

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องขยายตลับลูกปืน  
Induction Bearing Heater



T104286



จัดทำโดย

นายพงศกร  
นายชฎายุ  
นายภัทรศักดิ์

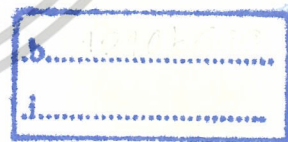
วรรณโชคชัย  
จันทร์สนิท  
ไตรสุรัตน์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. อนุวัฒน์

จางวนิชเลิศ

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 104286  
วัน,เดือน,ปี..... 3.0. ๓.ค. 2552



ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2551

เครื่องขยายตลับลูกปืน  
Induction Bearing Heater



อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์อันวัดน์ จางวนิชเลิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องขยายตลับลูกปืน  
Induction Bearing Heater

ผู้จัดทำ

- 1.นายพงศกร
- 2.นายชญาญ
- 3.นายภัทรศักดิ์

วรรณโชคชัย  
จันทร์สินิท  
ไตรสุรัตน์



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผศ. ดร. อนุวัฒน์ งามวนิชเลิศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องขยายตลับลูกปืน  
Induction Bearing Heater

นาย พงศกร วรธนโชคชัย  
นาย ชญาญู จันทร์สนิท  
นาย ภัทรศักดิ์ ไตรสุรัตน์  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ  
ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องขยายตลับลูกปืนที่มีขนาด 75 x 70 มม. พิกัด 6 kVA โดยสามารถตั้งเวลาได้ในช่วง 0 – 60 นาทีและตั้งอุณหภูมิได้ในช่วง 30 – 110 ° C ในขณะทำงาน และสามารถตัดการทำงานเมื่อถึงเวลาหรืออุณหภูมิที่กำหนดไว้

นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานได้กับตลับลูกปืนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในตั้งแต่ 50 – 300 มม. และสามารถนำโครงงานนี้ไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## INDUCTION BEARING HEATER

Pongsagorn Wannachockchoi

Chadayu Jansanit

Pattharasak Trisurat

Asst. Prof. Dr. Anuwat Jangwanitlert Supervisor

2008

## ABSTRACT

This project presents the design and construction of the 75 x 70 mm size and 6 kVA rated power as operating. This Bearing heater can set time 0 – 60 min and temperature 30 – 110 ° C stop working when reaches the set point.

The Bearing Heater in this project is usable with bearing inner diameter 50 – 300 mm. It can apply this Bearing Heater in the industry.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ ซึ่งเป็นที่ปรึกษาโครงการฉบับนี้ อาจารย์ ดร. ภพ จันท์เจริญสุข รศ.ดร.ชัชวูฒิ ฉัตรอุทัย ที่ได้ให้คำปรึกษาแนวทางในการแก้ปัญหา ความคิดริเริ่ม ตลอดจนฝึกฝนให้ ผู้เขียนมีความสามารถในการทำวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณบรรดา คณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในด้านวิชาการและความรู้ทั่วไป จนทำให้ข้าพเจ้าได้นำ ความรู้ที่ได้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการทำโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ภาควิศวกรรมการเครื่องกล ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และเครื่องมือใน การทำโครงการนี้ ขอขอบคุณพี่ช่างที่ให้คำปรึกษาในการทำงาน เสกที่ให้คำปรึกษาในด้านการใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ และขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ ชมรมซอฟท์บอล บาสเก็ตบอล และรักบี้ที่คอยเอาใจใส่ ใต้ถ้ำมตลอดเวลา

ขอกล่าวคำขอบคุณ สำหรับทุกสิ่งทุกอย่างที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มอบให้โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โอกาสใน การศึกษาตลอดหลักสูตรวิศวกรรมบัณฑิตอันถือเป็นเกียรติสูงสุดสำหรับข้าพเจ้า

ท้ายที่สุดนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่เคารพรักและสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่สนับสนุนให้โอกาสแก่ผู้เขียนได้เล่าเรียนจนถึงวันนี้

IV  
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ชื่อโครงการ.....	1
1.2 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขอบข่ายของงาน.....	2
บทที่ 2 วัสดุที่ใช้ทำตลับลูกปืนและประกอบเพลลา	
2.1 วัสดุที่ใช้ทำลูกปืน.....	3
2.2 วิธีการประกอบตลับลูกปืนกับเพลลา.....	4
2.3 การขยายตัวทางกลศาสตร์ของวัสดุ.....	5
บทที่ 3 แม่เหล็กไฟฟ้า	
3.1 สนามแม่เหล็ก.....	7
3.2 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล.....	9
3.3 การเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า.....	10
3.4 ความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	10
3.5 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	11
3.6 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก.....	11
3.7 ความซึมซาบได้สัมพัทธ์.....	12
3.8 ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 4 แม่เหล็กและหม้อแปลงเบื้องต้น	
4.1 หลักการพื้นฐานทางไฟฟ้า.....	13
4.2 ค่าสูญเสียทางไฟฟ้า.....	19
4.3 การสูญเสียในแกนเหล็ก.....	24
4.3.1 การสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์ซิส ( $P_h$ ).....	24
4.3.2 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ( $P_e$ ).....	25
4.4 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ.....	28
4.4.1 เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple).....	28
4.4.2 RTD(Resistance Temperature Detectors).....	29
4.4.3 เทอร์มิสเตอร์ (Thermister Thermally sensitive resistor).....	33
บทที่ 5 การออกแบบแกนเหล็กและวงจรควบคุม	
5.1 การออกแบบแกนเหล็กและขดลวด.....	34
5.2 การออกแบบกล่องบรรจุ.....	40
5.3 การออกแบบวงจรควบคุมความร้อนและวงจรกำลัง.....	41
5.4 การออกแบบการทดลอง.....	44
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	57
ภาคผนวก.....	60
บรรณานุกรม.....	83
ประวัติผู้เขียน.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VI  
สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 วิธีการอัดดลบลูกปืนแบบแน่นน้อย.....	4
รูปที่ 2.2 รูปแสดงระยะการขยายตัวที่อุณหภูมิต่างๆกันหลายขนาด.....	5
รูปที่ 2.3 แสดงการขยายตัวของวัสดุเนื่องจากความร้อน.....	6
รูปที่ 3.1 แสดงการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ.....	8
รูปที่ 3.2 แสดงกฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	8
รูปที่ 3.3 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กรั้วไหล.....	9
รูปที่ 4.1 แสดงวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงที่ติดตั้งปฐมภูมิ.....	15
รูปที่ 4.2 วงรอบฮีสเตอร์ซิส.....	22
รูปที่ 4.3 ผลของความถี่ต่อการเกิดวงรอบฮีสเตอร์ซิส.....	22
รูปที่ 4.4 ผลของแรงดันต่อการเกิดวงรอบฮีสเตอร์ซิส.....	23
รูปที่ 4.5 (ก)วงรอบฮีสเตอร์ซิสของแม่เหล็กอ่อน.....	24
(ข)วงรอบฮีสเตอร์ซิสของแม่เหล็กแข็ง.....	24
รูปที่ 4.6 การใช้แกนเหล็กแบบเหล็กแผ่นอัดซ้อน เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน.....	26
รูปที่ 4.7 ความสูญเสียในแกนเหล็กของแกนเหล็กชนิดต่างๆ ที่ความหนาต่างกัน.....	26
รูปที่ 4.8 ขนาดพื้นที่มากที่สุดภายในวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 หน่วย.....	27
รูปที่ 4.9 การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่การตัดแผ่นเหล็กแบบมุ่มฉากและมุ่ม 45 องศา.....	28
รูปที่ 4.10 หลักการทำงานของเทอร์โมคัปเปิ้ล.....	29
รูปที่ 4.11 ลักษณะหัว RTD.....	30
รูปที่ 4.12 ลักษณะวงจร RTD.....	31
รูปที่ 4.13 วงจรการต่อ RTD แบบ 3 wire.....	32
รูปที่ 4.14 วงจรการต่อ RTD แบบ 4 wire.....	32
รูปที่ 5.1 แสดงขนาดของคาน.....	35
รูปที่ 5.2 แสดงขนาดของแกนเหล็ก.....	36
รูปที่ 5.3 แสดงขนาดของ Bobbin (หน่วย มม.).....	37
รูปที่ 5.4 กล้องบรรจุแกนเหล็ก.....	40
รูปที่ 5.5 การยัดแกนเหล็กกับโครง.....	41
รูปที่ 5.6 ลักษณะของวงจรควบคุม.....	42
รูปที่ 5.7 Flow Chart การทำงานของ Microcontroler.....	43
รูปที่ 5.8 วงจรการทดลอง.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VII

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดพื้นที่มากที่สุดที่บรรจุในวงกลมที่มีพื้นที่ 100 ตารางหน่วย เทียบกับจำนวนชั้นของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก.....	27
ตารางที่ 5.1 ผลการวัดอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องขยายตัลบลูกปืนและ Thermo Hunter.....	45
ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองครั้งที่ 1 ตลบลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. กับ YOKE 4 ซม.....	46
ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองครั้งที่ 2 ตลบลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. กับ YOKE 4 ซม.....	47
ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองครั้งที่ 2 ตลบลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. กับ YOKE 4 ซม.....	47
ตารางที่ 5.5 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง ตลบลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม.....	48
ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองครั้งที่ 1 ตลบลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. กับ YOKE 4 ซม.....	48
ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองครั้งที่ 2 ตลบลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. กับ YOKE 4 ซม.....	49
ตารางที่ 5.8 ผลการทดลองครั้งที่ 3 ตลบลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. กับ YOKE 4 ซม.....	49
ตารางที่ 5.9 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง ตลบลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม.....	50
ตารางที่ 5.10 ผลการทดลองครั้งที่ 1 ตลบลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 ซม. กับ YOKE 7 ซม.....	50
ตารางที่ 5.11 ผลการทดลองครั้งที่ 2 ตลบลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 ซม. กับ YOKE 7 ซม.....	51
ตารางที่ 5.12 ผลการทดลองครั้งที่ 3 ตลบลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 ซม. กับ YOKE 7 ซม.....	51
ตารางที่ 5.13 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง ตลบลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 ซม.....	52
ตารางที่ 5.14 ทดสอบ ตลบลูกปืนขนาด 6 ซม. ที่เวลา 3 นาที.....	52
ตารางที่ 5.15 ทดสอบ ตลบลูกปืนขนาด 9 ซม. ที่เวลา 3 นาที.....	53
ตารางที่ 5.16 ทดสอบ ตลบลูกปืนขนาด 11 ซม. ที่เวลา 3 นาที.....	53
ตารางที่ 5.17 แสดงขนาดการขยายตัวของตลบลูกปืน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. ที่อุณหภูมิ 110 ° C.....	54
ตารางที่ 5.18 แสดงขนาดการขยายตัวของตลบลูกปืน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. ที่อุณหภูมิ 110 ° C.....	55
ตารางที่ 5.19 แสดงขนาดการขยายตัวของตลบลูกปืน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 ซม. ที่อุณหภูมิ 110 ° C.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ชื่อโครงการ

โครงการเรื่อง เครื่องขยายตลับลูกปืน (Induction Bearing Heater) สร้างขึ้นเพื่อความสะดวกปลอดภัย และทำให้เสียเวลาน้อยที่สุด สำหรับการติดตั้งลูกปืนในวงการอุตสาหกรรม

### 1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในโรงงานรีดเหล็กเส้น ตลับลูกปืนเม็ดทรงกระบอกแบบสี่แฉกมักถูกเลือกใช้ให้สามารถ ถอดเปลี่ยนลูกรีดจากแท่นได้ง่าย แหวนในตลับลูกปืน เหล่านี้จะถูกสวมแน่นไว้บนคอเพลลาของลูกรีด ลูกรีดจะต้องถูกเปลี่ยนบ่อยครั้ง เพราะรู้สึกหรือจากการทำงานการรับน้ำหนักสูงและสิ่งปนเปื้อนต่างๆ จึงต้องถอดและติดตั้งแหวนในกับลูกรีดใหม่อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

โดยวิธีการติดตั้งแบบเดิมนั้นจะใช้วิธี การต้มตลับลูกปืนในน้ำมันร้อน หรือการใช้ไฟลนที่ตลับลูกปืน กรณีที่ตลับลูกปืนมีขนาดเล็ก โดยจะต้องรักษาระดับอุณหภูมิในน้ำมันให้คงที่ ที่ 120 องศาเซลเซียส นานประมาณ 10-15 นาที จนทำให้ตลับลูกปืนมีความร้อนซึ่งจะส่งผ่านทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางวงในของตลับลูกปืน เกิดการขยายตัวได้ประมาณ 100-150  $\mu\text{m}$  ค่าความแตกต่างระหว่างตลับลูกปืนกับเพลลา จะขึ้นอยู่กับค่าการสวมอัดแน่นและขนาดของตลับลูกปืน โดยปกติแล้วอุณหภูมิของเพลลาประมาณ 80-90 องศาเซลเซียส (144-162 องศาฟาเรนไฮต์) จึงจะเพียงพอต่อการติดตั้งลูกปืนเข้ากับเพลลา ไม่ควรจะให้ความร้อนตลับลูกปืนเกิน 125 องศาเซลเซียส เพราะวัสดุของตลับลูกปืนจะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ มีผลให้ความกลมและค่าความแข็งแรงอาจจะแปรผันได้ ควรหลีกเลี่ยงการให้ความร้อนมากเกินไป และไม่ควรรีบใช้เปลวไฟลนลูกปืนจนสามารถประกอบเข้ากับเพลลาได้

วิธีการต้มในน้ำมันร้อน	ใช้เครื่องขยายตลับลูกปืน
1. มีความยุ่งยากในการควบคุมระดับอุณหภูมิให้คงที่	1. สามารถทำการขยายโดยปราศจากเปลวไฟ
2. มีอันตรายจากความร้อนและน้ำมันของเปลวไฟ	2. เมื่อขยายเสร็จแล้วไม่จำเป็นต้องทำความสะอาด
3. ต้องใช้น้ำมันจำนวนมาก และเมื่อเสร็จจากการต้มแล้วต้องทำความสะอาดด้วย	3. สามารถใช้กับตลับลูกปืนได้ทุกชนิดง่ายต่อการใช้งาน และสามารถควบคุมอุณหภูมิได้
4. ต้องคอยสังเกตและควบคุมน้ำมันอยู่เสมอขณะที่ต้ม	4. ค่าใช้จ่ายต่อครั้งตลอดอายุการใช้งานจะมีราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเครื่องขยายตัวลบลูกปืน จะใช้วิธีการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าโดยการ บ้อนไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ แล้วอาศัยหลักการของหม้อแปลงเหนี่ยวนำ ให้เกิดกระแสไหลทางด้านทุติยภูมิ แต่ในเครื่องขยายตัวลบลูกปืนนั้น จะเปรียบตัวลบลูกปืนเป็นเสมือนขดลวดทางด้านทุติยภูมิ 1 ขด ที่ลัดวงจรอยู่ขณะใช้งาน และด้วยความแตกต่างทางด้านจำนวนรอบของขดลวด ทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแส ทางด้านทุติยภูมิไหลในตัวลบลูกปืนและในตัวลบลูกปืนก็มีความต้านทานจำเพาะอยู่ ทำให้เมื่อมีกระแสไหลจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นคล้ายกับ การสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กของหม้อแปลงจากกระแสไหลวน (Eddy current) ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะ และขนาดของตัวลบลูกปืนแต่ละชนิดที่นำมาทำการให้ความร้อน

### 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาหลักการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน
2. ศึกษาการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
3. ศึกษาและออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
4. ทำการต่อวงจรพร้อมทั้งทำการทดลองวงจรควบคุม

### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าในขดลวดไปใช้งาน
2. ได้เรียนรู้การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
3. ได้เรียนรู้การเลือกใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้ตรงกับความต้องการ
4. ได้เรียนรู้การออกแบบวงจรจริงในการนำไปใช้งาน
5. สามารถนำโครงการนี้ไปประยุกต์ใช้งานอย่างอื่นได้

### 1.5 ขอบข่ายของงาน

1. สร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์และแกนเหล็กที่สามารถเหนี่ยวนำแก่ตัวลบลูกปืน
2. ทดสอบการทำงานของวงจรควบคุม
3. ทดสอบการทำงานกับตัวลบลูกปืนขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### วัสดุที่ใช้ทำลูกปืนและประกอบเพลลา

#### 2.1 วัสดุที่ใช้ทำลูกปืน

วัสดุสำหรับวงแหวนและตลับลูกปืนผิวสัมผัสของวงแหวน และเม็ดลูกปืนของตลับลูกปืน ได้รับความเค้นหนัก ที่เกิดขึ้นกัน ดังนั้นวงแหวนและเม็ดของลูกปืนจะต้องสามารถรักษาความเที่ยงตรง และความคลาดเคลื่อนในการหมุน ให้ได้ตามความต้องการ วงแหวนและลูกปืนจะต้องทำมาจากวัสดุ ที่มีความแข็งสูงสามารถต้านทานต่อความเค้นล้า (Stress & strain) มีความต้านทานต่อความสึกหรอ และสามารถรักษาขนาดได้ เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนและโครเมียมสูง ผ่านกรรมวิธีชุบแข็งแบบ Carburized ได้ถูก นำมาใช้เป็นวัสดุทำวงแหวน และลูกปืนของตลับลูกปืนมาตรฐาน ความแข็งของ วงแหวนและลูกปืนปกติมีค่า HRC 58 องศา ถึง HRC 65 องศา วัสดุที่ใช้กับตลับลูกปืน คือ เหล็กกล้าที่มี ส่วนผสมของคาร์บอนสูง ส่วนผสมทางเคมีมาตรฐาน JIS G 4805 เหล็กกล้าคาร์บอนและโครเมียมสูง เหล็กกล้า SUJ2 เป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งสามารถเทียบได้กับเหล็กกล้า ANSI 5210 ( สหรัฐอเมริกา ) DIN 100 CR 6 ( เยอรมันตะวันตก ) และ GS 534 A 99 ( สหราชอาณาจักร ) สำหรับ SUJ3 หรือ SUJ5 มีคุณสมบัติความแข็งดีสามารถใช้ได้กับตลับลูกปืนขนาดใหญ่

สำหรับเหล็กกล้าชุบแข็งจะต้องเป็น เหล็กกล้าโครม ( SCR ) เหล็กกล้า Chromemolyddenum (SCM) และเหล็กกล้า Nickel chrome molybdenum (SCM) ส่วนผสมทางเคมี เหล็กกล้าจากการชุบแข็ง และการเติมคาร์บอนให้กับเหล็กกล้าจะได้เนื้อของเหล็กเป็นชั้นๆ ที่ระยะความ ลึกเหมาะสมเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งจะให้คุณสมบัติ ต้านทานต่อแรงเสียดทานดีเยี่ยมและการเติม คาร์บอนให้กับเหล็กกล้าจะได้เนื้อของเหล็กเป็นชั้นๆ ที่ระยะความลึกเหมาะสมเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบ แข็งจะให้คุณสมบัติต้านทานต่อแรงเสียดทานดีเยี่ยม

สาเหตุความล้าทำให้ตลับลูกปืน เกิดจากการแตกร้าวเกิดจากสิ่งแปลกปลอม ที่ไม่ใช่โลหะผสม อยู่ในวัสดุ ทำตลับลูกปืน ถ้าไม่มีสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่โลหะผสมอยู่ในวัสดุทำตลับลูกปืนจะสามารถยืด อายุการใช้งานของตลับลูกปืนได้ สำหรับตลับลูกปืนทุกชนิด ที่ใช้เหล็กที่มี ออกซิเจน และส่วนผสม แปลกปลอมโลหะต่ำซึ่งผ่านกระบวนการสุญญากาศ ทำให้บริสุทธิ์สำหรับตลับลูกปืน ที่ต้องการความ มั่นใจในการใช้งาน เหล็กกล้าที่หลอมเหลวในสุญญากาศ(CVEM) และเหล็กกล้าที่หลอมเหลวด้วยไฟฟ้า (ESR) จะเป็นเหล็กกล้าที่มีความบริสุทธิ์สูงสำหรับตลับลูกปืนที่ทำงานในสภาวะอุณหภูมิสูง (M5D)สำหรับงานที่ต้องการความต้านทานต่อการกัดกร่อน ควรใช้เหล็กกล้าสแตนเลส (SUS 440 C) สำหรับลูกปืนที่ผิวทางเดินลูกปืนได้ผ่านการชุบแข็งด้วยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้าควรใช้เหล็กกล้าMachine structural carbon (S 48 C ถึง S 50 C) และเหล็กกล้า Chrome molybdenum (SCM 440)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



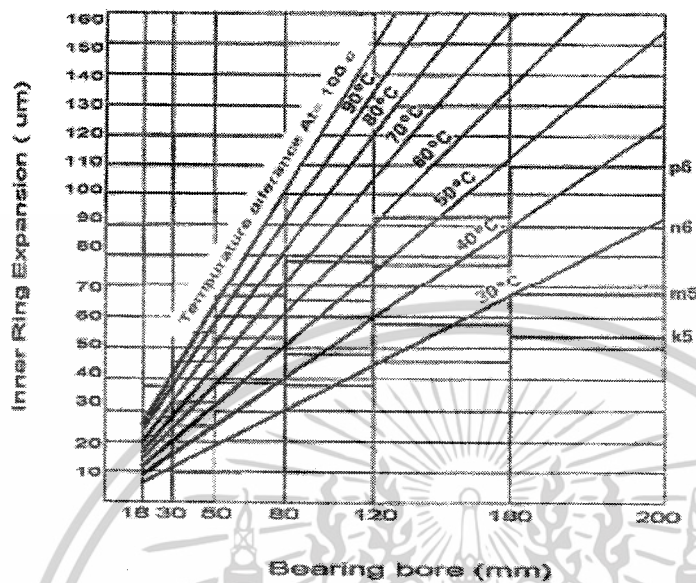
รูปที่ 2.1 วิธีการอัดตลับลูกปืนแบบแน่นเล็กน้อย

## 2.2 วิธีการประกอบตลับลูกปืนกับเพลลา

การประกอบตลับลูกปืนที่มี รูเพลลาทรงกระบอก ตลับลูกปืนที่มีการประกอบแน่นเล็กน้อย สามารถใช้ประกอบ ที่อุณหภูมิธรรมดาในห้อง โดยใช้ความปลอดภัยที่อัดแหวนในดั่งรูป 2.1 โดยการส่งแรงดันบริเวณศูนย์กลางของตลับลูกปืน แรงดันบนเส้นรอบวงของแหวนจะต้องสม่ำเสมอตามปกติการประกอบตลับลูกปืนสามารถทำได้โดยการตีบล็อกด้วยค้อนอย่างไรก็ตาม เมื่อติดตั้งตลับลูกปืนส่วนใหญ่ จะใช้การอัดด้วยเครื่องอัดทางกลหรือเครื่องอัดไฮดรอลิก

เมื่อประกอบตลับลูกปืนที่ไม่สามารถอัดบนเพลลา และเสื่อตลับลูกปืนในเวลาเดียวกัน จำเป็นต้องมีแผ่นรองเพื่อกระจายแรงดันให้ทั่วบนแหวนในและแหวนนอก

การประกอบตลับลูกปืนที่มีค่าความเผื่อมากที่แหวนใน หรือประกอบกับตลับลูกปืนบนเพลลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ จำเป็นต้องใช้แรงจำนวนมากในการประกอบตลับลูกปืนที่อุณหภูมิธรรมดาในห้อง การประกอบสามารถทำได้ง่ายขึ้นในการใช้ความร้อน ที่แหวนในให้ขยับตัวก่อน ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่างแหวนใน และงานที่สวมขึ้นอยู่กับจำนวนค่าความเผื่อ และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแหวนในและทางปริมาณความร้อนที่ได้กับตลับลูกปืน



รูปที่ 2.2 รูปแสดงระยะการขยายตัวที่อุณหภูมิต่างกันหลายขนาด

ถ้าให้ความร้อนแก่ตลับลูกปืนแบบแห้งเช่นเตาไฟฟ้า ตลับลูกปืนดังกล่าวสามารถสวมประกอบได้โดยไม่ต้องใช้แรงอัดวิธีนี้สามารถใช้กับตลับลูกปืนแบบมีซีลใส่สารหล่อลื่นก่อนใช้งานหรือตลับลูกปืนที่มีซีล

สำหรับการให้ความร้อนแก่แหวนในของตลับลูกปืนเม็ดทรงกระบอกชนิด NJ, NU หรือ NUP หรือตลับลูกปืนชนิดคล้ายกับตลับลูกปืนที่ใดกล่าว ที่ไม่มีหน้าแปลนหรือมีหน้าแปลนเพียงหน้าเดียวสามารถใช้ความร้อนจากการเหนี่ยวนำไฟฟ้า และด้วยวิธีดังกล่าวนี้ทำให้สามารถประกอบตลับลูกปืนได้เร็ว

การสวมประกอบเพลากับตลับลูกปืนที่กำลังร้อนนั้นแหวนในจะต้องยันกับป่าเพลาสวมเมื่อตลับลูกปืนเย็นลง ไม่เกิดช่องว่างระหว่างแหวนและป่าเพล่า การให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นวิธีที่ได้อธิบายแล้วนั้นยังสามารถช่วยในการถอดแหวนโดยใช้เครื่อง ดึงออก

### 2.3 การขยายตัวทางกลศาสตร์ของวัสดุ

การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion) เมื่อวัสดุได้รับอุณหภูมิสูงขึ้นอะตอมจะสั่นแรงขึ้นโมเลกุลจะอยู่ห่างกันมากขึ้นทำให้ปริมาตรของวัตถุเพิ่มขึ้น จากหลักการข้างต้นเมื่อกำหนดขอบเขตการศึกษา เช่น ในวัตถุรูปทรงที่มีความยาว ก็จะมีการเพิ่มขึ้นของความยาว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta l = \alpha l \Delta t$$

เมื่อ

$\alpha$  = สัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัตถุเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป

$\Delta t$  = ค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

จากความสัมพันธ์ระหว่างแนวคิดกับการใช้งานเมื่อมีการให้อุณหภูมิแก่วัตถุ เช่น แบตเตอรี่ ตามรูปก็จะทำให้วงแหวนด้านใน และด้านนอกเกิดการขยายตัวออกตามยาวเป็น  $l + \Delta l$  ให้ความยาวจากเดิม  $l = 2\pi r$  ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิกับวัตถุ

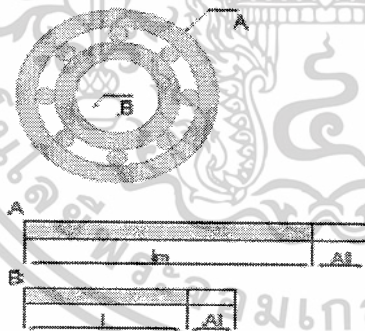
$$l_n + \Delta l$$

$$r_n = l_n / 2\pi$$

เมื่อ

$r_n$  = รัศมีหลังจากเพิ่มอุณหภูมิ

จึงสรุปได้ว่า เมื่อทำให้อุณหภูมิที่แบตเตอรี่สูงขึ้น ตัวแบตเตอรี่จะสามารถขยายเส้นผ่านศูนย์กลางได้เพิ่มขึ้นด้วย โดยที่  $r_n > r$  ดังแสดงในรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการขยายตัวของวัสดุเนื่องจากความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3 แม่เหล็กไฟฟ้า

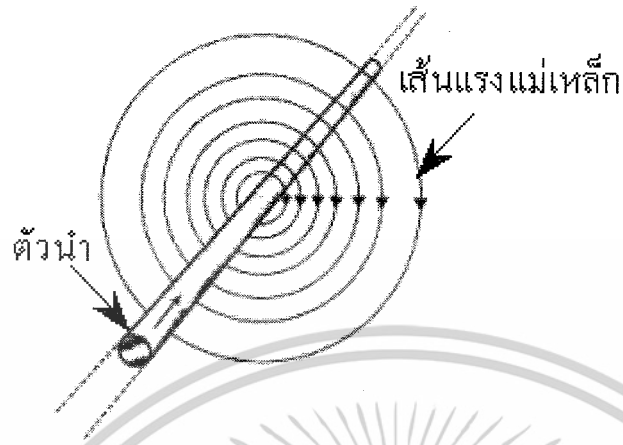
### 3.1 สนามแม่เหล็ก

ในปี ค.ศ. 1819 แฮนส์ คริสเตียน เอออสเตด (Hans Christian Oersted) นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์ก ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้า และพบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นเสมอ

การทดลองของเอออสเตดนั้น คือ นำตัวนำไฟฟ้า AB มาต่อเข้ากับเซลล์ไฟฟ้า และให้ตัวนำนั้นวางขนานกับเข็มทิศที่วางอยู่ที่ตัวนำนั้น เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำจะทำให้เข็มทิศเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวขนานเดิม โดยเข็มทิศจะตั้งฉากกับตัวนำ AB แต่เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับทางเข็มทิศจะเกิดการเบี่ยงเบนกลับทางไปอีกทางหนึ่ง ซึ่งทำมุมกับตำแหน่งเดิม 180 องศา และยังพบอีกว่าถ้าให้ขดลวดตัวนำทำมุม 90 องศากับเข็มทิศแล้ว เข็มทิศจะไม่เบี่ยงเบนไปในทิศใดๆเลย

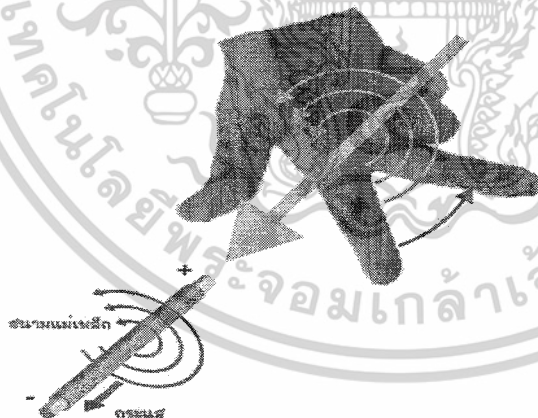
เอออสเตดยังค้นพบอีกว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้านั้นประกอบไปด้วยเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนหนึ่งจัดเรียงเป็นวงรอบๆ ตัวนำที่กระแสไหลผ่านนั้น โดยตัวนำจะเป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมเหล่านั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆตัวนำนี้ถ้ายังอยู่ห่างจากตัวนำมากอำนาจแม่เหล็กก็ยิ่งน้อย การเกิดสนามแม่เหล็กนี้สามารถแสดงได้ดังรูป 2.2 โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ในแนวตั้งทะลุผ่านกระดาษแข็ง แล้วนำเข็มทิศวางไว้บนกระดาษแข็งตามตำแหน่งต่างๆ จะสังเกตเห็นว่าทิศทางจะหันเหเรียงตามกันไปเป็นวงกลมรอบตัวนำ โดยให้สีตำแหน่งหัวเหนือ และสีขาวยุ่ตำแหน่งใต้ หรืออาจใช้ผงโรย โดยจะสังเกตเห็นว่าผลเหล็กเรียงตัวเป็นวงกลม

ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำไฟฟ้ากับทิศทางกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำ สามารถหาได้โดยการใช้กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก คือให้ใช้มือขวากำรอบตัวนำไฟฟ้า โดยให้หัวแม่มือชี้ไปตามความยาวของตัวนำ แทนทิศทางกระแสไฟฟ้า และให้นิ้วทั้งสี่ที่เหลือกำรอบตัวนำโดยนิ้วทั้งสี่นั้นจะแทนทิศทางกระแสของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำนั้นดังแสดงในรูป 2.3



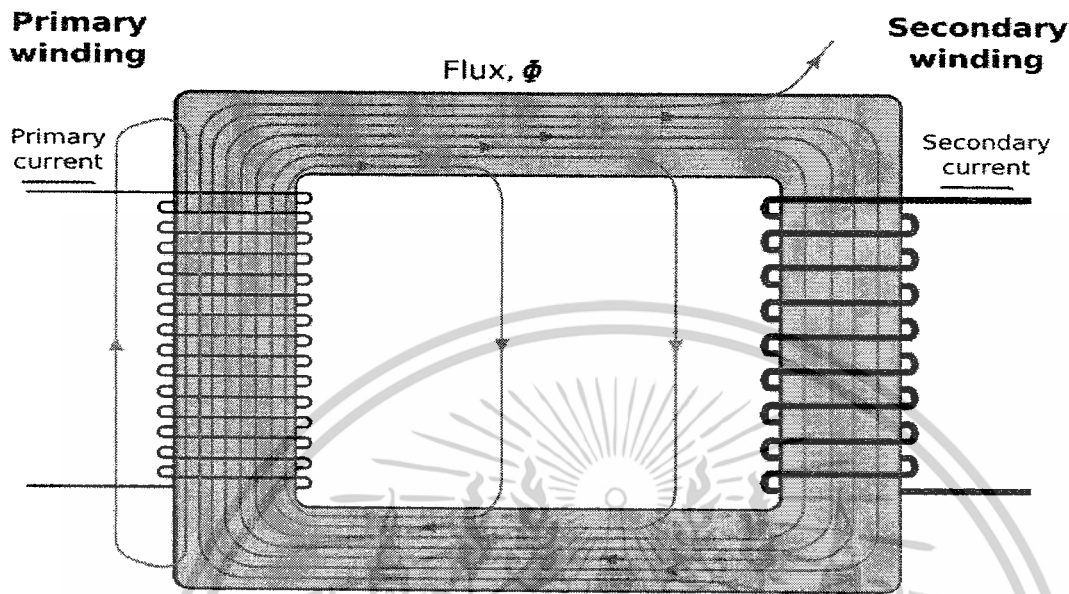
รูปที่ 3.1 แสดงการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ

ลูกศรที่ใช้ในวงจรไฟฟ้าจะใช้แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าไปตามความยาวของตัวนำไฟฟ้า โดยจะกำหนดให้ที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้าซึ่งเห็นกันลูกศรนั้นแทนด้วยเครื่องหมายกากบาท(+) ส่วนด้านที่เป็นกระแสไฟฟ้าไหลออกซึ่งเห็นเป็นหัวลูกศรแทนด้วยเครื่องหมายจุด(.) และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดรอบตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.4 และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 3.2 แสดงกฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

### 3.2 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Magnetic Leakage Flux)

เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลเป็นเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนหนึ่งที่ไม่ไหลไปตามความต้องการดังแสดงในรูปเส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการและใช้ประโยชน์ได้จริงๆ ได้ก็คือเส้นแรงแม่เหล็กที่ป่านช่องอากาศเท่านั้น ส่วนเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลที่ไม่ไหลผ่านช่องว่างตามต้องการเรียกเส้นแรงแม่เหล็กนี้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

ถ้าต้องการให้เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลน้อยที่สุดนั้นต้องให้ขดลวดขุดที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กอยู่ใกล้ช่องว่างหรือจุดที่ต้องการใช้เส้นแรงแม่เหล็กนั้นๆ ซึ่งเราจะสามารถทราบได้ว่ามีการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก ได้จากการเอาเข็มทิศไปวางไว้ในบริเวณที่มีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล และก็จะยากมากที่จะไม่ให้มีการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก เครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดที่อาศัยอำนาจแม่เหล็ก เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์อย่างดีจะมีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลประมาณ 15-20%

ถ้ากำหนด

$\Phi_1$  = เส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้น หรือเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั้งหมด

$\Phi$  = เส้นแรงแม่เหล็กที่สามารถใช้งานได้จริงๆ

จากการทดลองของฮอปคินสัน (Hopkinson) พบว่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลจะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นมาต่อเส้นแรงแม่เหล็กที่สามารถใช้งานได้จริงๆ โดยสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วนี้ จะใช้สัญลักษณ์  $\lambda$  และสามารถหาได้จากสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda = \Phi_1 / \Phi$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลนี้เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของฮอปकिनสันถ้าค่าสัมประสิทธิ์มากแสดงว่าออกแบบเครื่องจักรไม่ดี แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าสัมประสิทธิ์น้อยแสดงว่าออกแบบเครื่องจักรได้ดี โดยในปัจจุบันค่าสัมประสิทธิ์ของฮอปकिनสันประมาณ 1.1 - 1.25

### 3.3 การเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic induction)

ในปี ค.ศ. 1831 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ คือ ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ได้ค้นพบหลักฐานเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า คือ ถ้ามีขดลวด C ปลายของขดลวดต่อกับกัลวานอิมิตอร์ G แล้วนำแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่เข้าไปในขดลวด เข็มของกัลวานอิมิตอร์จะบ่ายเบนไปในทิศทางหนึ่งแสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด C หลังจากการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กถาวรหยุดลง เข็มของกัลวานอิมิตอร์จะกลับมายังที่ศูนย์ตามเดิมผลการทดลองพิสูจน์ได้ว่ามี

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ เมื่อเทียบกับขดลวด C

ผลที่ได้รับจากการทดลองเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า สรุปได้ดังนี้

- ก. เมื่อลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดเส้นแรงแม่เหล็ก หรือ เส้นแรงแม่เหล็ก เคลื่อนที่ตัดลวดตัวนำจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด
- ข. ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็ก และขึ้นอยู่กับทิศทางของลวดตัวนำที่เคลื่อนที่สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก
- ค. ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราเร็วที่ลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดหรือถูกตัดโดยเส้นแรงแม่เหล็ก

### 3.4 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity) ใช้สัญลักษณ์ H

คือแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวของวงจรมแม่เหล็ก วงจรมแม่เหล็ก วงจรมแม่เหล็กที่มีเส้นแรงแม่เหล็กสม่ำเสมอจะมีค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยหน่วยความยาวคงที่ตลอดแนวของเส้นแรงแม่เหล็กนั้น นั่นหมายความว่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าคงที่ตลอดแนวของสนามแม่เหล็กนั้นด้วย หน่วยความเข้มสนามแม่เหล็ก คือ แอมแปร์/เมตร ความเข้มสนามแม่เหล็กเราสามารถวัดได้หรือหาได้จากการนำเอาขั้วเหนือเดี่ยว (N) ที่มีแรงแม่เหล็ก 1 หน่วยขั้วไปวางไว้ ณ จุดใดจุดหนึ่งในสนามแม่เหล็ก ค่าแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระทำของขั้วเหนือเดี่ยวกับสนามแม่เหล็กก็จะเป็นค่า ความเข้มสนามแม่เหล็กนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มสนามแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการคือ

$$H = \zeta / l = Ni/l$$

โดย  $H$  = ความเข้มสนามแม่เหล็ก

$l$  = ความยาวของวงจรมแม่เหล็ก

### 3.5 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก(Magnetic flux density) ใช้สัญลักษณ์ $B$

เพื่อให้ทราบถึงปริมาณที่แน่นอนของเส้นแรงแม่เหล็ก จึงต้องกำหนดพื้นที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลผ่านต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กหาได้จากสมการ

$$B = \Phi / A$$

$B$  = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

$\Phi$  = เส้นแรงแม่เหล็ก

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก

### 3.6 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก(Magneto motive force) ใช้สัญลักษณ์ $\zeta$

หมายถึง ความสามารถในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็ก เป็นแหล่งที่ทำหน้าที่ส่งเส้นแรงแม่เหล็ก ให้เคลื่อนที่ผ่านไปมาในวงจรมแม่เหล็กซึ่งคล้ายกับแรงดันไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ส่งกำลังไฟฟ้าเข้าไปในโหลด หน่วยของงานคิดเป็นจูล แต่หน่วยของแรงดันแม่เหล็กใช้เป็นแอมแปร์เทิร์น (A-T)

แรงดันแม่เหล็กหาได้จากสมการคือ

$$\begin{aligned} \zeta &= m.m.f \\ &= Ni \end{aligned}$$

$\zeta$  = แรงดันแม่เหล็ก

$l$  = กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด  $\mu$

$N$  = จำนวนรอบขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 ความซึมซาบได้สัมพัทธ์(Relative permeability) ใช้สัญลักษณ์ $\mu_r$

จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ที่แท้จริงมันจะขึ้นอยู่กับโมเลกุล ของแกนเหล็กว่าจะสามารถวางตัวในแนวเดียวกันได้ง่ายเพียงใด เรียกว่าซึมซาบได้ ความซึมซาบนี้เป็นอัตราส่วนของ ความหนาแน่นแห่งเส้นแรงแม่เหล็กต่อความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mu = B / H = \mu_0 \mu_r \quad (\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7})$$

ความซึมซาบได้คือความยินยอม ให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านโดยความซึมซาบสุญญากาศเป็น 1 ซึ่งปกติทั่วไปแล้ว จะกล่าวถึงเฉพาะความซึมซาบได้สัมพัทธ์

### 3.8 ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative permeability) ใช้สัญลักษณ์ $\mu_r$

คืออัตราส่วนของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตได้ในวัสดุสารแม่เหล็กต่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตได้ในสุญญากาศ โดยใช้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กค่าเดียวกัน เช่น ในอากาศ  $\mu_r = 1$  แต่ในโลหะผสม เช่น นิกเกิล-เหล็ก มี  $\mu_r$  สูงถึง 100000

## บทที่ 4

### แม่เหล็กและหม้อแปลงเบื้องต้น

#### 4.1 หลักการพื้นฐานทางไฟฟ้า

ขดลวด 2 ชุด มีจำนวนรอบ  $N_1, N_2$  ตามลำดับ พันอยู่บนแกนเหล็กเดียวกัน ซึ่งปกติแกนจะทำด้วยวัสดุ Ferromagnetic ที่มีค่า permeability,  $\mu$  สูงเมื่อเทียบกับอากาศ ค่า  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m ส่วนค่า permeability ของวัสดุอื่น,  $\mu$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\mu_0 \mu_r$  โดยที่  $\mu_r$  คือค่า relative permeability ในกรณีของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าค่า  $\mu_r$  อาจจะมีค่าสูงถึง 2,000 – 4,000

โดยทั่วไปแล้วฟลักซ์ (flux) ที่เกิดจากขดลวดแต่ละชุด สามารถแยกได้เป็นสองส่วน คือ leakage flux,  $\Phi_1$  และ magnetizing flux,  $\Phi_m$  ทั้ง 2 ส่วนจะถูกกำหนดทิศทางให้เป็น + ตามกฎมือขวาเทียบกับทิศทางการไหลของกระแสในขดลวด

ในการวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าบ่อยครั้งกำหนดให้มีค่าบวก และมีทิศทางการไหลออกจากส่วนบนของขดลวดชุดที่ 2 และใช้เครื่องหมาย . (dot) กำกับที่ส่วนบนของขดลวดฟลักซ์ที่ผ่านขดลวดแต่ละชุดสามารถอธิบายได้ ดังนี้

$$\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{m1} + \Phi_{m2} \quad (4-1)$$

$$\Phi_2 = \Phi_{12} + \Phi_{m2} + \Phi_{m1} \quad (4-2)$$

Leakage flux,  $\Phi_{11}$  เกิดจากกระแสไหลวนในขดลวดชุดที่ 1 และ link เฉพาะขดลวดชุดที่ 1 เท่านั้น เช่นเดียวกับ leakage flux,  $\Phi_{m2}$  ที่เกิดจากกระแสไหลวนในขดลวดที่ 2 และ link ขดลวดชุดที่ 2 และชุดที่ 1 ทุกรอบ

ถึงขณะนี้ ควรทำความเข้าใจด้วยว่า ที่อธิบายผ่านมานั้นเป็นกรณีของจินตภาพ (ideal) เพราะในความเป็นจริงแล้ว leakage flux, อาจจะไม่ link ทุกรอบของขดลวดที่ทำให้เกิดมันขึ้น เช่น อาจจะไม่ ทุกรอบของขดลวดชุดที่ 1 และ magnetizing flux,  $\Phi_m$  ของขดลวดชุดหนึ่งก็อาจจะไม่ link ทุกรอบของขดลวดอีกชุดหนึ่ง (เช่น  $\Phi_{m1}$  อาจจะไม่ link ทุกรอบของขดลวดชุดที่ 2) เพราะฉะนั้นในทางปฏิบัติควรที่จะต้องพิจารณาถึงจำนวนรอบสมมูลย์ (equivalent number) แทนที่จะพิจารณาถึงจำนวนรอบของขดลวด ดังนั้นค่าอินดักแตนซ์ของวงจรที่เชื่อมโยงกันทางแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้าอื่น จึงต้องคำนวณจากสมการทดสอบสมการไฟฟ้าสามารถถูกเขียนในรูปของ matrix ได้ดังนี้  $\lambda_1, \lambda_2 \quad \lambda \quad \lambda \quad N_1 \quad N_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v = Ri + \frac{d\lambda}{dt} \quad (4-3)$$

โดยที่  $R = \text{diag} [R_1 \ R_2]$

ความต้านทาน  $R_1, R_2$  และ flux linkage  $\lambda_1, \lambda_2$  สัมพันธ์กับขดลวดชุดที่ 1, 2 ตามลำดับ เมื่อสมมุติให้  $\Phi_1 (\Phi_2)$  อยู่กับจำนวนรอบสมมูลย์  $N_1 (N_2)$  ของขดลวดชุดที่ 1 (2), จะได้ความสัมพันธ์ของ flux linkage ดังนี้

$$\lambda_1 = N_1 \Phi_1 \quad (4-4)$$

$$\lambda_2 = N_2 \Phi_2 \quad (4-5)$$

โดยที่  $\Phi_1$  และ  $\Phi_2$  เป็นไปตามสมการ (4-1) และ (4-2) ตามลำดับวงจรที่เชื่อมโยงกันทางแม่เหล็กโดยที่มีในระบบแม่เหล็กที่มีลักษณะเชิงเส้น

ถ้าไม่เกิดการอิ่มตัว (saturation) ในระบบแม่เหล็ก ก็สามารถพิจารณาได้ว่าระบบแม่เหล็กนั้นมีลักษณะเชิงเส้น (linear) และฟลักซ์ มีค่าดังนี้

$$\Phi_{11} = \frac{N_1 i_1}{R_{11}} \quad (4-6)$$

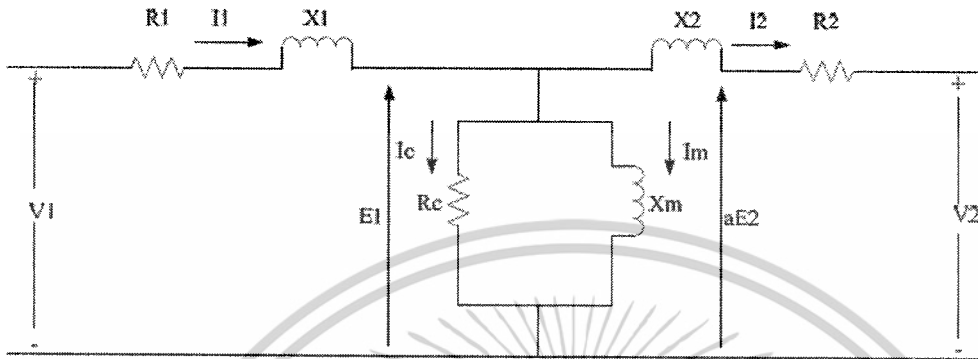
$$\Phi_{m1} = \frac{N_1 i_1}{R_m} \quad (4-7)$$

$$\Phi_{12} = \frac{N_2 i_2}{R_{12}} \quad (4-8)$$

$$\Phi_{m2} = \frac{N_2 i_2}{R_m} \quad (4-9)$$

โดยที่  $R_{11}$  และ  $R_{12}$  คือ reluctance ของเส้นทางที่มีการ leak ของฟลักซ์ (reluctance of leakage path) ผลคูณระหว่าง 1 กับ  $N$  (ampere-turns) คือ mmf (magneto motive force) ซึ่งคำนวณได้จากกฎของแอมแปร์ (Ampere's)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงที่ติดตั้งปฐมภูมิ

Reluctance ของเส้นทางในแกนที่ฟลักซ์ผ่าน (reluctance of leakage path),  $R_m$  ของที่แสดงในรูป 4.1 สามารถถูกคำนวณได้โดยที่มีความถูกต้องเพียงพอ จากความสัมพันธ์ ดังนี้

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad \text{Amp/Wb} \quad (4-10)$$

โดยที่  $l$  : ความยาวเฉลี่ยของเส้นทางที่ฟลักซ์ผ่าน (mean of equivalent length of magnetic path)

$A$  : พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

$\mu$  : Permeability ของแกนเหล็ก

แทนค่าสมการ (4-6) ถึง (4-9) ลงในสมการ (4-1) และ (4-2) จะได้

$$\Phi_1 = \frac{N_1 i_1}{R_{l1}} + \frac{N_1 i_1}{R_m} + \frac{N_2 i_2}{R_m} \quad (4-11)$$

$$\Phi_2 = \frac{N_2 i_2}{R_{l2}} + \frac{N_1 i_1}{R_m} + \frac{N_2 i_2}{R_m} \quad (4-12)$$

แทนค่าสมการ (4-11) ถึง (4-12) ลงในสมการ (4-4) และ (4-5) จะได้

$$\lambda_1 = \frac{N_1^2 i_1}{R_{l2}} + \frac{N_1^2 i_1}{R_m} + \frac{N_1 N_2 i_2}{R_m} \quad (4-13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_2 = \frac{N_2^2 i_2}{R_{l2}} + \frac{N_2^2 i_2}{R_m} + \frac{N_1 N_2 i_1}{R_m} \quad (4-14)$$

จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์ของ 2 เทอมแรกในสมการ (4-13) ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดชุดที่ 1 และ Reluctance ของระบบแม่เหล็ก แต่ไม่ขึ้นอยู่กับชุดที่ 2 ในทำนองเดียวกัน สำหรับสมการ (4-14) ดังนั้น จึงกำหนด (define) เทอม self – inductance ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} L_{11} &= \frac{N_1^2}{R_{l1}} + \frac{N_1^2}{R_m} \\ &= L_{l1} L_{m1} \end{aligned} \quad (4-15)$$

$$\begin{aligned} L_{22} &= \frac{N_2^2}{R_{l2}} + \frac{N_2^2}{R_m} \\ &= L_{l2} L_{m2} \end{aligned} \quad (4-16)$$

โดยที่  $L_{l1}$  และ  $(L_{l2})$  คือ leakage inductance ของขดลวดที่ 1 และ (2) ตามลำดับ และ  $L_{m1}$ ,  $(L_{m2})$  คือ magnetizing inductance ของขดลวดชุดที่ 1 และ (2) ตามลำดับ และจากสมการ (4-15) และ (4-16) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{L_{m2}}{N_2^2} = \frac{L_{m1}}{N_1^2} \quad (4-17)$$

ส่วนสัมประสิทธิ์ของเทอมที่ 3 ในสมการ (4-13) และ (4-14) ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดทั้ง 2 ชุด ถูกกำหนดให้เป็น mutual inductance ดังนี้

$$L_{12} = \frac{N_1 N_2}{R_m} \quad (4-18)$$

$$L_{21} = \frac{N_2 N_1}{R_m} \quad (4-19)$$

เห็นได้ว่า  $L_{12} = L_{21}$  และ mutual inductance มีความสัมพันธ์กับ magnetizing inductance ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 L1 &= \frac{N_2 N_{m1}}{N_1} \\
 &= \frac{N_1}{N_2} L_{m2}
 \end{aligned} \tag{4-20}$$

ดังนั้น สามารถเขียน flux leakage ในรูปของ matrix ได้

$$\lambda = Li \tag{4-21}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 L &= \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{pmatrix} \\
 L &= \begin{pmatrix} L_{11} + L_{m1} & \frac{N_2}{N_1} L_{m1} \\ \frac{N_1}{N_2} L_{m2} & L_{12} + L_{m2} \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{4-22}$$

และสามารถแทนค่า inductance matrix ลงในสมการแรงดันไฟฟ้า (4-3) เพื่อหาวงจรสมมูลย์ที่มีความลักษณะเป็น T ได้ (equivalent T circuit) ดังนี้  
จากสมการ (4-21)

$$\lambda_1 = L_{11} i_1 + L_{m1} \left( i_1 + \frac{N_2}{N_1} i_2 \right) \tag{4-23}$$

$$\lambda = L_{12} i_2 + L_{m2} \left( \frac{N_1}{N_2} i_1 + i_2 \right) \tag{4-24}$$

ซึ่งอาจจะแทนค่าเทอม  $\frac{N_1}{N_2} i_2$  หรือ  $\frac{N_2}{N_1} i_2$  ด้วยตัวแปรอื่นได้ ในที่นี้เลือกแทนค่าเทอม  $\frac{N_2}{N_1} i_2$  ด้วย ตัวแปร  $i_2'$  ดังนี้

$$i_2' = \frac{N_2}{N_1} i_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ 
$$N_1 i_2' = N_2 i_2 \quad (4-25)$$

ซึ่งหมายความว่าเมื่อ  $i_2'$  ไหลในขดลวดชุดที่ 1 จะทำให้เกิด mmf (ampere-turn) ค่าเท่ากับ mmf ที่เกิดจากกระแส  $i_2$  ไหลในขดลวดชุดที่ 2 ซึ่งเท่ากับเป็นการโอนย้าย (transfer) กระแสในขดลวดชุดที่ 2 ไปยังขดลวดชุดที่ 1 โดยที่ขดลวดชุดที่ 1 เป็นขดลวดอ้างอิง (reference coil)

ในทำนองเดียวกัน ถ้าเลือกแทนค่าเทอม  $\frac{N_2}{N_1} i_2$  ด้วยตัวแปร  $i_1'$  จะได้

$$N_2 i_1' = N_1 i_1 \quad (4-26)$$

ในที่นี้  $i_1'$  คือ กระแสเมื่อไหลในขดลวดชุดที่ 2 จะทำให้เกิด mmf เท่ากับ mmf ที่เกิดจาก  $i_1$  ไหลในขดลวดชุดที่ 1 ซึ่งเท่ากับเป็นการโอนย้ายกระแสในขดลวดชุดที่ 1 ไปยังขดลวดชุดที่ 2 จากสมการ (3-25)

$$i_2' = \frac{N_2}{N_1} i_2 \quad (4-27)$$

ซึ่งการเปลี่ยนตัวแปรจะไม่ทำให้กำลังงาน (power) เปลี่ยน ดังนั้น

นั่นคือ 
$$i_2' v_2' = i_2 v_2$$

$$v_2' = \frac{N_1}{N_2} v_2 \quad (4-28)$$

เนื่องจากเทอม flux linkage มีหน่วยเป็น volt – second ดังนั้นในการแทนตัวแปรใหม่ ก็จะทำให้ในทำนองเดียวกับแรงดันไฟฟ้าเช่นในสมการ (4-28)

นั่นคือ 
$$\lambda_2' = \frac{N_1}{N_2} \lambda_2 \quad (4-29)$$

แทนค่าสมการ (4-27) ลงในสมการ (4-24) และคูณ (4-24) ด้วย  $\frac{N_1}{N_2}$  จะได้เทอม  $\lambda_2'$  และเมื่อ

แทน  $L_{m2}$  ด้วย  $\frac{N_2^2}{N_1^2} L_{m1}$  ในสมการ (4-23) จะได้

$$\lambda_1 = L_{11} i_1 + L_{m1} (i_1 + i_2) \quad (4-30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_2' = L_{12}'i_2 + L_m(i_1 + i_2) \quad (4-31)$$

โดยที่

$$L_{12}' = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 L_{12} \quad (4-32)$$

สมการแรงดันไฟฟ้า จะมีรูปดังนี้

$$v_1 = R_1 i_1 + \frac{d\lambda_1}{dt} \quad (4-33)$$

$$v_2' = R_2 i_2' + \frac{d\lambda_2'}{dt} \quad (4-34)$$

โดยที่

$$R_2' = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2 \quad (4-35)$$

## 4.2 ค่าสูญเสียทางไฟฟ้า

ค่าสูญเสียในขดลวด (copper loss) เป็น กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในขดลวดทองแดงที่มาใช้พันเป็นขดปฐมภูมิ และขดทุติยภูมิ นั้นเอง โดยกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียนี้จะเปลี่ยนรูปเป็นความร้อน ซึ่งค่าเท่ากับ  $I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = (I_1')^2 R_{eq}$  กำลังสูญเสียนี้ ขึ้นกับปริมาณกระแสที่ไหลยกกำลังสอง และจะเห็นว่า กระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ แล้วแต่ขนาดของโหลดว่าจะมีค่าเป็นเท่าไร

ค่าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy current loss) เป็นกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กได้ไปเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในแกนเหล็ก เมื่อแกนเหล็กของหม้อแปลงเป็นเหล็กทั้งก้อน ในนั้นจะมีเส้นแรงแม่เหล็กอยู่ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ผ่านไป ดังนั้นจึงเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นในแกนเหล็กได้ เมื่อมีแรงดันจะมีกระแสไหลวน (Eddy current) ขึ้นในเนื้อเหล็ก กระแสไหลวนในทิศทวนเข็มนาฬิกา เนื่องจากทางที่กระแสไหลวนนั้นมีค่าความต้านทาน จึงทำให้มีกำลังสูญเสียเท่ากับ  $I^2 R = \frac{V^2}{R}$  ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียนี้ จะเปลี่ยนรูปไปเป็นความร้อนในแกนเหล็ก จะเห็นว่าการเกิดความร้อนขึ้นในตลับลูกปืนได้นั้นคล้ายๆ กับการเกิดความร้อนในแกนเหล็กเนื่องจากกระแสไหลวน

กฎของโอห์ม (Ohm's law) พิจารณาขดลวดทองแดง ซึ่งต่อปลายทั้งสองเข้ากับขั้วแบตเตอรี่ที่มีความต่างศักย์  $V$  จะมีกระแสในเส้นลวด โดยกระแส  $I$  จะเป็นสัดส่วนกลับกับความต้านทาน  $R$  และจากกฎของโอห์ม กระแสไฟฟ้า  $I$  ที่ไหลจะเป็นสัดส่วนตรงกับความต่างศักย์ที่ประยุกต์เข้าไป และเป็นสัดส่วนกลับกับความต้านทานของลวด โดยที่

$$i = \frac{V}{R} \quad (4-36)$$

เมื่อ  $I$  = กระแสไฟฟ้า A (แอมแปร์)  
 $V$  = ความต่างศักย์ V (โวลท์)  
 $R$  = ความต้านทาน  $\Omega$  (โอห์ม)

ความต้านทานไฟฟ้า  $R$  ของลวดตัวนำไฟฟ้า จะเป็นสัดส่วนตรงกับความยาว และเป็นสัดส่วนกลับกับพื้นที่หน้าตัด  $A$  ปริมาณเหล่านี้จะสัมพันธ์ โดยมีค่าคงที่ของวัสดุ เรียกว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า  $\rho$  ดังนี้ คือ

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (4-37)$$

หน่วยของสภาพความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งมีค่าคงที่สำหรับวัสดุที่อุณหภูมิเฉพาะ คือ

$$\rho = R \frac{A}{l} = \frac{\Omega m^2}{m} = \Omega \cdot m \quad (4-38)$$

การเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวด อาจพิจารณาในรูปของสภาพความนำไฟฟ้าแทนที่จะอยู่ในรูปของสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4-39)$$

จากสมการต่างๆ ข้างต้น จะเห็นว่าพลังงานความร้อนสะสมจะมีค่า

$$P = I^2 R \quad (4-40)$$

ซึ่งพลังงานความร้อนจะแปรผันตาม  $I$  และ  $R$  ดังนั้นจะเห็นว่าเมื่อกระแส ( $I$ ) มีค่าสูงขึ้น ก็ทำให้เกิดความร้อนขึ้นในโลหะเครื่องขยายตัวลูปป็น (Induction Bearing Heater) เปรียบได้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้หลักการ พันขดลวดต้านปฐมภูมิจำนวนรอบมาก และพันขดลวดต้านทุติยภูมิด้วยจำนวนรอบน้อยๆ บนแกนเหล็กเดียวกัน อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าต่อแรงดันไฟฟ้าต้านออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

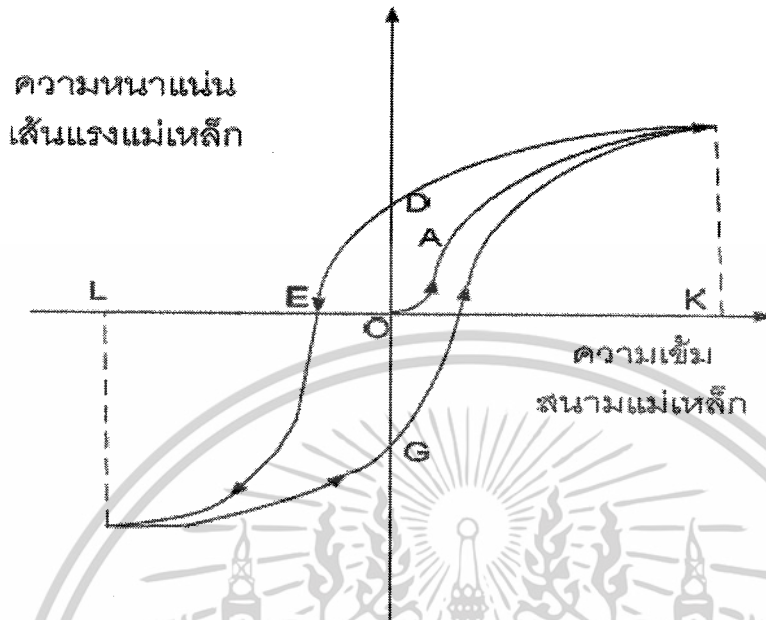
เท่ากับอัตราส่วนของการพันขดลวด ขณะที่กำลังไฟฟ้าคงเท่ากัน ดังนั้นขดลวดด้านทุติยภูมิที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำๆ จะมีกระแสไฟฟ้าสูง

ในกรณีของเครื่องขยายตลับลูกปืน ตลับลูกปืนเสมือนขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งถูกลัดวงจร และมีจำนวนรอบเพียงรอบเดียว ซึ่งทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลวน (Eddy current) ในตลับลูกปืนสูงมาก ดังนั้นเกิดปริมาณความร้อนจำนวนมากที่ตลับลูกปืน ขณะที่คาน (Yoke) ยังคงมีอุณหภูมิปกติเหมือนเดิม

### ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

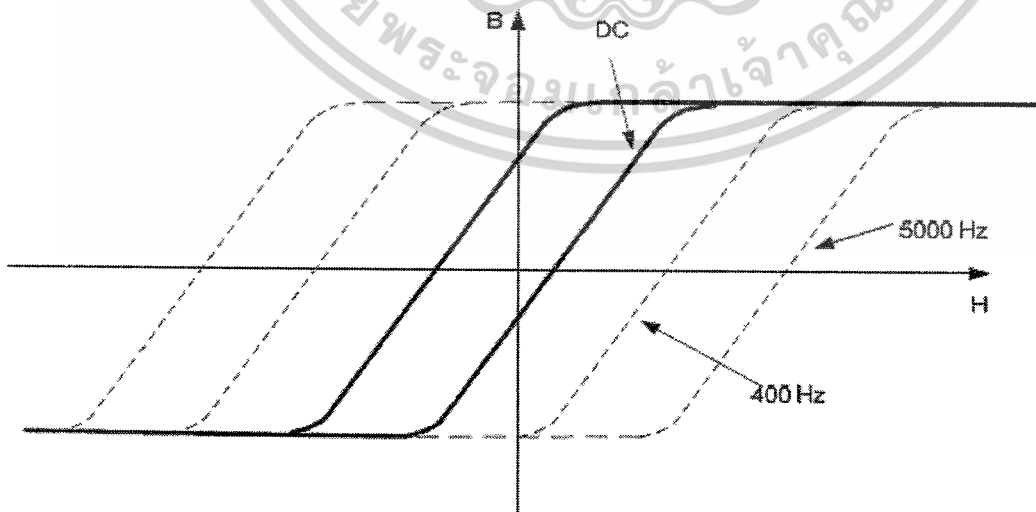
เมื่อป้อนแรงเคลื่อนแม่เหล็กให้กับสารเฟอร์โรแมกเนติก โดยการป้อนกระแสสลับให้กับขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็ก เมื่อกระแสเพิ่มขึ้น ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ก็เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้เส้นแรงแม่เหล็ก (B) เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัวทางด้านบวก ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองแทนด้วยเส้นโค้ง OAK เมื่อลดความเข้มสนามแม่เหล็กลงเป็นศูนย์ จะพบว่ายังมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเหลืออยู่ คือ OD เรียกว่า อำนาจแม่เหล็กตกค้าง (Residual magnetism) ถ้าต้องการให้อำนาจแม่เหล็กตกค้างเป็นศูนย์ จะต้องเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงข้าม ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลง จนกระทั่งเป็นศูนย์ที่จุด E ค่าของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก OE ที่ให้อำนาจแม่เหล็กตกค้างเป็นศูนย์มีชื่อเรียกว่า โคเออร์ซิฟฟอर्स (Coercive force) ถ้าหากว่ายังคงเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กต่อไปอีก จะเป็นเหตุให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงข้าม จนกระทั่งถึงจุดที่แกนเหล็กเกิดการอิ่มตัวทางด้านลบแทนด้วยเส้น EF หลังจากนั้นถ้าทำการกลับทิศของการป้อนความเข้มสนามแม่เหล็กอีกครั้ง ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นตามเส้นทาง FG ณ จุดนั้นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ แต่จะยังคงมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างทางด้านลบอยู่ และถ้าหากยังคงเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กต่อไปอีก จนถึงค่าค่าหนึ่ง ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเป็นศูนย์ และหากยังคงเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กต่อไป ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กก็จะเพิ่มขึ้น จนเกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กทางด้านบวก เป็นการครบรอบเส้นทางเดินของกราฟ พฤติกรรมดังกล่าวนี้จะเกิดซ้ำอีกเมื่อมีการลดความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กอีกครั้งหนึ่ง เราเรียกเส้นทาง CDEFGC วงรอบฮิสเทอรีซิส ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พื้นที่วงรอบฮิสเทอรีซิสจะมีความสัมพันธ์กับการสูญเสียในแกนที่จะกล่าวในตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 วงรอบฮิสเทอรีซิส

ในการทดสอบสารแม่เหล็ก ในห้องทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กอย่างช้าๆ ซึ่งวงรอบฮิสเทอรีซิสที่ได้จากการทดสอบในลักษณะดังกล่าว เรียกว่า วงรอบ ฮิสเทอรีซิสไฟฟ้ากระแสตรง (dc hysteresis หรือ static hysteresis loop) แต่ถ้าทำการทดสอบสารแม่เหล็กด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กอย่างรวดเร็ว ยกตัวอย่างเช่น เปลี่ยนแปลงด้วยความถี่ 50 Hz วงรอบฮิสเทอรีซิสที่ได้จะขยายขึ้น และยังความถี่สูงมากขึ้นวงรอบฮิสเทอรีซิสก็จะยิ่งขยายใหญ่ขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.3

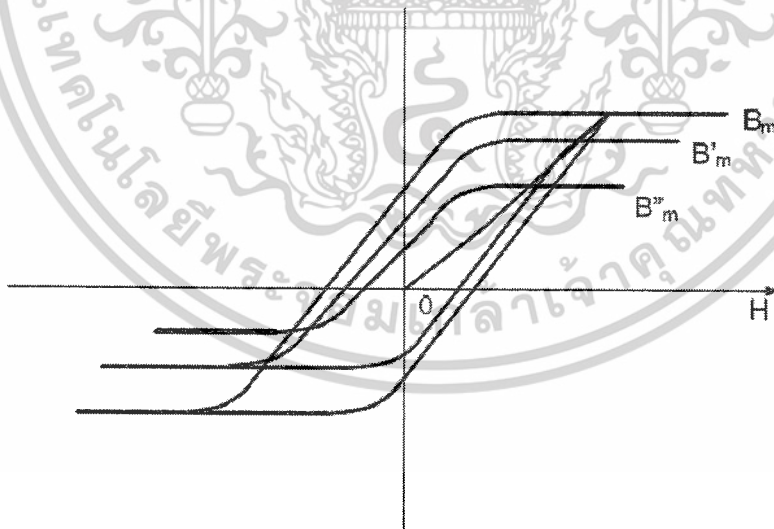


รูปที่ 4.3 ผลของความถี่ต่อการเกิดวงรอบฮิสเทอรีซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

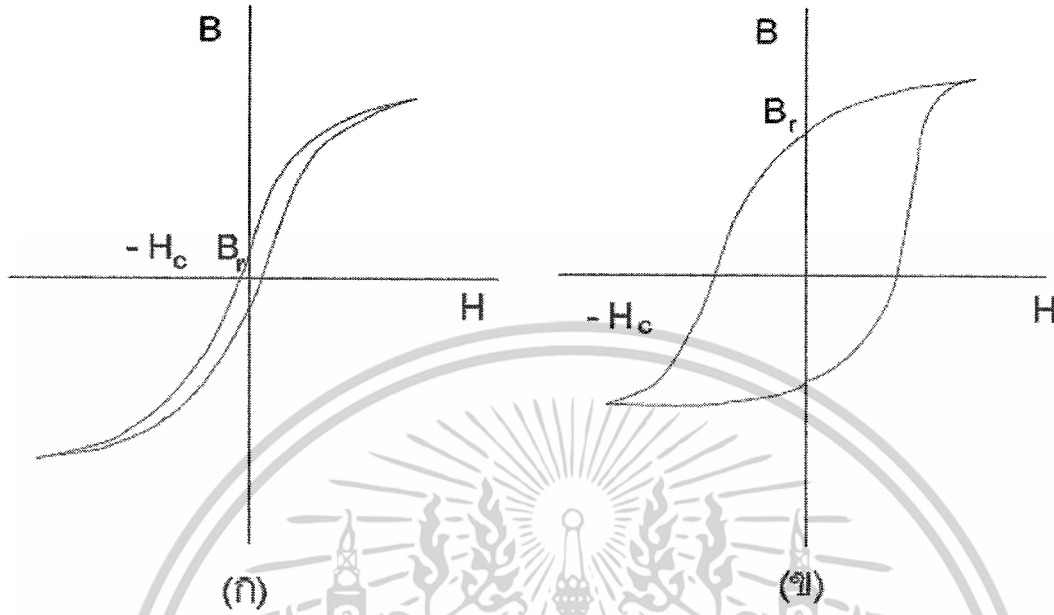
และจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ต่างๆ พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจากค่า  $B_m$  ไปเป็น  $-B_m$  และกลับไปเป็น  $B_m$  อีกครั้ง พลังงานที่ใช้ดังกล่าวจะเรียกว่า ค่าความสูญเสียจากฮิสเตอรีซิส (hysteresis loss) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับพื้นที่วงรอบฮิสเตอรีซิสอีกด้วย สาเหตุที่วงรอบฮิสเตอรีซิสมีขนาดขยายใหญ่ขึ้นเมื่อป้อนความเข้มสนามแม่เหล็กที่ความถี่ค่าต่างๆ เพราะเมื่อความถี่สูงขึ้นก็จะทำให้เกิดกระแสไหลวน (eddy current) ซึ่งเป็นพลังงานสูญเสีย ที่ทำให้วงรอบฮิสเตอรีซิสขยายใหญ่ขึ้น

และถ้ากำหนดให้ค่า ความถี่ จำนวนรอบ และค่าความหนาแน่นแม่เหล็กมีค่าคงที่ จะได้ว่าค่าเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อน ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนเข้าค่าหนึ่ง ก็จะได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดค่าหนึ่ง ยกตัวอย่างเช่น ถ้ากำหนดให้ วงรอบฮิสเตอรีซิสขนาดใหญ่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.4 กำหนดให้สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสูงสุด และจะได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด  $B_m$  แต่ถ้าทำการลดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับดังกล่าวลง 20% ก็จะได้วงรอบฮิสเตอรีซิสที่เล็กลง ซึ่งรวมถึงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด ที่ต่ำลง  $B'_m$  และถ้าทำการลดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับลงอีกเรื่อยๆ ก็จะทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดลดลงเรื่อยๆ เช่นกัน  $B''_m$  เส้นทางเดินจากจุด  $B_m, B'_m, B''_m$  ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 และจะเรียกว่า normal induction curve ซึ่งจะมีรูปร่างของวงรอบฮิสเตอรีซิสที่คล้ายกัน แต่ที่จุดเริ่มต้น (virgin curve) OBM จะไม่เหมือนกัน



รูปที่ 4.4 ผลของแรงดันต่อการเกิดวงรอบฮิสเตอรีซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 (ก) วงฮิสเตอร์ซิสของแม่เหล็กอ่อน (ข) วงฮิสเตอร์ซิสของแม่เหล็กแข็ง

พฤติกรรมการเกิดวงรอบฮิสเตอร์ซิส สามารถที่จะแบ่งวัสดุแม่เหล็กออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แม่เหล็กอ่อน (soft magnet) และแม่เหล็กแข็ง (hard magnet) ซึ่ง “แม่เหล็กอ่อน” เป็นวัสดุที่ง่ายต่อการทำให้เป็นแม่เหล็กหรือลบล้างอำนาจแม่เหล็ก จึงไม่เป็นแม่เหล็กถาวร ส่วน “แม่เหล็กแข็ง” มีสมบัติตรงข้ามกับแม่เหล็กอ่อน คือ ต้องใช้สนามแม่เหล็กภายนอกความแรงสูงในการทำให้เป็นแม่เหล็ก และการลบล้างอำนาจแม่เหล็กจะทำได้ยาก จึงจัดเป็นแม่เหล็กถาวร ความแตกต่างของแม่เหล็กอ่อนและแม่เหล็กแข็ง (แม่เหล็กถาวร) จะแสดงได้ด้วยวงฮิสเตอร์ซิส (hysteresis loop) โดยแม่เหล็กอ่อนจะมีวงฮิสเตอร์ซิสแคบ ส่วนแม่เหล็กแข็งจะมีวงฮิสเตอร์ซิสกว้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.5

### 4.3 การสูญเสียในแกนเหล็ก

การสูญเสียในแกนเหล็กประกอบด้วยกำลังไฟฟ้า สูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis loss) และกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนภายในแกนแม่เหล็ก (eddy current loss) ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ซิส ( $P_h$ )

พิจารณาพื้นที่ของวงรอบฮิสเตอร์ซิส (ผลคูณของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก) พบว่าเป็นพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่เกิดขึ้นทุกคาบของแรงดัน หรือกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดที่พันรอบแกนเหล็ก พื้นที่ดังกล่าวจะหมายถึงความสูญเสีย ที่เรียกว่า ความสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ซิส ซึ่งสามารถได้จากสมการที่ 4-41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_h = \frac{1}{2} \left[ \frac{B_m^2}{\mu} \right] V f \quad \text{watt} \quad (4-41)$$

- เมื่อ  $B_m$  = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด  
 $\mu$  = ความซึมซาบสนามแม่เหล็ก  
 $V_c$  = ปริมาตรของแกนเหล็ก  
 $f$  = ความถี่

เพื่อที่จะลดปัญหาของความสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิส จะต้องไปใช้แกนเหล็กประเภท soft material ในการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้า

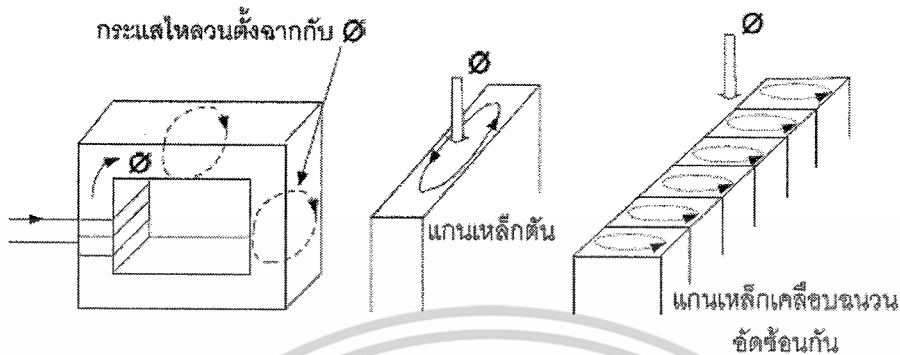
#### 4.3.2 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ( $P_e$ )

เมื่อมีกระแสไหลในตัวนำที่คล้องแกนเหล็กอยู่นั้น ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในแกนเหล็ก สนามแม่เหล็กดังกล่าวจะตัดกับแกนเหล็กซึ่งมีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นในแกนเหล็ก และกระแสก็จะสามารถไหลอยู่ในแกนเหล็กได้ เรียกว่า กระแสไหลวน การเกิดขึ้นของกระแสไหลวนก่อให้เกิดความสูญเสียในทางความร้อนขึ้น เรียกว่า ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-42

$$P_e = K_e f^2 B_m^2 \quad \text{watt} \quad (4-42)$$

- เมื่อ  $K_e$  = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับเนื้อสารที่นำมาทำแกนเหล็ก  
 $f$  = ความถี่  
 $B_m$  = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด

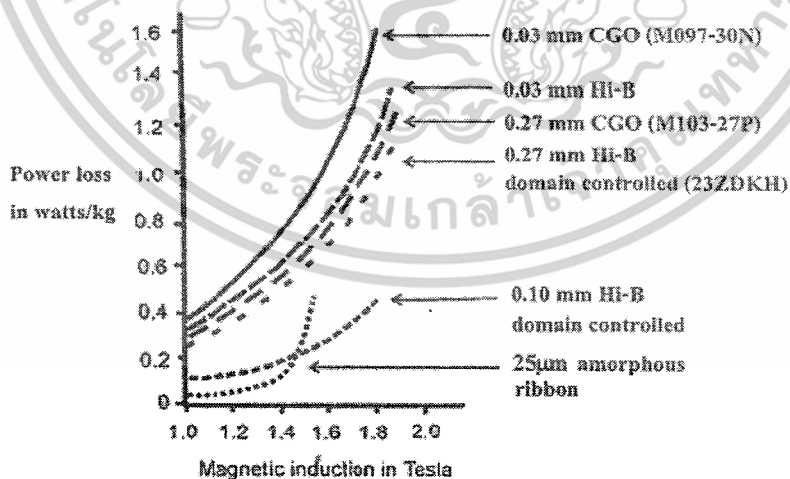
ขนาดของกระแสไหลวน ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก (ความถี่) และความต้านทานไฟฟ้าของแกนเหล็ก การลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนทำได้โดยใช้แกนเหล็กเป็นแบบเหล็กแผ่นอัดซ้อนกัน (Laminated core) ดังรูปที่ 4.6 โดยแต่ละแผ่นจะใช้สารเคลือบผิวที่มีค่าความต้านทานสูง เช่น ฉาบด้วยน้ำมันวานิช



รูปที่ 4.6 การใช้แกนเหล็กแบบเหล็กแผ่นอัดซ้อน เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

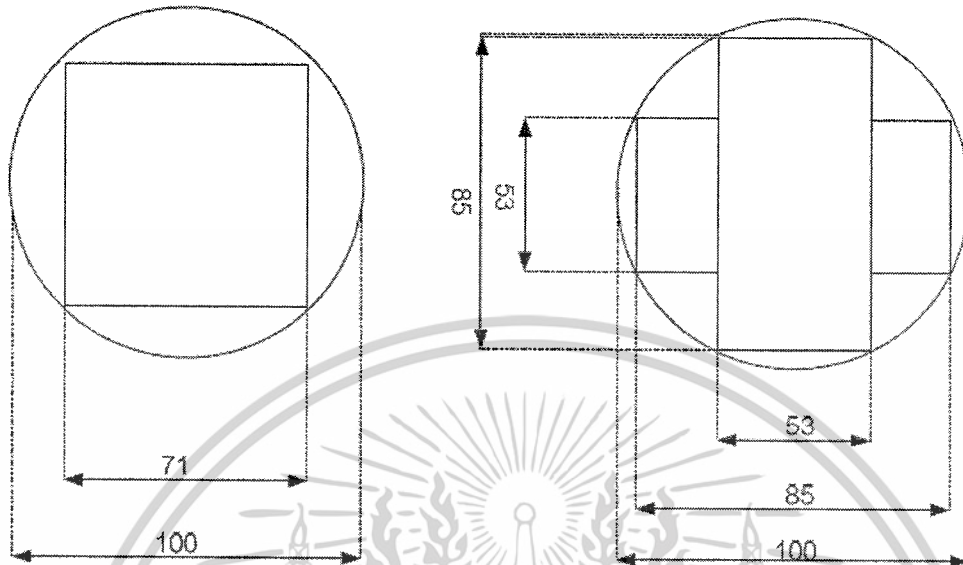
การสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์ซิสและกระแสไหลวนรวมกันเรียกว่าการสูญเสียในแกนเหล็ก

(Core loss) การสูญเสียดังกล่าวเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนา เพราะจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในตัวเครื่องจักรไฟฟ้า วิธีการลดค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ทำได้โดยการเลือกใช้แกนเหล็กที่มีคุณสมบัติเป็นประเภทแม่เหล็กอ่อน ที่มีลักษณะแผ่นบาง รูปที่ 4.7 แสดงค่าความสูญเสียในแกนเหล็กในหน่วยวัตต์ต่อน้ำหนักของแกนเหล็ก (กิโลกรัม) ของแกนเหล็กชนิดต่างๆ ที่ความหนาต่างกัน โดยทั่วไปแล้วบริษัทผู้ผลิตแกนเหล็กจะเป็นผู้ทดสอบ และรายงานค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก ให้ผู้ที่ต้องการเลือกใช้แกนเหล็กนำไปพิจารณา ข้อมูลที่ทางบริษัทนำเสนอจะเป็นค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของแกนเหล็กนั้น (Watt/kilogram) นอกจากนี้แล้วบริษัทผู้ผลิตแกนเหล็กยังจะให้ข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นกับความหนาแน่นแม่เหล็กอีกด้วย เพื่อให้เกิดความสะดวกในการนำไปใช้ออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าต่อไป



รูปที่ 4.7 ความสูญเสียในแกนเหล็กของแกนเหล็กชนิดต่างๆ ที่ความหนาต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



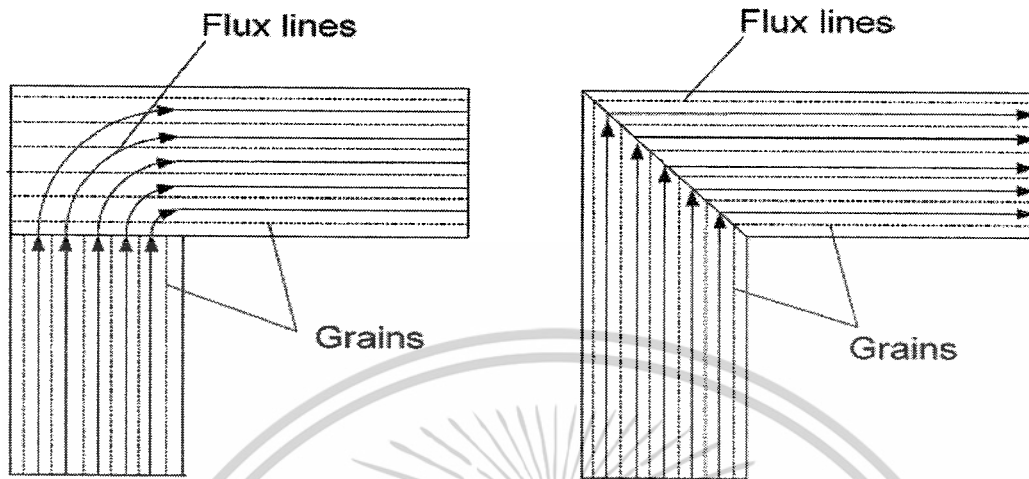
รูปที่ 4.8 ขนาดพื้นที่มากที่สุดภายในวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 หน่วย

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดพื้นที่มากที่สุดที่บรรจุในวงกลมที่มีพื้นที่ 100 ตารางหน่วย เทียบกับจำนวนชั้นของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

รูปแบบของหน้าตัดแกนเหล็ก	สี่เหลี่ยมจัตุรัส	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น
อัตราส่วนของหน้าตัดแกนเหล็กเทียบกับพื้นที่วงกลมล้อมรอบมากที่สุด	64	79	84	87

จากตารางการออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กให้มีหลายชั้นมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพการใช้พื้นที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่การตัดแผ่นเหล็กและการประกอบกันเป็นแกนเหล็กนั้นมีความยุ่งยากมากขึ้น เป็นผลให้ค่าแรงในการประกอบสร้างแกนเหล็กมากขึ้น ฉะนั้นในการสร้างหม้อแปลงจำนวนน้อยตัว จึงพยายามออกแบบจำนวนชั้นของหน้าตัดแกนเหล็กให้น้อยที่สุด นอกจากนี้ถ้าออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กในแต่ละด้านมีความแตกต่างของจำนวนชั้นมาก จะทำให้กำลังสูญเสียในแกนเหล็กและกระแสสร้างแม่เหล็กสูงขึ้น ตามความแตกต่างของจำนวนชั้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงช่องทางไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่การตัดแผ่นเหล็กแบบมุ่มฉากและมุ่ม 45 องศา

การตัดแผ่นเหล็กแบบมุ่มฉาก จะทำให้การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กไม่สะดวก เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กวิ่งข้ามรอยต่อของแผ่นเหล็ก และการที่เส้นแรงแม่เหล็กข้ามแผ่นเหล็กจากแผ่นหนึ่งไปอีกแผ่นหนึ่ง เส้นแรงแม่เหล็กจะไหลในทิศทางตั้งฉากกับการเรียงตัวของเกรนเหล็ก ซึ่งทิศทางนี้แผ่นเหล็กจะมีค่าสภาพซึมซับเป็นหนึ่งในสิบถึงหนึ่งในเจ็ดเท่าของทิศทางที่เกรนของเหล็กเรียงตัวอยู่ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะกลับทิศทางไหล เป็นผลให้กำลังสูญเสียในแกนเหล็กและกระแสทำให้แม่เหล็กสูงขึ้น การแก้ปัญหานี้จะทำโดยตัดแผ่นเหล็กเป็นมุม 45 องศา ซึ่งจะทำให้การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กสะดวกขึ้น ลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก และลดค่ากระแสแม่เหล็ก

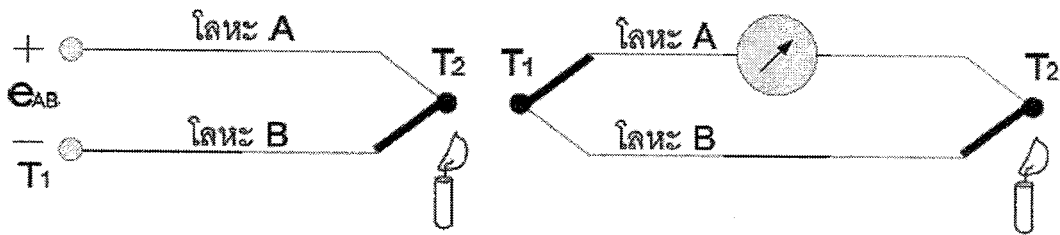
#### 4.4 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แปลงพลังงานความร้อน เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่นิยมใช้กันในปัจจุบันมี 4 ชนิด คือ

##### 4.4.1 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิลเป็นเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิที่เกิดจากการนำเอาลวดโลหะ 2 ชนิด ที่ไม่เหมือนกัน มาเชื่อมปลายเข้าด้วยกัน เมื่อนำปลายอีกด้านหนึ่งของเทอร์โมคัปเปิล ไปวางที่บริเวณต้องการวัดอุณหภูมิจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ปลายสายอีกด้านหนึ่ง โดยค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จะเป็นสัดส่วนกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างปลายด้านที่เชื่อมต่อกันกับปลายด้านที่ติดอยู่ เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้กันอยู่มีประมาณ 10 ชนิดเท่านั้น โดย Output ที่จ่ายออกมาทำการวัดจะอยู่ที่ประมาณ 40 mV/°C โดยเทอร์โมคัปเปิลจะมีย่านการวัดประมาณ -270 °C ถึง 2,300 °C โดยแสดงดังรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 หลักการทำงานของเทอร์โมคัปเปิ้ล

ปริมาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับผลต่างอุณหภูมิของปลายจุดต่อทั้งสอง โดยมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$e_{AB} = aDT \quad (4-43)$$

เมื่อ  $e_{AB}$  : Seebeck Voltage  
 $A$  : ค่าสัมประสิทธิ์ของ Seebeck มีหน่วยเป็น Volt/K  
 $DT$  : ผลต่างอุณหภูมิของปลายจุดต่อทั้งสอง

#### 4.4.2 RTD (Resistance Temperature Detectors)

อาร์ทีดี คือ ตัวเซ็นเซอร์อุณหภูมิที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโลหะ ซึ่งค่าความต้านทานดังกล่าวจะมีค่าเพิ่มตามอุณหภูมิ ความต้านทานของโลหะที่เพิ่มเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นนี้เรียกว่า “สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบบวก”

(Positive Temperature Coefficient ; PTC) นอกจากนี้อาร์ทีดียังมีชื่อเรียกได้อีกอย่างว่า “เทอร์มิสเตอร์แบบค่าความต้านทาน” (Resistance Temperatures) การกำหนดสเกลมาตรฐานจากจุดอ็อกซิเจน ( $-182.96^{\circ}\text{C}$ ) ถึงจุดแอนติโมนี ( $630.74^{\circ}\text{C}$ ) โดย IPTS

เราพบว่าความนำ (conductivity) ;  $\sigma$  ของโลหะใดๆ จะเป็นฟังก์ชันกับค่าของอุณหภูมิ ในทางกลับกันค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity) ซึ่งเป็นส่วนกลับของความนำ ก็จะเปลี่ยนแปลงเกือบเป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิในย่านอุณหภูมิห้อง เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง และเงิน จะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 0.4% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลวิน ซึ่งอาจจะแสดงค่าความนำของโลหะใดๆ ได้เป็น

$$\sigma = -\rho_e \mu_e \quad (4-44)$$

เมื่อ  $\rho_e$  = ความหนาแน่นของประจุอิเล็กตรอนอิสระมีค่าเป็นลบ  
 $\mu_e$  = ความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอน ; m/V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ชนิดของอาร์ทีดี (Type of RTD)** แบ่งเป็น 4 ชนิด โดยมีแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4.11

แพลทินัม เป็นแบบที่นิยมใช้มากที่สุด เขียนบอกไว้เป็น PT ได้แก่ PT-10, PT-100, PT-1000 ความสามารถในการทำซ้ำสูง แต่ความไวต่ำ ราคาแพงมากเพื่อเทียบกับนิกเกิล ซึ่งมีความสามารถในการทำซ้ำน้อย แต่มีความไวมากกว่า และราคาถูกกว่าทองคำและเงิน ชาติทั้งสองมีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำ ทั้งสแตน มีค่าความต้านทานจำเพาะสัมพัทธ์สูง มักใช้กับการวัดอุณหภูมิที่มีค่าสูง เพราะหากใช้ที่อุณหภูมิปกติจะมีความเปราะและยากต่อการใช้งาน นิกเกิล ใช้กับย่านอุณหภูมิสูงๆ มีความเป็นเชิงเส้นต่ำ ทำให้เกิดค่าดริฟต์ (drift) กับเวลา นอกจากนี้ยังมีวัสดุชนิดอื่นๆ ที่ใช้ทำอาร์ทีดี ได้แก่ เหล็ก เป็นต้น

**คุณลักษณะของอาร์ทีดี (Characteristic of RTD)**

ความไว (Sensitivity) ความไวของอาร์ทีดีหาได้จากค่าของ  $\alpha_0$  พบว่าแพลทินัมจะมีค่า  $\alpha = 0.00385 \text{ } \Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$  (ประมาณ  $0.004/^{\circ}\text{C}$ ) ดังนั้น สำหรับแพลทินัมอาร์ทีดีแบบ  $100 \text{ } \Omega$  จึงเปลี่ยนค่าความต้านทานไปเพียง  $0.4 \text{ } \Omega$  เท่านั้น หากอุณหภูมิเปลี่ยนไป  $100^{\circ}\text{C}$

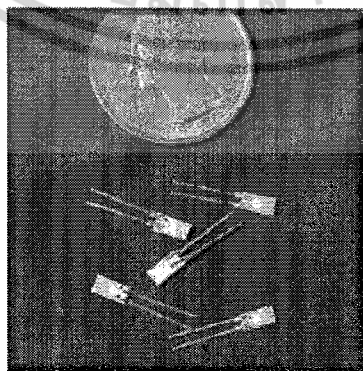
ผลตอบสนองต่อเวลา (Response Time) เวลาในการตอบสนองของอาร์ทีดีเกิดจากการนำความร้อน โดยทั่วไปเวลาคงที่จะกำหนดโดยสภาวะอากาศอิสระ (หรือสภาวะใดๆ ที่สมมูลกัน) หากว่ามันอยู่ในฝักป้องกัน (sheath) มันจะสัมผัสความร้อนได้ไม่ดี จึงทำให้ได้ผลตอบสนองต่อเวลาช้า

โครงสร้าง (Construction) แน่นหนาว่าอาร์ทีดีที่มีความยาวของสายมาก จะทำให้ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิมาก

การปรับสภาพสัญญาณ (Sine Conditioning)

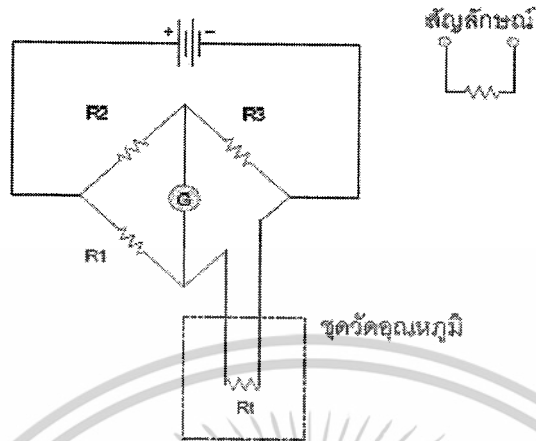
ค่าคงที่ในการสูญเสีย (Dissipation Constant)

ย่านการใช้งาน (Range) ย่านประสิทธิภาพการใช้งานของอาร์ทีดี จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ พบว่า อาร์ทีดีแบบแพลทินัมจะมีย่านใช้งานจาก  $100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $650^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่ อาร์ทีดีที่ทำจากนิกเกิลจะมีช่วงใช้งานจาก  $-180^{\circ}\text{C}$  ถึง  $300^{\circ}\text{C}$



**รูปที่ 4.11** ลักษณะหัว RTD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ลักษณะวงจร RTD

ข้อควรจำในการวัดอุณหภูมิโดยใช้อาร์ทีดี คือต้องมีการชิลด์สายและเดินสายบิดเกลียว เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนอาร์ทีดีที่มีความเปราะบาง จึงต้องป้องกันและระวังการใช้งาน เนื่องจากที่อาร์ทีดีไม่สามารถกำเนิดพลังได้เหมือนกับเทอร์โมคัปเปิ้ลจึงทำให้มีกระแสไหลผ่าน และเกิดผลของความร้อนจูล ( $I^2R$ ) กับตัวมันเอง

RTD 2 สาย วงจรใช้งานพื้นฐานของ RTD คือ Wheatstone Bridge โดย  $R_t$  คือ RTD ซึ่งติดตั้งอยู่ในจุดที่ต้องการวัดอุณหภูมิมีค่าความต้านทานอีก 3 ค่าในวงจร คือ  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  ซึ่งต้องอยู่ที่อุณหภูมิห้อง และเป็นความต้านทานชนิดที่มีความถูกต้องสูง ดังรูปที่ 4.12

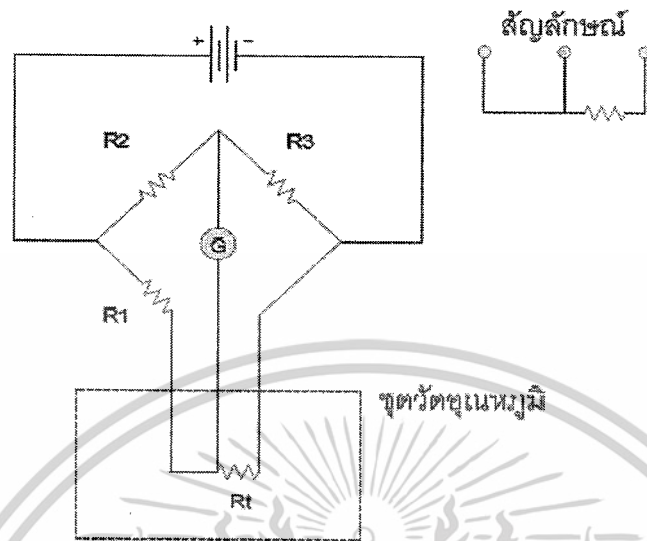
วงจร Bridge จะอยู่ในสภาวะสมดุล เมื่อ RTD ( $R_t$ ) อยู่ที่  $0^\circ\text{C}$  แล้วทำให้  $R_t/R_3 = R_1/R_2$  ซึ่งจะไม่มีการไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ เมื่ออุณหภูมิที่  $R_t$  สูงขึ้น ค่า  $R_t$  จะเพิ่มขึ้น ทำให้วงจร Bridge ไม่สมดุลและมีการไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ อย่างไรก็ตาม RTD 2 สาย เหมาะกับงานที่ RTD อยู่ใกล้กับวงจรเท่านั้น ไม่เหมาะกับงานที่ต้องลากสายยาวๆ เนื่องจากจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นจากค่าความต้านทานสะสมของสายตัวนำ ทำให้ค่าที่อ่านได้ผิดเพี้ยนไป RTD 2 สายจึงเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการความถูกต้องสูงนัก

RTD 3 สาย เป็นที่นิยมใช้ที่สุดในอุตสาหกรรม โดยสายทั้ง 3 เป็นแบบที่นิยมใช้ที่สุดในอุตสาหกรรม โดยสายทั้ง 3 ที่อยู่ระหว่างจุดที่วัดกับวงจร จะต้องมีความยาวเท่ากัน และอยู่ในอุณหภูมิเดียวกันตลอด เพื่อให้ค่าความต้านทาน  $r_1$ ,  $r_2$  และ  $r_3$  เปลี่ยนไปในทิศทางเดียวกัน ด้วยขนาดเท่ากัน นั่นคือ

$$\frac{R_t + r_3}{R_3} = \frac{R_1 + r_1}{R_2} \quad (4-45)$$

เนื่องจาก  $r_1$  เท่ากับ  $r_3$  เพราะฉะนั้นอุณหภูมิที่วัดจึงขึ้นอยู่กับ  $R_t$  เพียงตัวเดียว ทำให้ RTD 3 สาย มีความถูกต้องสูงกว่า RTD แบบ 2 สาย มีการต่อวงจรดังรูปที่ 4.13

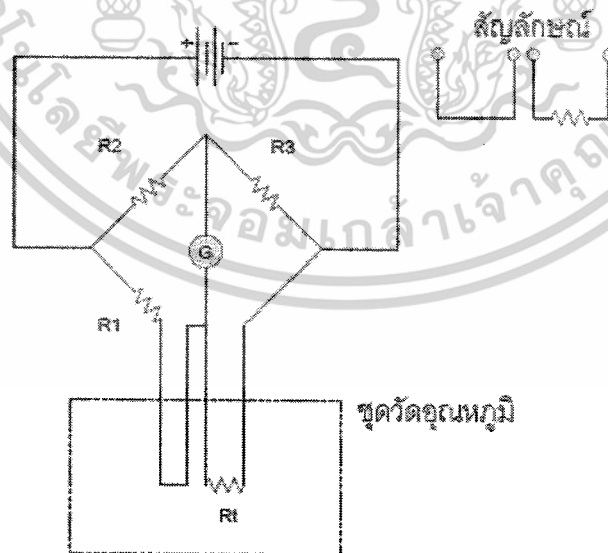
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 วงจรการต่อ RTD แบบ 3 wire

RTD 4 สาย RTD 4 สายเป็นแบบที่มีความถูกต้องสูงที่สุด เนื่องจากเส้นจุดต่อของ Bridge ออกไปอยู่ภายนอกทั้ง 4 จุด สามารถชดเชยความต้านทานของสายตัวนำได้ทั้งหมด โดยสายทั้ง 4 ต้องมีขนาด, ความยาวเท่ากัน และอยู่ในอุณหภูมิเดียวกันตลอดเหมือนกับ RTD 3 สาย ดังรูปที่ 4.14

RTD เป็น Sensor วัดอุณหภูมิที่มี Linearity ดีที่สุด มีความถูกต้องสูง และให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูง แต่มีย่านการใช้งานกว้างเท่ากับเทอร์โมคัปเปิ้ล และมีราคาแพงกว่าพอสมควร



รูปที่ 4.14 วงจรการต่อ RTD แบบ 4 wire

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.3 เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor Thermally sensitive resistor)

เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้ทำเครื่องวัดอุณหภูมิ เนื่องจากคุณสมบัติของเทอร์มิสเตอร์ คือ ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง มี 2 แบบ คือ

NTC (Negative Temperature Coefficient) เป็นเทอร์มิสเตอร์แบบที่ค่าความต้านทานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เป็นเซรามิกที่ผลิตจากโพลีคริสตอลไลน์ (Polycrystalline) NTC จึงมีขนาดเล็ก คงทน และสามารถตอบสนองให้ผลลัพธ์ที่รวดเร็ว โดยจะมีค่าความต้านทาน 5 กิโลโอห์ม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และเนื่องจากการตอบสนองที่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ NTC ชนิดนี้จึงไม่เหมาะสำหรับเครื่องวัดอุณหภูมิที่ใช้วัดอุณหภูมิสูงๆ และค่าความต้านทานที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้ NTC ชนิดนี้เสียหายได้

PTC (Positive Temperature Coefficient) หรือ Platinum (Pt) thermistors เป็นเทอร์มิสเตอร์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน เพราะสร้างจากแผ่นแพลตทินัม ค่าความต้านทานมีตั้งแต่ 0-600 องศาเซลเซียส



## บทที่ 5

### การออกแบบแกนเหล็กและวงจรควบคุม

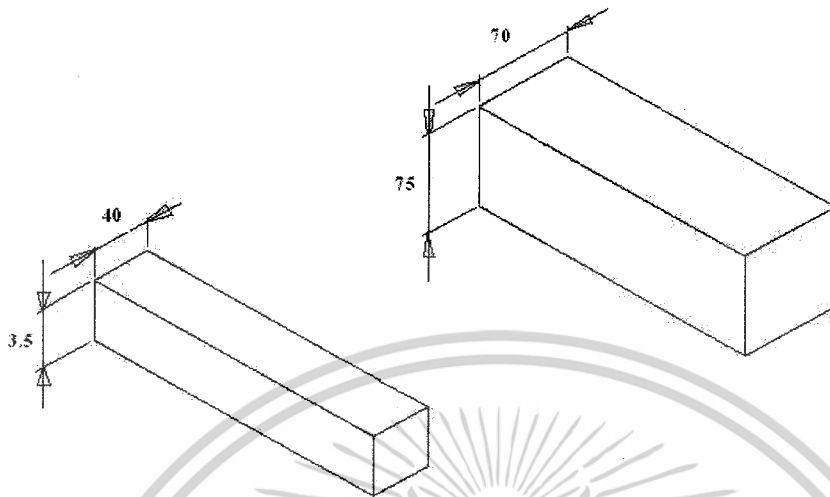
#### 5.1 การออกแบบแกนเหล็กและขดลวด

ในการออกแบบแกนในที่นี่ เราออกแบบพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กตามความเหมาะสมของตลับลูกปืนโดยในที่นี้กำหนดให้ใช้หน้าตัดขนาด 75 x 70 ตร.มม. ซึ่งจะมีคานเท่ากับ 75 x 70 ตร.มม. ทำให้สามารถใช้กับลูกปืนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในตั้งแต่ 110 มม. – 600 มม. และทำการสร้างคานที่มีขนาดเล็กโดยมีขนาด 40 x 35 ตร.มม. เพื่อที่สามารถใช้กับตลับลูกปืนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน ตั้งแต่ 50 มม. – 110 มม. ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยกำหนดค่าเริ่มต้นการออกแบบของ

$$\text{ขนาดพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก} = 5250 \text{ ตร.มม.}$$

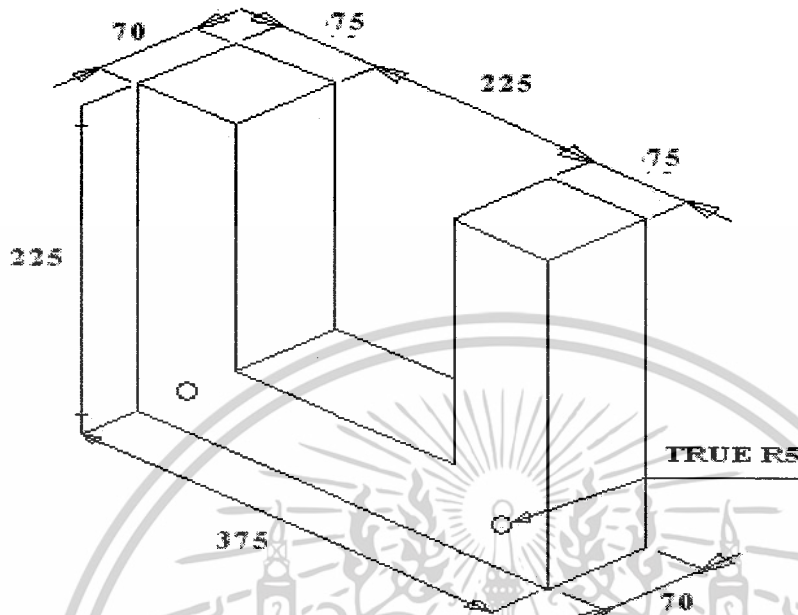
$$\text{ขนาด KVA} = 6 \text{ KVA}$$

ซึ่งในการออกแบบขนาดของแกนเหล็กโดยทั้งหมดจะออกแบบ โดยคำนึงถึงลักษณะของการทำงานจริงให้มีขนาดเหมาะสมแกนเหล็กจะประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กบาง เนื่องจากเหตุผลการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก อันเกิดจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก โดยทั่วไปแผ่นเหล็กหนาจะอยู่ระหว่าง 0.24 – 0.5 มม. การเลือกใช้แกนเหล็กที่มีความหนาน้อยกว่าค่า 0.27 มม. จะทำให้ความสามารถรับแรงทางกลไม่ดีแผ่นเหล็กนี้มีส่วนผสมของซิลิกอนประมาณ 3 – 5% การผสมซิลิกอนเข้าไปเพื่อให้ค่าความต้านทานของแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น เพื่อลดขนาดของกระแสไหลวนและเพิ่มค่า  $\mu$  ของแผ่นเหล็ก และวงรอบฮิตเตอรีซิสลดลง



รูปที่ 5.1 แสดงขนาดของคาน

นั่นคือการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก และลดกระแสแม่เหล็ก ให้ได้ขนาดตามรูปที่ 4.8 แล้วใช้ตัวจับยึด บีบให้แน่นที่สุดเพื่อลดช่องว่างระหว่างแผ่นเหล็กที่วางซ้อนกันเพื่อให้เกิดช่องว่างอากาศ (Air Gaps) ระหว่างแผ่นเหล็กน้อยที่สุด เนื่องจากช่องว่างอากาศมีผลทำให้กระแสขณะไม่มีโหลดสูง (No Load Current) ความสูญเสียขณะไม่มีโหลดสูง (No Load Losses) ระดับความดังของเสียงรบกวนสูง (Noise Levels) แล้วแกนเหล็กยังต้องรับแรงทางกลอันเกิดจากน้ำหนักของตัวเองและน้ำหนักของคาน ฉะนั้นแผ่นเหล็กที่เรียงเสร็จแล้วจะต้องยึดติดให้แน่น ซึ่งอาจทำได้โดยใช้แผ่นเหล็กประกบที่ขึ้นด้วยฉนวน เพื่อป้องกันการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า หรืออาจจำเป็นต้องเจาะแกนเหล็กเพื่อทำการใส่สอดกับสลักเกลียว โดยนอตและสลักเกลียวต้องทำมาจากฉนวน เพื่อป้องกันการเชื่อมกันทางไฟฟ้าระหว่างแกนกับสลักเกลียวอันจะทำให้กระแสไหลวนเพิ่มขึ้น เมื่อเรียงแผ่นเหล็กจะได้เป็นแกนขนาดดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงขนาดของแกนเหล็ก

หาพื้นที่หน้าตัดของขดลวดทองแดง

$$S \times l = \text{พื้นที่หน้าตัดของลวด (ตร.ซม.)}$$

$$l = VA/V$$

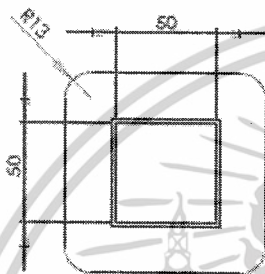
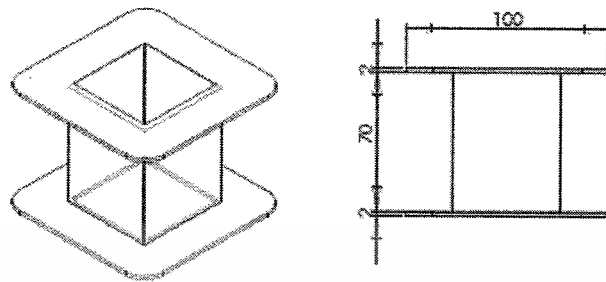
$$= 6.0\text{KVA}/220$$

$$= 27.272 \text{ A}$$

$S$  = ส่วนกลับความหนาแน่นของกระแส

ซึ่ง  $S$  มีค่าอยู่ในช่วง 0.25 ถึง 0.5 ตร.มม./A โดยที่ในการคำนวณนี้ใช้ค่า 0.4 ตร.มม./A ถ้าเราใช้ค่า  $S$  มาก จะทำให้หน้าตัดขดลวดทองแดงมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้อุณหภูมิในขณะใช้งานมีน้อย แต่ราคาขดลวดทองแดงขนาดใหญ่จะสูงกว่าขดลวดทองแดงขนาดเล็กและเมื่อพันลวดทองแดงลงบน Bobbin แล้วทำให้พื้นที่หน้าตัดตามของขดลวดทองแดงมีขนาดใหญ่ ซึ่งจะไม่เหมาะสมกับแกนเหล็ก ซึ่งในโครงการนี้ใช้ Bobbin ขนาด 75 x 70 ตร.มม. ดังรูปที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แสดงขนาดของ Bobbin (หน่วย มม.)

หาจำนวนรอบในการพันลวด

$$V = 4.44fANB_{\max} \quad (4-1)$$

จะได้

$$N = V/(4.44fAB_{\max})$$

กำหนดให้

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$A = 52.5 \text{ ตร.ซม.}$$

$$B = 1.5 \text{ T}$$

ได้

$$N = 125 \text{ รอบ}$$

การเลือกความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด ( $B_{\max}$ ) จะต้องเลือกระดับที่ต่ำกว่าระดับการอิ่มตัวของแกนเหล็ก เพื่อไม่ให้เกิดฮาร์มอนิกส์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของแกนเหล็กด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่หน้าตัดของขดลวด} &= 0.3 \times (6.0 \text{KVA} / 220) \\ &= 8.1816 \text{ ตร.มม.} \end{aligned}$$

เทียบจกตาราง WIRE GAUGES TABLE เลือกลวดขนาดเบอร์ S.W.G. 10 ( มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.24 มม., มีพื้นที่หน้าตัด 8.398 ตร.ซม.)

หาจำนวนชั้นและจำนวนรอบ/ชั้นของการพันขดลวด

$$\text{จากความกว้าง Bobbin} = 75 \times 70 \text{ มม.}$$

$$\text{ลวด S.W.G. 10 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง} = 3.24 \text{ มม.}$$

$$\text{ได้จำนวนรอบ/ชั้น} = 75 / (3.24)$$

$$= 23.148$$

ประมาณ

$$= 23 \text{ รอบ/ชั้น}$$

ได้จำนวนชั้น

$$= 125 / 23$$

$$= 5.4347$$

ประมาณ

$$= 6 \text{ ชั้น}$$

สรุป พันขดลวดลงบนบอบบิ้น 23 รอบ/ชั้น จำนวน 6 ชั้น เต็มได้ 138 รอบ

การประมาณน้ำหนักของเหล็กในการสั่งซื้อ

จากคุณสมบัติของเหล็ก 1 ลบ.ซม.หนัก 6.67 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนแกนเหล็กและ YOKE 7.5 x 7 ตร.ซม.

แผ่นเหล็กขนาด  $2(7.5 \times 7 \times 35.5) + 2(7.5 \times 7 \times 15) = 3727.5 + 1575 = 5302.5$  ลบ.ซม.

$$5302.5 \times 6.67 = 35.367 \text{ kg}$$

ประมาณ 36 kg

ส่วน YOKE ขนาด 4 x 3.5 ตร.ซม. และ

แผ่นเหล็กขนาด  $(4 \times 3.5 \times 35.5) = 497$  ตร.ซม.

$$497 \times 6.67 = 3.314 \text{ kg}$$

ประมาณ 4 kg

รวม  $36 + 4 = 40$  kg

การประมาณน้ำหนักของขดลวดในการสั่งซื้อ

จากแกนเหล็กขนาด 75 x 70 มม. มีเส้นรอบวง 29 ซม. เพื่อเฉลี่ยโดยให้ความยาวลวดใน 1 รอบ = 42 ซม. พันทั้งหมด 138 รอบ จึงใช้ลวดยาว 5796 ซม.

ปริมาตรทรงกระบอก = พื้นที่หน้าตัด x ความยาว

$$= 8.398 \times 5796$$

$$= 486.74 \text{ ลบ.ซม.}$$

ประมาณ 487 ลบ.ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคุณสมบัติลวดทองแดง 1 ลบ.ซม. หนัก 9 กรัม

ได้นำน้ำหนักของลวดทองแดงทั้งหมด =  $487 \times 9$  g

= 4.383 kg

สิ่งซื้อลวดทองแดง

= 4.5 kg

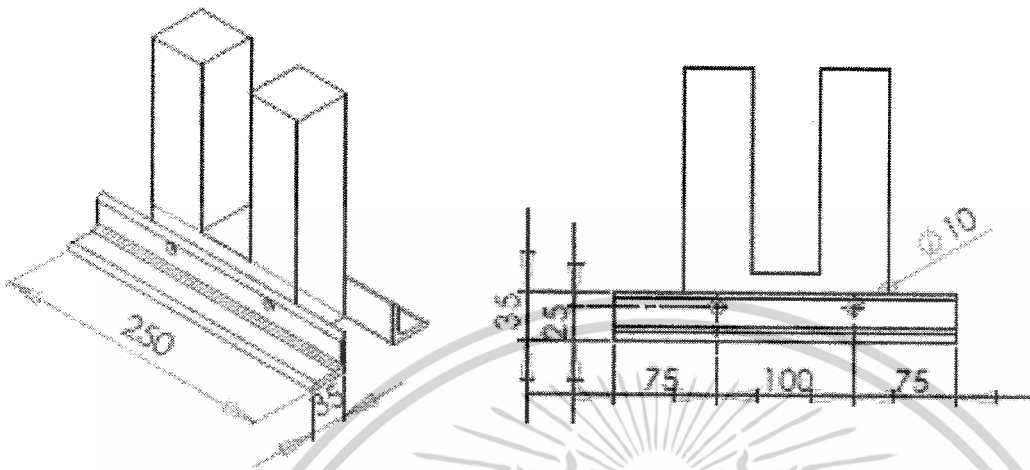
## 5.2 การออกแบบการบรรจุ

การออกแบบกล่องบรรจุใช้เหล็กสังกะสี ออกแบบแผ่นคลี่แล้วพับตามแบบประกอบแล้วครอบแกนเหล็กดังรูปที่ 5.4 และการยึดแกนเหล็กกับโครงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.4 กล่องบรรจุแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 การยึดแกนเหล็กกับโครง

### 5.3 การออกแบบวงจรควบคุมความร้อนและวงจรกำลัง

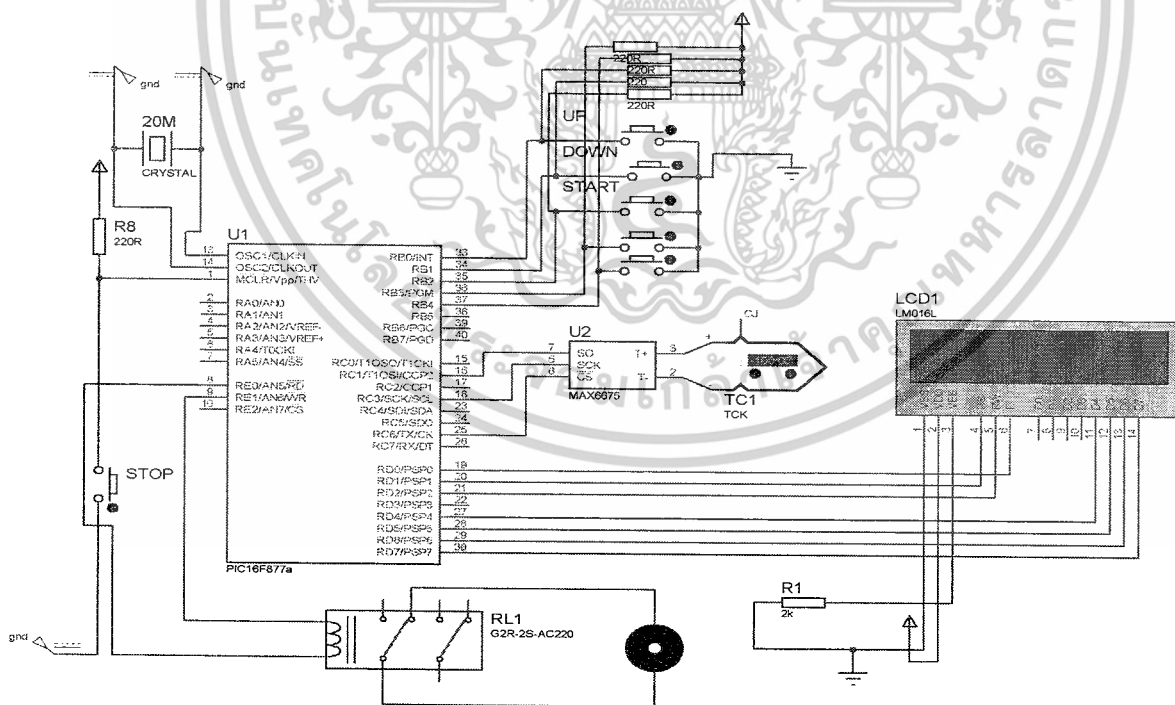
#### ชุดควบคุมความร้อน

ชุดควบคุมความร้อนเครื่องขยายตัวลูกปืนเราจะอาศัยการทำงานของ Microcontroller โดยจะใช้ PIC 16F877A เป็นตัวประมวลผลต่าง ๆ ตั้งแต่การเปิดปิดอุปกรณ์ต่าง ๆ ในเครื่องขยายตัวลูกปืน โดยรับค่า input จาก Push button switch เพิ่มเริ่มการทำงานโดยใช้ Thermocouple เป็น อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ โดย PIC จะแสดงข้อความและข้อมูลทางจอ LCD ขนาด 16 x 2 (16 อักขระ จำนวน 2 บรรทัด) โดยใช้การเชื่อมต่อจอแสดงผล LCD แบบ 4 บิต คือ ใช้ขาที่ติดต่อกับ Microcontroller เพียง 4 ขา คือ D4 - D7

PIC 16F877A จะแสดงข้อความเพื่อติดต่อกับผู้ใช้งานว่าให้เริ่มต้นตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการในการกดปุ่ม "UP" หรือ "DOWN" โดยที่ PIC จะเก็บค่าข้อมูลอุณหภูมิที่ตั้งอันได้แก่ 60, 70, 80, 90, 95, 100, 110C เมื่อกดปุ่ม "START" จะมีการให้ยืนยันค่าที่ตั้งไว้ และ PIC จะให้เราทำการตั้งเวลา โดยการกดปุ่ม "UP" หรือ "DOWN" โดยสามารถตั้งเวลาได้ตั้งแต่ 0-60 นาที กดปุ่ม "START" เพื่อยืนยันเวลาในหน่วยนาทีที่ตั้งไว้ และ PIC จะให้เราทำการตั้งเวลาอีกครั้งในหน่วยวินาทีโดยการกดปุ่ม "UP" หรือ

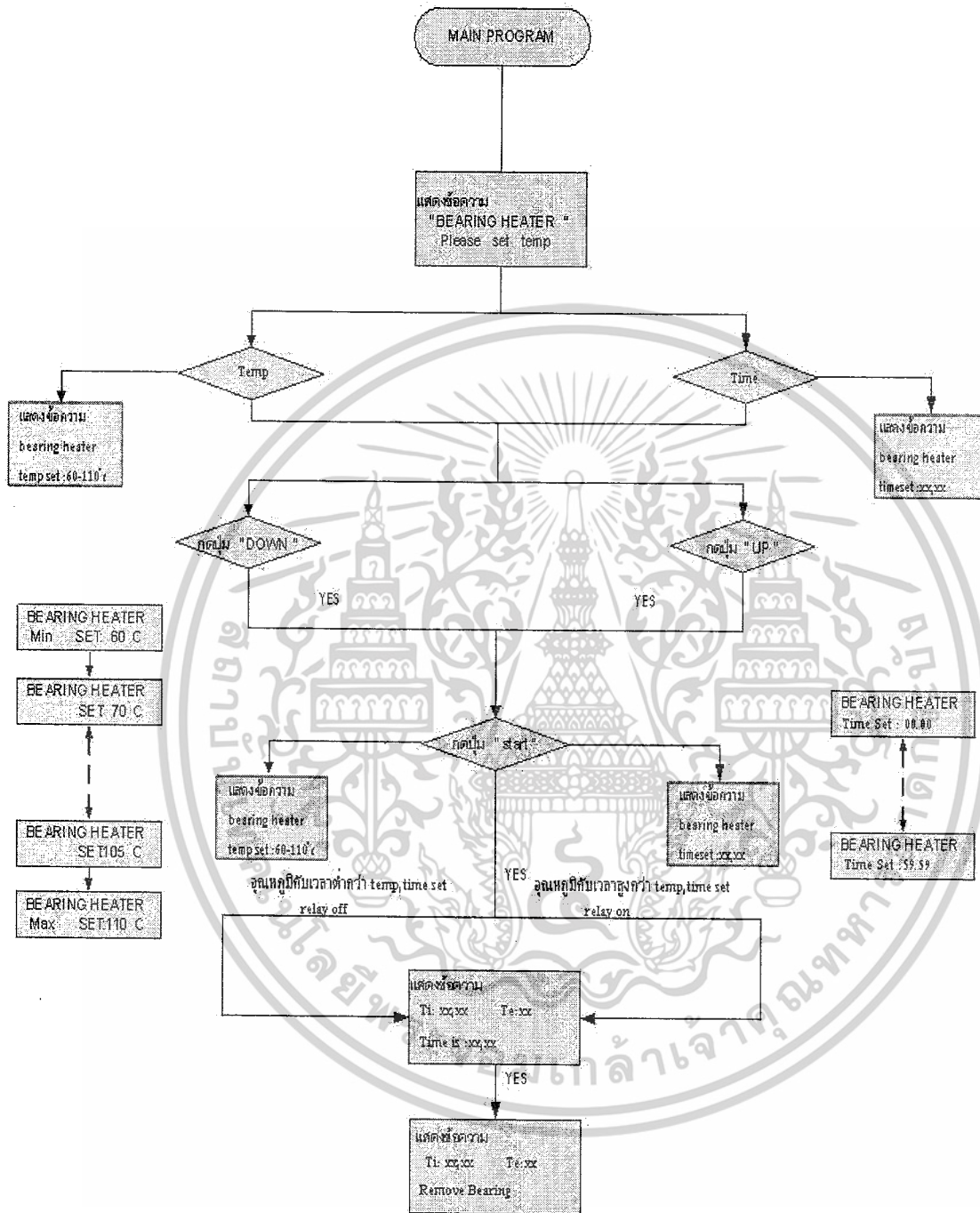
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

“DOWN” โดยสามารถตั้งได้ในช่วงเวลา 0-59 วินาที กดปุ่ม “START” เพื่อยืนยันค่าที่ตั้งไว้ กดปุ่ม “START” อีกครั้ง PIC จะสั่งให้ Relay เริ่มทำงานและให้ Thermocouple อ่านค่าอุณหภูมิ ทางพอร์ต B0 โดย Thermocouple มีย่านการวัดที่ 0°C ถึง +1024°C ความละเอียดถึง 0.25 °C สายที่ส่งสัญญาณต้องมีการชิลเพื่อป้องกันการเหนี่ยวนำที่เกิดจากแกนเหล็กอันจะทำให้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้ผิดพลาดจากค่าจริงได้ PIC จะทำการเปรียบเทียบค่าจากวงจรวัดอุณหภูมิเพื่อมาทำการ เปิด – ปิด โดย Relay มีเงื่อนไขว่าเมื่อค่าจากวงจรวัดอุณหภูมิมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้หรือเวลาสูงกว่าเวลาที่ตั้งไว้จะสั่งให้ Relay เปิดวงจร ทำให้ขดลวดไม่มีกระแสไหลทำให้อุณหภูมิลดลงและเมื่ออุณหภูมิลดลงกว่าค่าที่ตั้งไว้ PIC ก็จะสั่งให้ Relay ปิดวงจร Heater อีกครั้งโดยหน่วงเวลา 5 วินาที เพื่อป้องกันการเปิด-ปิด วงจรซ้ำๆ ในเวลาอันสั้นอัน การทำงานแบบนี้เรียกว่า ON – OFF Control โดยจะมีโปรแกรมคอยทำนายเวลาการทำงานเสร็จสิ้นโดยการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาที่ใช้ไปแล้วแสดงผลเป็นหน่วยนาที ซึ่งลักษณะของ flow chart โปรแกรมการทำงานของ Microcontroller จะแสดงในรูปที่ 5.7 และรูปวงจรควบคุมจะแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ลักษณะของวงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 Flow Chart การทำงานของ Microcontroler

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อรวมอุปกรณ์ต่าง ๆ มาประกอบเป็นตัวเครื่องขยายลูกปืนแล้ว ยังต้องมีการป้องกันการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า คือ

1. การใช้กระดาษครีฟท์กั้นระหว่างชั้นของขดลวด (layer) เมื่อพันได้รอบเต็ม 29 รอบ
2. เมื่อพันขดลวดจนครบ 6 ชั้น แล้วพันทับด้วยเทปฉนวน
3. ลวดทองแดงที่อยู่นอกขดลวดหุ้มด้วยปลอกสายทนไฟ
4. ระหว่างแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นได้ในแกนเหล็ก ด้วยความต้องการที่จะลดผลของกระแสไหลวนในแกนมีการเคลือบฉนวนและเมื่อเรียงแผ่นได้เป็นแกนตามขนาดที่ต้องการแล้วมีการใช้ วานิช "CLASS H" ชนิดที่แห้งในอากาศปกติเคลือบทับอีกชั้นซึ่งวานิชสามารถทนความร้อนได้ถึง 180 °C
5. การใช้ไม้อัดฉนวนระหว่างแกนเหล็กกับฐานยึดและไม้อัดฉนวนนี้เอง ยังสามารถป้องกันการเชื่อมกันทางไฟฟ้าของขดลวดกับแกนเหล็ก โดยการเว้นช่องอากาศด้วย

#### 5.4 การออกแบบการทดลอง

**ตอนที่ 1** การทดสอบความเที่ยงตรงค่าอุณหภูมิที่วัดโดยเครื่องขยายตลับลูกปืน กับ Thermo Hunter (ความละเอียด 1 °C )

##### ขั้นตอนการทดลอง

1. ให้ความร้อนแก่ตลับลูกปืน โดยตั้งพิภักที่ความร้อนสูงสุด 110 °C แล้วกด START
2. ใช้ Thermo Hunter วัดอุณหภูมิที่รังลูกปืนเมื่อเครื่องขยายตลับลูกปืนวัดค่าได้ ตั้งแต่ 30 °C และวัดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 °C บันทึกค่าลงตาราง
3. หาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่วัดได้จาก Thermo Hunter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ผลการวัดอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องขยายตัลบลูกปืนและ Thermo Hunter

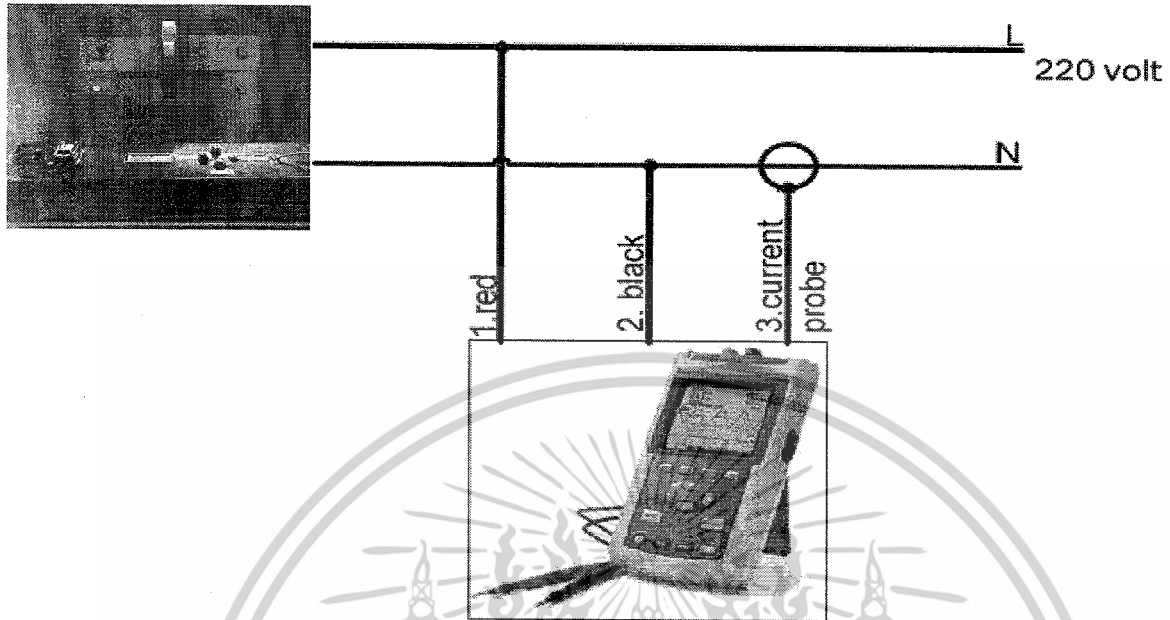
ค่าที่วัด จาก ตัวเครื่อง	Thermo Hunter ครั้งที่1	Thermo Hunter ครั้งที่2	Thermo Hunter ครั้งที่3	Thermo Hunter ครั้งที่4	Thermo Hunter ครั้งที่5	MEAN	SD
30	31	30	30	32	31	30.8	0.748
40	42	40	40	41	42	41	0.894
50	50	53	53	52	51	51.8	1.166
60	62	62	61	60	61	61.2	0.748
70	73	71	70	71	71	71.2	0.979
80	81	83	83	82	81	82	0.894
90	91	90	91	93	92	91.4	1.10
100	100	102	102	103	101	101.6	1.019
110	112	110	112	111	111	111.2	0.7483

ตอนที่2 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของเครื่องขยายตัลบลูกปืนที่อุณหภูมิต่างๆ

ขั้นตอนทดลอง

1. ต่อบรรจุการทดลองดังรูป 5.8 โดยติดหัววัดอุณหภูมิตัลบลูกปืน
2. ให้ความร้อนแก่ตัลบลูกปืน โดยตั้งพิกัดอุณหภูมิสูงสุดที่ 30 °C และกด Start
3. เพิ่มอุณหภูมิจนถึง 110 °C โดยทำซ้ำตามข้อ 1 และ 2
4. เปลี่ยนตัลบลูกปืนและ YOKE ที่สามารถสวมเข้ากันได้พอและทำซ้ำเหมือนเดิม
5. เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องขยายตัลบลูกปืนที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 วงจรการทดลอง

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองครั้งที่ 1 ตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. กับ YOKE 4 ซม.

%THDv ก่อนการทดลอง 1.5 %

Temperature (°C)	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	Power factor	%THDv
30	0.00	163.9	18.07	829.27	0.28	2.2
40	0.29	163.9	17.90	821.47	0.28	2.4
50	0.41	164.0	17.84	819.21	0.28	2.4
60	0.48	164.1	17.80	817.87	0.28	2.4
70	1.01	164.1	17.77	816.50	0.28	2.4
80	1.07	164.1	17.75	815.57	0.28	2.4
90	1.17	164.2	17.70	813.78	0.28	2.3
100	1.27	164.2	17.65	811.48	0.28	2.4
110	1.40	164.2	17.63	810.56	0.28	2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองครั้งที่ 2 ตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. กับ YOKE 4 ซม.

%THDv ก่อนการทดลอง 1.6 %

Temperature ( ° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	Power factor	%THDv
30	0.00	163.3	17.07	864.13	0.31	2.3
40	0.24	163.3	17.05	863.12	0.31	2.3
50	0.35	163.2	17.01	860.57	0.31	2.3
60	0.45	164.3	16.94	862.81	0.31	2.3
70	0.53	163.9	16.91	859.18	0.31	2.3
80	1.10	163.4	16.89	855.55	0.31	2.3
90	1.14	163.3	16.86	853.50	0.31	2.3
100	1.21	163.2	16.84	851.97	0.31	2.3
110	1.31	163.3	16.83	851.99	0.31	2.3

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองครั้งที่ 3 ตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. กับ YOKE 4 ซม.

%THDv ก่อนการทดลอง 1.6 %

Temperature ( ° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	Power factor	%THDv
30	0.00	162.5	18.02	819.91	0.28	2.0
40	0.31	162.5	17.82	810.81	0.28	2.0
50	0.39	162.5	17.79	780.54	0.27	2.0
60	0.49	162.5	17.72	806.26	0.28	2.0
70	1.00	162.7	17.68	776.66	0.27	2.0
80	1.11	162.8	17.64	804.10	0.28	2.0
90	1.21	162.8	17.59	801.82	0.28	2.0
100	1.28	162.8	17.55	799.99	0.28	2.0
110	1.37	162.8	17.52	798.63	0.28	2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลองตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม.

ค่าเฉลี่ย %THDv ก่อนการทดลอง 1.53 %

Temp ( ° C )	Time(Min)		Voltage(V)		Current(A)		Power(W)		%THDv		P.F.	
	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD
30	0.00	0.00	163.23	0.57	17.17	0.46	837.77	19.03	2.1	0.13	2.34	0.32
40	0.28	0.03	163.23	0.57	17.59	0.38	831.80	22.57	2.2	0.15	2.34	0.32
50	0.38	0.02	163.23	0.61	17.54	0.38	820.11	32.68	2.2	0.15	2.43	0.36
60	0.47	0.02	163.43	0.74	17.49	0.39	828.98	24.38	2.2	0.15	2.34	0.32
70	0.85	0.22	163.46	0.73	17.45	0.38	817.45	36.69	2.2	0.15	2.43	0.36
80	1.09	0.02	163.43	0.53	17.43	0.38	825.08	22.05	2.2	0.15	2.34	0.32
90	1.17	0.03	163.43	0.58	17.38	0.37	823.03	22.09	2.2	0.15	2.34	0.32
100	1.25	0.03	162.80	0.33	17.35	0.36	821.15	22.29	2.2	0.15	2.34	0.32
110	1.36	0.04	163.43	0.58	17.33	0.35	820.39	22.87	2.2	0.15	2.34	0.32

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองครั้งที่ 1 ตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. กับ YOKE 4 ซม.

%THDv ก่อนการทดลอง 1.5 %

Temperature ( ° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	Power factor	%THDv
30	0.00	163.6	16.81	797.53	0.29	4.2
40	0.28	163.5	16.69	791.36	0.29	4.2
50	0.43	163.5	16.63	761.32	0.28	4.2
60	1.03	163.5	16.56	731.04	0.27	4.3
70	1.14	163.5	16.51	728.83	0.27	4.2
80	1.28	163.4	16.48	700.14	0.26	4.4
90	1.40	163.5	16.45	699.29	0.26	4.4
100	1.58	163.6	16.42	698.44	0.26	4.3
110	2.01	163.6	16.38	696.74	0.26	4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองครั้งที่ 2 ตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซ.ม. กับ YOKE 4 ซ.ม.

%THDv ก่อนการทดลอง 1.4 %

Temperature ( ° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	Power factor	%THDv
30	0.00	163.3	17.06	6470.76	0.23	4.2
40	0.35	163.8	16.98	639.70	0.23	4.2
50	0.49	163.8	16.95	638.57	0.23	4.4
60	1.02	163.9	16.94	638.59	0.23	4.4
70	1.22	163.9	16.91	637.46	0.23	4.4
80	1.38	164.0	16.88	636.71	0.23	4.7
90	1.58	163.9	16.85	635.19	0.23	4.7
100	2.13	163.9	16.83	634.44	0.23	5.0
110	2.27	163.9	16.79	632.93	0.23	5.0

ตารางที่ 5.8 ผลการทดลองครั้งที่ 3 ตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซ.ม. กับ YOKE 4 ซ.ม.

%THDv ก่อนการทดลอง 1.5 %

Temperature ( ° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	Power factor	%THDv
30	0.00	163.6	17.01	640.05	0.23	4.2
40	0.41	163.3	16.90	635.14	0.23	4.2
50	1.01	163.7	16.87	635.17	0.23	4.2
60	1.17	163.7	16.83	633.67	0.23	4.2
70	1.40	163.7	16.79	632.16	0.23	4.4
80	1.57	163.7	16.77	631.41	0.23	4.4
90	2.28	163.6	16.73	629.52	0.23	4.7
100	3.00	163.6	16.68	627.64	0.23	5.0
110	3.22	163.6	16.65	626.51	0.23	5.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง ตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม.

ค่าเฉลี่ย %THDv ก่อนการทดลอง 1.47 %

Temp ( ° C )	Time(Min)		Voltage(V)		Current(A)		Power(W)		%THDv		P.F.	
	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD
30	0.00	0.00	163.5	0.14	16.96	0.11	692.78	74.07	4.2	0.00	0.26	0.03
40	0.35	0.05	163.57	0.17	16.90	0.07	688.73	72.59	4.2	0.00	0.26	0.03
50	0.64	0.26	163.67	0.12	16.82	0.13	678.35	58.68	4.2	0.06	0.25	0.02
60	1.07	0.07	163.70	0.16	16.78	0.16	667.77	44.78	4.3	0.05	0.24	0.02
70	1.25	0.11	163.70	0.16	16.74	0.17	632.82	31.55	4.2	0.06	0.24	0.02
80	1.41	0.12	163.70	0.24	16.71	0.17	656.08	34.26	4.5	0.14	0.24	0.01
90	1.75	0.38	163.67	0.17	16.68	0.17	654.67	31.64	4.6	0.14	0.24	0.01
100	2.24	0.58	163.70	0.14	16.64	0.17	653.51	31.89	4.7	0.33	0.24	0.01
110	2.50	0.52	163.70	0.14	16.61	0.17	653.06	30.92	4.7	0.33	0.24	0.01

ตารางที่ 5.10 ผลการทดลองครั้งที่ 1 ตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 ซม. กับ YOKE 7 ซม.

%THDv ก่อนการทดลอง 1.3 %

Temperature ( ° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	Power factor	%THDv
30	0.00	163.3	12.49	887.78	0.43	3.1
40	0.31	163.2	12.48	886.53	0.43	3.1
50	0.36	165.4	12.41	882.62	0.43	3.1
60	0.48	165.6	12.39	882.67	0.43	3.1
70	0.58	165.7	12.30	876.39	0.43	3.1
80	1.05	165.9	12.28	876.02	0.43	3.1
90	1.12	166.0	12.21	871.55	0.43	3.1
100	1.21	166.1	12.13	866.36	0.43	3.1
110	1.29	166.3	12.02	859.54	0.43	3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.11 ผลการทดลองครั้งที่ 2 ตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 ซ.ม. กับ YOKE 7 ซ.ม.

%THDv ก่อนการทดลอง 1.4 %

Temperature ( ° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	Power factor	%THDv
30	0.00	165.3	13.21	1026.29	0.47	3.1
40	0.32	165.6	12.72	990.02	0.47	3.1
50	0.44	165.6	12.67	986.13	0.47	3.1
60	0.51	165.7	12.63	983.61	0.47	3.1
70	1.01	165.7	12.54	976.60	0.47	3.1
80	1.11	165.7	12.44	989.43	0.48	3.1
90	1.05	165.7	12.34	961.03	0.47	3.1
100	1.29	165.8	12.25	974.90	0.48	3.1
110	1.46	165.8	12.12	944.46	0.47	3.1

ตารางที่ 5.12 ผลการทดลองครั้งที่ 3 ตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 ซ.ม. กับ YOKE 7 ซ.ม.

%THDv ก่อนการทดลอง 1.3 %

Temperature ( ° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	Power factor	%THDv
30	0.00	165.7	12.43	865.05	0.42	2.9
40	0.29	165.7	12.17	846.96	0.42	2.9
50	0.40	165.9	12.12	844.49	0.42	2.9
60	0.48	165.9	12.04	858.89	0.43	2.9
70	1.00	165.9	11.94	831.95	0.42	2.9
80	1.16	166.0	11.82	824.09	0.42	2.9
90	1.24	165.9	11.78	859.89	0.44	2.9
100	1.34	166.0	11.66	851.65	0.44	2.9
110	1.51	166.0	11.57	806.66	0.42	2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.13 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง ตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 ซม. ค่าเฉลี่ย %THDv ก่อนการทดลอง 1.27 %

Temp (° C )	Time(Min)		Voltage(V)		Current(A)		Power(W)		%THDv		P.F.	
	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD
30	0.00	0.00	165.43	0.19	12.71	0.35	926.34	71.26	3.03	0.09	0.44	0.02
40	0.35	0.01	165.50	0.22	12.455	0.22	907.84	60.31	3.03	0.09	0.44	0.02
50	0.40	0.03	165.63	0.21	12.40	0.22	871.08	18085	3.03	0.09	0.44	0.02
60	0.49	0.01	165.73	0.12	12.35	0.24	908.39	54.07	3.03	0.09	0.44	0.02
70	0.56	0.20	165.77	0.09	12.26	0.25	894.98	60.49	3.03	0.09	0.44	0.02
80	1.10	0.04	165.87	0.12	12.18	0.26	896.51	69.04	3.03	0.09	0.44	0.02
90	1.18	0.05	165.87	0.12	12.11	0.24	897.49	45.18	3.03	0.09	0.45	0.02
100	1.28	0.05	165.97	0.12	12.01	0.25	897.64	54.96	3.03	0.09	0.45	0.02
110	1.42	0.09	166.03	0.21	11.90	0.24	870.22	56.76	3.03	0.09	0.44	0.02

ตอนที่ 3 ทดสอบการเพิ่มอุณหภูมิของตลับลูกปืนที่เวลาต่างๆ

ขั้นตอนทดลอง

1. ต่อบังคับการทดลองดังรูป 5.8 โดยติดหัววัดอุณหภูมิตลับลูกปืน
2. ให้ความร้อนแก่ตลับลูกปืน โดยตั้งพิกัดอุณหภูมิสูงสุดที่ 110 °C และ ตั้งเวลาที่ 1.30 นาที
3. กด Start โดยทำซ้ำตามข้อ 1 และ 2
4. เปลี่ยนตลับลูกปืนและ YOKE ที่สามารถสวมเข้ากันได้พอดีและทำซ้ำเหมือนเดิม
5. เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องขยายตลับลูกปืนที่อุณหภูมิต่างๆที่เวลา 1.30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.14 ทดสอบ ตลับลูกปืนขนาด 6 ซม. ที่เวลา 1.30 นาที

ครั้งที่	Temperature ( ° C )
1	103
2	105
3	102
4	102
5	108
6	108
7	106
8	108
9	106
10	110
เฉลี่ย	106.3
SD	2.2

ตารางที่ 5.15 ทดสอบ ตลับลูกปืนขนาด 9 ซม. ที่เวลา 1.30 นาที

ครั้งที่	Temperature ( ° C )
1	64
2	70
3	75
4	68
5	81
6	67
7	75
8	86
9	78
10	77
เฉลี่ย	73.78
SD	6.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.16 ทดสอบ ตลับลูกปืนขนาด 11 ซม. ที่เวลา 1.30 นาที

ครั้งที่	Temperature ( ° C )
1	109
2	108
3	110
4	102
5	105
6	100
7	110
8	110
9	107
10	103
เฉลี่ย	106.4
SD	3.50

**ตอนที่ 4** การทดสอบการขยายตัวของตลับลูกปืนที่อุณหภูมิ 110 ° C

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการให้ความร้อนแก่ตลับลูกปืน โดยตั้งพิกัดอุณหภูมิสูงสุดที่ 30 ° C เมื่ออุณหภูมิถึงพิกัดแล้วบันทึกค่าเส้นผ่านศูนย์กลางวงในของริงลูกปืนด้วย เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ ( ความละเอียด 25  $\mu$ m )
2. ทำการให้ความร้อนแก่ตลับลูกปืน โดยตั้งพิกัดอุณหภูมิสูงสุดที่ 110 ° C เมื่ออุณหภูมิถึงพิกัดแล้วบันทึกค่าเส้นผ่านศูนย์กลางวงในของริงลูกปืนด้วย เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ ลงในตาราง
3. เปลี่ยนขนาดตลับลูกปืนและ YOKE ที่สามารถสวมเข้ากันได้พอและทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1 ถึง 2
4. หาค่าเฉลี่ยของความยาวที่เพิ่มขึ้น จากการทดลอง 10 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.17 แสดงขนาดการขยายตัวของตลับลูกปืน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซ.ม. ที่อุณหภูมิ 110 °C

ครั้งที่	การขยายตัว ( $\mu\text{m}$ )
1	35
2	25
3	25
4	25
5	20
6	35
7	20
8	20
9	30
10	20
เฉลี่ย	25.5
SD	5.68

ตารางที่ 5.18 แสดงขนาดการขยายตัวของตลับลูกปืน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซ.ม. ที่อุณหภูมิ 110 °C

ครั้งที่	การขยายตัว ( $\mu\text{m}$ )
1	35
2	45
3	35
4	35
5	30
6	35
7	30
8	25
9	30
10	30
เฉลี่ย	33.125
SD	5.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.19 แสดงขนาดการขยายตัวของตลับลูกปืน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 ซม. ที่อุณหภูมิ 110 °C

ครั้งที่	การขยายตัว ( $\mu\text{m}$ )
1	75
2	65
3	65
4	70
5	70
6	65
7	60
8	70
9	60
10	65
เฉลี่ย	66.5
SD	4.5

#### ขั้นตอนการใช้งานเครื่องขยายตลับลูกปืน

1. จ่ายไฟ 220 V<sub>ac</sub> ให้กับเครื่องขยายตลับลูกปืนโดยการเปิดเบรกเกอร์
2. นำตลับลูกปืนที่ต้องการจะขยายสอดเข้าแกนเหล็ก ( YOKE )
3. นำแกนเหล็กพร้อมตลับลูกปืนวางบนแกนให้หน้าแกนเหล็กสัมผัสกันสนิท
4. นำหัววัดอุณหภูมิติดที่รังลูกปืนของตลับลูกปืน
5. ตั้งอุณหภูมิ และเวลา และกดปุ่ม START เพื่อเริ่มการทำงาน
6. ขณะที่เครื่องทำงานสามารถกดปุ่ม Reset เพื่อหยุดการทำงานทันทีหรือเมื่อเครื่องแสดงข้อความ REMOVE BEARING แสดงว่าเครื่องขยายตลับลูกปืนเสร็จสมบูรณ์แล้วแต่เครื่องจะหยุดการทำงานชั่วคราว เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าที่ตั้งไว้เครื่องจะทำงานอีกจนกว่าจะมีการกดปุ่ม Reset
7. เมื่อกดปุ่ม Reset แล้วเครื่องขยายตลับลูกปืนจะตัดไฟที่จ่ายให้กับเครื่อง ปิดเบรกเกอร์ แล้วนำตลับลูกปืนไปติดตั้งกับเพลลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง

การทดลองตอนที่ 1 การทดสอบความเที่ยงตรงค่าอุณหภูมิที่วัดโดยเครื่องขยายตัลบลูกปืน กับ Thermo Hunter ( ความละเอียด  $1^{\circ}\text{C}$  ) จากผลการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณทำให้ทราบว่าค่าที่ได้จากเครื่องขยายตัลบลูกปืนมีค่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่าค่าอุณหภูมิที่วัดจากเครื่องวัดมาตรฐาน ประมาณ  $1 - 2^{\circ}\text{C}$  ทั้งๆที่ เซ็นเซอร์อิเล็กทรอนิกส์มีความละเอียดกว่าเครื่องวัดมาตรฐาน ( Thermo Hunter ) คืออยู่ที่  $0.25^{\circ}\text{C}$  น่าจะเป็นผลมาจากที่ตัลบลูกปืนส่วนทำให้การวัดมีความคลาดเคลื่อนและ Thermo Hunter วัดอุณหภูมิเป็นพื้นที่วงกลมผู้ทดลองต้องพยายามวัดค่าข้างไว้แล้วจะทำให้ทราบว่าค่าความร้อนสูงสุดทำให้ค่าที่วัดได้น่าจะเป็นค่ามากกว่าอุณหภูมิจริงหรือมากกว่าเครื่องขยายตัลบลูกปืนนั่นเอง

การทดลองตอนที่ 2 การทดสอบกำลังไฟฟ้า ของตัลบลูกปืนเครื่องขยายตัลบลูกปืนที่อุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความร้อนของตัลบลูกปืนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสั้นและไม่เสถียรของโมเลกุล ส่งผลให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นแต่กระแสที่วัดได้ๆค่อยๆลดลง ตามหลักของความต้านทานของตัวนำโลหะจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และกำลังไฟฟ้าที่ให้แก่ตัลบลูกปืนต่างขนาดกันเนื่องจากตัลบลูกปืนเปรียบเสมือนขดลวดความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ ดังนั้นยิ่งตัลบลูกปืนมีพื้นที่หน้าตัดมากก็จะทำให้มีความต้านทานต่ำ และตัลบลูกปืนที่มีความหนาของรังลูกลงมากจะทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูง

จากการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ซึ่งสังเกตจาก %THDv นั้นก่อนทำการทดลองค่าประมาณ 1-2 % เมื่อเครื่องขยายตัลบลูกปืนทำงานจ่ายไฟฟ้า ให้แก่งานค่าของ %THDv เพิ่มขึ้นประมาณ 2-3 % ใน การทดลองที่ใช้ Yoke กับตัลบลูกปืนที่มีขนาดพอดีกัน แต่ในการทดลองที่ใช้ Yoke กับตัลบลูกปืนที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้ค่า %THDv มีค่าสูงขึ้น( ตามมาตรฐานของคุณภาพไฟฟ้าไม่ควรเกิน 3 % ) แสดงว่าเครื่องขยายตัลบลูกปืนสร้างกระแสฮาร์มอนิกส์ต่ำในการใช้งานกับตัลบลูกปืนที่เหมาะสม

ตอนที่ 3 เมื่อพิจารณาที่เวลา 2 นาทีซึ่งจากการทดลองข้างต้นพบว่าตัลบลูกปืนจะมีอุณหภูมิเข้าใกล้ อุณหภูมิสูงสุดของเครื่องขยายตัลบลูกปืนที่วัดได้ พบว่าที่ขนาด Yoke มีขนาดพอดีกับตัลบลูกปืน จะใช้เวลาในการทำความร้อนตัลบลูกปืนสั้นกว่า Yoke ที่มีขนาดแตกต่างกับตัลบลูกปืนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 4 จากการทดลองเมื่อรวบรวมผลการทดลองการขยายตัวของตลับลูกปืน ที่ 110 ° C พบว่าค่าเฉลี่ยการขยายตัวต่ำสุดของตลับลูกปืนอยู่ที่ 25.5  $\mu\text{m}$  สำหรับตลับลูกปืนขนาด 6 ซม. ซึ่งการขยายที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำอาจมีผลมาจากขนาดของตลับลูกปืนมีขนาดใหญ่ เวลาในการให้ความร้อนเร็วเกินไป

โดยสรุปแล้วความสามารถของเครื่องขยายตลับลูกปืนสามารถใช้งานจริงได้จากผลการทดลอง ทั้ง 4 ตอนข้างต้นทั้งความเที่ยงตรงในการวัดอุณหภูมิ พิกัดกำลังของเครื่อง การใช้งานร่วมกับ YOKE ขนาดต่างกัน การสร้างกระแสมอนิเตอร์และการขยายตัวของตลับลูกปืนที่อุณหภูมิพิกัด โดยขณะที่เครื่องทำงานยังมีการสั่นและไม่มีการซีลสนามแม่เหล็กซึ่งยังต้องพัฒนาต่อไป โดยเมื่อเทียบราคาและความสามารถกับเครื่องขยายตลับลูกปืนของต่างประเทศที่มีขาย ก็อยู่ในเกณฑ์พอใช้เมื่อต้นทุนการทำราคาประมาณ 9100 บาทต่อเครื่อง

ความสามารถ	TIH 030	TIH 100	เครื่องขยายตลับลูกปืน
การควบคุมอุณหภูมิ			
-ช่วงอุณหภูมิ	0 - 250 ° C	0 - 250 ° C	0 - 1024 ° C
-หัววัดอุณหภูมิแม่เหล็ก	K-type	K-type	K-type
-ความแม่นยำ	$\pm 2$ ° C	$\pm 2$ ° C	$\pm 1$ ° C
การควบคุมเวลา			
-ช่วงเวลา	0 - 60 นาที	0 - 60 นาที	0 - 60 นาที
-โหมดวัดอุณหภูมิ	มี	มี	มี
-การจัดสนามแม่เหล็ก	มี(<2 A/cm)	มี(<2 A/cm)	ไม่มี
-ระบบป้องกันความร้อนสูง	มี	ปุ่มกดพร้อมจอLCD	มี
เกินไป ( 110 C )		เป็นแบบรีโมท	
กำลังไฟฟ้าสูงสุด	2.0 kVA	3.6 kVA	6 kVA
ราคา(1 US/ 35 bath)	47,250	70,350	9,100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ปัญหาที่พบกับเครื่องขยายตัลบลูกปืน

- สนามแม่เหล็กจากขดลวด รมกวนไม่โครคอนโทรลเลอร์ให้เกิดการทำงานผิดพลาด
- กล่องบรรจุเกิดความร้อน เนื่องจากทำจากเหล็กทำให้เวลาทำการทดสอบต้องถอดกล่องบรรจุออก จึงทำการทดลองได้
- เนื่องจากสนามแม่เหล็กจากขดลวด รมกวนไม่โครคอนโทรลเลอร์ให้เกิดการทำงานผิดพลาด จึงไม่สามารถใช้งานที่ไฟ 220 โวลต์ได้ ต้องทำการทดลองที่ 170 โวลต์ เพื่อลดค่าของสนามแม่เหล็ก ที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์ทนได้
- ขณะเครื่องทำงานมีการสั่นมากเนื่องจากกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงสูง ทำให้การวัดอุณหภูมิอาจมีการผิดพลาด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
โปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์

```

#include <16F877A.h>
#define ADC=10
#define HS,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP
#define use delay(clock=20000000)
#define use rs232(baud=9600, xmit=PIN_C6, rcv=PIN_C7) // Serial port
#include <stdlib.h>
#include "input.c" //
#define use_portb_lcd
#include <lcd.c>
int16 read_temp();
int up=10,up2=0,up3=0;
int realtime1,realtime2;
int16 realtemp;
int start=0;
int t1=0,t2=0;
void button ()
{
    if(!input(pin_a0))
    {
        up=up+10;

        delay_ms(500);
    }
    if(!input(pin_a1))
    {
        up=up-10;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    delay_ms(500);
  }
  if(!input(pin_a2))
  {
    start++;
    delay_ms(500);
  }

  if(up<1)
  {
    up=0;
  }
}

void button2 ()
{
  if(!input(pin_a0))
  {
    up2++;
    delay_ms(500);
  }
  if(!input(pin_a1))
  {
    up2--;
    delay_ms(500);
  }
  if(!input(pin_a2))
  {
    start++;
  }
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    delay_ms(500);
}

if(up2===-1)
{
up2=0;
}
}
void buttom3 ()
{
if(linput(pin_a0))
{
up3++;
delay_ms(500);
}
if(linput(pin_a1))
{
up3--;
delay_ms(500);
}
if(linput(pin_a2))
{
start++;
delay_ms(500);
}
}
if(up3===-1 )
{
up3=59;
}
}
if(up3>59)

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
up3=0;
}
}

void main()
{
    int16 temp,value;
    unsigned int8 data1,data2;
    char string[5];
    output_low(PIN_c3); //clock
    output_low(PIN_c2);
    setup_spi(SPI_MASTER|SPI_I_TO_h|SPI_CLK_DIV_16); //OK
    lcd_init();
    output_high(PIN_c2);
    while (TRUE) {
        if(start==0)
        {
            lcd_gotoxy(1,1);
            printf(lcd_putc," BEARING HEATER ");
            buttom();

            if(up>110)
            {
                lcd_gotoxy(1,2);
                printf(lcd_putc,"MAX SET = 110 C ");
                up=110;
                delay_ms(1500);
            }
            if(up<10)
            {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

lcd_gotoxy(1,2);
printf(lcd_putc,"MIN SET = 10 C ");
up=10;
delay_ms(1500);
}
lcd_gotoxy(1,2);
printf(lcd_putc,"SET TEMP %d C ",up);
}
if(start==1)
{
  realtime=up;
  buttom2();
  lcd_gotoxy(1,2);
  printf(lcd_putc,"SETTIME %d.00 min ",up2);
}
if(start==2)
{
  realtime1=up2;
  buttom3();
  lcd_gotoxy(1,2);
  printf(lcd_putc,"SETTIME %d.%d min ",realtime1,up3);
}
if(start==3)
{
  realtime2=up3;
  lcd_gotoxy(1,1);
  printf(lcd_putc,"TEMP= %ld C ",realtemp);
  lcd_gotoxy(1,2);
  printf(lcd_putc,"TIME= %d.%d min ",realtime1,realtime2);
  delay_ms(3000);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

lcd_gotoxy(1,1);
  printf(lcd_putc,"  START  ");
  lcd_gotoxy(1,2);
  printf(lcd_putc,"          ");
delay_ms(1000);
start=4;
}
if(start==4)
{
  output_high(pin_d0);
  output_low(PIN_c2);
data1 = spi_read(0);
data2=spi_read(0);
temp=data1 << 8;
temp = temp | data2;
output_high(PIN_c2);
value=temp >> 3;
value= value*0.25;
itoa(value,10, string);
lcd_gotoxy(1,1);
printf(lcd_putc,"TEMP%d TIME%d.%d",realtemp,realtime1,realtime2);
lcd_gotoxy(1,2);
printf(lcd_putc,"TEMP%d TIME%d.%d ",value,t1,t2);
t2++;
delay_ms(1000);
if(t2>59)
{
t2=0;
t1++;
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if((t1>=realtime1)&(t2>=realtime2))
{
    start=5;
    output_low(pin_d0);
}
if(value>=realtemp)
{
    start=5;
    output_low(pin_d0);
}
}
if(start==5)
{
    lcd_gotoxy(1,1);
    printf(lcd_putc," REMOVE BEARING ");
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc,"TEMP%d TIME%d.%d ",value,t1,t2);
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ข้อมูลอุปกรณ์

#### คุณสมบัติของ PIC16F877A มีดังนี้

1. มีคำสั่งเป็นภาษาแอสเซมบลี 35 คำสั่ง
2. ใน 1 คำสั่งใช้เวลาทำงาน 1 - 2 cycle
3. ทำงานสูงสุดที่สัญญาณนาฬิกาตั้งเดิไฟตรงถึง 20MHz
4. ทำงานแบบ Pipe-Line สามารถทำงาน 2 อย่างในเวลาเดียวกัน
5. มีหน่วยความจำเป็นแบบ Flash มีขนาด 8kWord(1Word=14bit)
6. มีหน่วยความจำข้อมูล( Data Memory RAM )ขนาด 368 byte
7. มีหน่วยความจำข้อมูลแบบ EEPROM ขนาด 256 byte
8. ตอบสนองการอินเทอร์รัปต์ได้ทั้งหมด 14 แหล่ง
9. มี Stack ให้ใช้ได้ทั้งหมด 14 แหล่ง
10. มีระบบ Power On Reset, Power Up timer, Oscillator Start- up bf. Watchdog Timer
11. มีระบบ Code Protection กันการคัดลอก
12. มีโหมดประหยัดพลังงาน
13. สัญญาณนาฬิกา มีหลายโหมดให้เลือกใช้งาน คือ อาจจะใช้ XTAL หรือ RC ก็ได้
14. สามารถโปรแกรมด้วยไฟ +5VCC ได้
15. ใช้ไฟแบบ In-Circuit Serial Programming
16. ทำงานที่ไฟเลี้ยง 2VDC ถึง 5VDC
17. Current Sink และ Current Source อยู่ที่ 25 mA
18. มี Timer/Counter 3 ตัวคือ Timer 0 ขนาด 8 bit , Timer 1 ขนาด 16 bit และ Timer 2 ขนาด 8bit
19. Capture/Compare/PWM ( Pulse Width Modulation ) 2 ชุด
20. มีวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล( A/D Converter )ขนาด 10 bit
21. มีระบบ USART สำหรับการสื่อสารแบบ RS232
22. มีระบบตรวจสอบระดับไฟเลี้ยง ( Brown-out Reset )
23. มี i/o ทั้งหมด 5 พอร์ต แต่ละพอร์ตมีจำนวน bit ไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0 C to +1024 C)

**MAX6675**

**General Description**

The MAX6675 performs cold-junction compensation and digitizes the signal from a type-K thermocouple. The data is output in a 12-bit resolution, SPI™-compatible, read-only format.

This converter resolves temperatures to 0.25 C, allows readings as high as +1024C, and exhibits thermocouple accuracy of 8LSBs for temperatures ranging from 0C to +700C.

The MAX6675 is available in a small, 8-pin SO package.

**Features**

- Direct Digital Conversion of Type -K Thermocouple Output
- Cold-Junction Compensation
- Simple SPI-Compatible Serial Interface
- 12-Bit, 0.25 C Resolution
- Open Thermocouple Detection

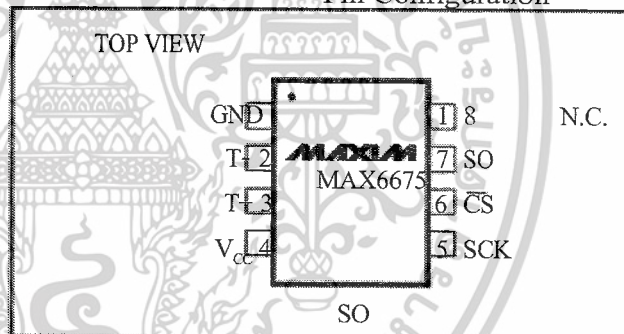
**Ordering Information**

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE
MAX6675ISA	-20 C to +85 C	8 SO

**Applications**

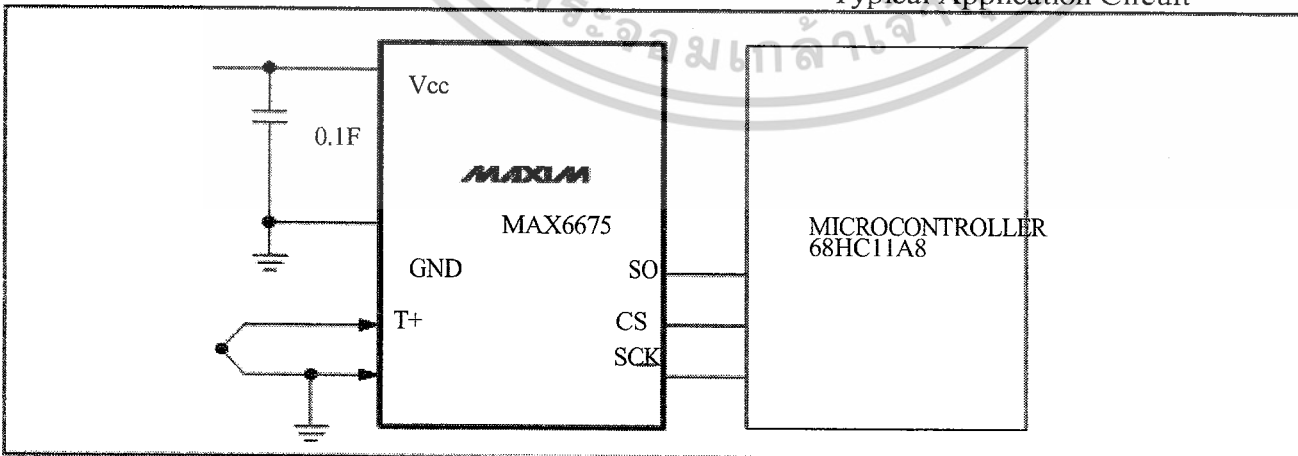
Industrial Appliances  
HVAC  
Automotive

**Pin Configuration**



SPI is a trademark of Motorola, Inc.

**Typical Application Circuit**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cold-Junction-Compensated  
to-Digital Converter (0 C to +1024 C)

K-Thermocouple-

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage ( $V_{CC}$ to GND) .....	-0.3V to +6V	Storage Temperature Range ... ..	-65 C to +150 C
SO, SCK, CS, T-, T+ to GND .....	-0.3V to $V_{CC} + 0.3V$	Junction Temperature .....	+150 C
SO Current .....	50mA	SO Package	
ESD Protection (Human Body Model) .....	2000V	Vapor Phase (60s) .....	+215 C
Continuous Power Dissipation ( $T_A = +70 C$ )		Infrared (15s) .....	+220 C
8-Pin SO (derate 5.88mW/C above +70 C) .....	471mW	Lead Temperature (soldering, 10s) .....	+300 C
Operating Temperature Range .....	-20 C to +85 C		

Stresses beyond those listed under “Absolute Maximum Ratings” may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

( $V_{CC} = +3.0V$  to  $+5.5V$ ,  $T_A = -20C$  to  $+85C$ , unless otherwise noted. Typical values specified at  $+25C$ .) (Note 1)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Temperature Error	THERMOCOUPLE	$T_A = +25C$ (Note 2), $V_{CC} = +3.3V$	-5		+5	LSB
		$T_A = +25C$ (Note 2), $V_{CC} = +5V$	-6		+6	
		$T_A = 0C$ to $+70C$ , $V_{CC} = +3.3V$	-8		+8	
		$T_A = 0C$ to $+70C$ , $V_{CC} = +5V$	-9		+9	
Thermocouple Conversion Constant	THERMOCOUPLE	$T_A = -20C$ to $+1000C$ , $V_{CC} = +3.3V$	-17		+17	V/LSB
		$T_A = -20C$ to $+1000C$ , $V_{CC} = +5V$	-19		+19	
Cold-Junction Compensation Error		$T_A = -20 C$ to $+85C$ (Note 2), $V_{CC} = +3.3V$	-3.0		+3.0	C
Resolution		$V_{CC} = +5V$	-3.0		+3.0	C
Thermocouple Input Impedance				0.25		$k\Omega$
Supply Voltage	$V_{CC}$		3.0		5.5	V
Supply Current	$I_{CC}$			0.7	1.5	mA
Power-On Reset Threshold	$V_{CC}$ rising		1	2	2.5	V
Power-On Reset Hysteresis				50		mV
Conversion Time		(Note 2)		0.17	0.22	s
SERIAL INTERFACE						
Input Low Voltage	$V_{IL}$				$0.3 \times V_{CC}$	V
Input High Voltage	$V_{IH}$		$0.7 \times V_{CC}$			V
Input Leakage Current	$I_{LEAK}$	$V_{IN} = GND$ or $V_{CC}$			5	A
Input Capacitance	$C_{IN}$			5		pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-  
to-Digital Converter (0 C to +1024 C)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

( $V_{CC} = +3.0V$  to  $+5.5V$ ,  $T_A = -20$  C to  $+85$  C, unless otherwise noted. Typical values specified at  $+25$  C.) (Note 1)

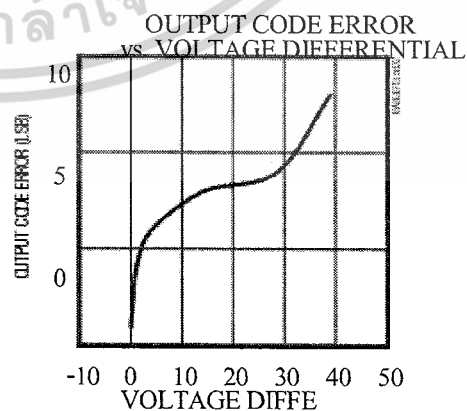
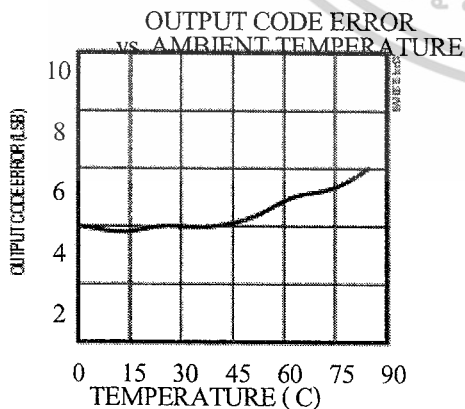
PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	MAX	
Output High Voltage	$V_{OH}$	$I_{SOURCE} = 1.6mA$	$V_{CC} - 0.4$		V
Output Low Voltage	$V_{OL}$	$I_{SINK} = 1.6mA$		0.4	V
TIMING					
Serial Clock Frequency	$f_{SCL}$			4.3	MHz
SCK Pulse High Width	$t_{CH}$		100		ns
SCK Pulse Low Width	$t_{CL}$		100		ns
CSB Fall to SCK Rise	$t_{CSS}$	$C_L = 10pF$	100		ns
CSB Fall to Output Enable	$t_{DV}$	$C_L = 10pF$		100	ns
CSB Rise to Output Disable	$t_{TR}$	$C_L = 10pF$		100	ns
SCK Fall to Output Data Valid	$t_{DO}$	$C_L = 10pF$		100	ns

Note 1: All specifications are 100% tested at  $T_A = +25$  C. Specification limits over temperature ( $T_A = T_{MIN}$  to  $T_{MAX}$ ) are guaranteed by design and characterization, not production tested.

Note 2: Guaranteed by design. Not production tested.

Typical Operating Characteristics

( $V_{CC} = +3.3V$ ,  $T_A = +25$  C, unless otherwise noted.)



MAXIM

MAX6675

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## BTA/BTB16 and T16 Series

SNUBBERLESS™, LOGIC LEVEL & STANDARD

16A TRIACs

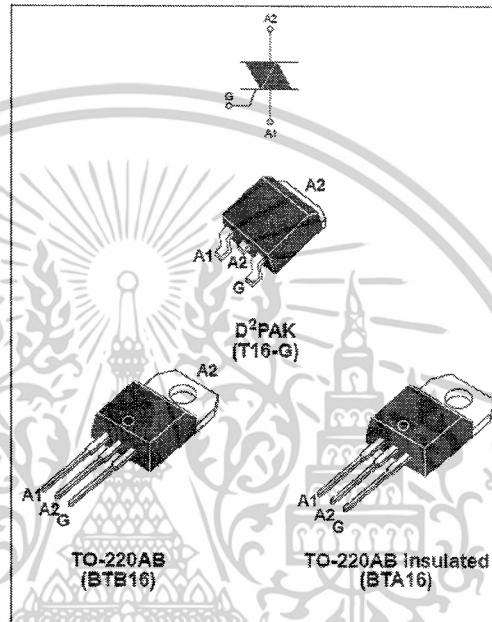
### MAIN FEATURES:

Symbol	Value	Unit
$I_{T(RMS)}$	16	A
$V_{DRM}/V_{RRM}$	600 and 800	V
$I_{GT} (Q_1)$	10 to 50	mA

### DESCRIPTION

Available either in through-hole or surface-mount packages, the BTA/BTB16 and T16 triac series is suitable for general purpose AC switching. They can be used as an ON/OFF function in applications such as static relays, heating regulation, induction motor starting circuits... or for phase control operation in light dimmers, motor speed controllers, ...

The snubberless versions (BTA/BTB...W and T16 series) are specially recommended for use on inductive loads, thanks to their high commutation performances. By using an internal ceramic pad, the BTA series provides voltage insulated tab (rated at 2500V RMS) complying with UL standards (File ref.: E81734).



### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit	
$I_{T(RMS)}$	RMS on-state current (full sine wave)	D <sup>2</sup> PAK T <sub>c</sub> = 100°C	16	A
		TO-220AB		
		TO-220AB Ins. T <sub>c</sub> = 85°C		
$I_{TSM}$	Non repetitive surge peak on-state current (full cycle, T <sub>J</sub> initial = 25°C)	F = 60 Hz t = 16.7 ms	168	A
		F = 50 Hz t = 20 ms	160	
$I_t^1$	I <sup>1</sup> <sub>t</sub> Value for fusing t <sub>p</sub> = 10 ms		144	A <sup>2</sup> s
di/dt	Critical rate of rise of on-state current I <sub>G</sub> = 2 x I <sub>GT</sub> , t <sub>r</sub> ≤ 100 ns	F = 120 Hz T <sub>J</sub> = 125°C	50	A/μs
V <sub>DSM</sub> /V <sub>RSM</sub>	Non repetitive surge peak off-state voltage	t <sub>p</sub> = 10 ms T <sub>J</sub> = 25°C	V <sub>DRM</sub> /V <sub>RRM</sub> + 100	V
I <sub>GM</sub>	Peak gate current	t <sub>p</sub> = 20 μs T <sub>J</sub> = 125°C	4	A
P <sub>G(AV)</sub>	Average gate power dissipation	T <sub>J</sub> = 125°C	1	W
T <sub>stg</sub>	Storage junction temperature range		- 40 to + 150	°C
T <sub>J</sub>	Operating junction temperature range		- 40 to + 125	

October 2001 - Ed: 4

1/7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## BTA/BTB16 and T16 Series

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T<sub>J</sub> = 25°C, unless otherwise specified)

## ■ SNUBBERLESS™ and LOGIC LEVEL (3 Quadrants)

Symbol	Test Conditions	Quadrant		T16	BTA/BTB16			Unit
				T1635	SW	CW	BW	
I <sub>GT</sub> (1)	V <sub>D</sub> = 12 V R <sub>L</sub> = 33 Ω	I - II - III	MAX.	35	10	35	50	mA
V <sub>GT</sub>		I - II - III	MAX.	1.3				V
V <sub>GD</sub>	V <sub>D</sub> = V <sub>DRM</sub> R <sub>L</sub> = 3.3 kΩ T <sub>J</sub> = 125°C	I - II - III	MIN.	0.2				V
I <sub>H</sub> (2)	I <sub>T</sub> = 500 mA		MAX.	35	15	35	50	mA
I <sub>L</sub>	I <sub>G</sub> = 1.2 I <sub>GT</sub>	I - III	MAX.	50	25	50	70	mA
		II		60	30	60	80	
dV/dt (2)	V <sub>D</sub> = 67 % V <sub>DRM</sub> gate open T <sub>J</sub> = 125°C		MIN.	500	40	500	1000	V/μs
(di/dt) <sub>c</sub> (2)	(dV/dt) <sub>c</sub> = 0.1 V/μs T <sub>J</sub> = 125°C			-	8.5	-	-	A/ms
	(dV/dt) <sub>c</sub> = 10 V/μs T <sub>J</sub> = 125°C		MIN.	-	3.0	-	-	
	Without snubber T <sub>J</sub> = 125°C			8.5	-	8.5	14	

## ■ STANDARD (4 Quadrants)

Symbol	Test Conditions	Quadrant		BTA/BTB16		Unit
				C	B	
I <sub>GT</sub> (1)	V <sub>D</sub> = 12 V R <sub>L</sub> = 33 Ω	I - II - III	MAX.	25	50	mA
V <sub>GT</sub>		IV	MAX.	50	100	
V <sub>GD</sub>	V <sub>D</sub> = V <sub>DRM</sub> R <sub>L</sub> = 3.3 kΩ T <sub>J</sub> = 125°C	ALL	MIN.	1.3		V
I <sub>H</sub> (2)	I <sub>T</sub> = 500 mA	ALL	MIN.	0.2		V
I <sub>L</sub>	I <sub>G</sub> = 1.2 I <sub>GT</sub>	I - III - IV	MAX.	25	50	mA
		II		40	60	
dV/dt (2)	V <sub>D</sub> = 67 % V <sub>DRM</sub> gate open T <sub>J</sub> = 125°C		MIN.	80	120	V/μs
(dV/dt) <sub>c</sub> (2)	(di/dt) <sub>c</sub> = 7 A/ms T <sub>J</sub> = 125°C		MIN.	200	400	V/μs
				5	10	V/μs

## STATIC CHARACTERISTICS

Symbol	Test Conditions			Value	Unit
V <sub>TM</sub> (2)	I <sub>TM</sub> = 22.5 A t <sub>p</sub> = 380 μs	T <sub>J</sub> = 25°C	MAX.	1.55	V
V <sub>to</sub> (2)	Threshold voltage	T <sub>J</sub> = 125°C	MAX.	0.85	V
R <sub>d</sub> (2)	Dynamic resistance	T <sub>J</sub> = 125°C	MAX.	25	mΩ
I <sub>DRM</sub>	V <sub>DRM</sub> = V <sub>RDM</sub>	T <sub>J</sub> = 25°C	MAX.	5	μA
I <sub>RDM</sub>		T <sub>J</sub> = 125°C		2	mA

Note 1: minimum I<sub>GT</sub> is guaranteed at 5% of I<sub>GT</sub> max.

Note 2: for both polarities of A2 referenced to A1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## BTA/BTB16 and T16 Series

## THERMAL RESISTANCES

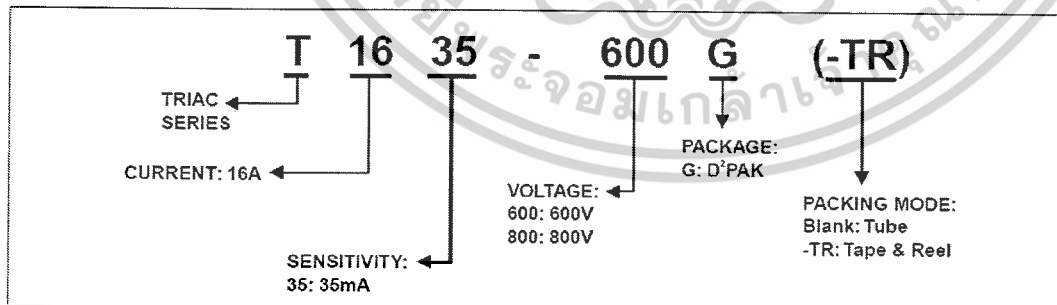
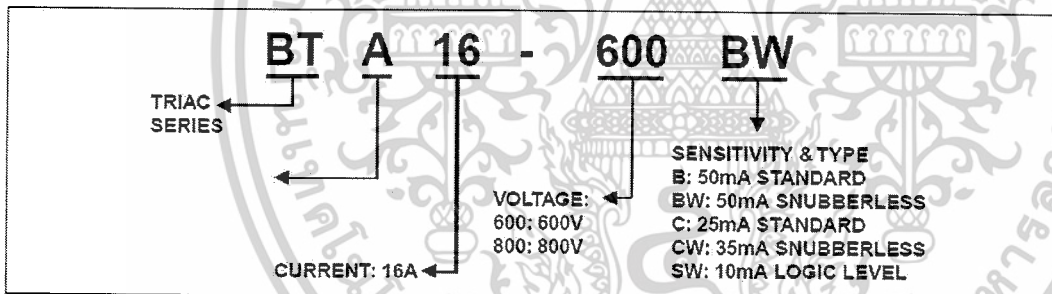
Symbol	Parameter		Value	Unit	
$R_{th(j-c)}$	Junction to case (AC)		D <sup>2</sup> PAK TO-220AB	1.2	°C/W
			TO-220AB Insulated	2.1	
$R_{th(j-a)}$	Junction to ambient	S = 1 cm <sup>2</sup>	D <sup>2</sup> PAK	45	°C/W
			TO-220AB	60	
			TO-220AB Insulated		

S: Copper surface under tab

## PRODUCT SELECTOR

Part Number	Voltage(XXX)		Sensitivity	Type	Package
	600 V	800 V			
BTA/BTB16-xxxB	X	X	50 mA	Standard	TO-220AB
BTA/BTB16-xxxBW	X	X	50 mA	Snubberless	TO-220AB
BTA/BTB16-xxxC	X	X	25 mA	Standard	TO-220AB
BTA/BTB16-xxxCW	X	X	35 mA	Snubberless	TO-220AB
BTA/BTB16-xxxSW	X	X	10 mA	Logic level	TO-220AB
T1635-xxxG	X	X	35 mA	Snubberless	D <sup>2</sup> PAK

## ORDERING INFORMATION



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

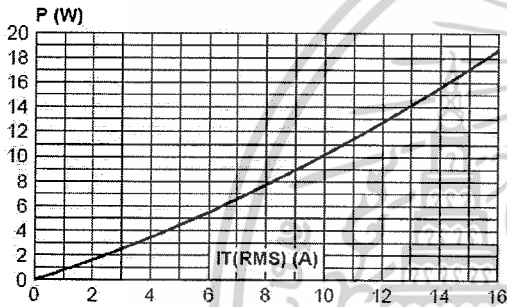
**BTA/BTB16 and T16 Series**

**OTHER INFORMATION**

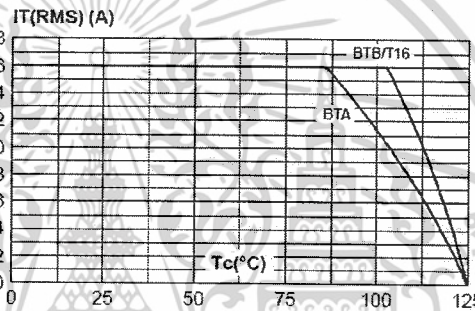
Part Number	Marking	Weight	Base quantity	Packing mode
BTA/BTB16-xxxzy	BTA/BTB16xxxzy	2.3 g	250	Bulk
T1635-xxxG	T1635xxxG	1.5 g	50	Tube
T1635-xxxG-TR	T1635xxxG	1.5 g	1000	Tape & reel

Note: xxx = voltage, y = sensitivity, z = type

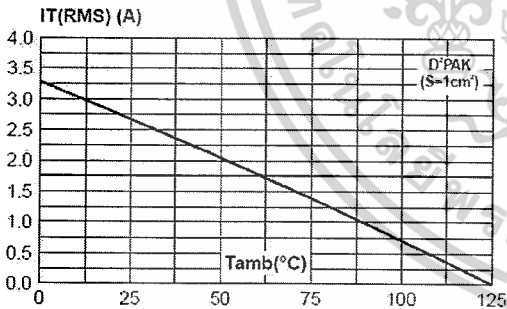
**Fig. 1:** Maximum power dissipation versus RMS on-state current (full cycle).



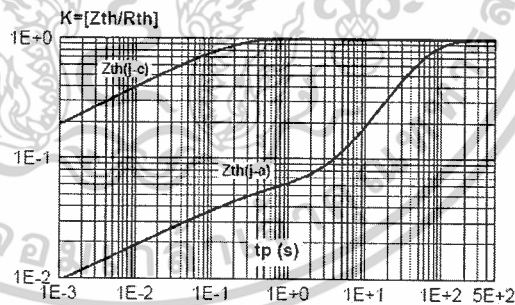
**Fig. 2-1:** RMS on-state current versus case temperature (full cycle).



**Fig. 2-2:** D<sup>2</sup>PAK RMS on-state current versus ambient temperature (printed circuit board FR4, copper thickness: 35 μm), full cycle.



**Fig. 3:** Relative variation of thermal impedance versus pulse duration.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 4: On-state characteristics (maximum values)

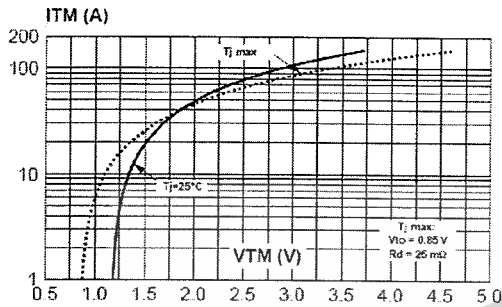


Fig. 5: Surge peak on-state current versus number of cycles.

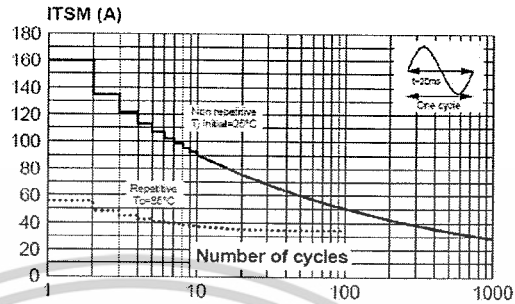


Fig. 6: Non-repetitive surge peak on-state current for a sinusoidal pulse with width  $t_p < 10\text{ms}$ , and corresponding value of  $I^2t$ .

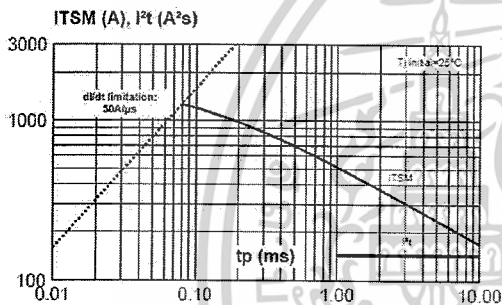


Fig. 7: Relative variation of gate trigger current, holding current and latching current versus junction temperature (typical values).

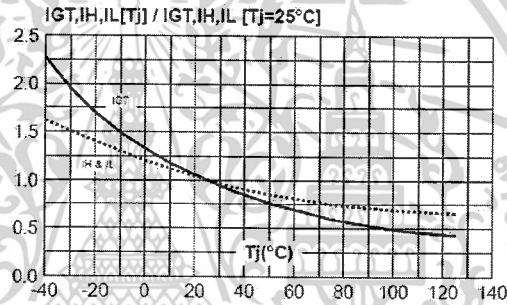


Fig. 8: Relative variation of critical rate of decrease of main current versus  $(dV/dt)_c$  (typical values).

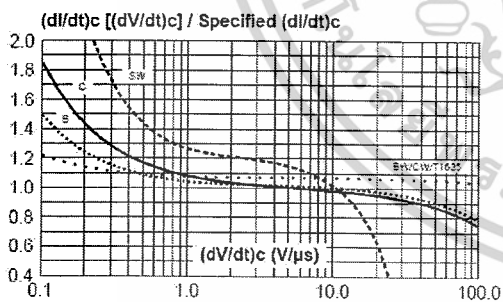
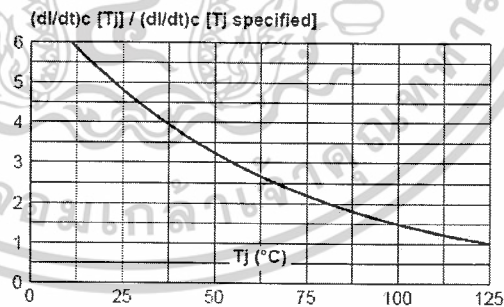


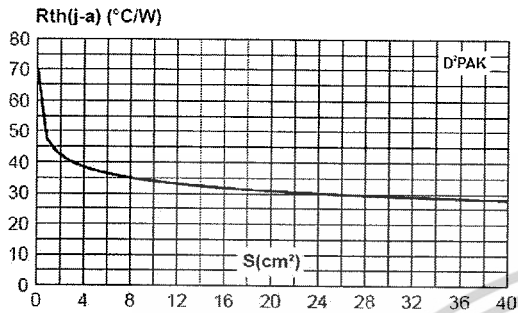
Fig. 9: Relative variation of critical rate of decrease of main current versus junction temperature.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

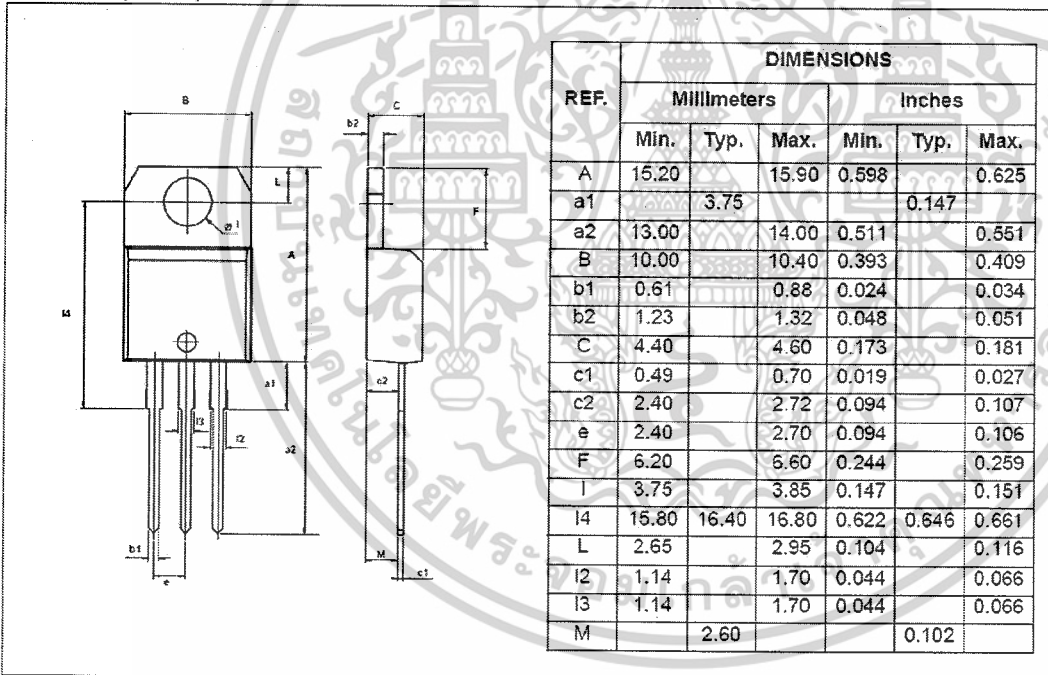
## BTA/BTB16 and T16 Series

Fig. 10: D<sup>2</sup>PAK Thermal resistance junction to ambient versus copper surface under tab (printed circuit board FR4, copper thickness: 35  $\mu\text{m}$ ).



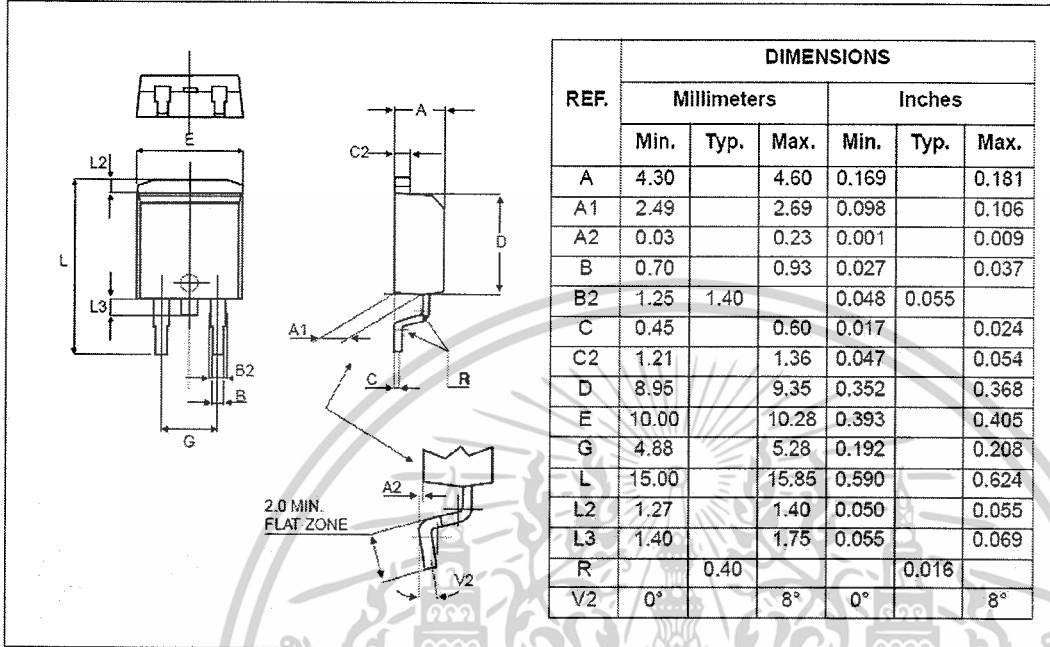
## PACKAGE MECHANICAL DATA

TO-220AB (Plastic)

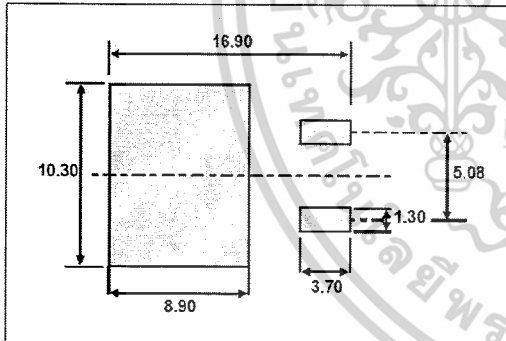


## BTA/BTB16 and T16 Series

## PACKAGE MECHANICAL DATA

D<sup>2</sup>PAK (Plastic)

## FOOTPRINT DIMENSIONS (in millimeters)

D<sup>2</sup>PAK (Plastic)

Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specifications mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

© The ST logo is a registered trademark of STMicroelectronics

© 2001 STMicroelectronics - Printed in Italy - All Rights Reserved

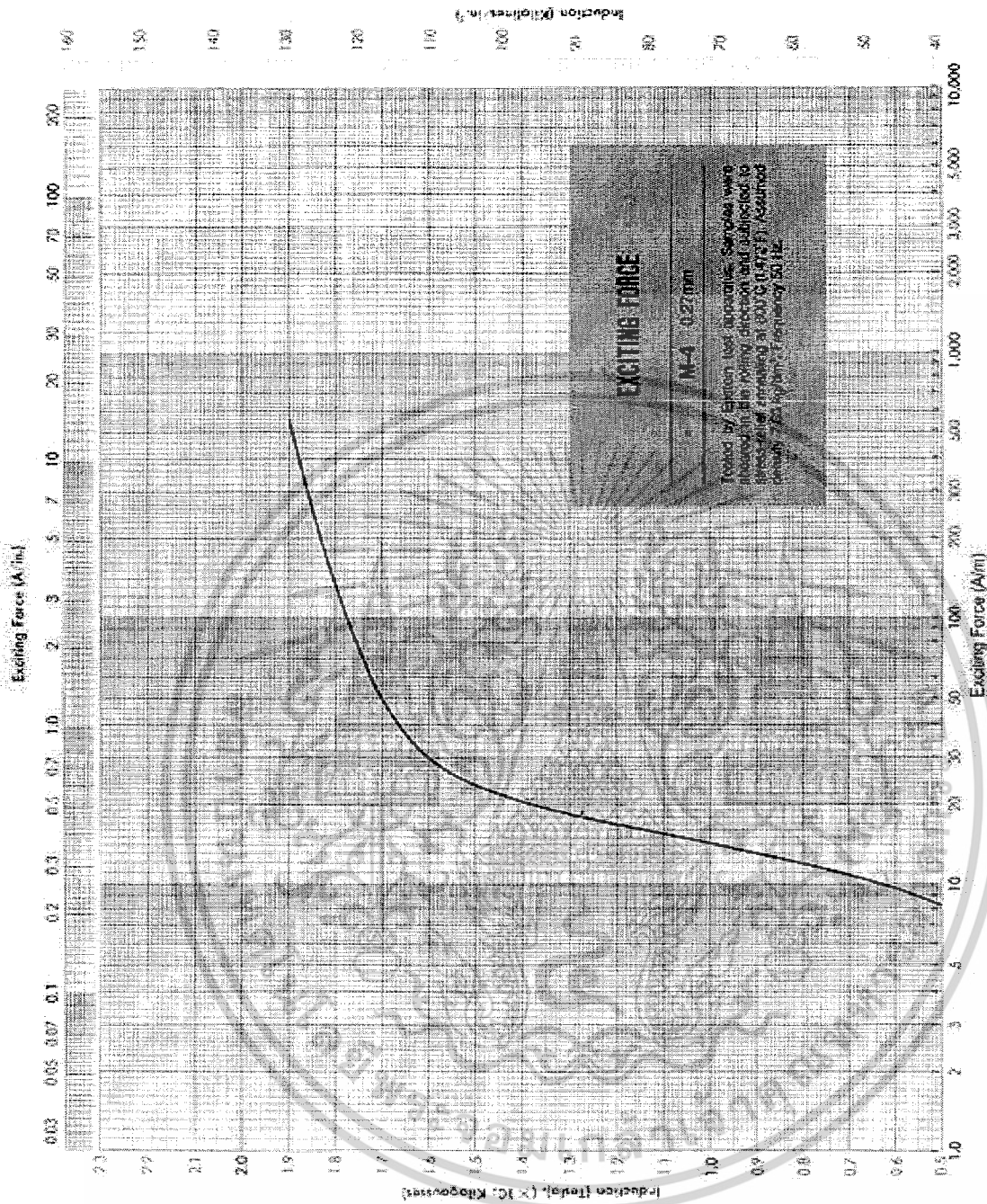
STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES

Australia - Brazil - China - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Italy - Japan - Malaysia  
Malta - Morocco - Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom - U.S.A

<http://www.st.com>

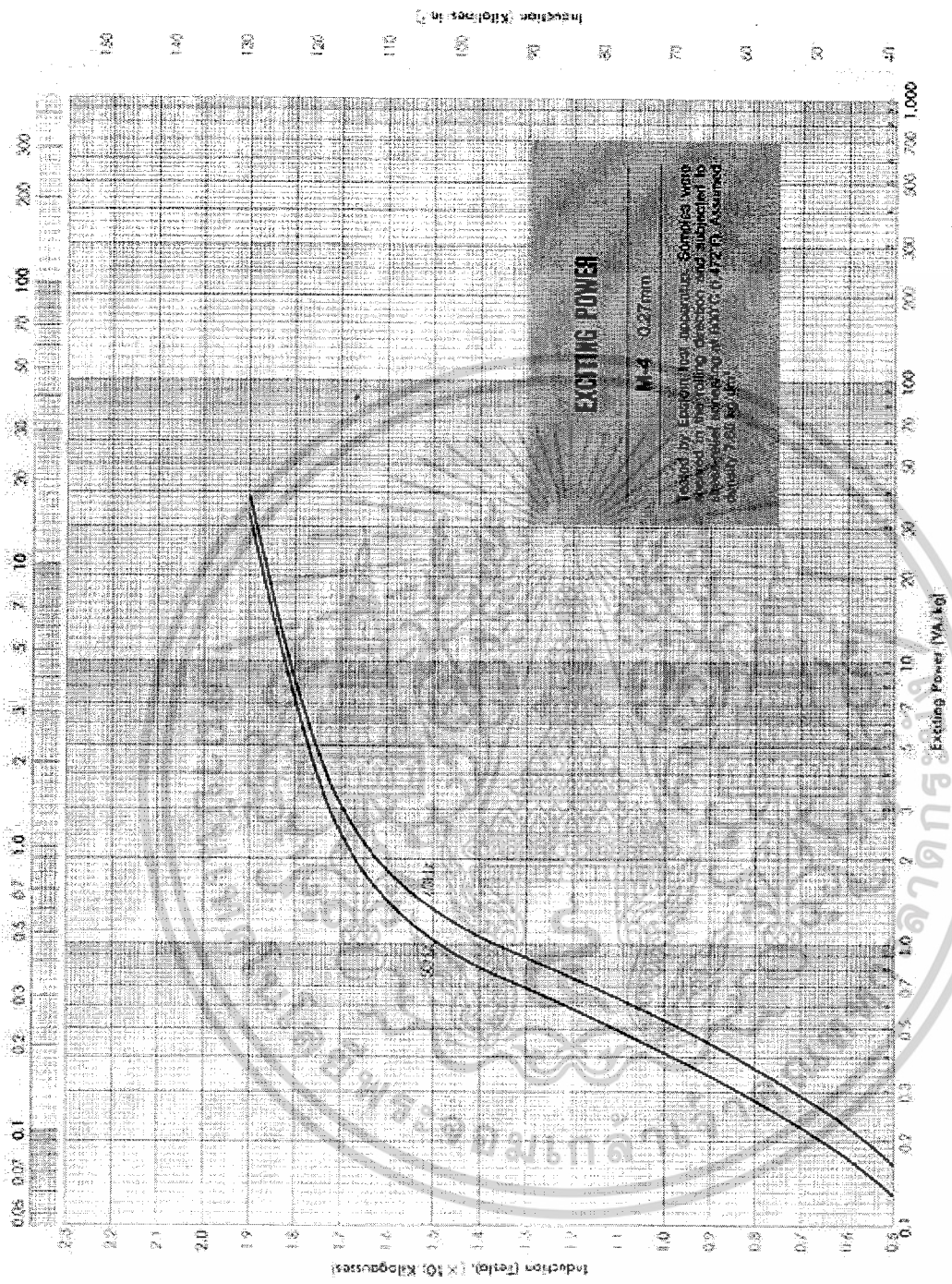


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



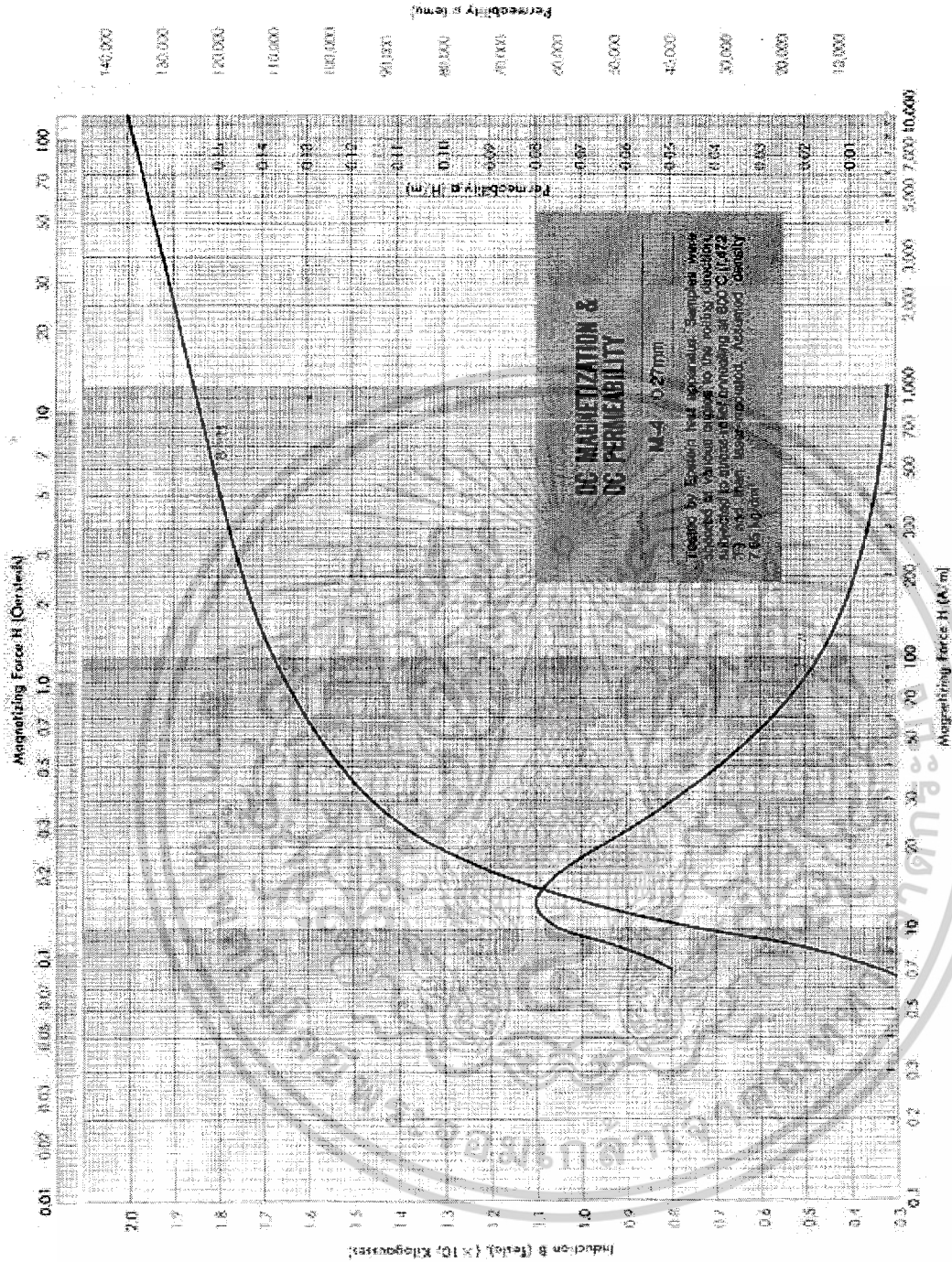
ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้น ( Exciting Force ) กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กของแผ่นเหล็ก M4 หนา 0.27 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



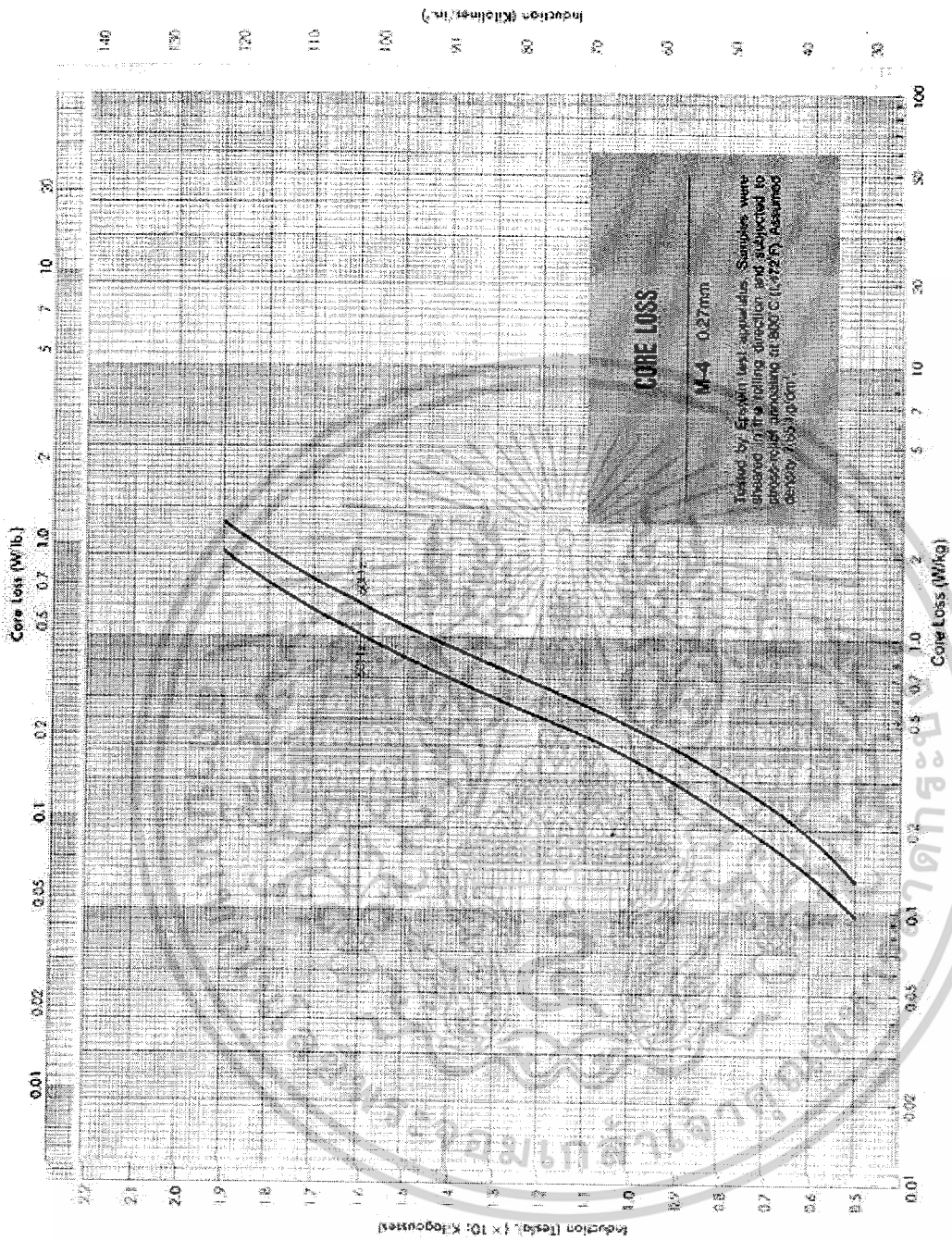
ความสัมพันธ์ B - H ที่ใช้ทำแกนเหล็กของแผ่นเหล็ก M4 ทน 0.27 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความสัมพันธ์ B – H และ  $\mu$  – H กระแสตรงของแผ่นเหล็ก M4 ทน 0.27 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความสูญเสียในแกนเหล็กของแผ่นเหล็ก M4 หนา 0.27 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้