที่ 2.63 วงจรกรองความถี่ต่ำ	60
รูปที่ 2.64 วงจรกรองความถี่สูง	61
รูปที่ 2.65 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน	63
รูปที่ 2.66 วงจรกรองความถี่แบบตัดแถบความถี่	64
รูปที่ 3.1 วงจรควบคุมมอเตอร์	65
รูปที่ 3.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30f2010	66
รูปที่ 3.3 วงจร Filter แบบ low pass filter	67
รูปที่ 3.4 วงจร Drive H-bridge	68
รูปที่ 3.5 ชุดขับมอเตอร์กระแสตรง	69
รูปที่ 3.6 มอเตอร์กระแสตรง 24 V	69
รูปที่ 3.7 หม้อแปลงวาริแอก	70
รูปที่ 3.8 การทำงานของเครื่องปรับความต่างศักย์	71
รูปที่ 3.9 กระบวนการของ PID	72
รูปที่ 4.1 สัญญาณขับวงจร H-bridge	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

4.3 ตารางแสดงผลการทดลองวงจรฟิลเตอร์	75
4.5 ตารางแสดงค่าการปรับเทียบค่า(Calibrate)	78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

ด้วยแหล่งจ่ายของเครื่องเอ็กรเย็สามารถปรับแรงดันโดยการหมุนวารีแอกด้วยมือ เมื่อต้องการเปลี่ยนแรงดันจึงไม่สะดวกในการควบคุมให้แรงดันคงที่จึงได้สร้างชุดควบคุมการปรับแรงดัน โดยใช้มอเตอร์หมุนแทนมือและใช้ไมโครคอนโทรเลอร์สร้างพัลส์วิดควบคุมการหมุนของมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งใช้คอมพิวเคอร์ในการป้อนค่าแรงดันแล้วส่งค่าผ่านพอร์ตอนุกรมให้ไมโครคอนโทรเลอร์ในการประมวลผลเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงโดยกระบวนการควบคุมของมอเตอร์กระแสตรงใช้การควบคุมแบบ PID

### 1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงด้วยพัลส์วิดมอดูเลชั่น สร้างเครื่องปรับความต่างศักย์สำหรับเครื่องเอ็กรเย็อัตโนมัติ ศึกษาการควบคุมมอเตอร์ด้วยพัลส์วิดมอดูเลชั่น

### 1.3 เนื้อหาโดยสังเขป

เนื้อหาในปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็นบทต่างๆ เพื่อสะดวกต่อการศึกษาและทำความเข้าใจ ในแต่ละบทประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 อธิบายความเป็นมาและความสำคัญของปริญญาณิพนธ์ วัตถุประสงค์ของโครงการ

บทที่ 2 ประกอบด้วยเนื้อหาทางทฤษฎี ที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้ อันได้แก่ ไมโครคอนโทรลเลอร์ มอสเฟต มอเตอร์ พัลส์วิดมอดูเลชั่น วงจร เฮท-บริดจ์ (H-bridge) และพีไอดี (PID controller)

บทที่ 3 อธิบายขั้นตอนการออกแบบและสร้างเครื่องปรับความต่างศักย์ของเครื่องเอ็กรเย็อัตโนมัติ

บทที่ 4 การทดลอง ลักษณะสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชั่น การตอบสนองของมอเตอร์กระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

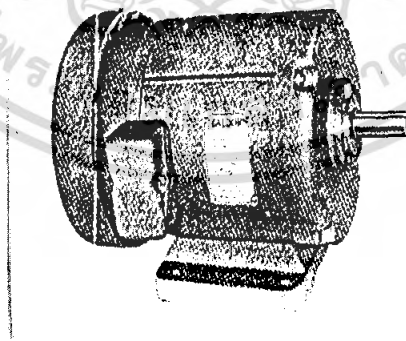
### มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

#### (Direct current motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเรียกกันว่าไดนาโม (Dynamo) มีส่วนประกอบคล้ายกันมาก มอเตอร์เป็นเครื่องที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล นั้นอาจหมุนแล้วใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้แต่เนื่องด้วยตำแหน่งแนวแกนไม่มีกระแสเกิดทาง Commentator (Axis of Sparkles) แตกต่างกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จำเป็นต้องเลื่อนเปลี่ยนตำแหน่งที่ตั้งของแปรงถ่านในเมื่อใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นมอเตอร์

#### 2.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์กระแสตรง

1. โครง (Frame of yoke)
2. ขั้วสนามแม่เหล็ก (Field pole or field Core)
3. แปรงถ่าน (Brush)
4. อามะเจอร์ (Armature)
5. คอมมิวเตเตอร์ (Commentator)
6. ฝาครอบ (end plate)

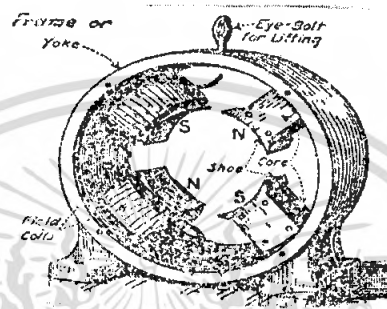


รูปที่ 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1. โครง (Frame or yoke)

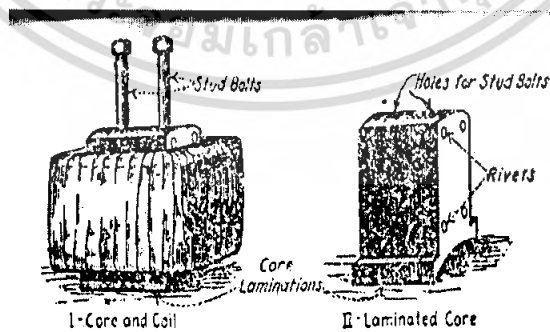
สร้างด้วยเหล็กหล่อ (cast Iron) หรือเหล็กเหนียว (seed) เป็นโครงสำหรับขั้วสนามแม่เหล็ก ทำหน้าที่เชื่อมวงจรแม่เหล็กให้ครบวงจร ซึ่งจำแนกเอาวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กมาสร้างเป็นโครงไม่ได้



รูปที่ 2.2 โครงของมอเตอร์

### 2. ขั้วสนามแม่เหล็ก (Field Pole or Field core)

สร้างด้วยเหล็กหล่อ (Cast Iron) หรือเหล็กอ่อนเหนียว (Steel Laminated) เป็นเหล็กแผ่นบาง ๆ หนาประมาณ 0.025 นิ้วอบน้ำยาแล้วนำมาอัดกันเป็นปึก เมื่อสร้างเป็นขั้วสนามแม่เหล็ก ทำหน้าที่ให้เกิดสนามแม่เหล็ก เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดที่พันรอบตัวมัน

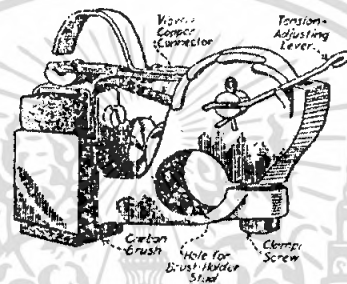


รูปที่ 2.3 ขั้วสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. แปรงถ่าน (Brush)

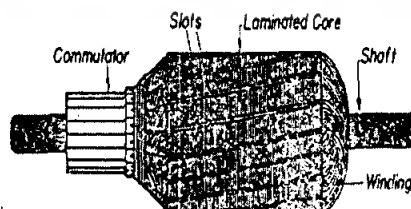
เป็นส่วนผสมของถ่านแกรไฟท์ (Graphite Carbon) ทำเป็นแท่งสี่เหลี่ยม ทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าเข้ายังคอมมิวเตเตอร์ แปรงถ่านต้องงออยู่ในตำแหน่งที่เลื่อนไปมาไม่ได้ ต้องมีสปริงกดแท่งแปรงถ่านเพื่อกันหลุดและมีของถ่าน ซึ่งทำด้วยโลหะบังคับไว้เรียกว่า Brush Holder สปริงมีแรงกด (Pressure) ประมาณ 1.5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากแปรงถ่านมีสายทองแดงเล็ก ๆ หลายเส้น ขวั้นเป็นเกลียวต่อไปยังขั้วต่อสาย (Terminal)



รูปที่ 2.4 แปรงถ่าน

### 4. อามเจอร์ (Armature)

สร้างด้วยเหล็กแผ่นบาง ๆ เรียกว่า Laminated Iron Core แต่ละแผ่นประมาณ 0.025 นิ้ว การทำด้วยเหล็กแผ่นบาง ๆ หลาย ๆ แผ่นอัดแน่นเพื่อลดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก รอบ ๆ ตัวอามเจอร์จะมีช่องว่างขนาดกว้างเท่า ๆ กัน สำหรับฟันขดลวดเรียกว่า Slot ปลายของขดลวดทุก ๆ ปลายต่อไปยังคอมมิวเตเตอร์



รูปที่ 2.5 อามเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5. คอมมิวเตเตอร์ (Commutator)

การสร้งประกอบด้วยชิ้นส่วนของทองแดงหลาย ๆ ชิ้นมีส่วนมีไมก้า (Mica) เป็นฉนวนคั่นระหว่างชิ้นส่วนของทองแดงเหล่านี้ มีหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขดลวด (Coil) ของอะมีเจอร์ และเป็นหัวต่อขั้วของขดลวด (Coil) ทั้งสองปลาย ดูรูปที่ 2.5

### 6. ฝาครอบ (cab)

คือฝาครอบมอเตอร์ ส่วนมากสร้างด้วยเหล็กหล่อ (Cast Iron) หรือเหล็กเหนียว (Steel) หน้าที่ของฝาครอบนี้เพื่อบังคับให้อะมีเจอร์หมุนตรงอยู่ในแนวเส้นแรงแม่เหล็กและให้อยู่ในแนวศูนย์กลางของตัวมอเตอร์ ดูรูปที่ 2.1

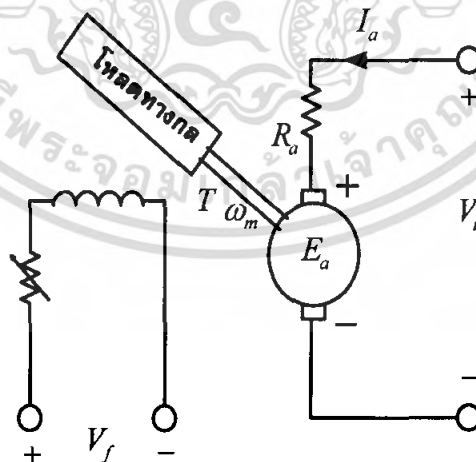
## 2.1.1 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์กระแสตรงสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิดหลัก ๆ ได้แก่

### 1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น (Separately Excited DC Motor)

วงจรมวลของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้นแสดงดังรูปที่

2.6 โดยที่วงจรมวลถูกป้อนแรงดันคงที่



รูปที่ 2.6 วงจรมวลมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดสนามแยกกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรสมมูลรูปที่ 2.6 เขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังนี้ คือ

$$I_f = \frac{V_f}{R_f} \quad (2.1)$$

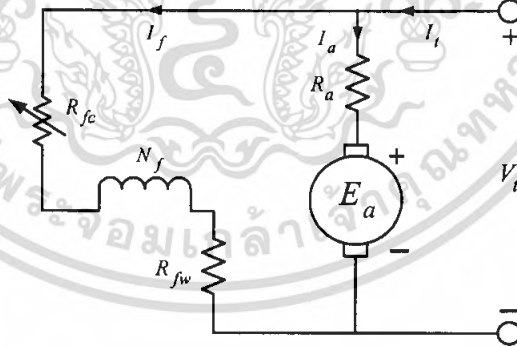
$$V_t = E_a + I_a R_a \quad (2.2)$$

และ  $I_L = I_a$

โดยที่  $E_a$  คือ แรงดันต้านกลับ (back emf)  
 $I_a$  คือ กระแสอาร์เมเจอร์  
 $I_L$  คือ กระแสโหลด

## 2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน (shunt DC Motor)

การกำหนดคุณลักษณะสมมูลทางด้านเอาต์พุตของมอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน  
 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน

$$V_t = E_a + I_a R_a \quad (2.3)$$

เมื่อ  $E_a = K_a \phi \omega_m$

ดังนั้น  $V_t = K_a \phi \omega_m + I_a R_a \quad (2.4)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ  $T_d = K_a \phi I_a$  ดังนั้น  $I_a$  เขียนได้ดังนี้คือ

$$I_a = \frac{T_d}{K_a \phi} \quad (2.5)$$

จากสมการ (2.4) และ (2.5)

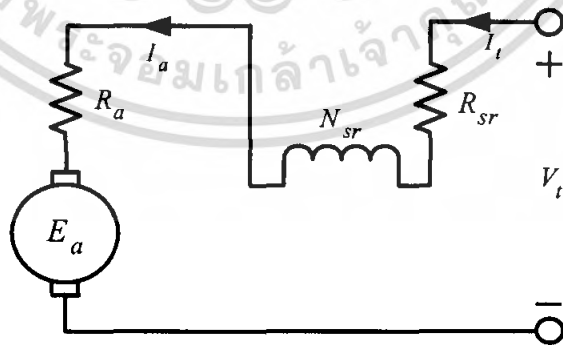
$$V_t = K_a \phi \omega_m + \frac{T_d}{K_a \phi} R_a \quad (2.6)$$

และสมการในการกำหนดค่าความเร็วแสดง ได้ดังนี้คือ

$$\omega_m = \frac{V_t - \frac{R_a}{K_a \phi} T_e}{K_a \phi} \quad (2.7)$$

### 3. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม (Series DC Motor)

มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรมนั้นเมื่อพิจารณาวงจรสมมูล ดังรูปที่ 2.8 กำหนดได้ตามสมการ (2.8)



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_t = E_a + I_a (R_a + R_{sr}) \quad (2.8)$$

และสำหรับสมการแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น ( $T_d$ ) หาได้ดังนี้ คือ

$$T_d = K_a \phi I_a \quad (2.9)$$

เมื่อสมมุติให้เส้นแรงในเครื่องจักรกลเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้น และกำหนดได้ตามสมการ (4.63)

$$\phi = c I_a \quad (2.10)$$

โดยที่  $c$  คือ ค่าคงที่

จากสมการ (4.62) และ (4.63) ดังนั้นแรงบิด  $T_d$  กำหนดใหม่

$$T_e = K_a \phi I_a = K_a c I_a^2 \quad (2.12)$$

สำหรับคุณลักษณะสมบัติที่ขั้วของมอเตอร์กระแสตรงชนิดขดลวดสนามต่ออนุกรม นั้น การคำนวณเป็นการพิจารณา และวิเคราะห์บนพื้นฐานของเส้นโค้งคุณลักษณะสมบัติการทำแม่เหล็ก

เปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น และผลของการอิ่มตัวในวงจรมแม่เหล็กจะพิจารณาจากการวิเคราะห์โดยใช้กราฟ ดังนั้นการหาคุณลักษณะของแรงบิด - ความเร็ว กระทำได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

จากสมการ

$$I_a = \sqrt{\frac{T_d}{c K_a}}$$

แทนค่าสมการ  $I_a$  ข้างต้นและ  $E_a = K_a \phi \omega_m$  ในสมการ (2.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

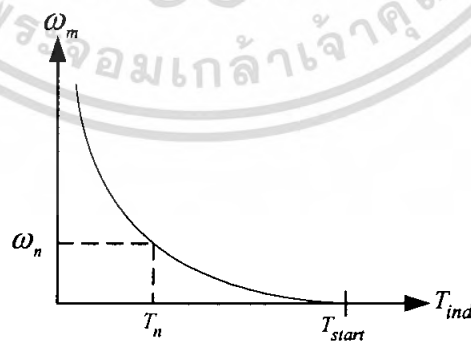
$$V_t = K_a \phi \omega_m + \sqrt{\frac{T_d}{cK_a}} \times (R_a + R_{sr}) \quad (2.13)$$

จากสมการข้างต้นแรงดัน  $V_t$  เขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$V_t = K_a \left( \frac{c}{K_a} \right) \times (T_d)^{1/2} \omega_m + \left( \frac{T_d}{K_a} \right)^{1/2} \times (R_a + R_{sr}) \quad (2.14)$$

ดังนั้นสมการความเร็ว  $\omega_m$  คือ

$$\omega_m = \left[ \frac{V_t}{(cK_a)^{1/2} \times T_d^{1/2}} - \frac{R_a + R_{sr}}{cK_a} \right] \quad (2.15)$$

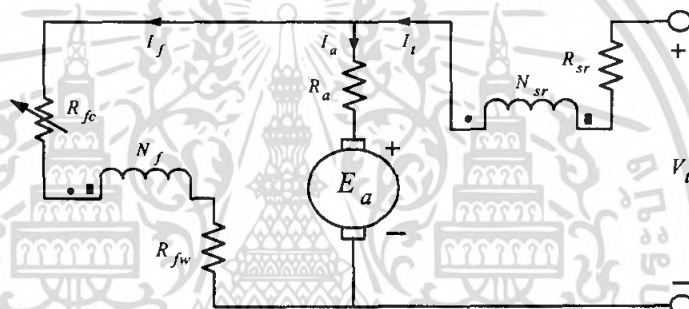


รูปที่ 2.9 คุณลักษณะสมบัติ แรงบิด - ความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม

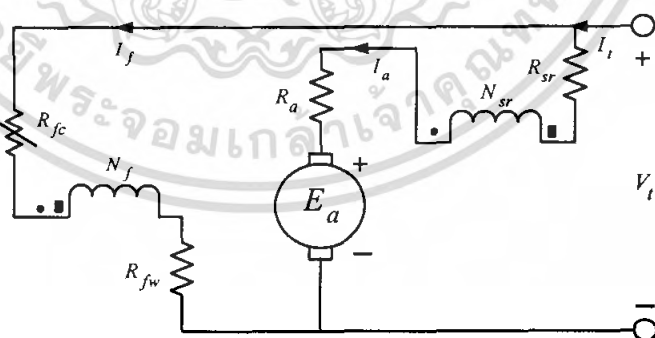
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม (Compounded DC Motor)

การต่อมอเตอร์แบบนี้ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กขานและขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอนุกรมต่อร่วมกัน ดังรูปที่ 4.45 (ก) และ (ข) สำหรับการกำหนดจุด (dot) ที่ขดลวดทั้งสองเหมือนกับการกำหนดในหม้อแปลงถ้าพิจารณากระแสที่ไหลผ่าน dot ซึ่งทำให้ค่า mmf เป็นบวก โดยที่การไหลของกระแสผ่านขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กทั้งสองส่งผลให้ค่า mmf เสริมกัน ดังนั้นผลรวมของค่า mmf มีค่าสูงขึ้นซึ่งมอเตอร์จะทำงานเป็น Cumulatively Compounded DC motor และถ้าลวดทั้งสองมีค่าเป็นลบ เรียกมอเตอร์ว่า Differentially Compounded DC Motor



(ก) Short shunt



(ข) Long shunt

รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของมอเตอร์แบบผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสมการแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์กระแสตรงชนิดขดลวดสร้าง  
สนามแม่เหล็กต่อผสมกำหนดได้ตามสมการดังต่อไปนี้

**Short-shunt**

$$V_t = E_a + I_a R_a + I_t R_{sr} \tag{2.16}$$

$$I_t = I_a + I_f \tag{2.17}$$

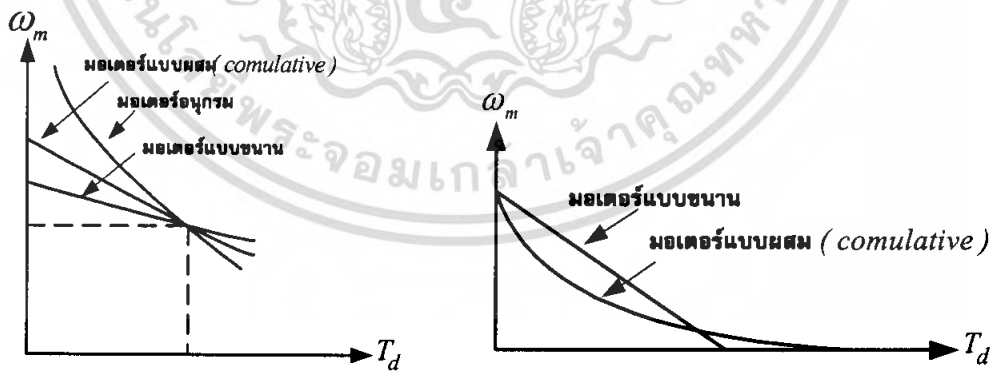
**Long-shunt**

$$V_t = E_a + I_a (R_a + R_{sr}) \tag{2.18}$$

$$I_t = I_a + I_f \tag{2.19}$$

$$I_f = \frac{V_t}{R_{fw} + R_{fc}} \tag{2.20}$$

สำหรับคุณลักษณะสมบัติ แรงบิด – ความเร็วของมอเตอร์ทั้งสองแบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



(ก)

(จ)

(ก) เปรียบเทียบระหว่างมอเตอร์แบบขนาน แบบอนุกรมและแบบผสม

(จ) เปรียบเทียบระหว่างมอเตอร์แบบขนานและแบบผสม

รูปที่ 2.11 คุณลักษณะสมบัติ แรงบิด - ความเร็ว

### 2.1.2 สมการหลักของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง

สมการศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วแปลงถ่าน  $E_a$  ศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแปลงถ่านสามารถหาได้จากสมการหลัก เมื่อแท่งตัวนำเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กอันเกิดจากอิทธิพลของขั้วแม่เหล็กภายในวงจร จะเกิดศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น ความเร็วที่เคลื่อนที่เป็น  $N$  รอบต่อนาที และมีรัศมีของตัวเมเจอร์เท่ากับ  $r_a$  เมตร ดังนั้นความเร็วของแท่งตัวนำที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กจะมีขนาดเท่ากับ

$$U = \frac{N * 2\pi r_a}{60} \text{ เมตร/วินาที} \quad (2.21)$$

ขนาดของสนามแม่เหล็กภายใต้ขั้วแม่เหล็กจะเป็นค่าของเส้นแรงแม่เหล็กหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของขั้วแม่เหล็กนั้น

$$B = \frac{\phi d}{ra\theta la} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $ra\theta$  เป็นความกว้างของขั้วแม่เหล็ก

ความหนาของตัวโรเตอร์จะเท่ากับความยาวของด่างตัวนำเท่ากับ  $la$  ในเครื่องจักรขนาดเท่าๆกัน ค่าของ  $B$  ศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแท่งตัวนำ ขณะอยู่ภายใต้อิทธิพลของขั้วแม่เหล็ก จะมีค่าเท่ากับ  $\frac{N2\pi\phi d}{60\theta}$  โวลต์ ภายใน 1 รอบ มุม  $\theta$  ที่หมุนไปเป็นมุม  $2\pi$  และแท่งตัวนำจะตัดผ่านขั้วแม่เหล็กทั้งหมด  $p$  ขั้ว ดังนั้นศักดาไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนแท่งตัวนำเดียวมีค่าเท่ากับ

$$e = \frac{\phi d N p}{60} \quad (V) \quad (2.23)$$

เมื่อ  $\phi d$  เป็นเส้นจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วมีหน่วยเป็น  $Wb$

ดังนั้นศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแปลงถ่านของเครื่องจักรไฟฟ้า อันหนึ่งอันใดจะมีขนาดเท่ากับ

$$E_a = \frac{\phi d p N Z a}{60 a} \quad (V) \quad (2.24)$$

เมื่อ  $Za$  เป็นจำนวนแท่งตัวนำทั้งหมดที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของขั้วแม่เหล็ก

$a$  เป็นจำนวนวงจรขนานที่เกิดซ้ำในตัวโรเตอร์ระหว่างขั้วแปลงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการข้างต้น เมื่อเครื่องไฟฟ้าสร้างเสร็จตัวแรกที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ก็มีแต่เพียงค่าความเร็ว  $N$  และค่าของเส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi d$  เท่านั้น ดังนั้นเขียนใหม่ได้

$$E_a = KN\phi d \quad (2.25)$$

$K$  เป็นค่าคงตัวของเครื่องจักรที่สร้างขึ้น

### 1. สมการความเร็วรอบของมอเตอร์

จากสมการ  $E_a = \frac{\phi d p N Z a}{60 a}$  เราจัดรูปสมการเพื่อหาความเร็วรอบของมอเตอร์ได้

$$N = \frac{60 a E_a}{p Z a \phi d} \quad (2.26)$$

จากสมการนี้จะเห็นได้ว่าถ้าเราต้องการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ของเครื่องจักรที่มีอยู่แล้ว ตัวแปรที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้มีแต่เพียงค่าศักดาไฟฟ้าระหว่างตัวแปลงถ่าน  $E_a$  และค่าเส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi d$  เท่านั้น สามารถเขียนใหม่เป็น

$$N = \frac{E_a}{K \phi d} \quad (2.27)$$

### 2. แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อแท่งตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอยู่ในสนามแม่เหล็กซึ่งตั้งฉากกันจะมีแรงเกิดขึ้นบนแท่งตัวนำนั้น เท่ากับผลคูณของสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้าและความยาวของแท่งตัวนำนั้น  
แรงทั้งหมดที่กระทำบนแท่งตัวนำ

$$F \text{ (total)} = \frac{Z a \phi a I a}{2 \pi r a (a)} \quad (2.28)$$

แรงบิด (Torque) ที่เกิดขึ้นจะเท่ากับแรงที่กระทำรอบ  $F \text{ (total)}$  คูณกับแขนของแรงคั่นเป็นรัศมีของตัวโรเตอร์เอง ดังนั้นแรงบิด (Torque) จะมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = \frac{Za\phi pIa}{2\pi a} \quad (2.29)$$

- เมื่อ  $Za$  เป็นจำนวนแท่งตัวนำทั้งหมดที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของขั้วแม่เหล็ก  
 $\phi d$  เป็นเส้นจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็กจากเครื่องจักร  
 $p$  เป็นจำนวนขั้วของเครื่องจักร  
 $Ia$  เป็นกระแสที่ไหลระหว่างแปลงถ่าน  
 $a$  เป็นจำนวนวงจรรขานที่เกิดขึ้นในตัวโรเตอร์ระหว่างขั้วแปลงถ่าน

DC มอเตอร์เป็นทรานสดิวเซอร์แรงบิดซึ่งมีคุณลักษณะพิเศษคือแรงบิดของเพลลาของ DC มอเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสอาร์มาเจอร์ แรงบิดของเพลลาของ DC มอเตอร์จะได้จากผลระหว่างสนามแม่เหล็กและขดลวดตัวนำ หลักการนี้แสดงได้ในรูป ในที่นี้กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำ จะสร้างสนามที่ประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi$  และขดลวดตัวนำเหล่านั้นอยู่ห่างจากศูนย์กลางการ หมุนเท่ากับ  $r$  ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเพลลาและกระแสเท่ากับ

$$T = K \phi I \quad (2.30)$$

- เมื่อ  $T$  คือแรงบิดของเพลลา มีหน่วยเป็นนิวตัน-เมตร  
 $\phi$  คือเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์  
 $I$  คือกระแสเป็นแอมแปร์

และ  $K$  คือค่าคงตัว ดังนั้นแรงบิดของเพลลาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลคูณของเส้นแรงแม่เหล็กและกระแส เมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดโวลต์เตจตกคร่อมตัวมันเอง โวลต์เตจ นี้จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของเพลลาของมอเตอร์และด้านการไหลของกระแส ควสามสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจย้อนกลับนี้และความเร็วของเพลลามอเตอร์คือ

$$E = K \phi \omega \quad (2.31)$$

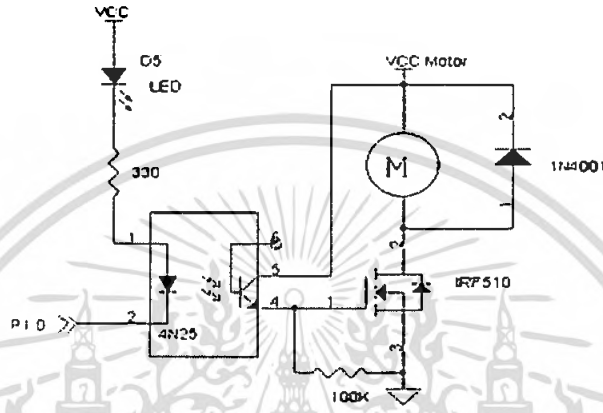
- เมื่อ  $E$  คือโวลต์เตจย้อนกลับ emf มีหน่วยเป็นโวลต์  
 $\phi$  คือเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์  
 $\omega$  คือความเร็วของมอเตอร์ มีหน่วยเป็นเรเดียน/วินาที

สมการ (2.30) - (2.31) เป็นสมการที่แสดงถึงหลักการทำงานพื้นฐานของ DC มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

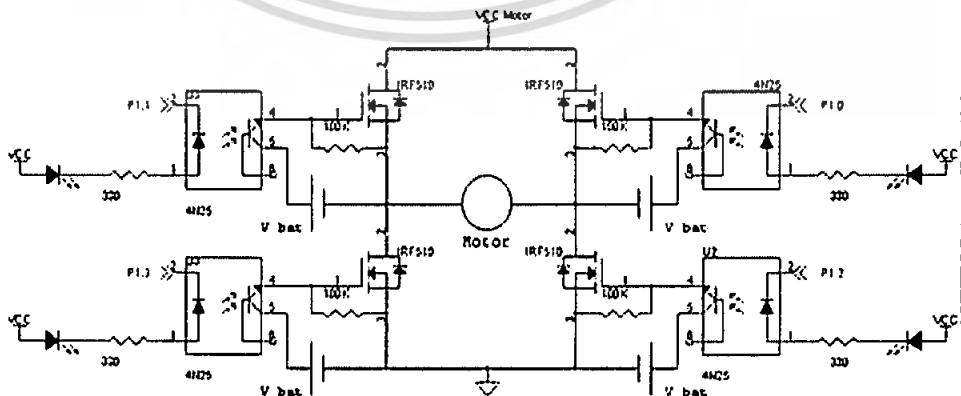
## 2.2 ชุดขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง H-bridge

ในการควบคุมเราสามารถใช้งานสวิทช์โดยใช้ Power BJT หรือ Power MOSFET เป็นตัวสวิทช์เพื่อสั่งให้มอเตอร์ทำงาน



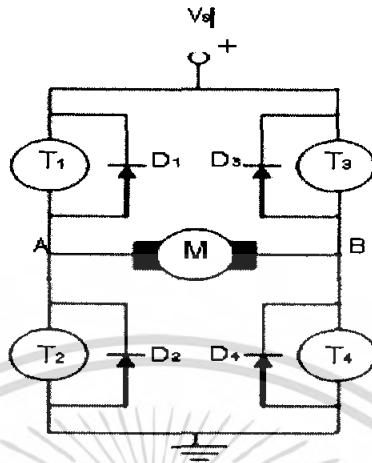
รูปที่ 2.12 แสดงวงจรขับมอเตอร์กระแสตรง

จากวงจรรูปที่ 2 จะพบว่าในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ถ้าเราต้องการให้มอเตอร์หมุน ก็เพียงทำให้มีความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทาน 100K ที่ต่ออยู่ระหว่างขา GATE และขา SOURCE ซึ่งในวงในรูปที่ 2 นี้การหมุนของมอเตอร์จะหมุนได้ในทิศทางเดียว ถ้าเราต้องการให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ทั้ง C.W. และ C.C.W. เราอาจใช้วงจรที่เป็น H - Bridge ดังรูปวงจร



รูปที่ 2.13 แสดงวงจรขับแบบ H - Bridge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงวงจรสมมูลของวงจรรูปที่ 2.13

จากวงจรสมมูลจะพบว่าในการสั่งงานให้ วงจร H-Bridge ทำงานจะทำได้โดยสั่งให้  $T_1$  และ  $T_4$  ON หรือ สั่งให้  $T_2$  และ  $T_3$  ON แต่มีเงื่อนไขว่า  $T_2$  จะต้องไม่ ON พร้อมกับ  $T_4$  เพราะถ้า  $T_2$  ON พร้อมกับ  $T_4$  จะทำให้เสมือนว่าเป็นการ Short Circuit ระหว่าง Supply  $V_d$

## 2.3 ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า ( Field-Effect Transistor; FET)

**ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า** คือ

ทรานซิสเตอร์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารกึ่งตัวนำเพื่อให้เกิดการนำกระแสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยทั่วไปมักเรียกชื่อย่อว่า "เฟต"

เฟตแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบรอยต่อ (Junction Field Effect Transistor) หรือ เจเฟต (JFET) และ ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบโลหะ-ออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) หรือ มอสเฟต (MOSFET) ในที่นี้จะกล่าวถึง MOSFET เท่านั้น

### มอสเฟต (MOSFET)

มอสเฟตจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ดิพลีชัน (Depletion) และ เอนานซ์เมนต์ (Enhancement) แต่แต่ละประเภทยังแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบแชนแนล n และ แบบแชนแนล p

มอสเฟตประเภท ดิพลีชันหรือดีมอสเฟต (D-MOSFET) ทั้ง 2 แบบจะทำงานได้ 2 โหมด คือ

โหมดดิพลีชัน (Depletion Mode) และ โหมดเอนานซ์เมนต์ (Enhancement Mode) กล่าวคือ ถ้าจ่าย

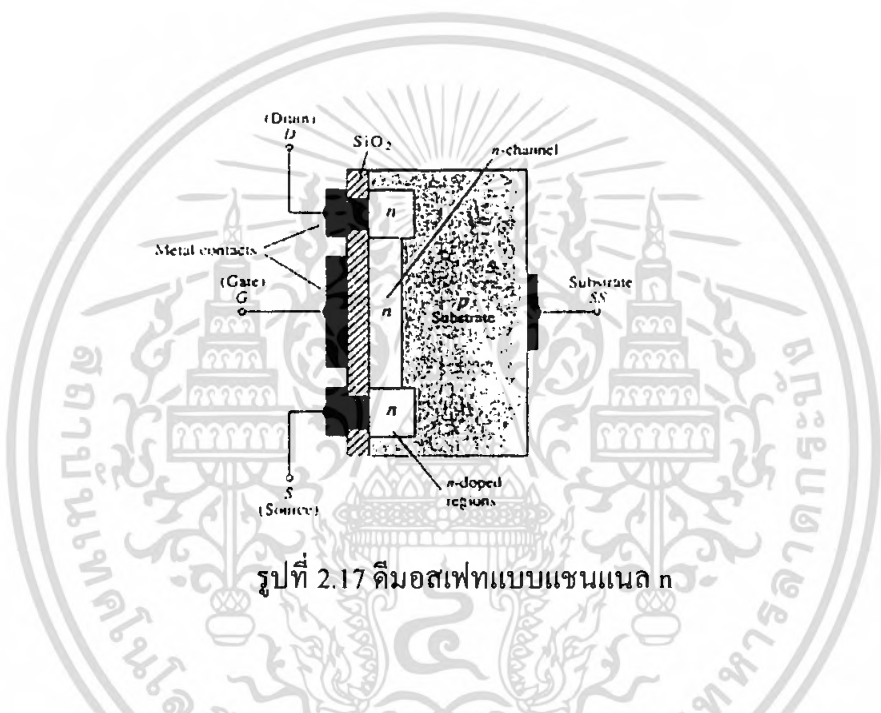
แรงดันลบให้กับดีมอสเฟตแชนแนล n จะทำงานในโหมดดิพลีชัน แต่ถ้าจ่ายแรงดันบวกจะทำงานในโหมดเอนานซ์เมนต์ แต่ถ้าจ่ายแรงดันลบให้กับดีมอสเฟตแชนแนล p จะทำงานในโหมดดิพลีชัน แต่ถ้าจ่ายแรงดันบวกจะทำงานในโหมดเอนานซ์เมนต์ อย่างไรก็ตามทั้งนี้ก็ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโหมดเอนฮานซ์เมนต์ ส่วนดีมอสเฟตแซนแนล p ก็จะทำงานคล้ายกันเมื่อ ได้รับแรงดันที่มีขั้วตรงข้ามกับแบบแซนแนล n

มอสเฟตประเภทเอนฮานซ์เมนต์หรืออีมอสเฟต (E-MOSFET) มีโครงสร้างบางอย่างคล้ายกับมอสเฟตแบบดีฟิสิชั่น แต่จะทำงานได้เฉพาะ โหมดเอนฮานซ์เมนต์เท่านั้น

### 2.3.1 ดีมอสเฟต (D-MOSFET)

ดีมอสเฟตแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 1. ดีมอสเฟตแบบแซนแนล n 2. ดีมอสเฟตแบบแซนแนล p



รูปที่ 2.17 ดีมอสเฟตแบบแซนแนล n

ดีมอสเฟตแบบแซนแนล n ประกอบขึ้นจากแผ่นผลึกฐาน p (p-substrate) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำทำจากซิลิกอนขั้ว D และขั้ว S ต่อกับบริเวณที่มีการกระตุ้นหรือ โด๊ปให้เป็นบริเวณสารกึ่งตัวนำ n (n-doped region) ทั้งสองส่วนนี้จะเชื่อมกับแซนแนล n สำหรับขั้ว G จะต่อกับวัสดุผิวนอกที่เป็นโลหะ โดยมีซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) กั้นแซนแนล n กับขั้ว G (ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นฉนวนประเภท ไดอิเล็กทริก) เมื่อมีสนามไฟฟ้าจ่ายเข้ามาที่ชั้นของ  $\text{SiO}_2$  ก็จะสร้างสนามไฟฟ้าด้านและสร้างชั้นฉนวน ขึ้นภายในตัวเองเพื่อกันขั้วเกตกับแซนแนล แสดงว่า **ไม่มีการต่อโดยตรงระหว่างขั้ว G กับแซนแนลของมอสเฟต ชั้นที่เป็นฉนวน  $\text{SiO}_2$  จะทำให้  $Z_1$  มีค่าสูงตามความต้องการได้**

นอกจากนี้บางครั้งจะต่อแผ่นผลึกจากฐานเข้ากับแหล่งจ่ายจึงมีขั้วเพิ่มขึ้นมาเรียกว่า ขั้วผลึกฐาน SS (Substrate : SS) ทำให้มีขั้วเพิ่มเป็น 4 ขั้ว และจากข้างต้น จึงสรุปความหมายของคำว่า MOS ในชื่อมอสเฟต (ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าโลหะออกไซด์สารกึ่งตัวนำ) ได้ดังนี้

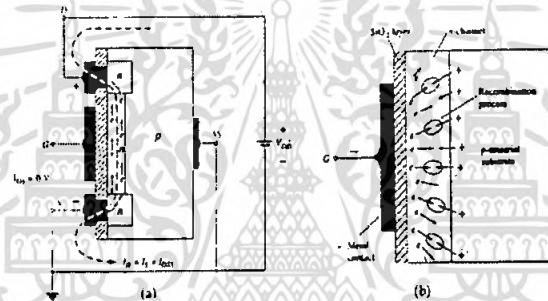
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดและเผยแพร่ซ้ำ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โลหะ (Metal, M) หมายถึง บริเวณสำหรับการต่อขั้ว D, S และ G กับวัสดุฉนวน
- ออกไซด์ (Oxide, O) หมายถึง ซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ )
- สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor, S) หมายถึง โครงสร้างพื้นฐานในบริเวณ

แพร่กระจายของสารกึ่งตัวนำชนิด p และสารกึ่ง ตัวนำชนิด n

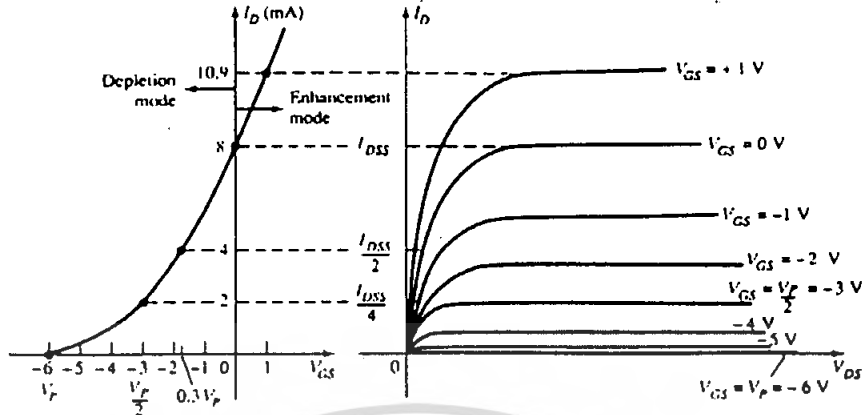
### การทำงานและคุณสมบัติเบื้องต้น (Basic Operation and Characteristics)

กำหนดให้  $V_{GS}$  ในรูป (a) มีค่าเป็นศูนย์ แล้วจ่าย  $V_D$  ที่ขั้ว D และ S ขั้ว D สามารถดึงดูดอิเล็กตรอนอิสระ (e) ผ่านแชนแนล n และทำให้กระแส  $I_d = I_s = I_{DSS}$  ไหลผ่านแชนแนล n ได้ (คล้ายกับการไหลของกระแสไฟฟ้าในแชนแนลของเจฟฟทขณะ  $V_{GS} = 0 \text{ V}$ )



รูปที่ 2.18 ทางเดินกระแสของมอสเฟต

ถ้าจ่าย  $V_{GS}$  ที่มีค่าเป็นลบให้กับขั้วเกต (รูป b) เช่น  $-1 \text{ V}$  ความต่างศักย์ที่ขั้วเกตจะผลักดันให้อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนไปยัง แผ่นผลึกฐาน p และดึงดูดโฮลจากแผ่นผลึกฐาน p ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลรวมตัวกันใหม่ (Recombination Process) จึงเกิดการลดจำนวน อิเล็กตรอนอิสระในแชนแนล n ที่มีไว้สำหรับการนำกระแส เมื่อมีค่า  $V_{GS}$  เป็นลบมากเท่าใดก็จะเกิดการรวมตัวกันใหม่มากขึ้นเท่านั้นและ อิเล็กตรอนอิสระที่แชนแนล n ก็จะมีจำนวนลดลง จึงกล่าวได้ว่าถ้า  $V_{GS}$  เป็นลบมากขึ้น  $I_D$  จะมีค่าน้อยลง เขียนเป็นคอร์ฟลักษณะได้ ดังรูปต่อไปนี้ การทำงานขณะ  $V_{GS}$  เป็นลบนี้ เราเรียกว่า **การทำงานในโหมดคัตออฟ**

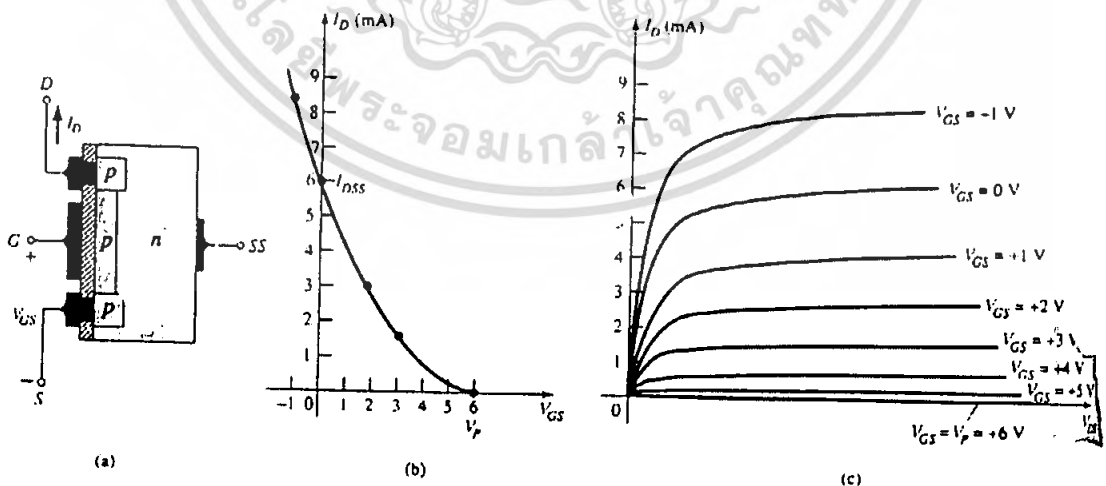


รูปที่ 2.19 กราฟแสดงคุณสมบัติของมอสเฟต

ถ้าจ่าย  $V_{GS}$  ที่มีค่าเป็นบวกให้กับขั้วเกตความต่างศักย์ที่ขั้วเกตจะดึงดูดอิเล็กตรอนจากผลึกฐาน p มายังบริเวณชั้น  $SiO_2$  ทำให้ พาหะนำกระแสและสภาพนำกระแสของแชนแนลเพิ่มขึ้น ดังนั้น กระแส  $I_D$  จึงเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่า  $I_{DSS}$  การทำงานขณะ  $V_{GS}$  เป็นบวกนี้เราเรียกว่า **การทำงานในโหมดเอนฮานซ์เมนต์**

**คิมอสเฟตแบบแชนแนล p**

โครงสร้างของคิมอสเฟตแบบแชนแนล p มีลักษณะตรงข้ามกับรูปของคิมอสเฟตแบบแชนแนล n คือประกอบด้วยแผ่นผลึกฐาน n และแชนแนล p ดังรูป

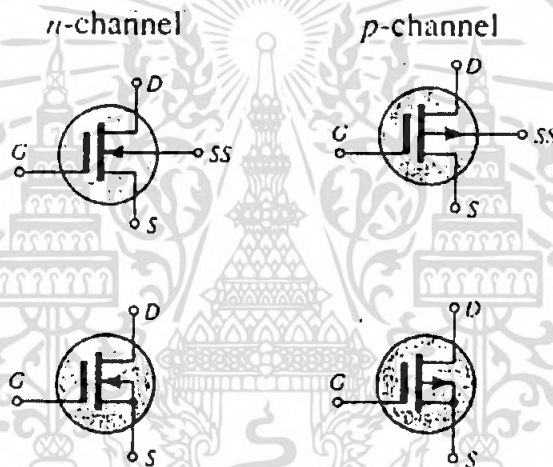


รูปที่ 2.20 คิมอสเฟตแบบแชนแนล p

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปรียบเทียบคุณลักษณะของคิมอสเฟตแบบแซนแนล กับคิมอสเฟตแบบแซนแนล p (ตามรูป b และ c) เราพบว่า ทิศทางของกระแสขั้วแรงดันต่าง ๆ กลับกันทำให้คุณลักษณะกลับกันด้วย  $I_D$  จะเริ่มเพิ่มขึ้นจากจุด Cutoff ที่  $V_{GS} = V_p$  และขณะที่  $V_{GS}$  มีค่าเป็นบวกลดลง  $I_D$  จะเพิ่มขึ้นจนถึง  $I_{GSS}$  และเพิ่มอย่างต่อเนื่องจนเลขค่า  $I_{GSS}$  เมื่อ  $V_{GS}$  มีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้นยังใช้สมการของชอคเลย์ ได้แต่ ควรระวังเครื่องหมาย  $V_{GS}$  และ  $V_p$  ในสมการให้ถูกต้อง (คือจะต้องมีเครื่องหมายเป็นบวก)

### สัญลักษณ์ (Symbols)



รูปที่ 2.21 สัญลักษณ์ของคิมอสเฟตแบบแซนแนล n และ p

ถ้าสังเกตให้ดีจะเห็นว่า สัญลักษณ์สื่อความหมายถึงโครงสร้างแท้จริงของอุปกรณ์ ช่องว่างระหว่างขั้ว G กับขั้ว D (ที่ต่อกับขั้ว S) แสดงว่า ไม่มีการต่อกันโดยตรงระหว่างขั้วทั้งสามเนื่องจากมีฉนวนกันที่ขั้ว G ส่วนขั้วผลึกฐาน SS ในมอสเฟต บางครั้งมี บางครั้งไม่มี จึงเขียนสัญลักษณ์ได้ทั้ง 2 แบบ คือ กรณีที่มีขั้ว SS และในกรณีไม่มีขั้ว SS ในการวิเคราะห์ลำดับต่อไป มัก จะไม่มีขั้ว SS ดังนั้น สัญลักษณ์ที่อยู่ข้างล่างจะเป็นสัญลักษณ์ที่ใช้ทั่วไป

### 2.3.2 อิมอสเฟต (EMOSFET)

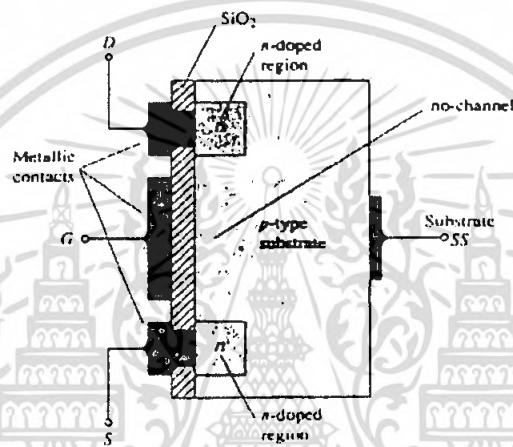
แม้ว่าโครงสร้างและขอบเขตการทำงานของคิมอสเฟตกับอิมอสเฟตจะมีลักษณะคล้ายกันอยู่บ้าง แต่คอร์ดฟคุณสมบัติของอิมอสเฟตจะแตกต่างออกไปโดยสิ้นเชิง \*กล่าวคือไม่สามารถนำสมการของชอคเลย์มาเขียนคอร์ดฟถ่ายโอนของอิมอสเฟตได้\* และกระแส  $I_D$  ยังไม่เกิดขึ้นจนกระทั่ง  $V_{GS}$  มีค่าสูงถึงค่าเฉพาะค่าหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมอสเฟตแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. อิมอสเฟตแบบแซนแนล n
2. อิมอสเฟตแบบแซนแนล p

### อิมอสเฟตแบบแซนแนล n



รูปที่ 2.22 โครงสร้างเบื้องต้นของอิมอสเฟตแบบแซนแนล n

อิมอสเฟตแบบแซนแนล n ประกอบขึ้นจากแผ่นผลึกฐาน p ที่เป็นสารกึ่งตัวนำทำจากซิลิคอน ขั้ว D และขั้ว S ต่อกับ บริเวณที่มีการกระตุ้น n โดยผ่านวัสดุฉนวนที่เป็นโลหะ นอกจากนี้บางครั้งจะต่อแผ่นผลึกฐาน p เข้ากับแหล่งจ่ายจึง มีขั้ว SS เพิ่มขึ้นมาคล้ายกับคิมอสเฟต

ถ้าสังเกตรูป ให้ดูจะเห็นได้ว่าไม่มีเส้นทางเชื่อมหรือไม่มีแซนแนล (no-channel) ระหว่างบริเวณที่มีการกระตุ้น n ทั้ง 2 แห่ง นี่คือการแตกต่างเบื้องต้นระหว่างโครงสร้างของอิมอสเฟตและคิมอสเฟต

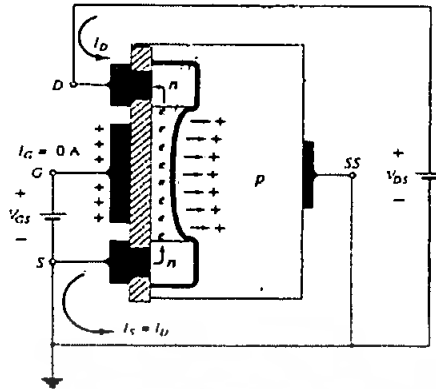
### การทำงานและคุณลักษณะเบื้องต้น

กำหนดให้  $V_{GS} = 0V$  และจ่าย  $V_{DS}$  ที่มีค่าเป็นบวกให้กับขั้ว S กับขั้ว D โดยขั้ว SS ต่อรวมกับขั้ว S ดังรูป จะเกิดจากไบอัสกลับที่รอยต่อ p-n (บริเวณที่มีการกระตุ้น n กับผลึกฐาน p) [เนื่องจากไม่มีเส้นทางเชื่อม หรือ แซนแนลระหว่างขั้ว D และขั้ว S ทำให้เกิดการต้านการไหลของ

อิเล็กตรอน] กระแส  $I_D = 0$  แตกต่างจาก คิมอสเฟตและเจเฟตซึ่งมี  $I_D = I_{DSS}$  ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

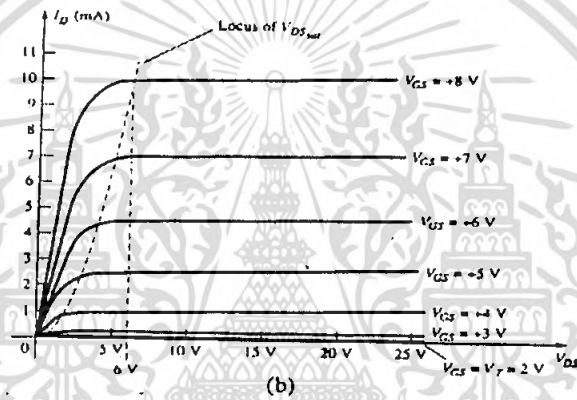
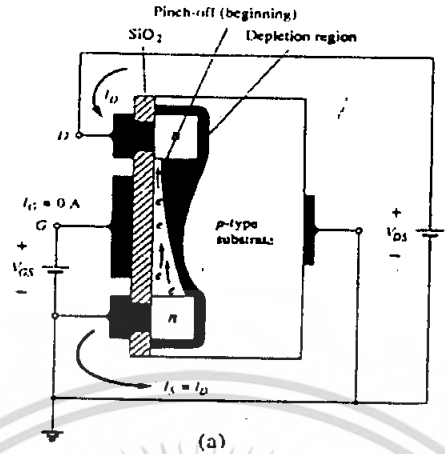
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 ลักษณะการทำงานของอิมอสเฟตแบบเซนแนล n

ถ้าจ่าย  $V_{DS}$  และ  $V_{GS}$  ที่มีค่าเป็นบวกคงรูป ทำให้ขั้ว D และขั้ว G มีความต่างศักย์เป็นบวก การที่ขั้ว G มีความต่างศักย์เป็น บวกนี้จะผลักดันให้โฮลในผลึกฐาน p เข้าไปสู่บริเวณภายในผลึกฐาน p และดึงดูดอิเล็กตรอนในผลึกฐาน p (เป็น พาหะข้างน้อยรวมตัว อยู่ในบริเวณใกล้กับผิวของ  $\text{SiO}_2$ ) ซึ่งมีคุณลักษณะเป็นฉนวนและป้องกันอิเล็กตรอนไม่ให้ดึงดูด ไปยังขั้วเกต ขณะที่  $V_{GS}$  เพิ่มขึ้น การรวมตัวของอิเล็กตรอนใกล้กับชั้นของ  $\text{SiO}_2$  ก็เพิ่มมากขึ้น ตามลำดับขณะเดียวกันบริเวณที่มีการ กระตุ้น n เกิดการเหนี่ยวนำจากแรงดัน  $V_{GS}$  ทำให้มีอิเล็กตรอนหรือ  $I_D$  (มีทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอน)ไหลระหว่าง ขั้ว D กับขั้ว S ระดับ  $V_{GS}$  ทำให้  $I_D$  ไหลเราเรียกว่า แรงดันธรสโวลต์ (Threshold Voltage:  $V_T$ ) ในสเปคกำหนดให้  $V_T$  เป็น  $V_{GS(th)}$



รูปที่ 2.24 คุณสมบัติของอิมอสเฟตแบบเซนแนล n

ถ้าเพิ่ม  $V_{GS}$  ให้สูงขึ้น  $I_D$  ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้า  $V_{GS}$  มีค่าคงที่ และ เพิ่มค่า  $V_{DS}$  จะทำให้  $I_D$  ถึงจุดอิ่มตัว (เช่นเดียวกับไดโอด) เนื่องจากขั้วบวกของ  $V_{DS}$  ดึงคู่อิเล็กตรอน จึงจะทำให้ปลายของช่องทางเหนี่ยวนำบริเวณใกล้ขั้ว D แคบลง ใกล้ระดับพินช์ออฟ [Pinch-Off (Beginning)] ดังรูป (a) เมื่อนำ KVL มาร่วมพิจารณา จะได้แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว D กับขั้ว G ( $V_{DG}$ ) ดังนี้

$$V_{DG} = V_{DS} - V_{GS} \tag{2.34}$$

ถ้ากำหนดให้  $V_{GS} = 8 \text{ V}$  และ  $V_{DS} = 2 \text{ V}$  ก็จะได้  $V_{DG} = -6 \text{ V}$  แต่ถ้าเพิ่ม  $V_{GS}$  เป็น  $5 \text{ V}$  ค่า  $V_{DG}$  จะเป็น  $-3 \text{ V}$  (ตาม สมการที่ 2.33) การลดลงของ  $V_{DG}$  ทำให้แรงดึงดูด (จากขั้วบวกของ  $V_{DS}$ ) ที่มีต่ออิเล็กตรอนอิสระในบริเวณช่องทางเหนี่ยวนำลดลง ด้วย ทำให้ช่องทางเหนี่ยวนำแคบลง ถ้าความกว้างของช่องทางดังกล่าวลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดพินช์ออฟ  $I_D$  ก็จะถึงจุดอิ่มตัว ดังที่ได้อธิบายในไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะของขั้วกรรณของมอสเฟตใน รูป (a) เป็นดังรูป (b) ขณะ  $V_T = 2 \text{ V}$  ที่  $V_{GS} = 8 \text{ V}$  ทำให้เกิด  $V_{DS}$  อิมิตัว ( $V_{DSsat}$ ) = 6 V ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{DSsat}$  กับ  $V_{GS}$  ดังนี้

$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_T \quad (2.34)$$

สมการที่ 2 ทำให้ทราบว่า เมื่อ  $V_T$  คงที่และ  $V_{GS}$  ยิ่งสูงขึ้นเท่าใด  $V_{DSsat}$  ก็ยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น ในรูป (b) ขณะที่  $V_T$  เป็น 2 V ณ ตำแหน่งนี้  $I_D = 0 \text{ mA}$  ดังนั้นจึงทำให้ทราบว่า ถ้า  $V_{GS}$  มีค่าต่ำกว่า  $V_T$  ค่า  $I_D$  ของ อิมอสเฟตจะเป็นศูนย์หรือไม่มีกระแสไหลนั่นเอง

ถ้าค่า  $V_{GS}$  เพิ่มขึ้นจาก  $V_T$  เป็น 8 V จะทำให้ระดับการอิมิตัวของ  $I_D$  เพิ่มขึ้นจาก 0 mA เป็น 10 mA แต่เนื่องจากช่วงของเคอร์ฟ  $V_{GS}$  มีระยะห่างไม่เท่ากัน ดังนั้น  $I_D$  ที่เพิ่มขึ้น จึงมีความสัมพันธ์กับ  $V_{GS}$  ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นดังสมการต่อไปนี้

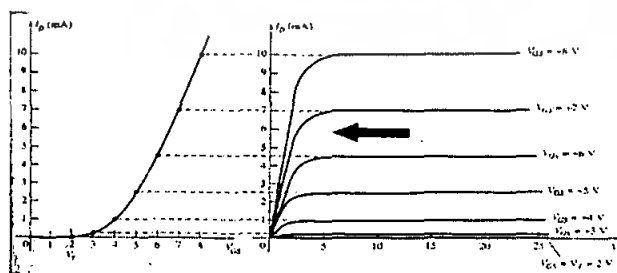
$$I_D = k (V_{GS} - V_T)^2 \quad (2.35)$$

เมื่อ  $k$  เป็นค่าคงที่ของโครงสร้างอิมอสเฟต ซึ่งหาค่าได้จาก

$$k = I_{D(on)} / (V_{GS(on)} - V_T)^2 \quad (2.36)$$

เมื่อ  $I_D$  (on) และ  $V_{GS}$  (on) เป็นกระแสและแรงดันที่ทำให้เกิดจุดเฉพาะบนเคอร์ฟ คุณลักษณะของมอสเฟต สมมติแทนค่า  $I_D$  (on) = 10 mA ขณะ  $V_{GS} = 8 \text{ V}$  ลงในสมการที่ 2.36 จะได้  $k = 0.278 \cdot 10^{-3} \text{ A/V}^2$  แทนค่า  $k$  ในสมการที่ 3 เพื่อหาค่า  $I_D$  สำหรับคุณลักษณะในรูป (b) โดยสมมติ  $V_{GS} = 4 \text{ V}$  จะได้  $I_D = 1.11 \text{ mA}$

สำหรับการวิเคราะห์ไฟฟ้ากระแสตรงของอิมอสเฟต จะใช้คุณลักษณะถ่ายโอนดังรูปต่อไปนี้ในการแก้ปัญหา



รูปที่ 2.25 คุณลักษณะถ่ายโอนกระแส

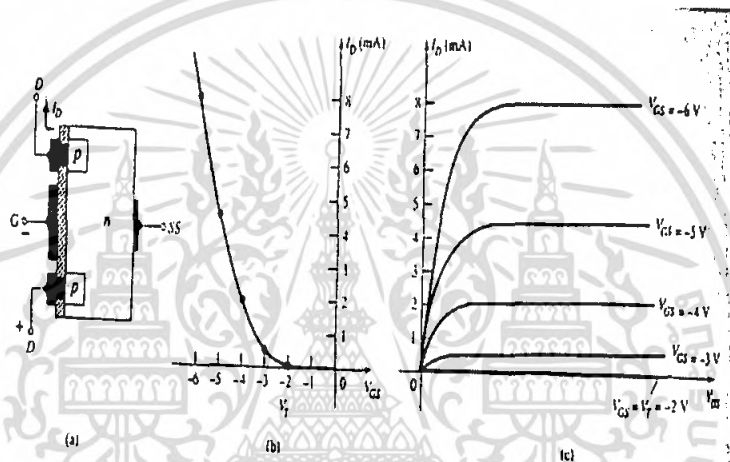
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคอร์ฟถ่ายโอนในรูป แตกต่างจากเคอร์ฟถ่ายโอนที่กล่าวในตอนต้น ๆ เพราะว่ามีอิมอสเฟทแบบ แชนแนล n จะมี ID เพิ่มขึ้นไม่ได้จนกว่า  $V_{GS} = V_T$  สมมติว่าเราจะเขียนเคอร์ฟถ่ายโอนที่มี  $k = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ A/V}^2$  และ  $V_T = 4 \text{ V}$  เมื่อนำสมการที่ 3 มาร่วม พิจารณา จะได้

$$I_D = 0.5 \cdot 10^{-3} (V_{GS} - 4 \text{ V})^2$$

### อิมอสเฟทแบบแชนแนล p

โครงสร้างของอิมอสเฟทแบบแชนแนล p มีลักษณะตรงข้ามกับแบบแชนแนล n

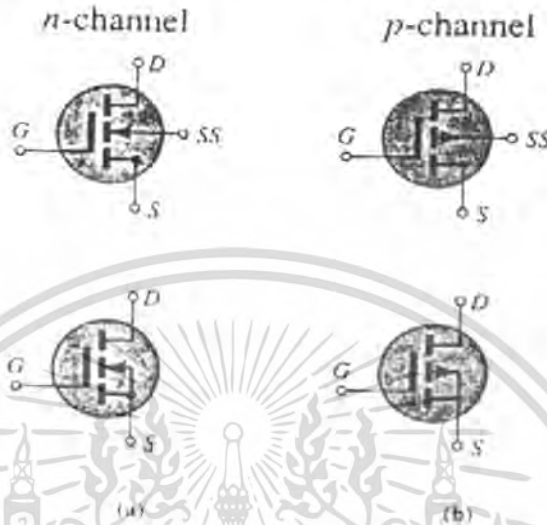


รูปที่ 2.26 อิมอสเฟทแบบแชนแนล p

กล่าวคือ ขั้ว D และขั้ว S ต่อกับผลึกฐาน n และบริเวณที่มีการกระตุ้น p (p-doped regions) แต่ขั้วของแรงดันและทิศทาง กระแสตรงข้ามกับแบบแชนแนล n นอกจากนี้คุณลักษณะของเคอร์ฟถ่ายโอน ก็จะแสดงค่าที่ด้านตรงข้าม

**สัญลักษณ์ (Symbol)**

สัญลักษณ์ของอิมอสเฟทแบบแชนแนล p และแชนแนล n เป็นดังรูป



รูปที่ 2.27 สัญลักษณ์ของอิมอสเฟทแบบแชนแนล n และแชนแนล p

จะเห็นได้ว่าสัญลักษณ์แสดง โครงสร้างแท้จริงของอุปกรณ์เส้นประเชื่อมระหว่างขั้ว D กับ ขั้ว S แสดงว่าไม่มี แชนแนลระหว่างขั้วทั้งสอง (ขณะไม่ได้รับการไบอัส) ซึ่งเป็นความแตกต่าง ประการเดียวระหว่างสัญลักษณ์ของคิมอสเฟทกับอิมอสเฟท

**2.4 หม้อแปลงไฟฟ้า**

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับจากวงจรหนึ่ง ไปยังอีกวงจรหนึ่ง โดยวิธี ทางวงจรแม่เหล็กซึ่งไม่มีจุดต่อไฟฟ้าถึงกันและ ไม่มีชิ้นส่วนทางกลเคลื่อนที่ โดยทั่วไปเราใช้หม้อ แปลงไฟฟ้าเพื่อแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้มีขนาดลดลงหรือเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยมีความถี่ไฟฟ้าคง เดิม

**2.4.1 โครงสร้างของหม้อแปลง**

หม้อแปลงแบ่งออกตามการใช้งานของระบบไฟฟ้ากำลังได้ 2 แบบคือ หม้อแปลงไฟฟ้า

ชนิด 1 เฟส และหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟสแต่ละชนิดมีโครงสร้างสำคัญประกอบด้วย

1. ขดลวดตัวนำปฐมภูมิ (Primary Winding) ทำหน้าที่รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า
2. ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) ทำหน้าที่จ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้า
3. แผ่นแกนเหล็ก (Core) ทำหน้าที่เป็นทางเดินสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าและให้ขดลวดพันรอบ

แกนเหล็ก

4. ขั้วต่อสายไฟ (Terminal) ทำหน้าที่เป็นจุดต่อสายไฟกับขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของ บริษัท อีทีอี จำกัด มีอยู่ชุดหนึ่งนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. อุปกรณ์ระบายความร้อน (Coolant) ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับขดลวด เช่น อากาศ พัดลม น้ำมัน หรือใช้ทั้งพัดลมและน้ำมันช่วยระบายความร้อน เป็นต้น

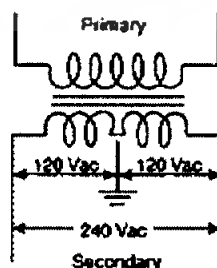
7. โครง (Frame) หรือตัวถังของหม้อแปลง (Tank) ทำหน้าที่บรรจุขดลวด แกนเหล็ก รวมทั้งการติดตั้งระบบระบายความร้อนให้กับหม้อแปลงขนาดใหญ่

8. สวิตช์และอุปกรณ์ควบคุม (Switch Controller) ทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า และมีอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ รวมอยู่ด้วย

## 2.4.2 ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า

การจำแนกหม้อแปลงตามขนาดกำลังไฟฟ้ามี่ดังนี้

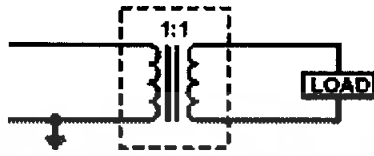
1. ขนาดเล็กจนถึง 1 VA เป็นหม้อแปลงที่ใช้กับการเชื่อมต่อระหว่างสัญญาณในงานอิเล็กทรอนิกส์
2. ขนาด 1-1000 VA เป็นหม้อแปลงที่ใช้กับงานด้านเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านขนาดเล็ก
3. ขนาด 1 kVA -1 MVA เป็นหม้อแปลงที่ใช้กับงานจำหน่ายไฟฟ้าในโรงงาน สำนักงาน ที่พักอาศัย
4. ขนาดใหญ่ตั้งแต่ 1 MVA ขึ้นไป เป็นหม้อแปลงที่ใช้กับงานระบบไฟฟ้ากำลัง ในสถานีไฟฟ้าย่อย การผลิตและจ่ายไฟฟ้า
5. หม้อแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่ม (Step-Up) ขดลวดทุติยภูมิจะมีจำนวนรอบมากกว่าขดลวดปฐมภูมิ
6. หม้อแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าลง (Step-Down) ขดลวดทุติยภูมิจะมีจำนวนรอบน้อยกว่าปฐมภูมิ
7. หม้อแปลงที่มีแทปแยก (Tap) ทำให้มีขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้หลายระดับ



รูปที่ 2.28 หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีแทปแยก (Tap) ด้านทุติยภูมิ

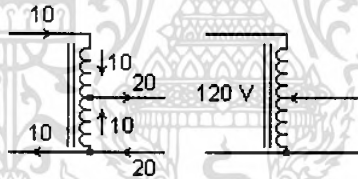
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. หม้อแปลงที่ใช้สำหรับแยกวงจรไฟฟ้าออกจากกัน (Isolating) ขดลวดทุติยภูมิจะมีจำนวนรอบเท่ากับขดลวดปฐมภูมิหรือมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากันทั้งสองด้าน



รูปที่ 2.29 หม้อแปลงไฟฟ้าแยกสายกราวด์ ( ) ออกจากระบบไฟฟ้า

9. หม้อแปลงแบบปรับเลื่อนค่าได้ (Variable) ขดลวดทุติยภูมิและปฐมภูมิจะเป็นขดลวดเดียวกัน หรือเรียกว่าหม้อแปลงออโต้ (Autotransformer) รูปที่ 15(ก) มักใช้กับการปรับขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้กับวงจรไฟฟ้าตามต้องการ และสำหรับวาไรแอก (Variac) นั้นเป็นชื่อเรียกทางการค้าของหม้อแปลงออโต้ที่สามารถปรับค่าได้ด้วยการเลื่อนแทปขดลวด

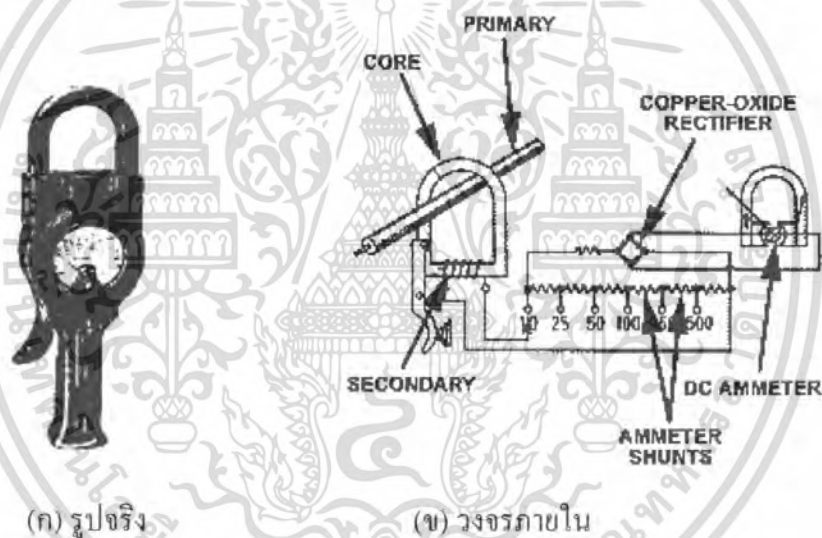


รูปที่ 2.30 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับเลื่อนค่าได้

10. หม้อแปลงกระแส (Current Transformer :CT) ถูกออกแบบมาให้ใช้งานร่วมกับเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าบางอย่างที่ต้องต่อร่วมกันในวงจร เดียวกันแต่ต้องการกระแสไฟต่ำหม้อแปลงกระแสจะทำหน้าที่แปลงขนาดกระแสลงตามอัตราส่วนระหว่างปฐมภูมิต่อทุติยภูมิเช่น 300 : 5 หรือ 100 : 5 เป็นต้น สำหรับหม้อแปลงกระแส 300 : 5 หมายถึงหม้อแปลงจะจ่ายกระแสทุติยภูมิ 5 A หากได้รับกระแสปฐมภูมิ 300 A หม้อแปลงกระแสจะต้องมีโหลดต่อไว้กับทุติยภูมิเพื่อป้องกันทุติยภูมิเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงในขณะที่ปฐมภูมิมีกระแสไฟฟ้าผ่าน และถ้าหม้อแปลงกระแสไม่ได้ใช้งาน ควรใช้สายไฟลัดวงจรหรือ ต่อวงจรไว้กับขั้วทุติยภูมิด้วย



รูปที่ 2.31 หม้อแปลงกระแส



รูปที่ 2.32 เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า Clamp on Ammeter

สำหรับการต่อหม้อแปลงกระแส (Current Transformer) และหม้อแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Potential Transformer) เพื่อวัดไฟฟ้าในระบบควบคุมที่ตู้จ่ายไฟของโรงงานอุตสาหกรรม สำนักงาน ร้านค้า และอาคารบ้านพักอาศัย แสดงในรูปที่ 18 เป็นตัวอย่างการต่อวงจรของเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (Ammeter), กำลังไฟฟ้า (Wattmeter), พลังงานไฟฟ้า (Watt-hour Meter) และแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Voltmeter) สำหรับโครงการนี้ใช้หม้อแปลงแบบ ออโต้ หรือ วารีแอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 หลักการทำงานของหม้อแปลง

E : แรงเคลื่อนไฟฟ้าจากแหล่งไฟสลับ (โวลต์)	R : โหลดตัวต้านทาน (โอห์ม)
V : แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (โวลต์)	I : กระแสไฟฟ้า (แอมป์)
N : จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)	f : ความถี่ (รอบต่อวินาที)
A : พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (ตารางเมตร)	t : เวลา (วินาที)
“P”: ปฐมภูมิ (Primary)	“S”: ทติยภูมิ (Secondary)

$\frac{\Delta B}{\Delta t}$

$\Delta t$  : อัตราการเปลี่ยนแปลงจากความหนาแน่น

B : ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (เวเบอร์ต่อตารางเมตร)

กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) กล่าวว่า เมื่อขดลวดได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า กระแสสลับ จะทำให้ขดลวดมีการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กตามขนาดของรูปคลื่นไฟฟ้า กระแสสลับ และทำให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ขดลวดนี้

เมื่อขดลวดปฐมภูมิได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ จะทำให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นตามกฎของฟาราเดย์ ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ขึ้นอยู่กับ จำนวนรอบของขดลวด พื้นที่แกนเหล็ก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงจากไฟฟ้า กระแสสลับ โดยเขียนในรูปคณิตศาสตร์ได้ คือ

$$V_p = -N_p A \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad (2.37)$$

ข้อสังเกต เครื่องหมายลบ แสดงให้เห็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีทิศทางตรงข้ามกับเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจะทำให้มีเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวด เส้นแรงแม่เหล็กนี้เปลี่ยนแปลงตามขนาดของรูปคลื่นไฟฟ้าที่ได้รับ เส้นแรงแม่เหล็กเกือบทั้งหมดจะอยู่รอบแกนเหล็ก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กผ่านขดลวด จะทำให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมินี้ และเขียนในรูปคณิตศาสตร์ได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_s = -N_s A \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad (2.38)$$

ความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และจำนวนรอบของขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงตามอุดมคติ (Ideal Transformer: ไม่รวมการสูญเสียของขดลวดและแกนเหล็ก) สามารถหาได้จาก

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} \quad (2.39)$$

ความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความถี่ จำนวนรอบของขดลวด พื้นที่แกนเหล็ก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (ไม่รวมการสูญเสียของเส้นแรงแม่เหล็กและแกนของหม้อแปลง) หาได้จาก

$$V = 4.44fNAB \quad (2.40)$$

### ข้อกำหนดทางไฟฟ้าสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า คือ

1. ไม่เปลี่ยนแปลงความถี่ไปจากเดิม
2. กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิเท่ากับด้านทุติยภูมิ เช่น หม้อแปลงขนาด 100 VA, 20 V / 5 V จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 20 V ส่วนด้านทุติยภูมิจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า 5 V

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในสมการที่ (2.39) เราสามารถคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านรับไฟได้ 5 A และกระแสไฟฟ้าด้านจ่ายไฟได้ 20 A ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{กำลังไฟฟ้า (VA) ด้านปฐมภูมิ} = \text{กำลังไฟฟ้า (VA) ด้านทุติยภูมิ}$$

$$20 \text{ V} \times 5 \text{ A} = 5 \text{ V} \times 20 \text{ A}$$

$$100 \text{ VA} = 100 \text{ VA}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 หลักการและทฤษฎีของการควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุม PID

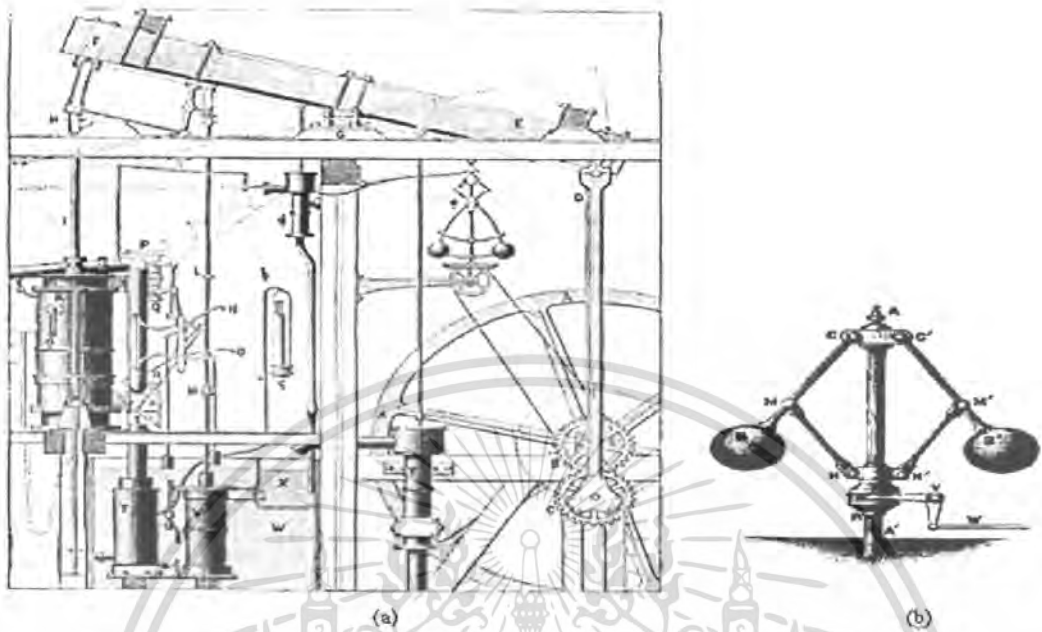
### 2.5.1 ประวัติของระบบควบคุมอัตโนมัติ

การใช้ระบบที่สามารถควบคุมได้โดยอัตโนมัตินั้นมีความพยายามมานานแล้ว การนำระบบดังกล่าวมาใช้งานเป็นครั้งแรกน่าจะเป็นการใช้ลูกลอยเพื่อรักษาระดับน้ำในถังเก็บ ซึ่งสร้างขึ้นที่ประเทศ Greece ในช่วงประมาณ 300-1 ปีก่อนคริสกาล โดยนาฬิกาน้ำของ Ktesibios ได้ใช้ลูกลอยนี้ หรืออีกกรณีหนึ่งก็จะเป็นตะเกียงน้ำมันของ Philon ที่สร้างขึ้นประมาณ 250 ปีก่อนคริสกาล ได้ใช้ลูกลอยเพื่อรักษาระดับของน้ำมันในตะเกียงให้คงที่ Heron of Alexandria ได้ตีพิมพ์หนังสือชื่อ Pneumatic ในช่วงคริสตศวรรษแรก ซึ่งในหนังสือเล่มนี้ได้มีอุปกรณ์มากมายที่ใช้ระบบลูกลอยนี้

สำหรับในยุคต่อมาในสมัยคริสตศวรรษที่ 15-17 ได้มีการประดิษฐ์ระบบควบคุมอัตโนมัติเพื่อใช้ควบคุมอุณหภูมิ ประดิษฐ์โดย Cornelis Drebbel (1572 – 1633) ในประเทศ Holland และ Dennis Papin (1647-1712) ได้ประดิษฐ์อุปกรณ์รักษาระดับความดัน (pressure regulator) ของเครื่องกำเนิดไอน้ำได้เป็นคนแรก

สำหรับในยุคใหม่ การผลิตระบบควบคุมอัตโนมัติเพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรม คนส่วนใหญ่ยกย่องให้เป็น Fly Ball Governor ของ James Watt ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นในปี 1769 เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องจักรไอน้ำ โดยส่วนประกอบเครื่องจักรกลต่างๆ ได้แสดงในรูปที่ 1.5 โดยส่วนที่เป็น fly ball governor จะประกอบด้วยลูกบอล 2 ลูกติดอยู่กับแกนในขณะที่ยังอยู่กับเพลา เมื่อเพลาหมุนแรงหนีศูนย์กลางจะทำให้ลูกบอลลอยขึ้น ระยะที่ลูกบอลลอยจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของเพลา ซึ่งระยะขยี้จะสามารทำให้ James Watt วัดความเร็วรอบของเครื่องจักรได้ เมื่อทราบความเร็วรอบด้วยระยะขยี้ของลูกบอลแล้ว James Watt ก็นำระยะขยี้ไปปรับเส้นทางเดินของไอน้ำเพื่อปรับให้ไอน้ำไหลเข้าเครื่องยนต์ตามต้องการ ดังนั้นความเร็วรอบของเครื่องยนต์ไอน้ำจะคงที่ด้วย แม้ว่าความถูกต้องของเอาท์พุทที่ได้ไม่ได้แม่นยำเหมือนกับการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมในปัจจุบัน แต่ก็ใช่อุปกรณ์ส่วนหนึ่งที่มีส่วนร่วมในการปฏิวัติอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 (a) เครื่องยนต์ไอน้ำของ Watt (b) แสดง fly ball governor

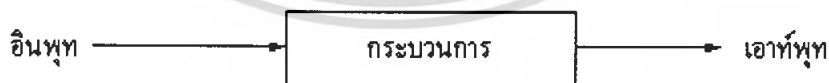
หลังจากนั้นเป็นต้นมาก็ได้มีความพยายามสร้างอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อที่จะสร้างระบบที่ควบคุมได้โดยอัตโนมัติขึ้นมา เพื่อพยายามที่จะเพิ่มความแม่นยำของการตอบสนองของระบบ อย่างไรก็ตามการสร้างอุปกรณ์ต่างๆ ขึ้นมาเพื่อควบคุมระบบนั้น ทำให้เกิดผลตามมา 2 ลักษณะใหญ่คือ หนึ่งเพิ่มความล่าช้าในการตอบสนองของระบบ และสองการควบคุมระบบที่ไม่ถูกต้องได้นำมาซึ่งความไม่เสถียรของระบบซึ่งทั้งสองนี้เป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้เกิดความต้องการที่จะสร้างทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมอัตโนมัติขึ้นมา

J.C. Maxwell ได้สร้างสมการคณิตศาสตร์เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบควบคุมต่างๆ ขึ้น โดย Maxwell ได้ทำแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบด้วย สมการอนุพันธ์ ซึ่งครั้งแรกเขาได้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ fly ball governor การศึกษาของ Maxwell นั้นเขาได้ให้ความสำคัญกับพารามิเตอร์หลายตัวที่จะมีผลกระทบกับการตอบสนองของระบบ ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ทฤษฎีของการควบคุมอัตโนมัติที่พัฒนาในประเทศสหรัฐอเมริกาและยุโรปตะวันตก จะแตกต่างออกไปจากที่ได้รับการพัฒนาในประเทศรัสเซียและประเทศทางยุโรปตะวันออก เนื่องจากการศึกษาด้านระบบควบคุมในสหรัฐอเมริกานั้น ส่วนใหญ่จะเป็นการพัฒนาขึ้นในบริษัทโทรศัพท์และบริษัทด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผู้ที่ทำงานในด้านนี้ก็เช่น Bode, Nyquist และ Block ที่ห้องปฏิบัติการของ Bell Telephone Laboratory ซึ่งการทำงานเหล่านี้มักจะทำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใน โดเมนความถี่ (Frequency Domain) เพื่อใช้อธิบายการทำงานของเครื่องขยายป้อนกลับ (Feedback Amplifiers) ในรูปของ bandwidth และตัวแปรด้านความถี่อื่นๆ ซึ่งทั้งหมดนี้จะแตกต่างจากนักคณิตศาสตร์และวิศวกรของประเทศรัสเซีย ซึ่งจะนิยมใช้โดเมนเวลา (Time Domain) ในการอธิบายสมการอนุพันธ์ของระบบควบคุม

ในระหว่างช่วงสงครามโลกครั้งที่สองนั้น ระบบควบคุมอัตโนมัติได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างมากเพื่อนำมาใช้ในกิจการด้านการทหาร เช่น ระบบควบคุมอากาศยาน ระบบควบคุมการยิง ระบบควบคุมเรดาร์ และอุปกรณ์อื่นๆ ซึ่งความต้องการทางด้านการทหารนี้เองเป็นเหตุให้ได้มีการพัฒนาทั้งอุปกรณ์และทฤษฎีของระบบควบคุมอัตโนมัติอย่างกว้างขวาง ทำให้เกิดทฤษฎีและอุปกรณ์ต่างๆ ขึ้นมาอย่างมากมาย ในช่วงก่อนปี ค.ศ. 1940 นั้นการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ มักจะมีพื้นฐานการค้นคว้าอยู่บนการทำงานแบบ trial-and-error แต่หลังจากช่วงนั้นมา การคิดค้นแบบจำลองคณิตศาสตร์และวิธีการคำนวณแบบต่างๆ ได้เพิ่มจำนวนขึ้น พร้อมกับมีความแม่นยำมากขึ้น ทำให้วิศวกรทางด้านระบบควบคุมต้องมีความเชี่ยวชาญในด้านดังกล่าวโดยเฉพาะ จนถึงที่ว่าพวกเขาเป็นวิศวกรอีกสาขาหนึ่งตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา

ระบบควบคุม คือ ส่วนประกอบหลายๆส่วนต่อเชื่อมกันขึ้นเป็นระบบที่จะให้การตอบสนองตามที่เราร้องการ พื้นฐานของการวิเคราะห์ระบบจะมีพื้นฐานจากทฤษฎีระบบเชิงเส้น ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตหรือการตอบสนอง ดังนั้นส่วนประกอบหรือกระบวนการ (Process) ที่เราร้องการที่จะควบคุม สามารถแทนด้วย บล็อก (block) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ส่วนอินพุตและเอาต์พุตของระบบมักจะแทนด้วยสัญญาณ โดยสัญญาณอินพุตจะเป็นส่วนสำคัญของผลลัพธ์หรือเอาต์พุต



รูปที่ 2.34 การควบคุมระบบ

ระบบควบคุมสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 แบบคือ

1. ระบบควบคุมแบบเปิด (Open Loop Control System)
2. ระบบควบคุมแบบปิด หรือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed Loop or Feedback Control System)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.2 ระบบควบคุมแบบเปิด

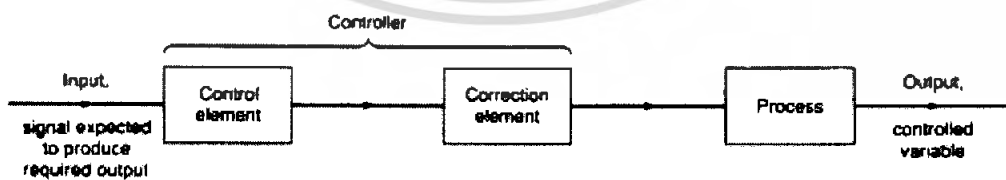
เป็นการใช้อุปกรณ์ (Controller) หรือ อุปกรณ์สั่งกำลัง (Control Actuator) เพื่อให้ได้การตอบสนองตามที่เรต้องการ โดยไม่ต้องนำผลการตอบสนองของระบบเข้ามาสู่การพิจารณา ลักษณะของระบบควบคุมแบบเปิดแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 2.35 ระบบควบคุมแบบเปิด

### ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมแบบเปิด

ในส่วนนี้เราจะมาทำความเข้าใจเกี่ยวกับระบบต่างๆ เหล่านี้ให้มากยิ่งขึ้น เพื่อให้เข้าใจกับส่วนประกอบพื้นฐานของระบบเหล่านี้ ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมแบบเปิด ในระบบควบคุมแบบเปิด เราสามารถพิจารณาได้ว่าระบบประกอบด้วยระบบย่อยที่วางอยู่ ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 1.6 ในความเป็นจริงอุปกรณ์ที่ทำงานเป็นระบบย่อยเหล่านี้ เราอาจจะไม่สามารถแยกออกมาเป็นส่วนๆ ได้ หรือแยกอย่างชัดเจนได้ว่าอุปกรณ์ใดทำหน้าที่อย่างไร โดยเฉพาะ แต่ว่าอุปกรณ์ในความเป็นจริงเหล่านั้น สามารถแยกหน้าที่การทำงานออกเป็นส่วนๆ ได้ตามที่แสดงในรูปที่ 2.38 นี้



รูปที่ 2.38 ระบบควบคุมแบบเปิด

ซึ่งส่วนประกอบย่อยจะประกอบด้วย

- Control element ส่วนนี้จะพิจารณาว่าควรจะให้ระบบทำงานต่อไปอย่างไรเมื่อได้รับคำสั่ง

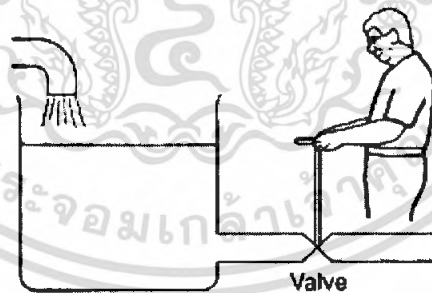
หรืออินพุท ของระบบควบคุม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Correction element ส่วนนี้จะตอบสนองต่ออินพุทที่ได้รับจากส่วนของ control element และนำไปปรับเปลี่ยนตัวแปรที่จะถูกควบคุมเพื่อให้ได้ค่าตามต้องการ
- Process หรืออาจเรียกว่า Plant ระบบจะเป็นส่วนปฏิบัติการเพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุทที่เราต้องการออกมา

ส่วนประกอบสองส่วนแรกคือ Control Element และ Correction Element เมื่อรวมกันแล้ว เราอาจเรียกรวมกันว่า Controller

ตัวอย่างของระบบควบคุมแบบเปิดก็เช่น การที่เราเปิดน้ำเข้าสู่ถังเก็บ โดยที่มีคนควบคุมคอยทำหน้าที่ปิด-เปิดน้ำให้ไหลออกไปจากถัง โดยที่ผู้ควบคุมนี้ไม่สามารถที่จะมองเห็นระดับน้ำในถังได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.39

ในที่นี่ Controlled variable ก็คือปริมาณน้ำที่ไหลออกจากท่อ หรืออัตราการไหลนั่นเอง สำหรับส่วนที่เป็น controlled element ก็คือผู้ที่ทำหน้าที่เปิด-ปิดน้ำ โดยอาศัยประสบการณ์ว่าการเปิดวาล์วน้ำไปประมาณเท่าที่กำหนดก็ควรจะให้มีน้ำไหลออกมาจากถัง และมีระดับน้ำเหลืออยู่ในถังในปริมาณที่เขาต้องการ สำหรับส่วนที่เป็น correction element คือ วาล์วน้ำที่ปรับอัตราการไหลของน้ำ และสุดท้ายคือส่วนที่เป็น process ก็คือถึงน้ำที่บรรจุ น้ำที่มีอยู่ในถังนั่นเอง



รูปที่ 2.39 ตัวอย่างระบบควบคุมแบบเปิด การเปิดน้ำเข้าสู่ถัง

### 2.5.3 ระบบควบคุมแบบปิด หรือ ระบบควบคุมป้อนกลับ

**ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ**จะแตกต่างจากระบบควบคุมแบบเปิดก็คือมีการนำเอาผลที่ได้จากกระบวนการกลับเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่จะส่งเข้าไปเป็นอินพุทที่จะให้กับระบบ การที่เราจะทราบค่าเอาต์พุทได้เราจะต้องมีการวัดข้อมูลของเอาต์พุท เมื่อเราทราบค่าเอาต์พุทแล้วเรามักจะนำค่าเอาต์พุทที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเอาต์พุทที่เราต้องการจากระบบ จากนั้นความแตกต่างระหว่างเอาต์พุทที่ต้องการและเอาต์พุทที่แท้จริงจะได้รับการส่งต่อไปสู่อุปกรณ์ควบคุม แล้วส่งต่อ

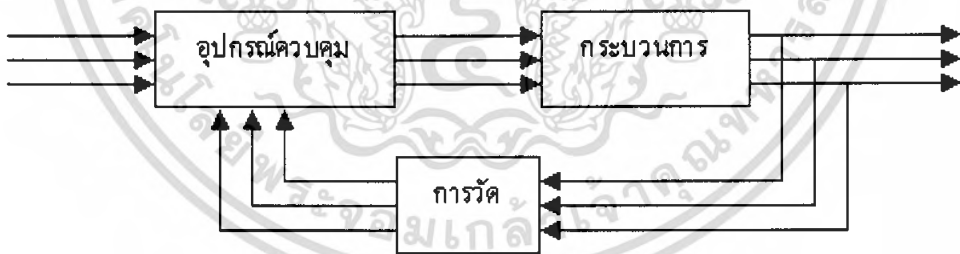
เอกส... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นอินพุตเข้าสู่ระบบเพื่อให้ความแตกต่างของเอาต์พุตที่ต้องการและเอาต์พุตที่แท้จริงลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง ดังนั้นเราจะได้ว่า ค่าเอาต์พุตของระบบเป็นไปตามต้องการ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับแสดงในรูปที่ 1.3 สำหรับหลักการของการป้อนกลับที่ได้อธิบายไปแล้วนี้ถือว่าเป็นพื้นฐานของการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.36 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

สำหรับระบบควบคุมหนึ่งๆนั้น อาจจะมีพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่ต้องการจะควบคุมมากกว่าหนึ่งพารามิเตอร์ ซึ่งระบบควบคุมดังกล่าวเป็นระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น แต่หลักการของระบบควบคุมก็จะเหมือนเดิม คือ ทุกตัวแปรที่เราต้องการควบคุมจะต้องมีการวัดค่าที่ได้จากเอาต์พุต และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่เราต้องการของตัวแปรตัวนั้นๆ สำหรับระบบควบคุมหลายตัวแปร (Multivariable Control System) จะมีลักษณะดังในรูปที่ 1.4



รูปที่ 2.37 ระบบควบคุมหลายตัวแปร

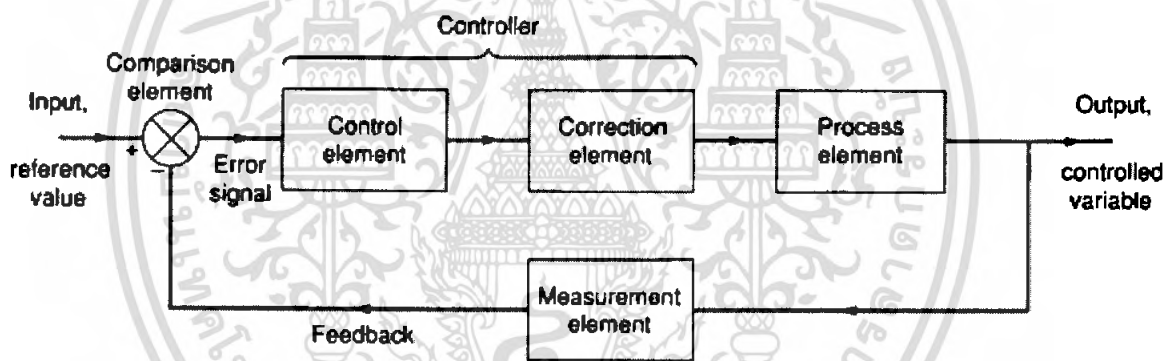
ตัวอย่างของระบบควบคุมแบบเปิดที่เราเห็นกันทั่วไปในชีวิตประจำวันก็เช่น พัดลมไฟฟ้าที่เราใช้กันทั่วไป เราเลือกความแรงของพัดลม แล้วเราจะได้เอาต์พุตออกมาโดยที่ไม่มีการตรวจสอบหรือตรวจวัดค่าใดๆ ในทำนองกลับกันเครื่องปรับอากาศจะมีการตรวจสอบว่าอุณหภูมิของห้องเป็นเท่าใด เพื่อที่จะตรวจสอบว่าระบบปรับอากาศควรจะทำงานหรือไม่ ซึ่งเครื่องปรับอากาศจะเป็นตัวอย่างของระบบควบคุมแบบปิด หรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

## ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมแบบปิด

ในส่วนนี้เราจะมาทำความเข้าใจเกี่ยวกับระบบต่างๆ เหล่านี้ให้มากยิ่งขึ้น เพื่อให้เข้าใจกับส่วนประกอบพื้นฐานของระบบเหล่านี้

### ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ระบบควบคุมแบบปิดสามารถพิจารณาได้ว่า ประกอบด้วยระบบย่อยที่ต่อวางกันตามรูปที่ 1.8 ในความเป็นจริงระบบย่อยเหล่านี้เราอาจไม่สามารถที่จะแยกแต่ละชิ้นส่วนออกมาเป็นส่วนๆ ได้ หรือแยกอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งอย่างซึ่งชัดเจนไปได้ว่าอุปกรณ์นั้นทำหน้าที่อย่างหนึ่งอย่างใดโดยเฉพาะ แต่อุปกรณ์ในความเป็นจริงเหล่านี้ สามารถแยกการทำงานออกเป็นส่วนต่างๆ ได้ตามที่แสดงในรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.40 ระบบควบคุมแบบปิด

โดยส่วนต่างๆ ในระบบควบคุมแบบปิดนี้จะประกอบด้วย

1. Comparison Element ส่วนนี้จะทำหน้าที่เปรียบเทียบค่าตัวแปรที่เราต้องการออกมา หรืออาจเรียกว่าค่ามาตรฐานของตัวแปรที่เราต้องการเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่เราวัดค่าตัวแปรนั้นได้ในสภาพความเป็นจริง ซึ่งเป็นค่าที่เป็นเอาต์พุตของระบบ ส่วนนี้จะให้สัญญาณหรือค่าความผิดพลาดออกมา ซึ่งความผิดพลาดนี้จะบอกให้ทราบว่าขณะนี้ค่าตัวแปรที่ต้องการควบคุมนั้นมีค่าอยู่แตกต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าที่เราต้องการให้มันเป็นเท่าใด นั่นคือ

ความผิดพลาด = ค่าสัญญาณอ้างอิง - ค่าสัญญาณที่วัดได้

2. Control Element เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ตัดสินใจว่าจะต้องทำอะไร เมื่อได้รับสัญญาณความผิดพลาด เรามักจะใช้คำว่า controller เมื่อเราเรียกส่วนนี้รวมถึง correction element

3. Correction Element ส่วนนี้มีหน้าที่กำหนดการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร เพื่อที่จะลดค่าความผิดพลาดให้น้อยลง เรามักเรียกอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในส่วนนี้ว่า Actuator

4. Process Element กระบวนการ หรือ plant จะเป็นระบบซึ่งเราต้องการควบคุมค่าตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัว

5. Measure Element ส่วนนี้จะเป็นส่วนของเครื่องมือวัด ซึ่งเครื่องมือวัดนี้จะให้สัญญาณที่แสดงถึงขนาดของตัวแปรที่เราต้องการที่จะควบคุม และเมื่อได้ค่าที่วัดแล้วก็จะมีการป้อนสัญญาณนั้นกลับเข้าสู่ส่วนเปรียบเทียบ (Comparison element) เพื่อให้ระบบพิจารณาว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นหรือไม่การทำงานของ ระบบป้อนกลับนี้จะทำไปเรื่อยๆ จนกว่าค่ามาตรฐาน และค่าที่วัดได้มีค่าเท่ากัน นั่นคือระบบควบคุมของเราสามารถควบคุมให้ค่าตัวแปรที่เราต้องการมีค่าตามที่เรากำหนดได้เรียบร้อยแล้วนั่นเอง

ส่วนสำคัญและจำเป็นของระบบควบคุมแบบปิดก็คือส่วนป้อนกลับ ซึ่งหมายถึงสัญญาณที่ได้มาจากค่าตัวแปรที่ต้องการจริงๆ เปลี่ยนเป็นสัญญาณแล้วป้อนกลับ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าของตัวแปรที่ต้องการ การป้อนกลับนี้จะถือว่าเป็นการป้อนกลับแบบลบ (Negative Feedback) เมื่อสัญญาณป้อนกลับนี้นำไปลบออกจากค่าที่ต้องการหรือค่ามาตรฐาน นั่นคือ

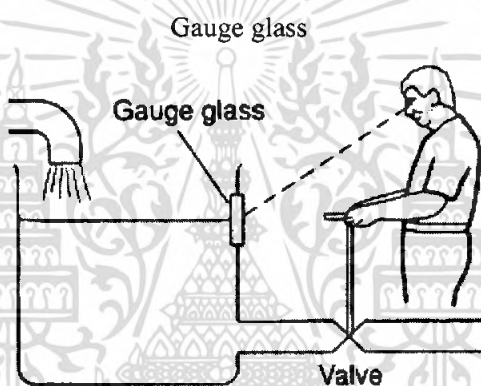
$$\text{ความผิดพลาด} = \text{ค่าสัญญาณอ้างอิง} - \text{ค่าสัญญาณป้อนกลับ} \quad (2.41)$$

การป้อนกลับแบบลบนี้ มีความจำเป็นในการที่เราต้องการให้ค่าตัวแปรที่เราต้องการควบคุมมีค่าตรงกับความต้องการของเราคือค่าของสัญญาณมาตรฐาน ส่วนการป้อนกลับแบบบวก(Positive Feedback) นั้น จะเกิดขึ้นเมื่อสัญญาณป้อนกลับจะนำมาบวกกับค่ามาตรฐาน นั่นคือ

$$\text{ความผิดพลาด} = \text{ค่าสัญญาณอ้างอิง} + \text{ค่าสัญญาณป้อนกลับ} \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.40 นั้นเราจะเห็นว่าสัญญาณป้อนกลับจะนำเข้มาพร้อมกับสัญญาณมาตรฐานที่ comparison element โดย comparison element นี้นิยมจะเขียนเป็นวงกลม ซึ่งมีกากบาทอยู่ตรงกลาง ซึ่งเป็นสัญลักษณ์มาตรฐานของการบวกสัญญาณ สำหรับในส่วนของ comparison element ของระบบป้อนกลับแบบลบ เราจะเห็นว่าค่าสัญญาณมาตรฐานจะถูกกำหนดด้วยเครื่องหมายบวก และค่าสัญญาณป้อนกลับจะกำหนดด้วยเครื่องหมายลบ ดังนั้นสัญญาณที่ออกมาจะเป็นความแตกต่างระหว่างสัญญาณทั้งสอง ถ้าหากว่าการป้อนกลับเป็นการป้อนกลับแบบบวก เครื่องหมายกำหนดสัญญาณที่ comparison element ก็จะมีเครื่องหมายเป็นบวกด้วย เพื่อแสดงถึงส่วนประกอบต่างๆ ของระบบควบคุมแบบปิด เราลองพิจารณาระบบควบคุมการใส่น้ำเข้าถังอีกครั้งหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 1.9 โดยในครั้งนี้ผู้ควบคุมการเปิดปิดน้ำสามารถมองเห็นระดับน้ำในถังได้โดยการมองผ่าน



รูปที่ 2.41 ระบบควบคุมการเปิดน้ำเข้าสู่ถังแบบปิด

#### 2.5.4 การควบคุมอัตโนมัติ

คอนโทรลเลอร์ (Controller) เป็นส่วนประกอบหนึ่งในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งจะมีสัญญาณความผิดพลาดเป็นอินพุตและมีเอาต์พุตเป็นอินพุตของ corrective element บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการเลือกใช้คอนโทรลเลอร์ที่เหมาะสมกับระบบควบคุมแบบป้อนกลับและวิธีการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับคอนโทรลเลอร์ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์ เรานิยมเรียก กฎการควบคุม (control Law) โดยจะมี 4 รูปแบบ คือ

1. ระบบควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)

2. ระบบควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control)

3. การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ (Proportional plus integral Control)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

#### 5. ควบคุมแบบ Proportional + Integral + Derivative (PID)

ในระบบบางประเภท เรามีความจำเป็นที่ต้องปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุม ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ส่วนประกอบอื่นเพิ่มเติมเข้ากับระบบควบคุม การที่เราปรับเปลี่ยนสมรรถนะของระบบควบคุมป้อนกลับแบบนี้เราเรียกว่า การชดเชย (Compensation)

### 1. ระบบควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)

ในระบบควบคุมแบบสัดส่วน เราจะได้ว่า เอาท์พุทของคอนโทรลเลอร์จะเป็นสัดส่วนกับ อินพุทของคอนโทรลเลอร์ และถ้าเรากำหนดสัญญาณอินพุทที่ให้กับคอนโทรลเลอร์เป็น ค่าความผิดพลาด( $e$ ) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา เราจะได้

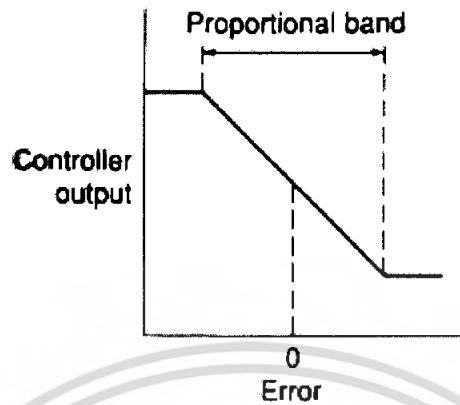
$$\text{output} = K_p e \quad (2.43)$$

เมื่อ  $K_p$  เป็นค่าคงที่เรียก Proportional gain เราจะพบว่าเอาท์พุทที่ออกจากคอนโทรลเลอร์แบบ Proportional control จะขึ้นกับขนาดของความผิดพลาดในขณะที่เรากำลังพิจารณา ทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์  $G_c(s)$  จะมีค่าเป็น

$$G_c(s) = K_p \quad (2.44)$$

ดังนั้นการควบคุมด้วยคอนโทรลเลอร์แบบนี้ก็จะเป็นการขยายสัญญาณความผิดพลาดเท่านั้น การที่เราได้สัญญาณความผิดพลาดขนาดใหญ่ที่เวลาหนึ่ง จะทำให้เกิดเอาท์พุทที่มีขนาดใหญ่จากคอนโทรลเลอร์ในเวลานั้น อย่างไรก็ตามการที่เรากำหนดให้ Gain คงที่นั้นในทางปฏิบัติเราอาจกำหนดไว้ในบางช่วงของสัญญาณความผิดพลาดเท่านั้น เราอาจกำหนดให้คอนโทรลเลอร์ของเรามีค่าเอาท์พุทไม่น้อยกว่าค่าค่าหนึ่งและไม่มากเกินไปกว่าค่าค่าหนึ่งก็ได้ ซึ่งการกำหนดช่วงจำกัดของเอาท์พุทจะมีลักษณะดังรูปที่ (2.13) และการกำหนดเอาท์พุทแบบ proportional control ช่วงที่มีการกำหนดสัดส่วนนี้ เราจะเรียกว่า proportional band.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

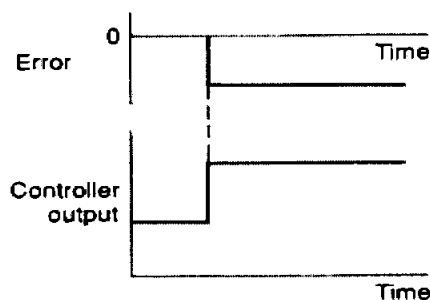


รูปที่ 2.42 การกำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุต

การกำหนด Proportional band นี้ จะช่วยให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าจำกัดไม่ไปสู่ค่าอนันต์ ทั้งทางด้านบวกและทางด้านลบ และเมื่อคอนโทรลเลอร์มีเอาต์พุตสูงที่สุดที่เป็นไปได้ค่าหนึ่งแล้ว เราก็นิยมที่จะกำหนดเอาต์พุตค่าใดๆ เป็นร้อยละของค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์ 100% ก็หมายถึงว่าเอาต์พุตจะเปลี่ยนจากค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ ไปเป็นค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ซึ่งจะทำให้เราได้ว่า

$$K_p = \frac{100}{\text{proportional band}} \quad (2.45)$$

เนื่องจากเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์จะเป็นสัดส่วนกับอินพุต ดังนั้น ถ้าหากอินพุตมีลักษณะเป็น step เอาต์พุตที่ได้ก็จะมีลักษณะเป็น step เช่นกัน โดยลักษณะของกราฟแสดงอินพุตและเอาต์พุตจะมีสัดส่วนที่แน่นอนค่าหนึ่ง ตามรูปที่ (2.43) โดยรูปนี้แสดงถึงการตอบสนองของคอนโทรลเลอร์ เมื่ออินพุตอยู่ในช่วง proportional band



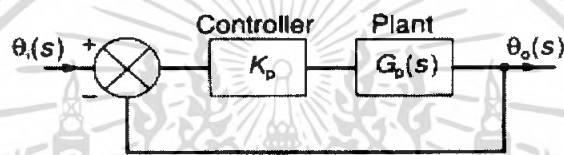
รูปที่ 2.43 การตอบสนองของคอนโทรลเลอร์แบบ proportional control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติ Proportional control นี้ จะมีลักษณะเหมือนกับเครื่องขยายสัญญาณรูปแบบหนึ่ง ซึ่ง อาจจะเป็นในลักษณะของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรืออาจจะเป็นเครื่องขยายสัญญาณเชิงกล เช่น คาน ก็ได้ ลักษณะของระบบที่ควบคุมแบบ proportional control จะมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 2.44 และจะทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็น

$$G_o(s) = K_p G_p(s) \quad (2.46)$$

เมื่อ  $G_p(s)$  เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ



รูปที่ 2.44 ระบบควบคุมแบบ proportional control

ข้อเสียประการสำคัญของระบบควบคุมที่คอนโทรลเลอร์คือ ไม่ได้มีการเพิ่มเทอม  $\frac{1}{s}$  (หรือการเพิ่มปริพันธ์) ในส่วน forward path ซึ่งหมายความว่า ถ้าระบบเป็นระบบ type 0 คอนโทรลเลอร์จะไม่ได้เปลี่ยนแปลง type ของระบบ ทำให้ระบบเป็น type 0 เหมือนเดิม และทำให้เกิดความผิดพลาดที่สภาพคงตัว เนื่องจากคอนโทรลเลอร์ไม่ได้ทำการเพิ่ม โพลหรือศูนย์ใหม่ให้กับระบบเพียงแต่เปลี่ยนตำแหน่งของโพลหรือศูนย์เท่านั้น เนื่องจากระบบควบคุมแบบป้อนกลับหนึ่งหน่วยจะมี ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเป็น

$$G(s) = \frac{K_p G_p(s)}{1 + K_p G_p(s)}$$

และสมการคุณลักษณะจะเป็น  $(1 + K_p G_p(s))$  และมีรากเปลี่ยนไปตามค่าของ  $K_p$

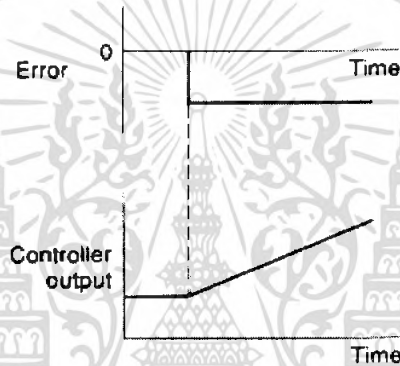
## 2. ระบบควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control)

ในระบบควบคุมแบบปริพันธ์เอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์จะเป็นสัดส่วนกับปริพันธ์ของสัญญาณผิดพลาดเทียบกับเวลา หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Output = K_i \int_0^t e dt \quad (2.47)$$

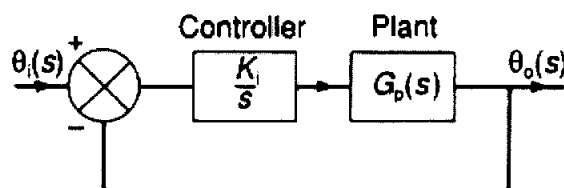
เมื่อ  $K_i$  เป็นค่าคงที่ที่เรียกว่า Integral gain ซึ่งจะมีหน่วยเป็น 1/sec รูปที่ 6.4 แสดงลักษณะการตอบสนองของ integral control เมื่อได้รับสัญญาณความผิดพลาดแบบ step ค่าปริพันธ์ระหว่างเวลา  $t$  และ 0 จะหมายถึงพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณความผิดพลาดจากเวลา 0 ถึง  $t$  ดังนั้นเนื่องจากเริ่มการมีสัญญาณความผิดพลาดแบบ step เอาท์พุทที่ออกจากคอนโทรลเลอร์จะมีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ ด้วยอัตราที่คงที่ ทำให้เอาท์พุทที่เวลาใดๆจะเป็นสัดส่วนกับความผิดพลาดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.45 ลักษณะการตอบสนองของคอนโทรลเลอร์แบบ integral control เปลี่ยนรูปปลาของสมการ 6.5 จะทำให้เราได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์เป็น

$$G_c(s) = \frac{output(s)}{e(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.48)$$

ดังนั้นสำหรับระบบที่แสดงในรูปที่ 45 การควบคุมแบบ integral control จะให้ forward-path transfer function เป็น  $\frac{K_i}{s} G_p(s)$  และทำให้มี ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็น



รูปที่ 2.46 ระบบควบคุมแบบ integral control

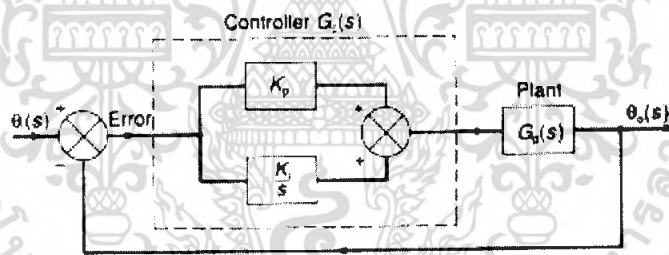
เอกสารเราสามารถพิจารณาถึงข้อได้เปรียบของการควบคุมแบบ integral control ได้จากสมการ 2.18 ซึ่งเรารู้ว่าครณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าระบบควบคุมแบบ integral control จะเพิ่มจำนวนโพลให้กับระบบควบคุมและเพิ่ม type ของระบบ จาก type 0 เป็น type 1 ซึ่งทำให้ระบบมีความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวเป็นศูนย์เทียบต่อ step input อย่างไรก็ตามการเพิ่มโพลที่  $s = 0$  และไม่มีการเพิ่มศูนย์ให้กับระบบควบคุม จะทำให้ความแตกต่างระหว่างจำนวนโพล ( $n$ ) และจำนวนศูนย์ ( $m$ ) เพิ่มขึ้นอีก 1 ซึ่งจะมีผลให้ asymptote angles ของทางเดินรากลดลง และจุดตัดจะเคลื่อนไปทางครึ่งขวาของ s-plane มากขึ้น มีผลทำให้ความเสถียรสัมพัทธ์ของระบบลดลง

(2.49)

### 3. การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ (Proportional plus Integral Control)

การที่ระบบควบคุมมีความเสถียรสัมพัทธ์ลดลง เมื่อเราใช้การควบคุมแบบปริพันธ์สามารถที่จะแก้ไขได้ในระดับหนึ่งโดยการใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์ (Proportional plus Integral, PI) ซึ่งลักษณะของระบบควบคุมจะเป็นตามรูป

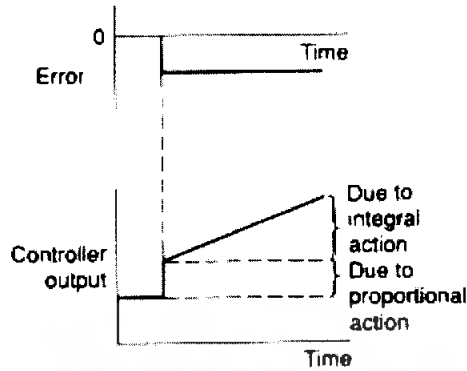


รูปที่ 2.47 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วย Proportional plus Integral

สำหรับระบบดังกล่าวจะมีเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์เป็น

$$\text{output} = K_p e + K_i \int_0^t e dt \quad (2.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.48 การตอบสนองของ PI controller

รูปที่ 2.48 แสดงเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับเมื่อมีอินพุตเป็นสัญญาณความผิดพลาดแบบ step ถ้าเราเปลี่ยนรูปถ่ายของสมการ 2.19 เราจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์แบบ PI เป็น

$$\begin{aligned}
 G_c(s) &= K_p + \frac{K_i}{s} \\
 &= \frac{s K_p + K_i}{s} \\
 &= K_p \frac{(s + K_i / K_p)}{s}
 \end{aligned} \tag{2.51}$$

เราให้ Integral time constant  $\tau_i$  เป็น

$$\tau_i = \frac{K_p}{K_i} \tag{2.52}$$

ดังนั้นเราจะได้

$$G_c(s) = \frac{K_p \left[ s + \left( \frac{1}{\tau_i} \right) \right]}{s} \tag{2.53}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจะทำให้เราได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็น

$$G_o(s) = G_c(s) G_p(s) \\ = \frac{K_p \left[ s + \left( \frac{1}{\tau_i} \right) G_p(s) \right]}{s} \quad (2.54)$$

เราจะเห็นว่าเรามีศูนย์ที่  $s = -\frac{1}{\tau_i}$  และโพลที่  $s=0$  เพิ่มให้กับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเมื่อเราใช้การควบคุมแบบ PI การที่เราเพิ่มตัวประกอบ  $s$  เข้ากับเทอมส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนก็เสมือนกับเราเพิ่มแบบของระบบขึ้นไป 1 จึงทำให้ระบบนี้จะไม่มีความผิดพลาดที่สภาพคงตัวสำหรับอินพุตแบบขั้นบันได นอกจากนั้นการที่เราเพิ่มศูนย์ให้กับระบบไปพร้อม ๆ กัน ก็จะทำให้ความแตกต่างระหว่างจำนวนโพล  $n$  และจำนวนศูนย์  $m$  มีค่าคงที่ ดังนั้นมุมของ asymptote สำหรับทางเดินของรากมีค่าคงเดิม เพราะจากอย่างไรก็ตามจุดตัดของเส้น asymptotes บนแกนจริง จะเคลื่อนที่เข้าหาจุดกำเนิดมากขึ้น ยังผลให้ความเสถียรของระบบลดลงบ้าง

$$\text{Intersection point} = (\text{ผลรวมของโพล} - \text{ผลรวมของศูนย์}) / (n - m)$$

การเพิ่มโพลที่  $s=0$  และศูนย์ที่  $s = -\frac{1}{\tau_i}$  จะทำให้จุดตัดเปลี่ยนไปเท่ากับ  $\pm \frac{(1/\tau_i)}{(n-m)}$  ซึ่งจะทำให้มีค่าเป็นบวกมากขึ้น และจุดตัดจะเคลื่อนที่มาทางขวามือเข้าใกล้จุดกำเนิดมากขึ้น อย่างไรก็ตามการลดลงของความเสถียรสัมพัทธ์นี้จะน้อยกว่าการที่เราใช้การควบคุมแบบปริพันธ์เพียงอย่างเดียว ค่าของ  $K_p$  และ  $K_i$  จะเป็นค่าที่ใช้กำหนดตำแหน่งของศูนย์และโพลของระบบ โดยตำแหน่งของศูนย์จะกำหนดด้วยค่า  $K_p$  ในขณะที่  $K_i$  จะเป็นค่าที่ใช้กำหนดโพลระบบปิด

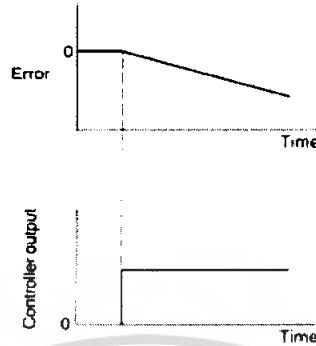
#### 4. การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

การควบคุมอีกแบบหนึ่งก็คือการควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Controller) การควบคุมแบบนี้เอาที่พหุจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาดเทียบกับเวลา นั่นคือ

$$\dot{\text{output}} = K_d \frac{de}{dt} \quad (2.55)$$

เมื่อ  $K_d$  คือ Derivative gain และมีหน่วยเป็นวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



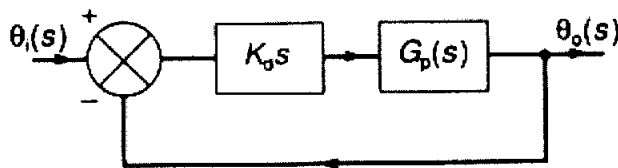
รูปที่ 2.49 การตอบสนองของ Derivative Control

รูปที่ 2.49 แสดงสิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณความผิดพลาดเป็นสัญญาณแบบ ramp เมื่อเริ่มได้รับสัญญาณความผิดพลาดและไม่ใช่ค่าของความผิดพลาดซึ่งทำให้เราได้สัญญาณส่งออกจากคอนโทรลเลอร์มีค่ามากก่อนที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้นมากจริง ๆ อย่างไรก็ตามหากความผิดพลาดมีค่าคงที่ก็ จะไม่มีการสะสมค่าความผิดพลาดแม้ว่าค่าความผิดพลาดจะมีมากก็ตาม ทำให้การควบคุมแบบ อนุพันธ์นี้ไม่อ่อนไหวต่อค่าความผิดพลาดที่คงที่หรือเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ซึ่งผลที่ตามมาการ ควบคุมแบบนี้จะไม่ใช้เพียงตัวเดียว แต่มักจะใช้ควบคู่รวมกับการควบคุมแบบอื่น เปลี่ยนรูปลาปลาซสมการ 6.11 เพื่อที่จะหาฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะเป็น

$$G_c(s) = K_d s \tag{2.56}$$

ดังนั้นสำหรับระบบควบคุม ดังที่แสดงในรูปที่ 2.50 การที่มีการควบคุมแบบอนุพันธ์จะทำให้เราได้ ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$G_o(s) = \frac{K_d s G_p(s)}{1 + k_d s G_p(s)} \tag{2.57}$$

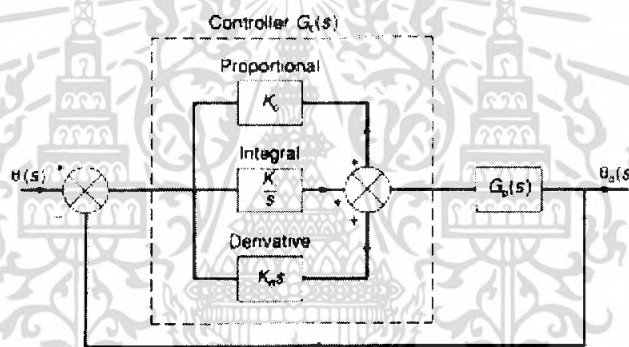


รูปที่ 2.50 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วย Derivative Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากว่าระบบเป็นแบบ Type 1 หรือสูงกว่า การควบคุมแบบอนุพันธ์จะลด S ในเทอมส่วนลงและลด type ของระบบลง 1 อย่างไรก็ตามเราได้กล่าวก่อนหน้านี้แล้วว่า การควบคุมแบบอนุพันธ์นี้มักจะไม่ใช่เพียงลำพังแต่เราจะใช้ร่วมกับการควบคุมแบบอื่น เพราะเมื่อเราใช้การควบคุมแบบอนุพันธ์จะทำให้เราเพิ่มความเร็วในการตอบสนองของระบบต่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในทางปฏิบัติการนำการควบคุมแบบอนุพันธ์ไปใช้นั้นค่อนข้างจะลำบาก ดังนั้นในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะเป็นการประมาณการควบคุมแบบอนุพันธ์ โดยใช้ lead compensator ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

### 5. การควบคุมแบบ Proportional + Integral + Derivative (PID)



รูปที่ 2.51 Block diagram ที่ประกอบด้วย PID control

การควบคุมโดยใช้แบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์และรวมกับแบบอนุพันธ์ (PID control) หรือที่เรียก การควบคุมแบบ 3 เทอม (three-term control) ระบบจะมีลักษณะตามรูปที่ 2.51 จะทำให้เอาท์พุทของคอนโทรลเลอร์เมื่อรับอินพุทเป็นความผิดพลาด  $e$  ดังนี้

$$\text{output} = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (2.58)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์ จะเป็น

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.59) ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเราสามารถจัดรูปได้เป็น

$$G_c(s) = K_p \left[ 1 + \frac{K_i}{K_p s} + \frac{K_d s}{K_p} \right]$$

หรือ

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (2.60)$$

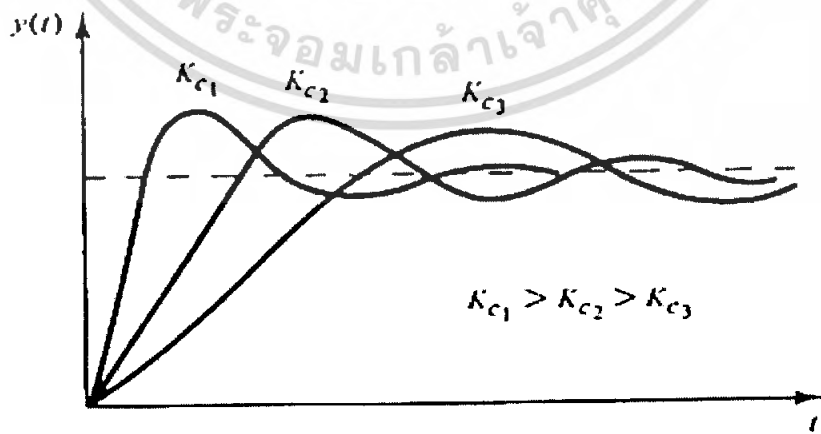
ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดของระบบที่แสดงในรูปที่ 6.12 จะเป็น

$$G_o(s) = G_c(s) G_p(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) G_p(s)$$

$$G_o(s) = \frac{K_p (\tau_i s + 1 + \tau_i \tau_d s^2) G_p(s)}{\tau_i s} \quad (2.61)$$

ดังนั้นการควบคุมแบบ PID controller จะเพิ่มจำนวนศูนย์ให้กับระบบเท่ากับ 2 และเพิ่มจำนวนโพล 1 โพล และทำให้ชนิด type ระบบเพิ่มขึ้น 1

ลักษณะการตอบสนองของระบบที่มีการควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative จะเห็นได้มีประสิทธิภาพดีกว่า 2 แบบแรก ดังผลการทดลองแสดงในกราฟ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของ set point เป็นแบบ unit step function



รูปที่ 2.52 การตอบสนองของระบบควบคุมแบบ PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 สถาปัตยกรรมของ dsPIC30f2010

### 2.6.1 หน่วยประมวลผลกลาง

หน่วยประมวลผลของ dsPIC30f2010 ใช้คำสั่งที่มีความยาว 1 เวิร์ด ขนาด 24 บิต โดยมีโปรแกรมเคาน์เตอร์ขนาด 23 บิต เพื่อแจ้งแอดเดรสของหน่วยความจำโปรแกรมที่เข้าไปประมวลผล dsPIC30f2010 มีความจุของหน่วยความจำโปรแกรม 12 กิโลไบต์ เมื่อคำสั่งมีความยาว 24 บิต จึงบรรจุหน่วยความจำได้จริง 4 กิโลเวิร์ด สามารถติดต่อกับหน่วยความจำได้สูงสุด 4 เมกะเวิร์ด

รีจิสเตอร์หลักที่ใช้ในการทำงานคือ รีจิสเตอร์ W (Working register) สำหรับใน dsPIC จะแตกต่างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC อย่างมาก โดยรีจิสเตอร์ W ได้รับการจัดโครงสร้างเป็นแบบอาร์เรย์ขนาด 16 บิต จึงทำให้สามารถรองรับทั้งข้อมูล ค่าแอดเดรส หรือค่าของรีจิสเตอร์ใดๆ ที่ต้องนำมาประมวลผลโดยใน dsPIC มีรีจิสเตอร์ W ให้ใช้งานถึง 16 ตัว ส่วนใหญ่ใช้ในการประมวลผลหลัก ส่วนอีกตัวหนึ่งคือรีจิสเตอร์ W 15 จะใช้ทำงานกับตัวชี้สแต็กในการทำงานของโปรแกรมย่อยและบริการอินเตอร์รัปต์

ด้านการตอบสนองอินเตอร์รัปต์นั้น dsPIC30f2010 มีการจัดสรรพื้นที่ที่เก็บค่าอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์ไว้มากถึง 54 ตำแหน่ง และยังสามารถกำหนดระดับความสำคัญได้อีก 8 ระดับด้วย

### 2.6.2 หน่วยความจำ

dsPIC30f2010 มีหน่วยความจำโปรแกรม 4 กิโลเวิร์ด แอดเดรสอยู่ในช่วง 0x000100 ถึง 0x001FFF สามารถโปรแกรมหรือเขียนข้อมูลลงไปได้ 2 วิธีคือ

1. โดยการใช้การโปรแกรมในวงจรแบบอนุกรมหรือ ICSP ผ่านทางขา PGD และ PGC (ขาที่ 17 และ 18) แล้วป้อนสัญญาณพัลส์แรงดันสูงสำหรับโปรแกรมผ่านทาง MCLR
2. โปรแกรมตัวเองในขณะที่ทำงานหรือ RTSP (Run time Self-Programming)

ส่วนหน่วยความจำข้อมูลแรมนั้น dsPIC30f2010 ได้จัดสรรเป็น 2 ส่วนคือ หน่วยความจำข้อมูลแรม X และ Y แต่ละส่วนมีขนาด 16 บิต ความจุ 256 ไบต์โดยในแต่ละส่วนจะมีตัวกำหนดแอดเดรสแยกออกจากกันเรียกว่า AGU (Address Generation Unit)

ในขณะที่หน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอม dsPIC30f2010 จัดสรรไว้ที่แอดเดรส 0x7FFC00 ถึง 0x7FFFFE มีความจุ 1 กิโลไบต์

ส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP Engine)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dsPIC ได้รับการออกแบบมาให้สามารถทำงานในด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นหลัก ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มความสามารถในหน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิกอย่างมาก โดยใน ส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมีหน่วยจัดการคุณเลขขนาด  $17 \times 17$  บิตความเร็วสูง หน่วยประมวลผลทางคณิตศาสตร์และลอจิกหรือ ALU ขนาด 40 บิต แยกคิวมูลเตอร์ขนาด 40 บิต อีก 2 ตัว และตัวเลื่อนข้อมูล 2 ทิศทางแบบบาเรล (barrel shifter) ขนาด 40 บิต จึงทำให้สามารถจัดการข้อมูลขนาด 16 บิต ได้เสร็จสิ้นภายในสัญญาณนาฬิกาเพียงไซเคิลเดียว

### 2.6.3 โมดูลฟังก์ชันพิเศษ

dsPIC30f2010 ได้รวมเอาโมดูลสำหรับทำงานเฉพาะทางไว้อย่างมากมาย ไม่ว่าจะเป็น โมดูลสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล ความละเอียด 10 บิต โมดูลเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมหรือ SPI โมดูลสื่อสารพอร์ตอนุกรมหรือ UART โมดูลสื่อสารข้อมูลบนระบบบัส I<sup>2</sup>C ไทเมอร์ ขนาด 16 บิตถึง 3 ตัวและที่เป็นพิเศษอีก 2 โมดูลคือ โมดูลสร้างสัญญาณ PWM เพื่อการควบคุมมอเตอร์และ โมดูลเข้ารหัสแบบควอดร่าเจอร์ โดยสามารถใช้งานร่วมกันเพื่อควบคุมมอเตอร์แบบปิดประสิทธิภาพสูง

### 2.6.4 พอร์ตอินพุตเอาต์พุต

dsPIC30f2010 มีพอร์ตใช้งานรวม 20 ขา ดังนี้

พอร์ต B มีขาชื่อ RB0 – RB5 โดยทุกพอร์ตสามารถกำหนดให้เป็นพอร์ตอินพุตหรือเอาต์พุตได้ และยังสามารถขับกระแสทั้งแบบซิงก์และซอร์สได้สองชุดถึง 25 mA

พอร์ต C มี 3 ขาชื่อ RC13-RC15

พอร์ต D มี 2 ขาชื่อ RD0 และ RD1

พอร์ต E มี 7 ขาชื่อ RE0-RE5 และ RE8

พอร์ต F มี 2 ขาชื่อ RF2 และ RF3

### 2.6.5 โครงสร้างทางโปรแกรม

(ก) แอ็กคิวมูลเตอร์ 40 บิต จำนวน 2 ตัว ใช้ในงานประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นหลัก

(ข) รีจิสเตอร์ W ขนาด 16 บิตมากถึง 16 ตัว โดยตัวที่ใช้งานเป็นหลักคือ W0 ส่วนตัวที่ถูกนำไปใช้ในส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมี 10 ตัวคือ W4 – W13 ส่วน W14 ถูกนำไปใช้ร่วมเป็นตัวชี้เฟรม และ W15 ถูกนำไปใช้ร่วมเป็นตัวชี้สเต็ก

(ค) โปรแกรมเคาเตอร์ ขนาด 24 บิต นำมาใช้ในการแจ้งแอดเดรส 23 บิต โดยไม่สนใจบิต

MSB และบิต LSB ต้องเป็น 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ง) รีจิสเตอร์หลัก อันประกอบด้วย

STATUS ซึ่งใช้แสดงสถานะการทำงาน มีขนาด 16 บิต

CORCON ใช้ควบคุมการทำงานของหน่วยประมวลผลกลางมีขนาด 16 บิต

TBLPAG เป็นรีจิสเตอร์กำหนดเพจของตารางข้อมูลในหน่วยความจำโปรแกรมมีขนาด 8 บิต

PSVPAG เป็นรีจิสเตอร์แสดงเพจแอดเดรสของพื้นที่โปรแกรม มีขนาด 8 บิต

RCOUNT รีจิสเตอร์เก็บค่าตัวนับจำนวนรอบของลูปที่ทำซ้ำ

DCOUNT เป็นรีจิสเตอร์เก็บค่าตัวนับจำนวนรอบของลูปที่ทำงาน

DOSTART เป็นรีจิสเตอร์กำหนดค่าแอดเดรสเริ่มต้นทำงานของโปรแกรมลูป

DOEND เป็นรีจิสเตอร์กำหนดแอดเดรสปลายทางที่ต้องการทำโปรแกรมลูป

สำหรับรีจิสเตอร์ DCOUNT, DOSTART และ DOEND เป็นรีจิสเตอร์เงา (shadow register) หมายความว่า เป็นรีจิสเตอร์ที่ถูกสร้างขึ้นชั่วคราวเพื่อเก็บค่าก่อนที่จะมีการถ่ายถอดออกไปทำงาน จึงไม่สามารถเข้าถึงรีจิสเตอร์เหล่านี้ได้โดยตรง

### 2.6.6 สแต็กพอยเตอร์และเฟรมพอยเตอร์ทางซอฟต์แวร์

ใน dsPIC ได้บรรจุสแต็กทางซอฟต์แวร์ขึ้นมา โดยใช้รีจิสเตอร์ W15 เป็นตัวชี้ตำแหน่งของสแต็กหรือสแต็กพอยน์เตอร์ (Software stack pointer) ซึ่งค่าของ W15 จะเปลี่ยนแปลงอัตโนมัติตามการกระโดดไปทำงานหรือออกจากโปรแกรมย่อย อย่างไรก็ตามก็ยังสามารถใช้งาน W15 เหมือนกับรีจิสเตอร์ W ตัวหนึ่งได้อีกด้วย แต่ถ้าไม่จำเป็นจริงๆ ไม่ควรใช้งาน

W15 จะมีค่าเท่ากับ 0x0800 หลังจากการรีเซต ผู้พัฒนาสามารถกำหนดค่าใหม่ได้ตามต้องการภายในขอบเขตของหน่วยความจำ

นอกจากนั้นใน dsPIC ยังมีตัวชี้กรอบหรือขอบเขตของสแต็กหรือเรียกว่าเฟรมพอยเตอร์ (software frame pointer) ด้วยโดยใช้รีจิสเตอร์ W14 ทำหน้าที่นี้โดยการกำหนดค่าของ W14 สามารถกระทำผ่านคำสั่ง LNK และ ULNK (คำสั่งภาษาแอสเซมบลี) เช่นเดียวกันก็ยังสามารถใช้งาน W14 เหมือนกับรีจิสเตอร์ W ตัวหนึ่งได้ ถ้าไม่จำเป็นจริงๆ ไม่ควรใช้งาน

รายละเอียดทั้งหมดของ dsPIC30f2010 สามารถดูได้จาก Datasheet

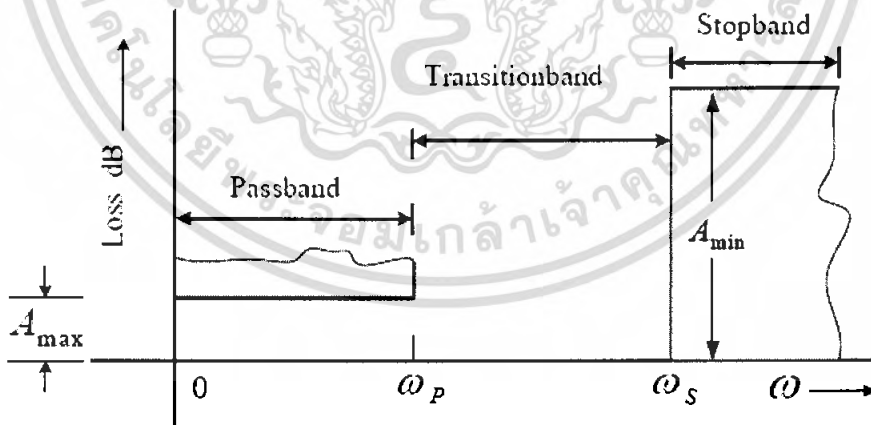
## 2.7 การตอบสนองทางความถี่

ลักษณะการตอบสนองทางความถี่ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดคือ กรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่าน การกรองแบบแถบความถี่ผ่าน และการกรองแบบตัดแถบความถี่ ซึ่งจะกล่าวดังต่อไปนี้

### 2.7.1 การกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

ลักษณะโดยทั่วไปของการกรองความถี่ต่ำผ่าน คือ ให้ความถี่ต่ำผ่านได้ และลดทอนสัญญาณความถี่สูง รูปแบบของการกรองความถี่ต่ำผ่านแสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งการกรองความถี่ต่ำผ่านจะยอมให้สัญญาณตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ ไปจนถึงความถี่  $\omega_p$  ซึ่งเรียก  $\omega_p$  ว่าความถี่คัตออฟ (Cutoff frequency) ด้วยอัตราการลดทอนของสัญญาณค่า  $A_{max}$  dB ช่วงของความถี่ตั้งแต่ 0 จนถึง  $\omega_p$  จะเรียกว่าแถบความถี่ผ่าน (Passband) และความถี่ที่มากกว่า  $\omega_s$  จะมีอัตราการลดทอนของสัญญาณอย่างน้อยที่ค่า  $A_{min}$  dB โดยเรียกช่วงความถี่ที่มากกว่า  $\omega_s$  ว่า แถบความถี่หยุด (Stopband) และเรียกความถี่ที่  $\omega_s$  ว่า ขอบของแถบความถี่หยุด (Stopband edge frequency) ช่วงความถี่ระหว่าง  $\omega_p$  และ  $\omega_s$

เรียกว่า ช่วงผ่านสัญญาณ (Transitionband) จะเห็นว่ามีค่าพารามิเตอร์ด้วยกันทั้งหมด 4 ค่าด้วยกัน คือ  $\omega_p$ ,  $\omega_s$ ,  $A_{max}$  และ  $A_{min}$  ที่กล่าวถึงในรูปที่ 2.53

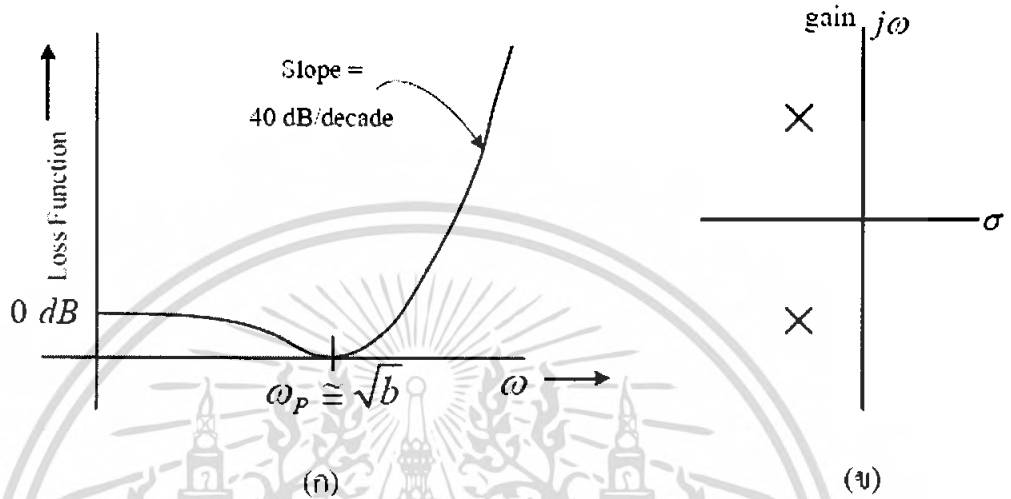


รูปที่ 2.53 ลักษณะของการกรองความถี่ต่ำ

การกรองความถี่ต่ำอันดับที่ 2 ในรูปของ gain function มีสมการดังนี้

$$\frac{V_o}{V_N} = \frac{b}{s^2 + as + b} = \frac{\omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}s + \omega_p^2} \quad (2.62)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.54 การกรองความถี่ต่ำ (ก) อัตราการสูญเสีย (ข) การพล็อตค่าโพลและซีโร

โดยจะได้ฟังก์ชันการลดทอน มีลักษณะดังนี้

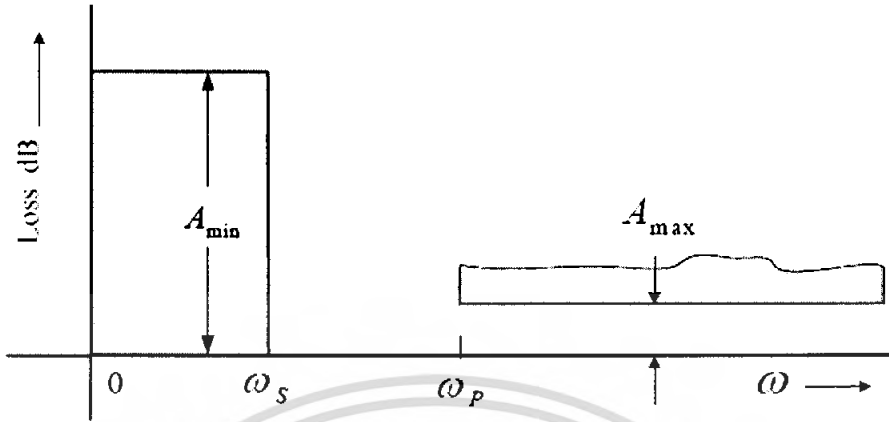
$$\frac{V_{IN}}{V_O} = \frac{s^2 + as + b}{b} = \frac{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}s + \omega_p^2}{\omega_p^2} \tag{2.63}$$

ดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.54(ก) เป็นลักษณะของการกรองความถี่ต่ำที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันการลดทอนด้วยอัตราขยายเป็น 1 เท่า สังเกตได้ว่าที่ความถี่สูง อัตราการสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม  $s^2$  ด้วยความชัน 40 dB / decade จากลักษณะของฟังก์ชันจะมี คอมเพล็กซ์โพล 2 ค่า ดังแสดงในภาพที่ 2.54(ข) ตำแหน่งของโพลสามารถหาได้จากสมการที่ (2.62)

### 2.7.2 การกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter)

การกรองความถี่ผ่านจะยอมให้ความถี่ที่กำหนดมาผ่านไปได้ เรียกความถี่นี้ว่า ความถี่คัทออฟ (Cutoff frequency) ลักษณะโดยทั่วไปของการกรองความถี่สูงผ่านจะปรากฏดังภาพที่ 3 ช่วงแถบความถี่ผ่านจะเริ่มที่  $\omega_p$  ถึง  $\omega_s$  และช่วงแถบความถี่ตัด จะเริ่มตั้งแต่ความถี่ 0 จนถึง  $\omega_s$  เช่นเดียวกับการกรองความถี่ต่ำ การกรองความถี่สูงก็มีค่าพารามิเตอร์ 4 ค่าเช่นกันคือ  $\omega_s, \omega_p, A_{min}, A_{max}$

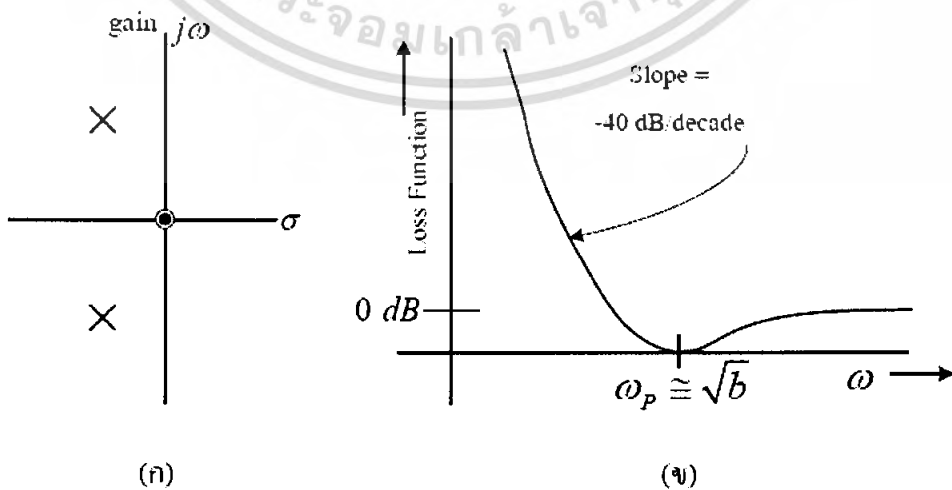
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.55 ลักษณะของการกรองความถี่สูง การกรองความถี่สูงที่กำลังมีค่าเป็น 2 ในรูปของ gain function มีสมการดังนี้

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{s^2}{s^2 + as + b} = \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}s + \omega_p^2} \quad (2.64)$$

จากฟังก์ชันจะเห็นว่า มี คอมเพล็กซ์ โพล 2 ค่า และซีโรอีก 2 ค่าที่จุดกำเนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.56 จาก การพล็อตขนาดในรูปของ Loss function จะเห็นว่าที่ความถี่ขึ้นอัตราการสูญเสียจะมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งต่างกับการกรองแบบความถี่ต่ำผ่านซึ่งจะมีค่าสูญเสียที่ เพิ่มขึ้น 40 dB / decade



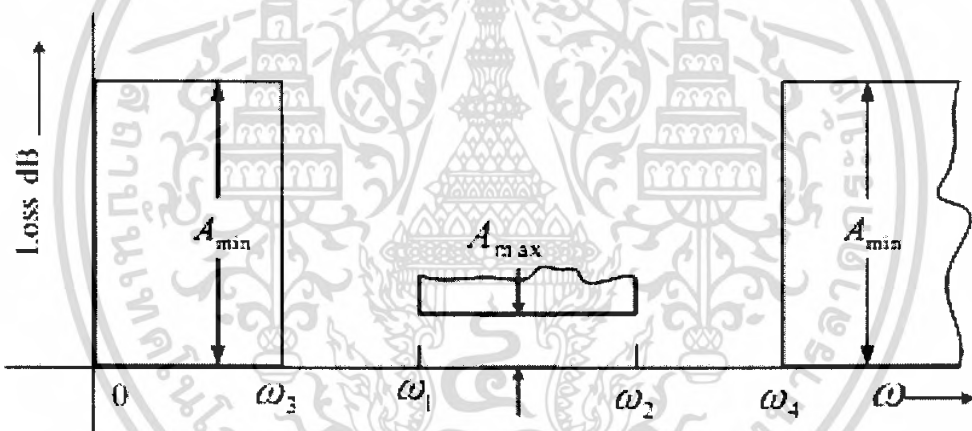
รูปที่ 2.56 การกรองความถี่สูง (ก) การพล็อตค่า โพลและซีโร (ข) อัตราการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

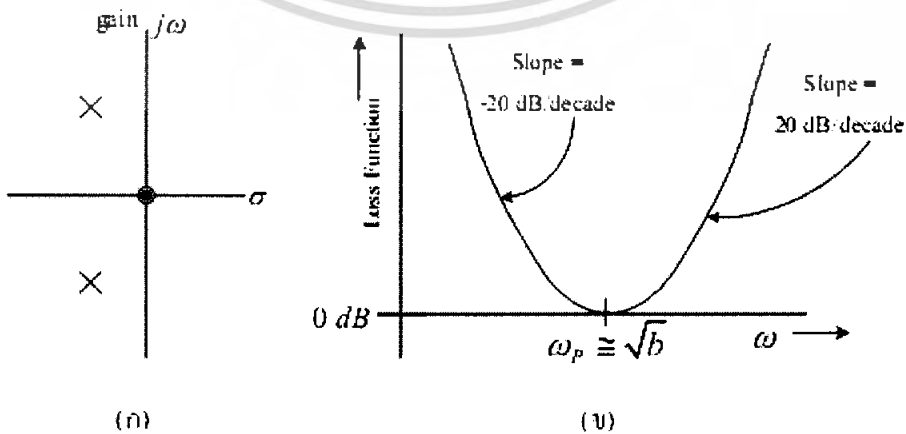
### 2.7.3 การกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter)

การกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน จะยอมให้ความถี่ช่วงหนึ่งผ่านไปได้ด้วยอัตราการลดทอนน้อย ๆ และจะปฏิเสธให้ความถี่ที่อยู่ทั้งสองข้างของความถี่ที่กล่าวมาผ่านไปได้ รูปที่ 2.57 จะแสดงลักษณะการกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน โดยที่ช่วงแถบความถี่ผ่านจะอยู่ระหว่าง  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  มีอัตราการลดทอนสูงสุดที่  $\max A$  dB และช่วงแถบความถี่ตัดทั้งสองข้างจะอยู่ที่ 0 ถึง  $\omega_3$  และอีกข้างอยู่ที่  $\omega_4$  จนถึง  $\infty$  มีอัตราการลดทอนของสัญญาณต่ำสุดที่  $A_{\min}$  dB สมการคุณลักษณะของการกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน อันดับที่ 2 เป็นดังนี้

$$\frac{V_D}{V_{IN}} = \frac{as}{s^2 + as + b} = \frac{\frac{\omega_p}{Q_p} s}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2} \tag{2.65}$$



รูปที่ 2.57 รูปแบบการกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน



รูปที่ 2.58 การกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน (ก) การพล็อตโพลและซีโร (ข) อัตราการสูญเสีย

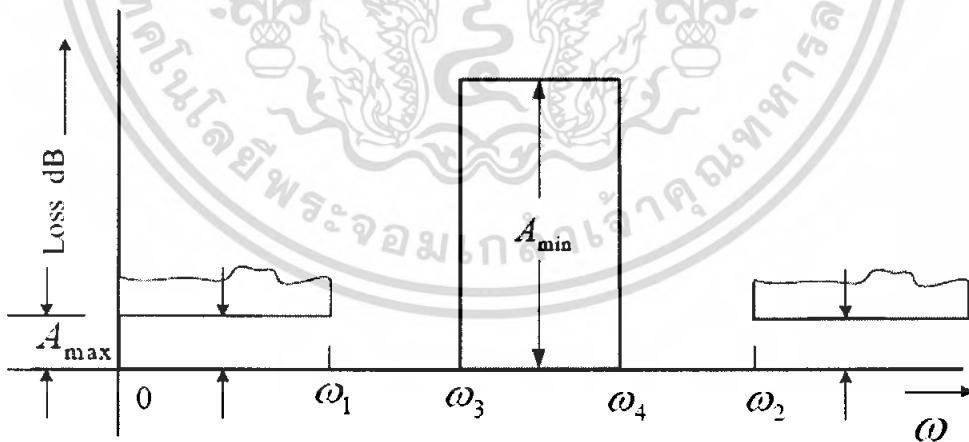
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากฟังก์ชันจะมีคอมเพล็กซ์ โพล 2 ค่าอยู่ทางซ้ายมือ และมี ซีโร อยู่ที่จุดกำเนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.58 (ก) ที่ความถี่ต่ำกว่า และความถี่สูงกว่าในช่วงแถบความถี่ผ่านจะมีอัตราการสูญเสียเป็น  $n$  คือ  $20 / \text{dB decade}$  และที่ความถี่  $P$   $b \omega = b$  อัตราการสูญเสียคงที่ที่ 1 เท่า ดังที่แสดงในรูปที่ 2.58(ข)

**2.7.4 การกรองความถี่แบบตัดแถบความถี่ (Band reject filter)**

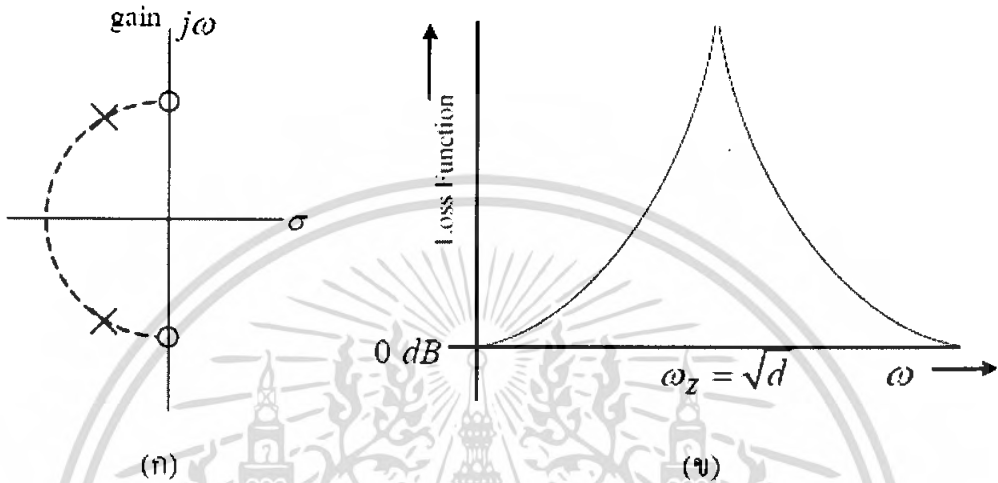
การกรองความถี่แบบตัดแถบความถี่ จะปฏิเสธให้สัญญาณช่วงหนึ่งผ่านไปไม่ได้ โดยที่ลักษณะของการกรองความถี่แบบตัดแถบความถี่ตามที่ต้องการ จะแสดงในรูปที่ 2.59 ช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้ผ่านจะอยู่ที่  $\omega_3$  จนถึง  $\omega_4$  โดยจะยอมให้ความถี่ที่ต่ำกว่า  $\omega_1$  และความถี่ที่สูงกว่า  $\omega_2$  ของการกรองความถี่สูงที่ อันดับที่ 2 ในรูปของ gain function มีลักษณะดังนี้การกรองความถี่แบบตัดแถบความถี่อันดับที่ 2 ในรูปของ gain function มีสมการดังนี้

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{s^2 + d}{s^2 + as + b} = \frac{s^2 + \omega_z^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}s + \omega_p^2} \tag{2.66}$$



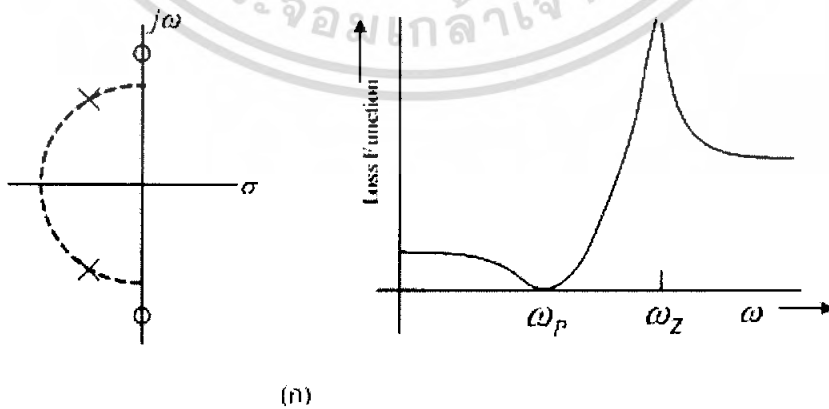
รูปที่ 2.59 รูปแบบการกรองความถี่แบบตัดแถบความถี่

เมื่อ  $\omega z = \omega p$  จะมีค่าคอมเพล็กซ์ โพลอยู่ทางซ้ายมือของแกน  $s$  และมีคอมเพล็กซ์ ซีโร อยู่ที่แกน  $j\omega$  ดังนั้นความถี่ของ โพลมีค่าเท่ากับความถี่ของค่าซีโร ดังที่แสดงรูปที่ 2.60(ก) อัตราการสูญเสียที่ความถี่ต่ำกว่า และความถี่สูงกว่าช่วงแถบความถี่ผ่านจะมีค่าเข้าใกล้ 1 เท่า จนกว่าความถี่ของซีโรจะเอกส มีค่าเป็น  $s = j\omega z$  จะทำให้มีค่าเป็นอนันต์ดังที่แสดงในรูปที่ 2.60 (ข) าดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

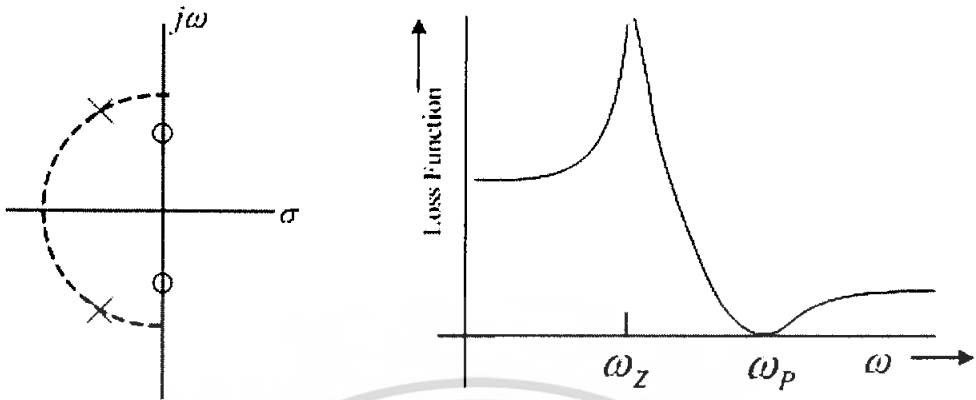


รูปที่ 2.60 การกรองแบบตัดแถบความถี่ผ่าน (ก) การพล็อต โพลและซีโร (ข) อัตราการสูญเสีย

แต่ถ้า  $\omega z \gg \omega p$  จากสมการที่ 5 จะทำให้ลักษณะการตอบสนองทางความถี่ด้านต่ำใช้ไม่ได้ ในช่วง stopband ดังที่แสดงในรูปที่ 2.60(ก) ในกรณีอย่างนี้อัตราการสูญเสียในช่วงความถี่สูงจะมีมากกว่าที่ความถี่ด้านต่ำ ลักษณะที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า low pass notch บ่อยครั้งถูกนำมาออกแบบใช้ ในการกรองความถี่ และถ้า  $\omega z \ll \omega p$  จะเรียกการตอบสนองทางความถี่ลักษณะนี้ว่า high pass notch ดังแสดงในรูปที่ 2.60(ข)



รูปที่ 2.61 (ก) low pass notch



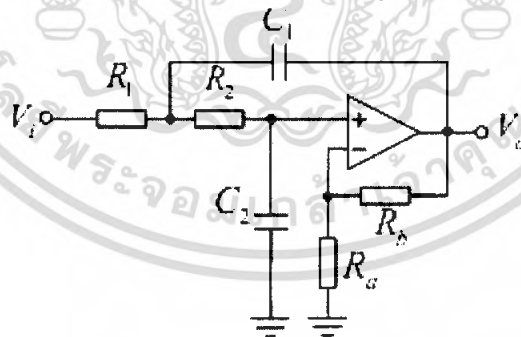
(ข)  
รูปที่ 2.62 (ข) high pass notch

## 2.8 วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ

วงจร Sallen and Key เป็นวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ (Active Filter) รูปแบบหนึ่งที่เป็นวงจรที่มีความเป็นพื้นฐาน และยังคงมีใช้งานอยู่ ซึ่งจะกล่าวดังต่อไปนี้

### 2.8.1 วงจรกรองความถี่ต่ำ (Low pass Filter)

วงจรกรองความถี่ต่ำ เป็นวงจรที่ยอมให้ความถี่ต่ำผ่าน โดยที่ไม่มีการสูญเสีย หรือว่ามีการสูญเสียน้อย โดยที่จะยอมให้สัญญาณผ่านตั้งแต่ 0 ถึง  $\omega_p$  และจะลดทอนสัญญาณความถี่สูง ตั้งแต่ความถี่ที่  $\omega_s$  จนถึง  $\infty$  โดยที่วงจรกรองความถี่ต่ำแสดงดังรูปที่ 2.63



รูปที่ 2.63 วงจรกรองความถี่ต่ำ

ดังนั้นจะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{k}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + \left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1-k}{R_2 C_2} \right) s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (2.67)$$

เมื่อ  $k = 1 + \frac{R_4}{R_5}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบกับสมการมาตรฐาน

$$H_{LP}(s) = \frac{G\omega_0^2}{s^2 + \left(\frac{\omega}{Q}\right)s + \omega_0^2} \quad (2.68)$$

จะได้

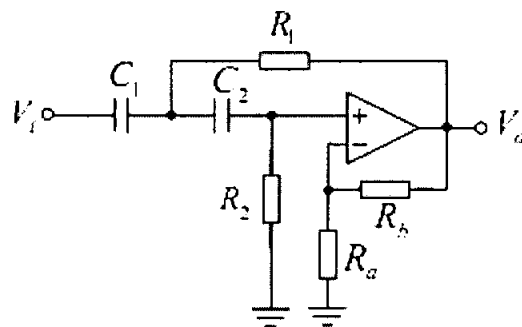
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (2.69)$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2} \left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1-k}{R_2 C_2} \right)} \quad (2.70)$$

$$G = k$$

### 2.8.2 วงจรกรองความถี่สูง (High pass Filter)

วงจรกรองความถี่สูงเป็นวงจรที่ยอมให้ความถี่สูงผ่าน โดยไม่มีการสูญเสียของสัญญาณมากเกินไป เรียกความถี่นี้ว่า ความถี่คัทออฟ (Cut off Frequency) โดยช่วงแถบความถี่ผ่านจะเริ่มที่  $\omega p$  ถึง  $\infty$  และช่วงแถบความถี่ตัดเริ่มที่ความถี่เป็น 0 จนถึง  $\omega s$  จากการกรองความถี่ต่ำที่ผ่านมา ถ้าต้องการเปลี่ยนเป็นวงจรกรองความถี่สูงสามารถทำได้โดยการสลับตำแหน่งระหว่างตัวต้านทาน(R) และตัวเก็บประจุ(C) ในวงจรทุกตัว ซึ่งจะได้วงจรที่กรองความถี่สูง ดังแสดงในรูปที่ 2.64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการรูปที่ 2.64 วงจรกรองความถี่สูง อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรกรองความถี่สูงสามารถเขียนฟังก์ชันโอนย้ายได้ดังนี้

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{ks^2}{s^2 + \left( \frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_2C_1} + \frac{1-k}{R_2C_2} \right) s - \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}} \quad (2.71)$$

$$H_{HP}(s) = \frac{Gs^2}{s^2 + \left( \frac{\omega_0}{Q} \right) s + \omega_0^2} \quad (2.72)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} \quad (2.73)$$

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_2C_1} + \frac{1-k}{R_2C_2}} \quad (2.74)$$

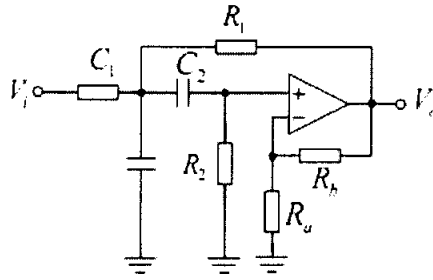
$$G = k$$

### 2.8.3 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass Filter)

วงจรกรองแถบความถี่ จะยอมให้ความถี่ในช่วงที่ต้องการผ่านไปได้โดยที่มีการลดทอนของสัญญาณน้อยมาก และจะไม่ยอมให้สัญญาณทั้งสองข้างของสัญญาณที่กล่าวมาแล้วผ่านได้ โดยที่จะยอมให้ความถี่ช่วง แถบความถี่ผ่านระหว่าง  $\omega p1$  ถึง  $\omega p2$  เป็นช่วงที่มีการลดทอนของสัญญาณสูงสุดและความถี่ช่วงแถบความถี่ตัดทั้งสองข้างคือตั้งแต่ 0 จนถึง  $\omega s1$  และช่วงตั้งแต่  $\omega s2$  จนถึง  $\infty$  เป็นช่วงที่มีการลดทอนของสัญญาณน้อยที่สุด วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแสดงในรูปที่

2.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.65 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

จากวงจรจะได้ฟังก์ชันโอนย้ายเป็น

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{k}{RC} s}{s^2 \left( \frac{1}{RC} + \frac{1}{R_3 C_2} + \frac{1}{R_3 C} + \frac{1-k}{R_2 C} \right) s + \frac{R+R_2}{R R_2 C C_2}} \quad (2.75)$$

สมการมาตรฐานของการกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน

$$H_{sp}(s) = \frac{G \left( \frac{\omega_o}{Q} \right) s}{s^2 + \left( \frac{\omega_o}{Q} \right) s + \omega_o^2} \quad (2.76)$$

จากสมการสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสองสมการได้ดังนี้

$$\omega_o = \sqrt{\frac{R+R_2}{R R_2 R_3 C C_2}} \quad (2.77)$$

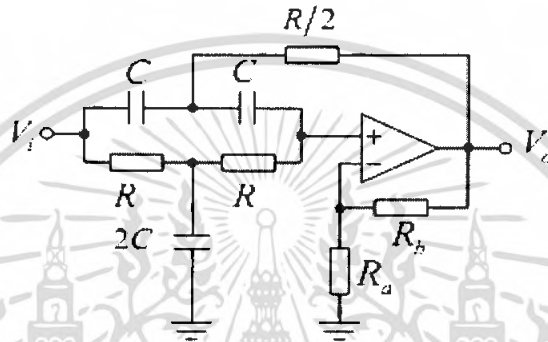
$$Q = \frac{\sqrt{\frac{R+R_2}{R R_2 C C_2}}}{\frac{1}{RC} + \frac{1}{R_3 C_2} + \frac{1}{R_3 C} + \frac{1-k}{R_2 C}} \quad (2.78)$$

$$G = \frac{\frac{k}{RC}}{\frac{1}{RC} + \frac{1}{R_3 C_2} + \frac{1}{R_3 C} + \frac{1-k}{R_2 C}} \quad (2.79)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.4 วงจรตัดแถบความถี่ผ่าน (Band reject Filter)

การกรองความถี่แบบตัดแถบความถี่นั้น จะไม่ยอมให้ความถี่ช่วงหนึ่งผ่านไปได้ ซึ่งช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านนั้นจะเรียกว่า แถบความถี่ตัด อยู่ระหว่าง กับ  $\omega s1$  และ  $\omega s2$  ช่วงของความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้จะอยู่ข้างของช่วงแถบความถี่ตัดทั้งสองข้าง โดยประกอบด้วย ตั้งแต่ 0 ถึง  $\omega p1$  และช่วงความถี่ตั้งแต่  $\omega p2$  ถึง  $\infty$  ซึ่งวงจรกรองความถี่แบบตัดแถบความถี่มีลักษณะดังรูปที่ 2.66



รูปที่ 2.66 วงจรกรองความถี่แบบตัดแถบความถี่

จากวงจรกรองความถี่แบบตัดแถบความถี่ด้านบน ใช้การต่อวงจรแบบทวิน-ที (twin-tee) โดยจะได้ฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรดังนี้

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{s^2 + \frac{1}{R^2 C^2}}{s^2 + 2\left(\frac{2-k}{RC}\right)s + \frac{1}{R^2 C^2}} \quad (2.80)$$

สมการมาตรฐานของการกรองความถี่แบบตัดแถบความถี่ผ่าน

$$H_{BR}(s) = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + \left(\frac{\omega_0}{Q}\right)s + \omega_0^2} \quad (2.81)$$

ซึ่งจะได้

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{RC}} \quad (2.82)$$

$$Q = \frac{\sqrt{RC}}{2(2-k)}$$

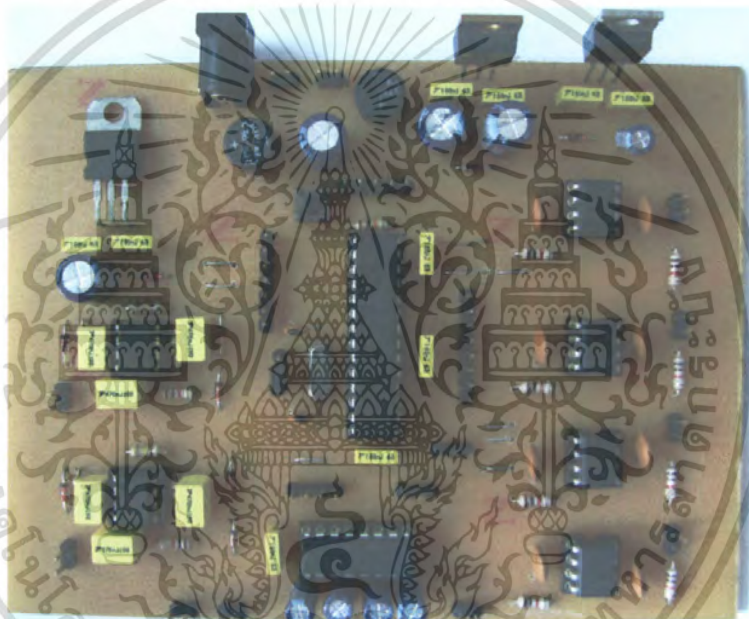
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่ง 2(2-k) รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่น (2.83) ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบและการสร้าง

#### 3.1 ส่วนประกอบของเครื่องปรับความต่างศักย์สำหรับเครื่องเอกเรย์อัตโนมัติ

##### 3.1.1 ชุดควบคุมการทำงานของมอเตอร์



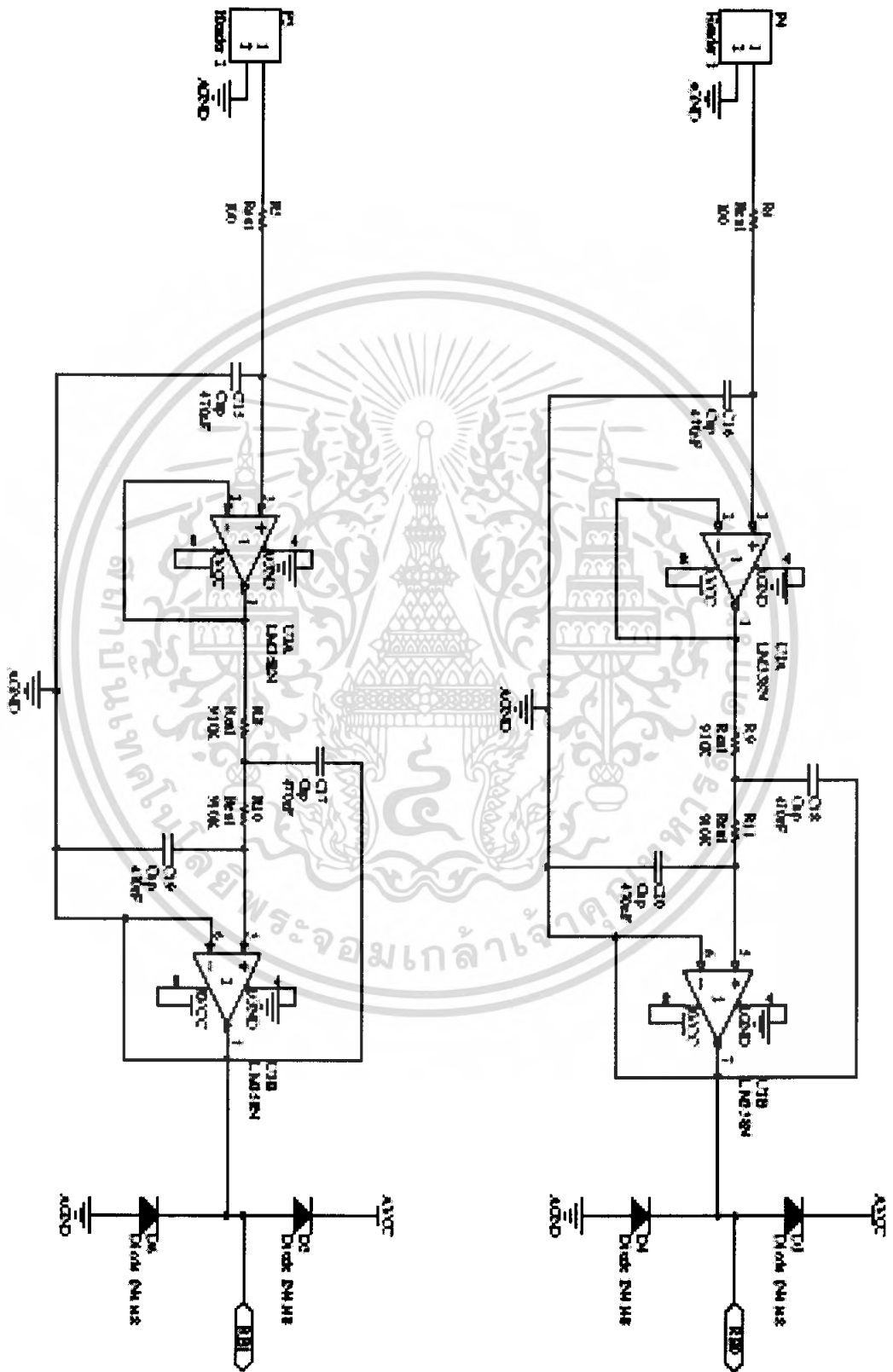
รูปที่ 3.1 วงจรควบคุมมอเตอร์

ประกอบด้วยวงจรหลัก 3 วงจร

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F2010
2. วงจร Filter แบบ low pass filter
3. วงจร Drive H-bridge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 3.3 วงจร Filter แบบ low pass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 3.1.2 ชุดขับมอเตอร์กระแสตรง (H-bridge)



รูปที่ 3.5 ชุดขับมอเตอร์กระแสตรง

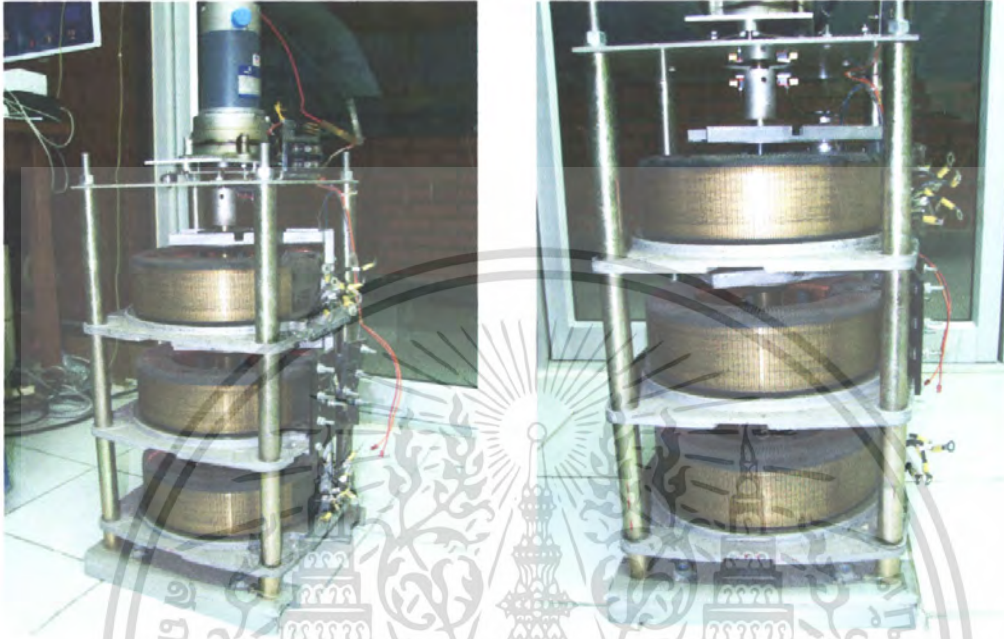
### 3.1.3 มอเตอร์กระแสตรง (DC motor)



รูปที่ 3.6 มอเตอร์กระแสตรง 24 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

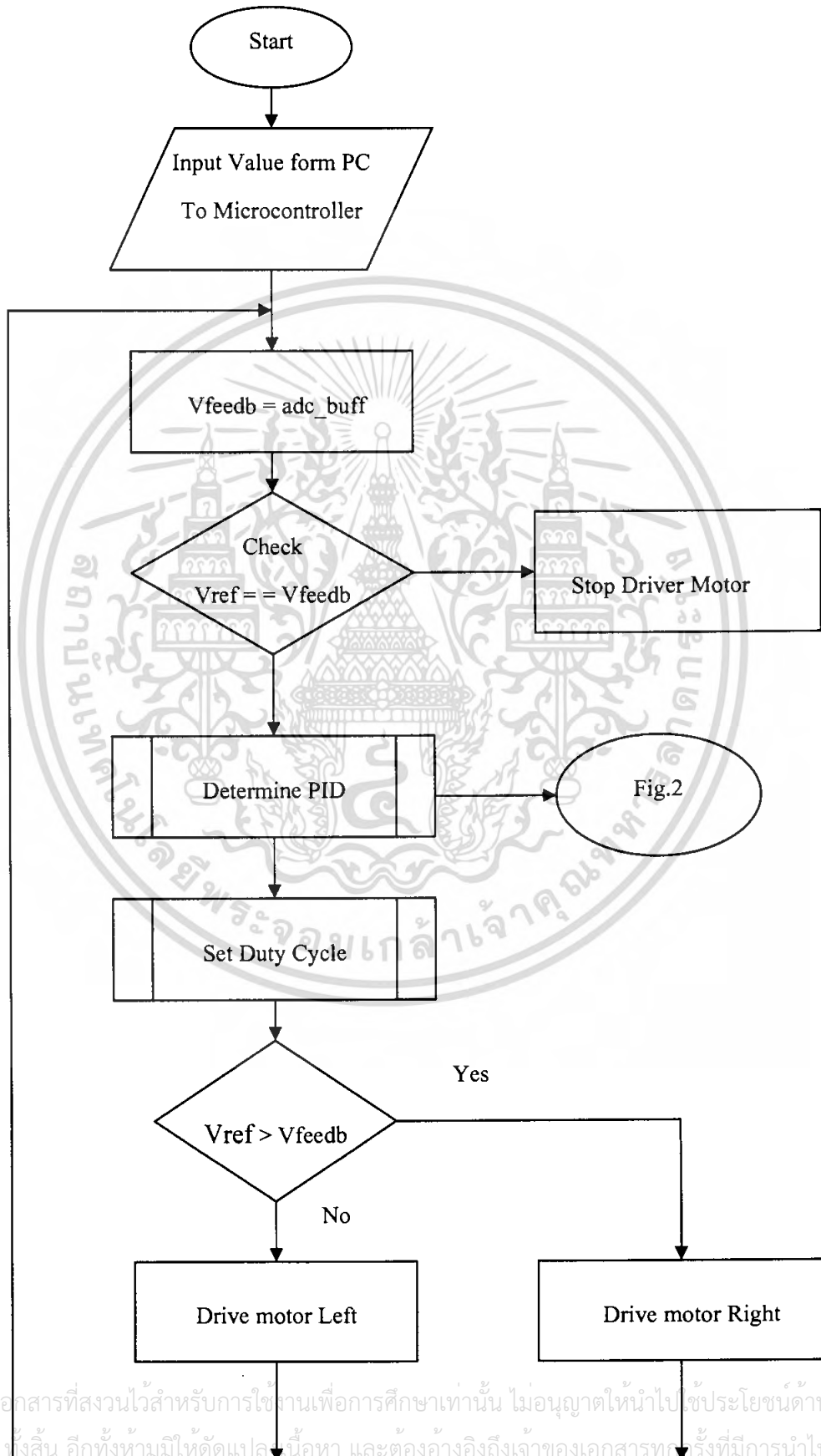
### 3.1.4 หม้อแปลงวาริแอก (Variac)



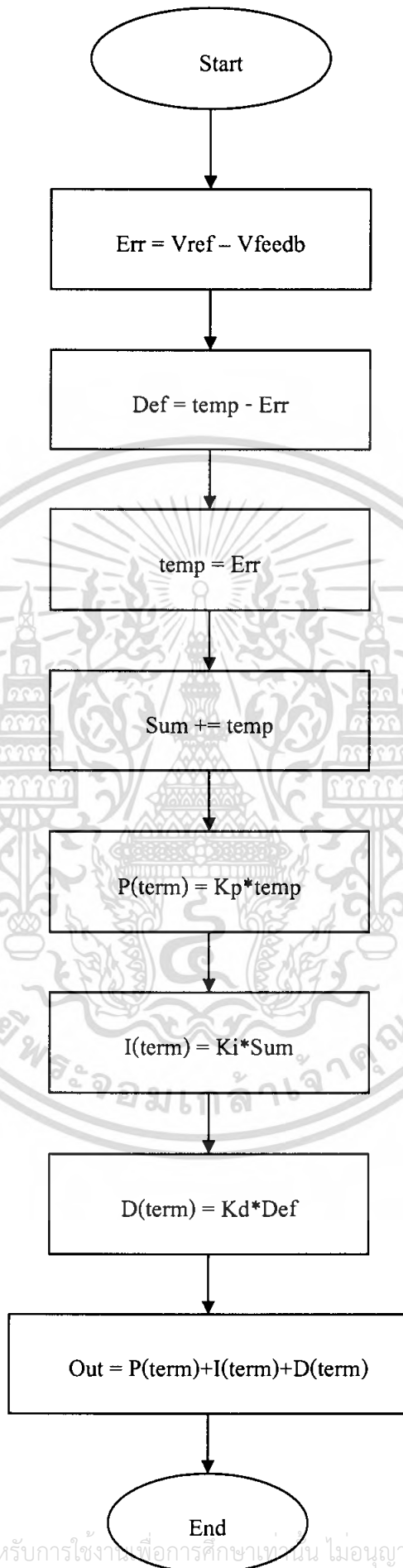
รูปที่ 3.7 หม้อแปลงวาริแอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การทำงานของเครื่องปรับความต้งคักคี่สำหรับเครื่องเอกซ์เรย์อัตโนมัติ



รูปที่ 3.8 การทำงานของเครื่องปรับความต้งคักคี่



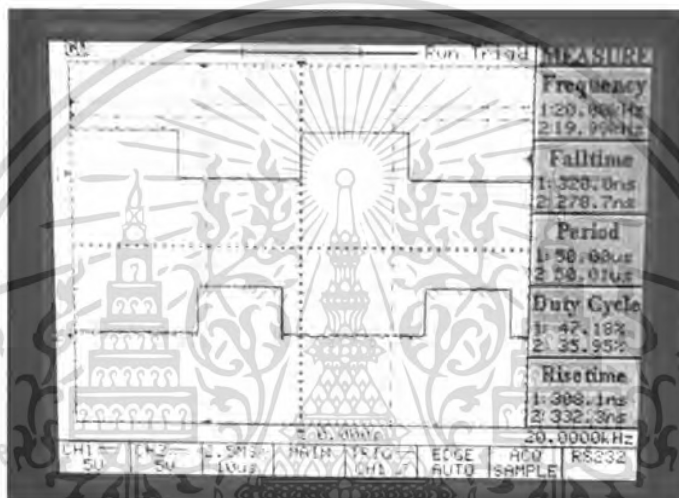
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 กระบวนการของ PID

## บทที่ 4

### การทดลอง

#### 4.1 สัญญาณขาขาของมอเตอร์เฟด



รูปที่ 4.1 สัญญาณขาขวงจร H-bridge

จากรูปที่ 4.1 สัญญาณ PWM ที่สร้างขึ้นมีความถี่ 20 kHz ซึ่งมีเวลาวิกฤตเพื่อแก้ปัญหาการหน่วงเวลาของอุปกรณ์ไม่ให้ทำงานพร้อมกันก่อนที่จะกระตุ้นสัญญาณขึ้นใหม่

#### 4.2 การตอบสนองของมอเตอร์กระแสตรง

เมื่อนำสัญญาณ PWM มาควบคุมการทำงานของวงจร H-bridge เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง เมื่อคิวดิไซเกิลเพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มความเร็วของมอเตอร์ได้ และจากการทดลองการทำงานของระบบการ PID โดยตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าไว้ที่ค่าหนึ่งๆ แล้วปรับค่าแรงดันที่ VR เพื่อปรับแรงดันย้อนกลับ เมื่อแรงดันย้อนกลับมากกว่าแรงดันอ้างอิงมอเตอร์จะเริ่มหมุนไปตามเข็มนาฬิกา เมื่อเวลานานไปค่าคิวดิไซเกิลก็จะเพิ่มขึ้นเพื่อปรับความเร็วให้มอเตอร์หมุนได้เร็วขึ้น และเมื่อปรับแรงดันย้อนกลับน้อยกว่าแรงดันอ้างอิงมอเตอร์จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา เมื่อเวลานานไปค่าคิวดิไซเกิลก็จะเพิ่มขึ้นเพื่อปรับความเร็วของมอเตอร์เช่นกัน และเมื่อปรับแรงดันย้อนกลับเท่ากับแรงดันอ้างอิงมอเตอร์จะหยุดทำงาน แสดงถึงการปรับแรงดันได้ตรงกับที่เราต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ตารางแสดงผลการทดลองวงจรฟีดแบ็ค

Vin 1 (Volt)	Vout1 (Volt)	Vout1/Vin1	%error
0.000	0.032	-	-
0.500	0.522	1.044	4.400%
1.020	1.030	1.010	0.980%
1.500	1.500	1.000	0.000%
2.030	2.030	1.000	0.000%
2.520	2.520	1.000	0.000%
3.000	3.000	1.000	0.000%
3.520	3.520	1.000	0.000%
4.070	4.100	1.007	0.737%
4.510	4.550	1.009	0.887%
5.000	5.020	1.004	0.400%

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการทดลองวงจรฟีดแบ็คครั้งที่ 1

Vin 2 (Volt)	Vout2 (Volt)	Vout2/Vin2	%error
0.000	0.032	-	-
0.500	0.532	1.064	6.400%
1.060	1.120	1.057	5.660%
1.520	1.580	1.039	3.947%
2.140	2.180	1.019	1.869%
2.630	2.670	1.015	1.521%
3.050	3.080	1.010	0.984%
3.540	3.580	1.011	1.130%
4.080	4.140	1.015	1.471%
4.480	4.540	1.013	1.339%
4.950	4.980	1.006	0.606%

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการทดลองวงจรฟีดแบ็คครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Vin 3 (Volt)	Vout3 (Volt)	Vout3/Vin3	%error
0	0.054	-	-
0.514	0.517	1.006	0.060%
1.070	1.140	1.065	6.542%
1.480	1.500	1.014	1.351%
1.990	2.050	1.030	3.015%
2.480	2.500	1.008	0.806%
3.020	3.050	1.010	0.993%
3.530	3.570	1.011	1.133%
4.000	4.010	1.003	0.250%
4.530	4.550	1.004	0.442%
4.990	4.990	1.000	0.000%

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการทดลองวงจรฟิลเตอร์ครั้งที่ 3

Vin 4 (Volt)	Vout4 (Volt)	Vout4/Vin4	%error
0	0.058		
0.522	0.525	1.005	0.517%
1.040	1.110	1.067	6.731%
1.520	1.560	1.026	2.632%
1.990	2.050	1.030	3.015%
2.570	2.620	1.019	1.946%
3.040	3.050	1.003	0.329%
3.560	3.580	1.006	0.562%
4.030	4.020	0.998	0.248%
4.570	4.620	1.011	1.094%
5.000	5.000	1.000	0.000%

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการทดลองวงจรฟิลเตอร์ครั้งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

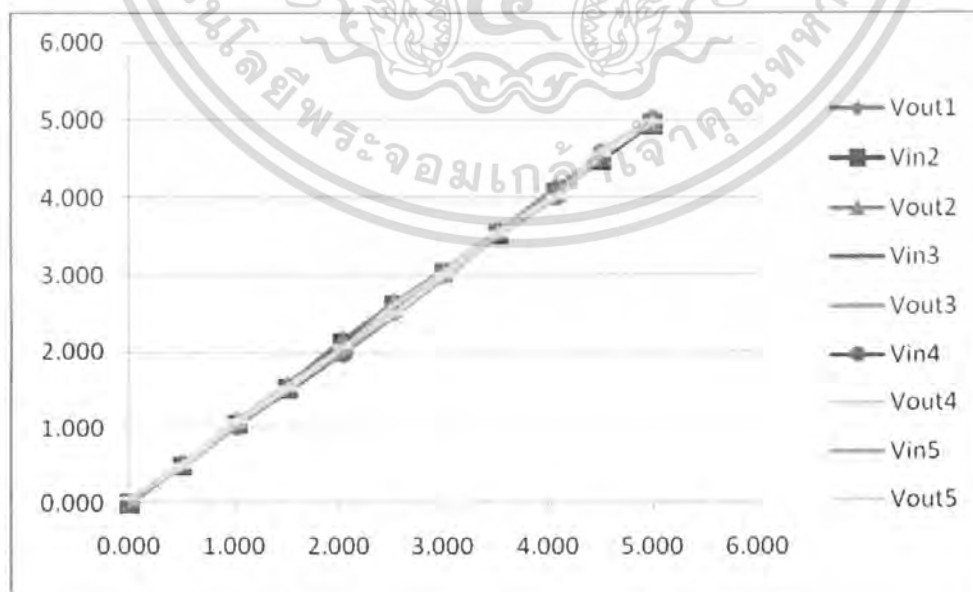
V adjust	Vout	error	% error
5.00	24.13	19.13	382.60
10.00	31.12	21.12	211.20
15.00	35.12	20.12	134.13
20.00	41.00	21.00	105.00
25.00	45.00	20.00	80.00
30.00	51.00	21.00	70.00
35.00	55.30	20.30	58.00
40.00	60.00	20.00	50.00
50.00	70.10	20.10	40.20
60.00	80.20	20.20	33.67
70.00	90.40	20.40	29.14
80.00	100.00	20.00	25.00
90.00	109.00	19.00	21.11
100.00	118.00	18.00	18.00
110.00	124.80	14.80	13.45
120.00	135.00	15.00	12.50
130.00	144.40	14.40	11.08
140.00	153.90	13.90	9.93
150.00	163.60	13.60	9.07
160.00	171.80	11.80	7.38
170.00	179.00	9.00	5.29
180.00	189.70	9.70	5.39
190.00	198.00	8.00	4.21
200.00	206.00	6.00	3.00
210.00	215.00	5.00	2.38
220.00	222.80	2.80	1.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Vin 5 (Volt)	Vout5 (Volt)	Vout5/Vin5	%error
0	0.062	-	-
0.488	0.496	1.016	0.160%
1.030	1.090	1.058	5.825%
1.510	1.520	1.007	0.662%
2.000	2.080	1.040	4.000%
2.480	2.510	1.012	1.210%
2.960	3.020	1.020	2.027%
3.520	3.540	1.006	0.568%
4.030	4.020	0.998	0.248%
4.540	4.550	1.002	0.220%
4.970	4.980	1.002	0.201%

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการทดลองวงจรฟิลเตอร์ครั้งที่ 5

#### 4.4 กราฟแสดงผลการทดลองวงจรฟิลเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 ตารางแสดงค่าการปรับเทียบค่า(Calibrate)

V adjust	Vout	error	% error
5.00	24.13	19.13	382.60
10.00	31.12	21.12	211.20
15.00	35.12	20.12	134.13
20.00	41.00	21.00	105.00
25.00	45.00	20.00	80.00
30.00	51.00	21.00	70.00
35.00	55.30	20.30	58.00
40.00	60.00	20.00	50.00
50.00	70.10	20.10	40.20
60.00	80.20	20.20	33.67
70.00	90.40	20.40	29.14
80.00	100.00	20.00	25.00
90.00	109.00	19.00	21.11
100.00	118.00	18.00	18.00
110.00	124.80	14.80	13.45
120.00	135.00	15.00	12.50
130.00	144.40	14.40	11.08
140.00	153.90	13.90	9.93
150.00	163.60	13.60	9.07
160.00	171.80	11.80	7.38
170.00	179.00	9.00	5.29
180.00	189.70	9.70	5.39
190.00	198.00	8.00	4.21
200.00	206.00	6.00	3.00
210.00	215.00	5.00	2.38
220.00	222.80	2.80	1.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **ครั้งที่ 1** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>V adjust</b>	<b>Vout</b>	<b>error</b>	<b>% error</b>
5.00	24.60	19.60	392.00
10.00	31.00	21.00	210.00
15.00	38.00	23.00	153.33
20.00	43.00	23.00	115.00
25.00	48.00	23.00	92.00
30.00	53.00	23.00	76.67
35.00	58.00	23.00	65.71
40.00	63.00	23.00	57.50
50.00	70.00	20.00	40.00
60.00	80.30	20.30	33.83
70.00	90.40	20.40	29.14
80.00	98.90	18.90	23.63
90.00	109.80	19.80	22.00
100.00	119.00	19.00	19.00
110.00	128.00	18.00	16.36
120.00	136.00	16.00	13.33
130.00	145.00	15.00	11.54
140.00	155.00	15.00	10.71
150.00	161.00	11.00	7.33
160.00	169.00	9.00	5.63
170.00	179.20	9.20	5.41
180.00	189.10	9.10	5.06
190.00	198.00	8.00	4.21
200.00	205.00	5.00	2.50
210.00	215.00	5.00	2.38
220.00	221.20	1.20	0.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อครั้งที่ 2 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>V adjust</b>	<b>Vout</b>	<b>error</b>	<b>% error</b>
5.00	24.51	19.51	390.20
10.00	31.17	21.17	211.70
15.00	37.20	22.20	148.00
20.00	41.70	21.70	108.50
25.00	47.40	22.40	89.60
30.00	51.20	21.20	70.67
35.00	56.60	21.60	61.71
40.00	60.50	20.50	51.25
50.00	68.90	18.90	37.80
60.00	78.20	18.20	30.33
70.00	90.00	20.00	28.57
80.00	97.70	17.70	22.13
90.00	109.00	19.00	21.11
100.00	118.00	18.00	18.00
110.00	127.60	17.60	16.00
120.00	136.00	16.00	13.33
130.00	145.00	15.00	11.54
140.00	154.20	14.20	10.14
150.00	162.00	12.00	8.00
160.00	170.00	10.00	6.25
170.00	179.00	9.00	5.29
180.00	189.00	9.00	5.00
190.00	198.00	8.00	4.21
200.00	206.00	6.00	3.00
210.00	216.60	6.60	3.14
220.00	223.10	3.10	1.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ครึ่งที่ 3  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>V adjust</b>	<b>Vout</b>	<b>error</b>	<b>% error</b>
5.00	25.00	20.00	400.00
10.00	31.18	21.18	211.80
15.00	37.60	22.60	150.67
20.00	41.00	21.00	105.00
25.00	47.20	22.20	88.80
30.00	52.00	22.00	73.33
35.00	56.60	21.60	61.71
40.00	60.50	20.50	51.25
50.00	71.30	21.30	42.60
60.00	79.60	19.60	32.67
70.00	88.90	18.90	27.00
80.00	97.40	17.40	21.75
90.00	108.00	18.00	20.00
100.00	117.90	17.90	17.90
110.00	125.30	15.30	13.91
120.00	135.30	15.30	12.75
130.00	144.70	14.70	11.31
140.00	153.60	13.60	9.71
150.00	161.10	11.10	7.40
160.00	170.00	10.00	6.25
170.00	178.30	8.30	4.88
180.00	189.20	9.20	5.11
190.00	199.10	9.10	4.79
200.00	207.00	7.00	3.50
210.00	215.30	5.30	2.52
220.00	221.30	1.30	0.59

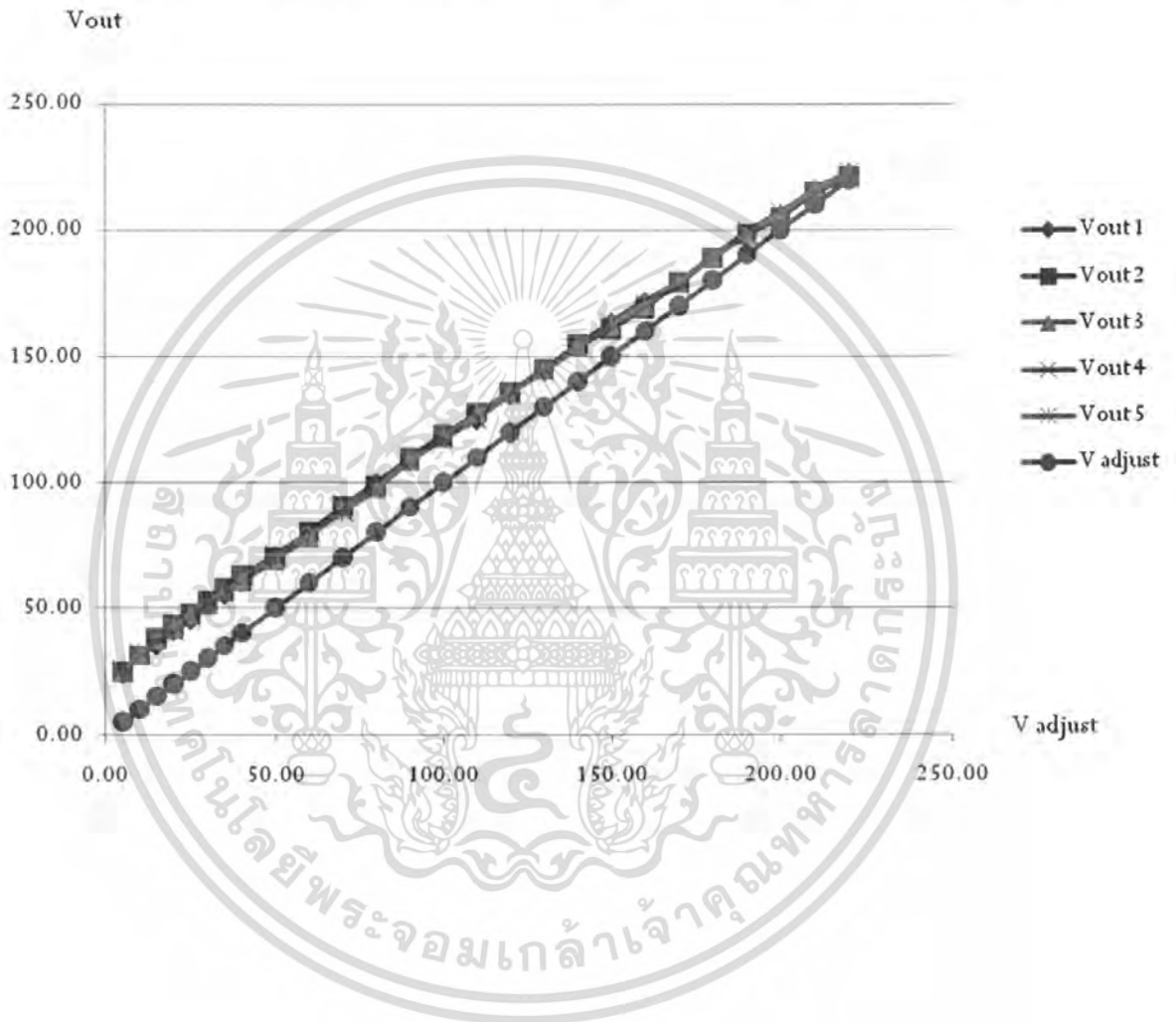
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ครึ่งที่ 4  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>V adjust</b>	<b>Vout</b>	<b>error</b>	<b>% error</b>
5.00	25.40	20.40	408.00
10.00	32.30	22.30	223.00
15.00	37.90	22.90	152.67
20.00	42.50	22.50	112.50
25.00	48.10	23.10	92.40
30.00	52.70	22.70	75.67
35.00	56.70	21.70	62.00
40.00	61.90	21.90	54.75
50.00	71.20	21.20	42.40
60.00	79.70	19.70	32.83
70.00	88.30	18.30	26.14
80.00	97.50	17.50	21.88
90.00	108.40	18.40	20.44
100.00	117.80	17.80	17.80
110.00	125.80	15.80	14.36
120.00	135.70	15.70	13.08
130.00	144.30	14.30	11.00
140.00	153.50	13.50	9.64
150.00	162.80	12.80	8.53
160.00	171.10	11.10	6.94
170.00	179.80	9.80	5.76
180.00	189.60	9.60	5.33
190.00	198.40	8.40	4.42
200.00	207.00	7.00	3.50
210.00	216.30	6.30	3.00
220.00	223.30	3.30	1.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อครั้งที่ 5 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Vout - Vadjust

### กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Vout – V adjust



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปและวิจารณ์การทดลอง

จากการทดลอง สัญญาณ PWM สามารถควบคุมวงจร H-bridge เพื่อขับมอเตอร์กระแสตรงและสามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ได้ด้วยการปรับความถี่ไซเคิลซึ่งก็คือปรับ VR ที่ป้อนให้กับ โมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล และเมื่อติดตั้งมอเตอร์เข้ากับแท่นเพื่อหมุนวารีแอก มอเตอร์สามารถหมุนวารีแอกเพื่อปรับแรงดันได้ แต่เนื่องจากวารีแอกที่มีอยู่ชำรุดจึงไม่สามารถควบคุมแบบรูปปิดได้ จึงได้ควบคุมแบบรูปเปิดแทน โดยการปรับ VR ด้วยมือเพื่อควบคุมความถี่ไซเคิลเพื่อปรับความเร็วมอเตอร์ จึงไม่สามารถรู้ได้ว่าระบบควบคุม PID จะเสถียรหรือใช้งานได้หรือไม่

#### 5.2 ปัญหาจากการทดลอง

เนื่องจากไม่สามารถวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ออกมาเป็นตัวเลขได้จึงไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของ ความถี่ไซเคิลกับความเร็วได้ และไม่สามารถทดสอบระบบควบคุมแบบปิดได้ เนื่องจากวารีแอกชำรุดเสียหายจึงไม่สามารถนำแรงเอาต์พุตของวารีแอกมาป้อนให้ เป็นแรงดันย้อนกลับได้

## บรรณานุกรม

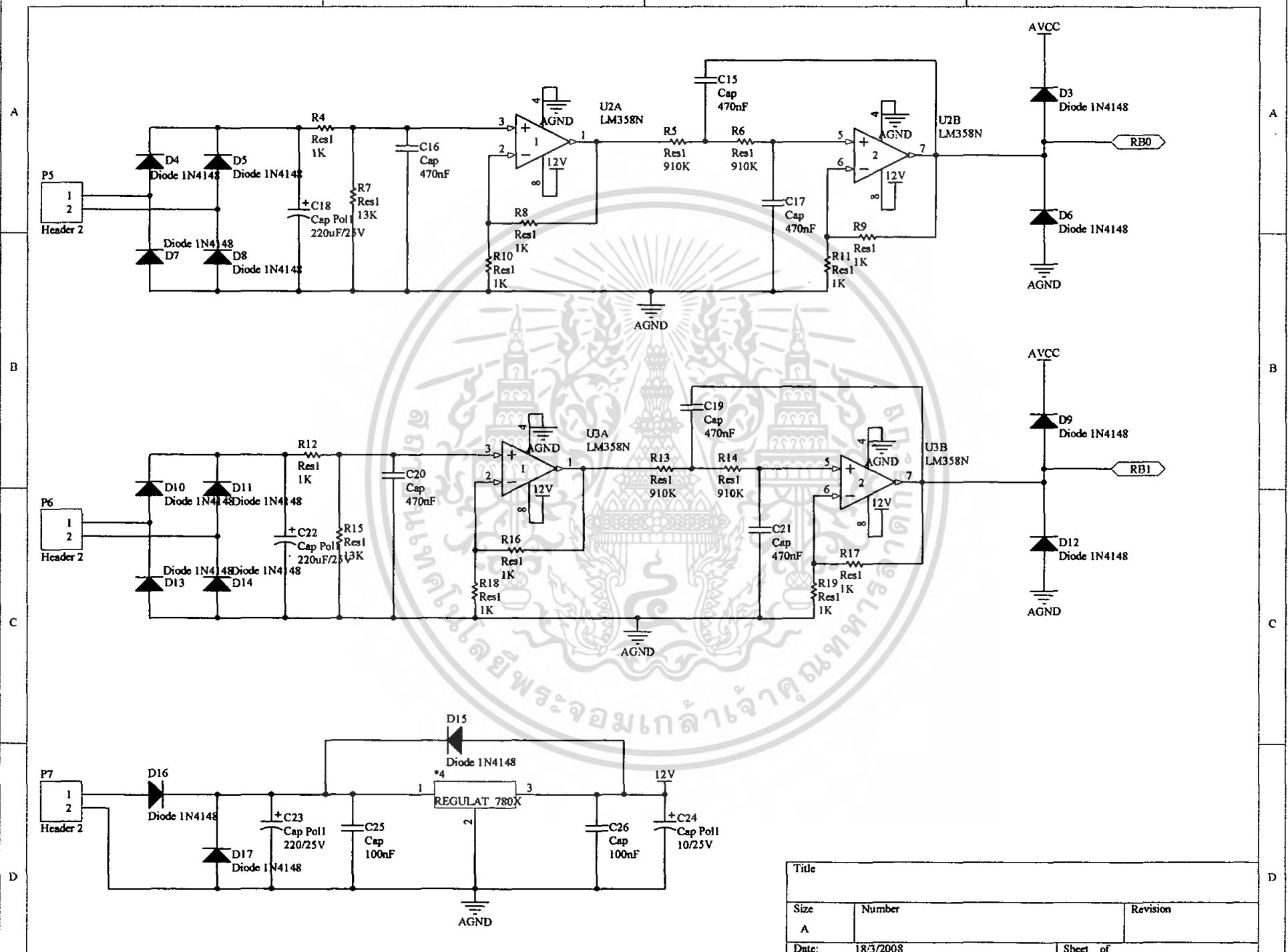
1. นฤกุล กระจาย,การเขียนโปรแกรมแบบวิซวลด้วย C++ Builder 5, สุวีริยาสาส์น,กรุงเทพฯ,2544
2. นคร ภัคศิชาติ,ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล,คู่มือการทดลอง dsPIC Microcontroller เบื้องต้น, กรุงเทพฯ,บริษัท อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมตส์ จำกัด,2550



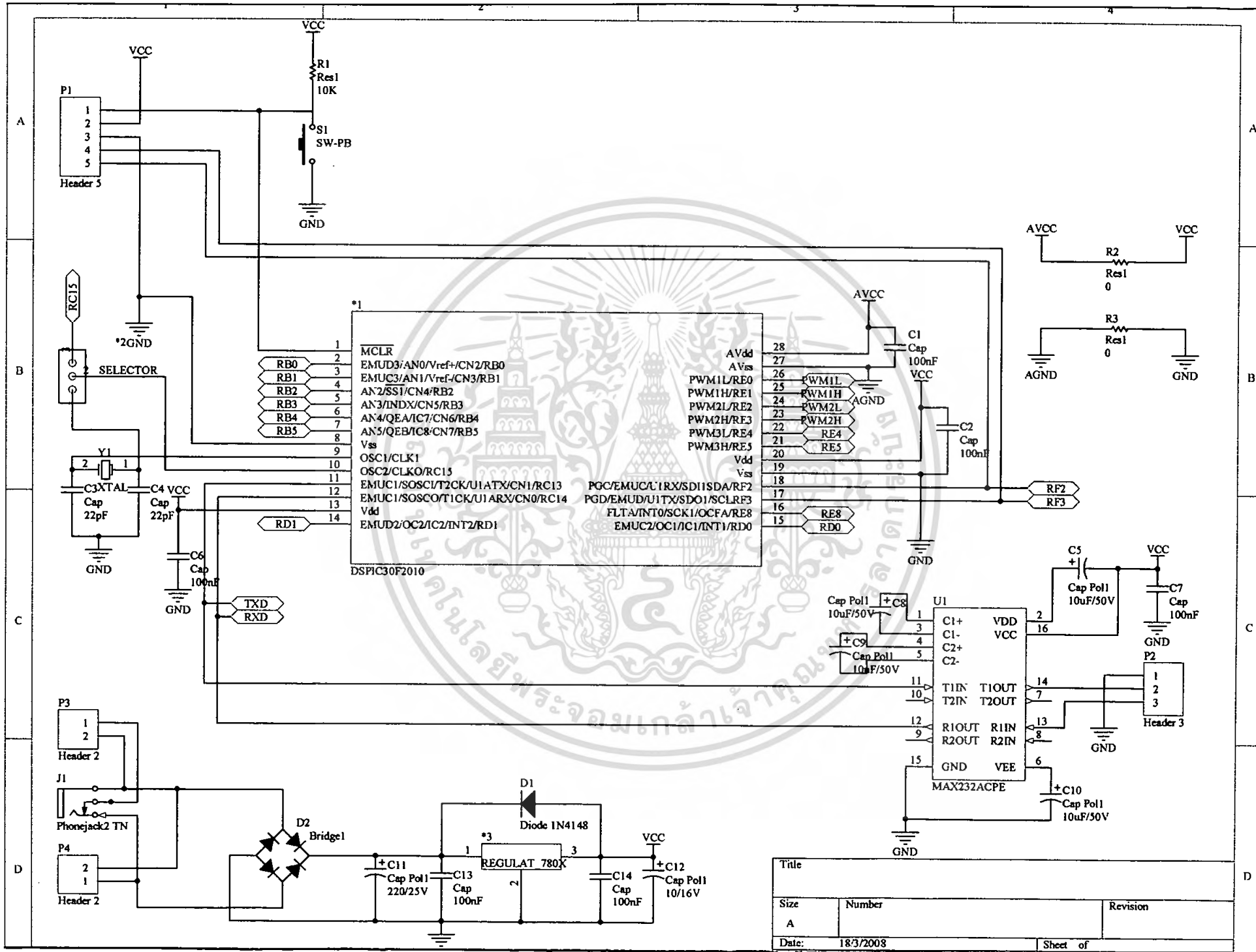
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Title		
Size	Number	Revision
A		
Date:	18/3/2008	Sheet of



Title		
Size	Number	Revision
A		
Date:	18/3/2008	Sheet of