

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

เครื่องขยายตลับลูกปืน

INDUCTION BEARING HEATER

โดย

นาย ประเสริฐ มงคลแสน

นาย ปิยชาติ ศรีแก้ว

ร/พ.  
ร/121 ก  
๑๕๕๐

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

81800

๗๔ ส.ย. ๒๕๕๑

b. ๑๑๑๓๖๑๒๓
i. ....

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา ๒๕๕๐

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2550

เครื่องขยายตลับลูกปืน

INDUCTION BEARING HEATER



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องขยายคลัทช์ลูกรับ

ผู้จัดทำ



1. นาย ประเสริฐ มงคลแสน
2. นาย ปิยชาติ ศรีแก้ว

.....*อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ*.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องขยายคลื่นลูกปืน

นาย ประเสริฐ มงคลแสน

นาย ปิยชาติ ศรีแก้ว

ผศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2550

## บทคัดย่อ

เครื่องขยายคลื่นลูกปืนที่นำเสนอในปฏิญานี้ เป็นสิ่งที่ยากและไม่ต้องการการควบคุมพิเศษ โดยเครื่องต้องการอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่เที่ยงตรงที่นำเสนอ DS1820 ที่ได้รับการปรับปรุงถูกใช้ในการวัดอุณหภูมิและใช้ในการคำนวณเพื่อให้เครื่องทำงานเสร็จสิ้นการทำงาน แล้วแสดงผลแก่ผู้ใช้งาน หลักการทำงานและเงื่อนไขในการออกแบบถูกอธิบายดังในรายละเอียดของปฏิญานี้ ผลการทดลองกำลังไฟฟ้า กระแสและเวลาในการขยายคลื่นลูกปืนขนาดต่างๆ ถือว่าน่าพอใจเมื่อเทียบราคาและความสามารถกับเครื่องที่มีขายในท้องตลาด

## INDUCTION BEARING HEATER

Praserd mongkholsan

Piyachart Srikaew

Asst. Prof. Dr. Anuwat Jangwanitlert Supervisor

2007

### ABSTRACT

Induction Bearing Heater is presented. It is simple to construct due to no special control requirement. It needs the accurate temperature device, DS1820, to calculate and predict time and show the temperature display. The principle and condition of the design are described in the project. The experimental results show that the output power, current, time for bearing expansion. The price of designed induction bearing heater can be compared with the price of market induction bearing heater.

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการรู้สึกซาบซึ้งต่อความกรุณาที่ ผศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ประจำภาช ไพรสวรรณา ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำในครั้งนี้ ถ้าปราศจากท่านโครงการนี้ก็คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณบริษัทสยามสติลซินดิเกต จำกัด ที่สนับสนุนให้ตลับลูกปืนเพื่อใช้ในการทดลอง และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ภาคเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังให้เบิกใช้เครื่องมือ , เจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการ และผู้จัดทำต้องขอบคุณเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการ(lab) ที่คอยเอาใจใส่คอยถามไถ่ตลอดเวลา

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่คอยส่งเสียเงินทอง ให้ผู้จัดทำเรียนหนังสือจนจบในครั้งนี้

## IV

### สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ชื่อโครงการ.....	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.3 วัตถุประสงค์.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 วัสดุที่ใช้ทำดัดลบลูกปืน.....	3
2.2 วิธีการประกอบดัดลบลูกปืนกับเพลลา.....	4
2.3 การขยายตัวทางกลศาสตร์ของวัสดุ.....	6
บทที่ 3 แม่เหล็กและหม้อแปลงเบื้องต้น.....	7
3.1 หลักการพื้นฐานทางไฟฟ้า.....	7
3.2 ค่าสูญเสียทางไฟฟ้า.....	13
3.3 การสูญเสียในแกนเหล็ก.....	18
3.3.1 การสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์ซิส ( $P_h$ ).....	18
3.3.2 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ( $P_e$ ).....	19
3.4 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ.....	22
3.4.1 เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple).....	22
3.4.2 RTD (Resistance Temperature Detectors).....	23
3.3.3 เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor Thermally sensitive resistor).....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การออกแบบแกนเหล็กและวงจรถบคุม.....	28
4.1 การออกแบบแกนเหล็กและขดลวด.....	28
4.2 การออกแบบกล่องบรรจุ.....	33
4.3 การออกแบบวงจรถบคุมความร้อนและวงจรถบคุมกำลัง.....	34
4.4 การออกแบบการทดลอง.....	38
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	56
ภาคผนวก .....	60
บรรณานุกรม.....	92
ประวัติผู้เขียน .....	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 วิธีการอัดดัดลูปปืนแบบแน่นเล็กน้อย.....	4
2.2 รูปแสดงระยะการขยายตัวที่อุณหภูมิต่างกันหลายขนาด.....	5
2.3 แสดงการขยายตัวของวัสดุเนื่องจากความร้อน.....	6
3.1 แสดงวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงที่ติดตั้งปฐมภูมิ.....	9
3.2 วงรอบฮีสเตอร์ซีส.....	16
3.3 ผลของความถี่ต่อการเกิดวงรอบฮีสเตอร์ซีส.....	17
3.4 ผลของแรงดันต่อการเกิดวงรอบฮีสเตอร์ซีส.....	17
3.5 (ก) วงฮีสเตอร์ซีสของแม่เหล็กอ่อน (ข) วงฮีสเตอร์ซีสของแม่เหล็กแข็ง.....	18
3.6 การใช้แกนเหล็กแบบเหล็กแผ่นอัดซ้อน ลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน..	20
3.7 ความสูญเสียในแกนเหล็กของแกนเหล็กชนิดต่างๆที่ความหนาต่างกัน.....	20
3.8 ขนาดพื้นที่มากที่สุดภายในวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 หน่วย.....	21
3.9 การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่การตัดแผ่นเหล็กแบบมุมฉากและมุม 45 องศา....	22
3.10 หลักการทำงานของเทอร์โมคัปเปิ้ล.....	23
3.11 ลักษณะหัว RTD.....	24
3.12 วงจรการต่อ RTD แบบ 2 wire.....	25
3.13 วงจรการต่อ RTD แบบ 3 wire.....	26
3.14 วงจรการต่อ RTD แบบ 4 wire.....	27
4.1 แสดงขนาดของคาน.....	28
4.2 แสดงขนาดของแกนเหล็ก.....	29
4.3 แสดงขนาดของ Bobbin ( หน่วย มม.).....	30
4.4 กล่องบรรจุแกนเหล็ก.....	33
4.5 การยึดแกนเหล็กกับโครง.....	33
4.6 ลักษณะของวงจรควบคุม.....	35
4.7 flow chart แสดงการทำงานของ Microcontroller.....	36
4.8 การป้องกันการเชื่อมกันทางไฟฟ้าในขดลวดทองแดง.....	37
4.9 การป้องกันการเชื่อมกันทางไฟฟ้าในแกนเหล็ก.....	38
4.10 วงจรการทดลอง.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิกับเวลาของดัลลูปปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม.....	42
4.12 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิกับกระแสน้ำพุตของดัลลูปปืน เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. ....	43
4.13 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิกับเวลาของดัลลูปปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. ....	45
4.14 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิกับกระแสน้ำพุตของดัลลูปปืน เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. ....	46
4.15 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิกับเวลาของดัลลูปปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. ....	48
4.16 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิกับกระแสน้ำพุตของดัลลูปปืน เส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. ....	49
4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าเวลาที่ดัลลูปปืนร้อนที่ YOKE ขนาดต่างๆ.....	51
4.18 กราฟเปรียบเทียบค่าขนาดกระแสน้ำพุตดัลลูปปืนกับ YOKE ขนาดต่างๆ.....	52
4.19 การสวม YOKE เข้ากับดัลลูปปืน.....	57
4.20 ดัลลูปปืนและเวอร์เนีย คาร์ลิปเปอร์.....	58
4.21 เครื่องขยายดัลลูปปืน.....	59

## VIII

### สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงขนาดพื้นที่มากที่สุดที่บรรจุในวงกลมที่มีพื้นที่ 100 ตารางหน่วย เทียบกับจำนวนชั้นของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก.....	21
4.1 ผลการทดลองการวัดอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องขยายดัดลูปปืนและ Thermo Hunter.....	39
4.2 ผลการทดลองครั้งที่ 1 ดัดลูปปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. กับ YOKE 2 ซม.....	40
4.3 ผลการทดลองครั้งที่ 2 ดัดลูปปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. กับ YOKE 2 ซม.....	41
4.4 ผลการทดลองครั้งที่ 3 ดัดลูปปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. กับ YOKE 2 ซม.....	41
4.5 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลองดัดลูปปืน เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม.....	42
4.6 ผลการทดลองครั้งที่ 1 ดัดลูปปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. กับ YOKE 3 ซม.....	43
4.7 ผลการทดลองครั้งที่ 2 ดัดลูปปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. กับ YOKE 3 ซม.....	44
4.8 ผลการทดลองครั้งที่ 3 ดัดลูปปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. กับ YOKE 3 ซม.....	44
4.9 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลองดัดลูปปืน เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม.....	45
4.10 ผลการทดลองครั้งที่ 1 ดัดลูปปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. กับ YOKE 5 ซม.....	46
4.11 ผลการทดลองครั้งที่ 2 ดัดลูปปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. กับ YOKE 5 ซม.....	47
4.12 ผลการทดลองครั้งที่ 3 ดัดลูปปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. กับ YOKE 5 ซม.....	47
4.13 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลองดัดลูปปืน เส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม.....	48
4.14 ผลการทดลองดัดลูปปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. กับ YOKE 5 ซม.....	50
4.15 ผลการทดลองดัดลูปปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. กับ YOKE 3 ซม.....	50
4.16 ผลการทดลองดัดลูปปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. กับ YOKE 2 ซม.....	51
4.17 แสดงขนาดการขยายตัวของดัดลูปปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. ที่อุณหภูมิ 110 °C .....	53
4.18 แสดงขนาดการขยายตัวของดัดลูปปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. ที่อุณหภูมิ 110 °C .....	53
4.19 แสดงขนาดการขยายตัวของดัดลูปปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. ที่อุณหภูมิ 110 °C .....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ชื่อโครงการ

โครงการเรื่อง เครื่องขยายตลับลูกปืน ( Induction Bearing Heater ) สร้างขึ้นเพื่อความสะดวกปลอดภัยและทำให้เสียเวลาน้อยที่สุด สำหรับการติดตั้งตลับลูกปืนในวงการอุตสาหกรรม

### 1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในโรงงานรีดเหล็กเส้น ตลับลูกปืนเม็ดทรงกระบอกแบบสี่แฉกมักถูกเลือกใช้ให้สามารถถอดเปลี่ยนลูกรีดจากแท่นได้ง่าย แหวนในตลับลูกปืน เหล่านี้จะสวมแน่นไว้บนคอเพลลาของลูกรีด ลูกรีดจะต้องถูกเปลี่ยนบ่อยครั้ง เพราะว่สึกหรือจากการทำงานการรับน้ำหนักสูงและสิ่งปนเปื้อนต่างๆ จึงต้องถอดและติดตั้งแหวนในกับลูกรีดใหม่อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

โดยวิธีการติดตั้งแบบเดิมนั้นจะใช้วิธี การต้มตลับลูกปืนในน้ำมันร้อน หรือการใช้ไฟลนที่ตลับลูกปืน กรณีที่ตลับลูกปืนมีขนาดเล็ก โดยจะต้องรักษาระดับอุณหภูมิในน้ำมันให้คงที่ที่ 120 องศาเซลเซียส นานประมาณ 10-15 นาที จนทำให้ตลับลูกปืนมีความร้อนซึ่งจะส่งผ่านทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางวงในของตลับลูกปืน เกิดการขยายตัวได้ประมาณ 100-150  $\mu\text{m}$  [1]ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่างตลับลูกปืนกับเพลลา จะขึ้นอยู่กับค่าของการสวมอัดแน่นและขนาดของตลับลูกปืน โดยปกติแล้วอุณหภูมิของเพลลาประมาณ 80 °C ถึง 90 °C (144 °F ถึง 162 °F) จึงจะเพียงพอต่อการติดตั้งตลับลูกปืนเข้ากับเพลลาไม่ควรจะให้ความร้อนกับตลับลูกปืนมีอุณหภูมิเกิน 125 °C เพราะวัสดุของตลับลูกปืนจะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ มีผลให้ความกลมและค่าความแข็งอาจจะแปรผันได้ ควรหลีกเลี่ยงการให้ความร้อนมากเกินไป และไม่ควรใช้เปลวไฟลนลูกปืนจนสามารถประกอบเข้ากับเพลลาได้

วิธีการต้มในน้ำมันร้อน	ใช้เครื่องขยายตลับลูกปืน
1.มีความยุ่งยากในการควบคุมระดับอุณหภูมิให้คงที่	1.สามารถทำการขยายโดยปราศจากเปลวไฟ
2.มีความอันตรายจากความร้อนของน้ำมันและเปลวไฟ	2.เมื่อขยายเสร็จแล้วไม่จำเป็นต้องทำความสะอาด
3.ต้องใช้น้ำมันจำนวนมากและเมื่อเสร็จจากการต้มแล้วต้องทำความสะอาดด้วย	3.สามารถใช้กับตลับลูกปืนได้ทุกชนิด ง่ายต่อการใช้งาน และสามารถควบคุมอุณหภูมิได้
4.ต้องคอยสังเกตและควบคุมน้ำมันอยู่เสมอขณะที่ต้ม	4.ค่าใช้จ่ายต่อครั้งตลอดอายุการใช้งานจะมีราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเครื่องขยายดัลบูลูกปีน จะใช้วิธีการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าโดยการ บ้อนไฟฟ้า ทางด้านปฐมภูมิ แล้วอาศัยหลักการของหม้อแปลงเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลทางด้านทุติยภูมิ แต่ในเครื่องขยายดัลบูลูกปีนนั้น จะเปรียบตัวดัลบูลูกปีนเป็นเสมือนขดลวด ทางด้านทุติยภูมิ 1 ขดที่ลัดวงจรอยู่ขณะใช้งาน และด้วยความแตกต่างทางด้านจำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแส ทางด้านทุติยภูมิไหลในตัวดัลบูลูกปีนและในตัวดัลบูลูกปีนก็มีความต้านทานจำเพาะอยู่ ทำให้เมื่อมีกระแสไหลจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นคล้ายกับ การสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กของหม้อแปลงจากกระแสไหลวน ( eddy current ) ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะ และขนาดของดัลบูลูกปีน แต่ละชนิดที่นำมาทำการให้ความร้อน

### 1.3 วัตถุประสงค์

- 1.ศึกษาหลักการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่เกิดภายในชิ้นงาน
- 2.ศึกษาการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- 3.ศึกษาและออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- 4.ทำการต่อวงจรพร้อมกับการทดลองวงจรควบคุม

### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.ได้ความรู้เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าในขดลวดไปใช้งาน
- 2.ได้เรียนรู้การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- 3.ได้เรียนรู้ในการเลือกใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้ตรงกับความต้องการ
- 4.ได้เรียนรู้การออกแบบวงจรจริงในการนำไปใช้งาน
- 5.สามารถนำโครงงานนี้ไปประยุกต์ใช้งานอย่างอื่นได้

### 1.5 ขอบข่ายของงาน

- 1.สร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์และแกนเหล็กที่สามารถเหนี่ยวนำแกดัลบูลูกปีน
- 2.ทดสอบการทำงานของวงจรควบคุม
- 3.ทดสอบการทำงานกับโลหะขนาดต่างๆ

## บทที่ 2

### วัสดุที่ใช้ทำดัลลูปป็นและประกอบกับเพลลา

#### 2.1 วัสดุที่ใช้ทำดัลลูปป็น

วัสดุสำหรับวงแหวนและดัลลูปป็นผิวสัมผัสของแหวน และเม็ดลูกป็นของดัลลูปป็น รับความเค้นหนัก ที่เกิดขึ้นร่วมกัน ดังนั้นวงแหวนและเม็ดลูกป็นจะต้องสามารถรักษาความเที่ยงตรงและความคลาดเคลื่อนในการหมุน ให้ได้ตามความต้องการ [2]วงแหวนและลูกป็นจะต้องทำมาจากวัสดุ ที่มีความแข็งสูงสามารถต้านทานต่อความเค้นล้า ( stress & strain ) มีความต้านทานต่อความสึกหรอ และสามารถรักษารูปร่างได้ เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนและโครเมียมสูง ผ่านกรรมวิธีชุบแข็ง และเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งแบบ Carburized ได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทำวงแหวน และลูกป็นของดัลลูปป็นมาตรฐาน ความแข็งของแหวนและลูกป็นปกติมีค่า HRC 58 องศา ถึง HRC 65 องศา วัสดุที่ใช้กับดัลลูปป็น คือ เหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของคาร์บอนสูง ส่วนผสมทางเคมีมาตรฐาน JIS G 4805 เหล็กกล้าคาร์บอนและโครเมียมสูง เหล็กกล้า SUJ2 เป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งสามารถเทียบได้กับเหล็กกล้า ANSI 5210 ( สหรัฐอเมริกา ) DIN 100 Cr 6 ( เยอรมันตะวันตก ) และ GS 534 A 99( สหรัฐอาณานิคม ) สำหรับ SUJ3 หรือ SUJ5 มีคุณสมบัติความแข็งดี สามารถใช้ได้กับดัลลูปป็นขนาดใหญ่

สำหรับเหล็กกล้าชุบแข็งจะต้องเป็นเหล็กกล้าโครม(Scr)เหล็กกล้า Chromemolyddenum ( SCM ) และเหล็กกล้า Nikel chrom molyddenum ( SCM ) ส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าเนื่องจากการชุบแข็ง และการเติมคาร์บอนให้กับเหล็กกล้าจะได้น้ำของเหล็กแข็งเป็นชั้นๆ ที่ระยะความลึกเหมาะสม เหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งจะให้คุณสมบัติต้านทานต่อแรงเสียดทานดีเยี่ยม

สาเหตุของความล้าทำให้ดัลลูปป็น เกิดการแตกร้าวเกิดจากสิ่งแปลกปลอม ที่ไม่ใช่โลหะผสมอยู่ในวัสดุ ทำดัลลูปป็น ถ้าไม่มีสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่โลหะผสมอยู่ในวัสดุทำดัลลูปป็น จะสามารถยืดอายุการใช้งานของดัลลูปป็นได้ สำหรับดัลลูปป็นทุกชนิด ที่ใช้เหล็กที่มีออกซิเจน และส่วนผสมแปลกปลอมโลหะต่ำซึ่งผ่านกระบวนการสุญญากาศ ทำให้บริสุทธิ์สำหรับดัลลูปป็น ที่ต้องการความมั่นใจในการทำงาน เหล็กกล้าที่หลอมเหลวในสุญญากาศ

( CVEM ) และเหล็กกล้าที่หลอมเหลวด้วยไฟฟ้า ( ESR ) จะเป็นเหล็กกล้าที่มีความบริสุทธิ์สูง สำหรับดัลลูปป็นที่ทำงานในสภาวะอุณหภูมิสูง ( M5D ) สำหรับงานที่ต้องการความต้านทานต่อการกัดกร่อน ควรใช้เหล็กกล้าสแตนเลส ( SUS 440 C ) สำหรับลูกป็นที่ผิวทางเดินลูกป็นได้ผ่านการชุบแข็งด้วยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้าควรใช้เหล็กกล้า machine structural carbon ( S 48 C ถึง S 50 C ) และเหล็กกล้า Chrome molybdenum ( SCM 440 )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 วิธีการอัดตลับลูกปืนแบบแน่นเล็กน้อย

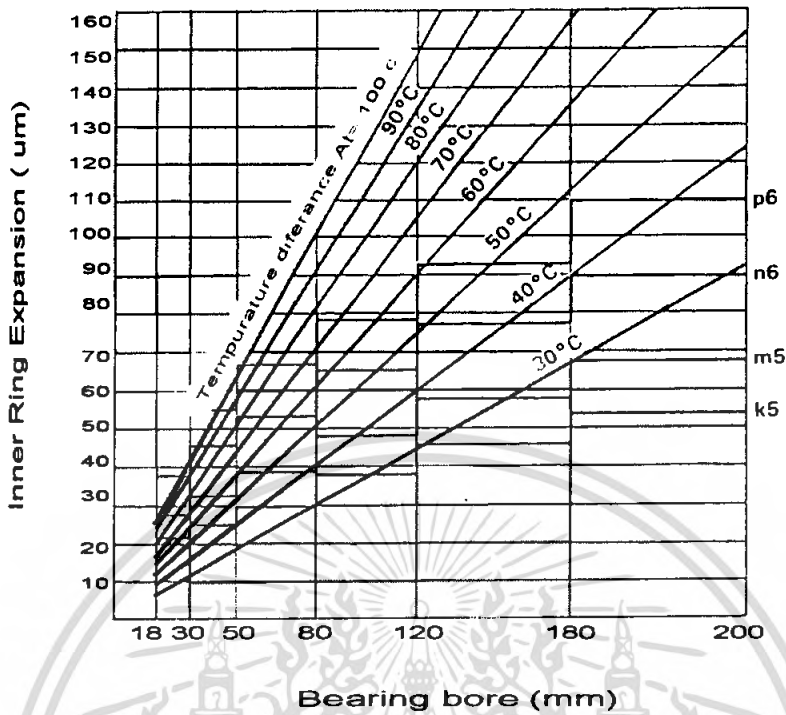
## 2.2 วิธีการประกอบตลับลูกปืนกับเพลลา

การประกอบตลับลูกปืนที่มีรูเพลลาทรงกระบอก ตลับลูกปืนที่มีการประกอบแน่นเล็กน้อยสามารถใช้ประกอบ ที่อุณหภูมิธรรมดาในห้องโดยใช้ความปลอดภัยที่อัดแหวนในดังรูปที่ 2.1 โดยการส่งแรงดันบริเวณศูนย์กลางของตลับลูกปืน แรงดันบนเส้นรอบวงของแหวนจะต้องสม่ำเสมอ ตามปกติการประกอบตลับลูกปืนสามารถทำได้โดยการตีบล็อกด้วยค้อน อย่างไรก็ตาม เมื่อติดตั้งตลับลูกปืนส่วนใหญ่ จะใช้การอัดด้วยเครื่องอัดทางกลหรือเครื่องอัดไฮดรอลิก

เมื่อประกอบตลับลูกปืนที่ไม่สามารถอัดบนเพลลา และเสื่อตลับลูกปืนในเวลาเดียวกัน จำเป็นต้องมีแผนรองเพื่อกระจายแรงดันให้ทั่วบนแหวนในและแหวนนอก

การประกอบตลับลูกปืนที่มีค่าความเผื่อมากที่แหวนใน หรือประกอบกับตลับลูกปืนบนเพลลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ จำเป็นต้องใช้แรงจำนวนมากในการประกอบตลับลูกปืนที่อุณหภูมิธรรมดาในห้อง การประกอบสามารถทำได้ง่ายขึ้นในการใช้ความร้อน ที่แหวนในให้ขยับตัวก่อน ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิมระหว่างแหวนใน และงานที่สวมขึ้นอยู่กับจำนวนค่าความเผื่อ และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิมระหว่างแหวนในและทางปริมาณความร้อนที่ได้กับตลับลูกปืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 รูปแสดงระยะการขยายตัวที่อุณหภูมิต่างๆกันหลายขนาด

ถ้าให้ความร้อนแก่ดัลลูปปืนแบบแห้งเช่นเตาไฟฟ้า ดัลลูปปืนดังกล่าวสามารถสวมประกอบได้โดยไม่ต้องใช้แรงอัด วิธีนี้สามารถใช้กับดัลลูปปืนแบบมีซิลใส่สารหล่อลื่นก่อนใช้งาน หรือดัลลูปปืนที่มีซิล

สำหรับการให้ความร้อนแก่แหวนในของดัลลูปปืนเม็ดทรงกระบอกชนิด NJ,NU หรือ NUP หรือดัลลูปปืนชนิดคล้ายกับดัลลูปปืนที่ไดกล่าว ที่ไม่มีหน้าแปลนหรือมีหน้าแปลนเพียงหน้าเดียว สามารถใช้ความร้อนจากการเหนี่ยวนำไฟฟ้า และด้วยวิธีดังกล่าวนี้ทำให้สามารถประกอบดัลลูปปืนได้รวดเร็ว

การสวมประกอบเพลากับดัลลูป ปืนที่กำลังร้อน นั้นแหวนในจะต้องยันกับป่าเพลาสวมเมื่อดัลลูปปืนเย็นลง ไม่เกิดช่องว่างระหว่างแหวนและป่าเพลลา การให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นวิธีที่ได้อธิบายแล้วนั้นยังสามารถช่วยในการถอดแหวนในโดยใช้เครื่อง ดึงออก

### 2.3 การขยายตัวทางกลศาสตร์ของวัสดุ

การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion) [3] เมื่อวัสดุได้รับอุณหภูมิสูงขึ้น อะตอมจะสั่นแรงขึ้น โมเลกุลจะอยู่ห่างกันมากขึ้นทำให้ปริมาตรของวัตถุเพิ่มขึ้น จากหลักการข้างต้น เมื่อกำหนดขอบเขตในการศึกษา เช่น ในวัตถุรูปทรงที่มีความยาว ก็จะมีการเพิ่มขึ้นของความยาว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามสูตร

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

เมื่อ

$\alpha$  = สัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัตถุเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป

$\Delta t$  = ค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

ความสัมพันธ์ระหว่างแนวคิดกับการใช้งานเมื่อมีการให้อุณหภูมิแก่วัตถุ เช่น แบริ่งตามรูปก็จะทำให้วงแหวนด้านใน และด้านนอกเกิดการขยายตัวออกตามความยาวเป็น  $l + \Delta l$  ทำให้ความยาวจากเดิม  $l = 2\pi r$  ดังนั้นเมื่อให้อุณหภูมิกับวัตถุ

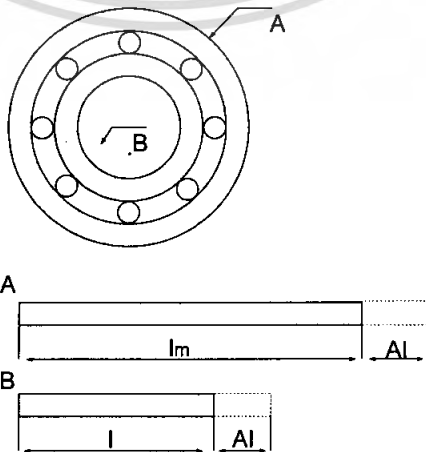
$$l_n = l + \Delta l$$

$$r_n = \frac{l_n}{2\pi}$$

เมื่อ

$r_n$  = รัศมีหลังจากเพิ่มอุณหภูมิ

จึงสรุปได้ว่า เมื่อให้อุณหภูมิที่แบริ่งสูงขึ้น ตัวแบริ่งจะสามารถขยายเส้นผ่านศูนย์กลางได้เพิ่มขึ้นด้วย โดยที่  $r_n > r$  ดังแสดงในรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการขยายตัวของวัสดุเนื่องจากความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### แม่เหล็กและหม้อแปลงเบื้องต้น

#### 3.1 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 สามารถแยกได้เป็นสองส่วนคือ leakage flux,  $\Phi_1$  และ magnetizing flux,  $\Phi_m$  ทั้ง 2 ส่วนจะถูกกำหนดทิศทางให้เป็น + ตามกฎมือขวาเทียบกับทิศทางการไหลของกระแสในขดลวด

ในการวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าบ่อยครั้งกำหนดให้มีค่าบวกและมีทิศทางการไหลออกจากส่วนบนของขดลวดชุดที่ 2 และใช้เครื่องหมาย  $\cdot$  (dot) กำกับที่ส่วนบนของขดลวดฟลักซ์ที่ผ่านขดลวดแต่ละชุดสามารถอธิบายได้ ดังนี้

$$\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{m1} + \Phi_{m2} \quad (3-1)$$

$$\Phi_2 = \Phi_{12} + \Phi_{m2} + \Phi_{m1} \quad (3-2)$$

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,  $\Phi_1$  อาจจะไม่ link ทุกรอบของขดลวดที่ทำให้เกิดมันขึ้น เช่น อาจจะไม่ link ทุกรอบของขดลวดชุดที่ 1 และ magnetizing flux,  $\Phi_m$  ของขดลวดชุดหนึ่งก็อาจจะไม่ link ทุกรอบของขดลวดอีกชุดหนึ่ง (เช่น  $\Phi_{m1}$  อาจจะไม่ link ทุกรอบของขดลวดชุดที่ 2) เพราะฉะนั้นในทางปฏิบัติควรที่จะต้องพิจารณาถึงจำนวนรอบสมมูลย์ (equivalent number) แทนที่จะพิจารณาถึงจำนวนรอบของขดลวด ดังนั้นค่าอินดักแตนซ์ของวงจรที่เชื่อมโยงกันทางแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้าอื่น จึงต้องคำนวณจากสมการทดสอบ

สมการไฟฟ้าสามารถถูกเขียนในรูปของ matrix ได้ดังนี้

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

โดยที่  $R = \text{diag} [ R_1 \ R_2 ]$

ความต้านทาน  $R_1, R_2$  และ flux linkage  $\lambda_1, \lambda_2$  สัมพันธ์กับขดลวดชุดที่ 1, 2 ตามลำดับ เมื่อสมมติให้  $\Phi_1 (\Phi_2)$  อยู่กับจำนวนรอบสมมูล  $N_1 (N_2)$  ของขดลวดชุดที่ 1 (2),

จะได้ความสัมพันธ์ของ flux linkage, ดังนี้

$$\lambda_1 = N_1 \Phi_1 \quad (3-4)$$

$$\lambda_2 = N_2 \Phi_2 \quad (3-5)$$

โดยที่  $\Phi_1$  และ  $\Phi_2$  เป็นไปตามสมการ (3-1) และ (3-2) ตามลำดับ วงจรที่เชื่อมโยงกันทางแม่เหล็กโดยที่มี ในระบบแม่เหล็กที่มีลักษณะเชิงเส้น

ถ้าไม่เกิดการอิ่มตัว (saturation) ในระบบแม่เหล็ก ก็สามารถพิจารณาได้ว่าระบบแม่เหล็กนั้นมีลักษณะเชิงเส้น (linear) และ ฟลักซ์ มีค่าดังนี้

$$\Phi_{11} = \frac{N_1 i_1}{R_{l1}} \quad (3-6)$$

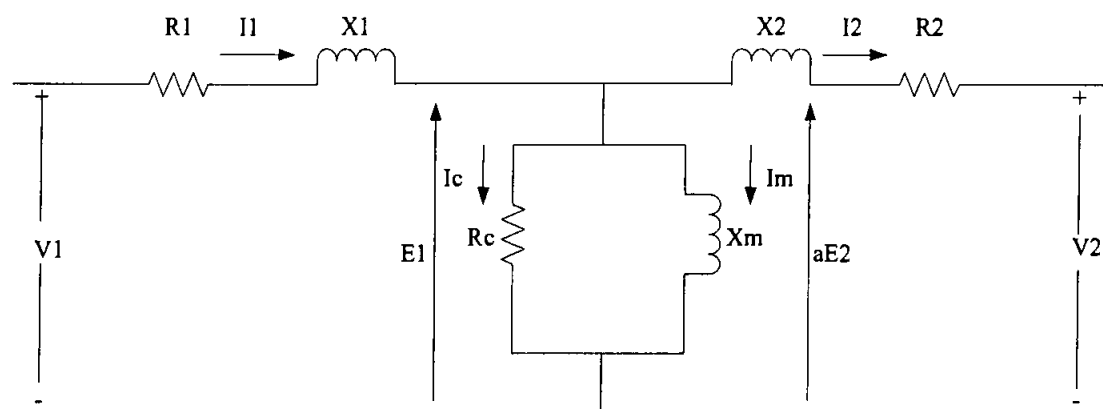
$$\Phi_{m1} = \frac{N_1 i_1}{R_m} \quad (3-7)$$

$$\Phi_{12} = \frac{N_2 i_2}{R_{l2}} \quad (3-8)$$

$$\Phi_{m2} = \frac{N_2 i_2}{R_m} \quad (3-9)$$

โดยที่  $R_{l1}$  และ  $R_{l2}$  คือ reluctance ของเส้นทางที่มีการ leak ของฟลักซ์ (reluctance of leakage path) ผลคูณระหว่าง  $l$  กับ  $N$  (ampere-turns) คือ mmf (magnetomotive force) ซึ่งคำนวณได้จากกฎของแอมแปร์ (Ampere's)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงที่คิดด้านปฐมภูมิ

Reluctance ของเส้นทางในแกนที่ฟลักซ์ผ่าน (reluctance of leakage path),  $R_m$  ของที่แสดงในรูป 3.1 สามารถถูกคำนวณได้โดยที่มีความถูกต้องเพียงพอ จากความสัมพันธ์ ดังนี้

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad \text{Amp/Wb} \quad (3-10)$$

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

$A$  : พื้นที่หน้าตัดของแกน

$\mu$  : permeability ของแกน

แทนค่าสมการ (3-6) ถึง (3-9) ลงในสมการ (3-1) และ (3-2) จะได้

$$\Phi_1 = \frac{N_1 i_1}{R_{l1}} + \frac{N_1 i_1}{R_m} + \frac{N_2 i_2}{R_m} \quad (3-11)$$

$$\Phi_2 = \frac{N_2 i_2}{R_{l2}} + \frac{N_1 i_1}{R_m} + \frac{N_2 i_2}{R_m} \quad (3-12)$$

แทนค่าสมการ (3-11) และ (3-12) ลงในสมการ (3-4) และ (3-5) จะได้

$$\lambda_1 = \frac{N_1^2 i_1}{R_{l1}} + \frac{N_1^2 i_1}{R_m} + \frac{N_1 N_2 i_2}{R_m} \quad (3-13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_2 = \frac{N_2^2 i_2}{R_{l2}} + \frac{N_2^2 i_2}{R_m} + \frac{N_1 N_2 i_1}{R_m} \quad (3-14)$$

จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์ของ 2 เทอมแรกในสมการ (3-13) ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดชุดที่ 1 และ reluctance ของระบบแม่เหล็ก แต่ไม่ขึ้นอยู่กับชุดที่ 2 ในทำนองเดียวกัน สำหรับสมการ (3-14)

ดังนั้น จึงกำหนด (define) เทอม self - inductance ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} L_{11} &= \frac{N_1^2}{R_{l1}} + \frac{N_1^2}{R_m} \\ &= L_{l1} + L_{m1} \end{aligned} \quad (3-15)$$

$$\begin{aligned} L_{22} &= \frac{N_2^2}{R_{l2}} + \frac{N_2^2}{R_m} \\ &= L_{l2} + L_{m2} \end{aligned} \quad (3-16)$$

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 (3-15) และ (3-16) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{L_{m2}}{N_2^2} = \frac{L_{m1}}{N_1^2} \quad (3-17)$$

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

$$L_{12} = \frac{N_1 N_2}{R_m} \quad (3-18)$$

$$L_{21} = \frac{N_2 N_1}{R_m} \quad (3-19)$$

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

$$\begin{aligned} L_{12} &= \frac{N_2 L_{m1}}{N_1} \\ &= \frac{N_1}{N_2} L_{m2} \end{aligned} \quad (3-20)$$

ดังนั้นสามารถเขียน fluxleakage ในรูปของ matrix ได้

$$\lambda = Li \quad (3-21)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} L &= \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} L_{11} + L_{m1} & \frac{N_2}{N_1} L_{m1} \\ \frac{N_1}{N_2} L_{m2} & L_{12} + L_{m2} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3-22)$$

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

$$\lambda_1 = L_{11} i_1 + L_{m1} \left( i_1 + \frac{N_2}{N_1} i_2 \right) \quad (3-23)$$

$$\lambda_2 = L_{12} i_1 + L_{m2} \left( \frac{N_1}{N_2} i_1 + i_2 \right) \quad (3-24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

หรือ  $N_1 i_2' = N_2 i_2$  (3 - 25)

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

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

$$N_2 i_1' = N_1 i_2$$
 (3 - 26)

ในที่นี้  $i_1'$  คือ กระแสเมื่อไหลในขดลวดชุดที่ 2 จะ ทำให้เกิด mmf เท่ากับ mmf ที่เกิดจาก  $i_1$  ไหลในขดลวดชุดที่ 1 ซึ่งเท่ากับเป็นการโอนย้าย กระแสในขดลวดชุดที่ 1 ไปยังขดลวดชุดที่ 2 จากสมการ (3 - 25)

$$i_2' = \frac{N_2}{N_1} i_2$$
 (3 - 27)

ซึ่งการเปลี่ยนตัวแปรจะไม่ทำให้กำลังงาน ( power ) เปลี่ยน ดังนั้น

$$i_2' v_2' = i_2 v_2$$

นั่นคือ

$$v_2' = \frac{N_1}{N_2} v_2$$
 (3 - 28)

เนื่องจากเทอม flux linkage มีหน่วยเป็น volt - second ดังนั้นในการแทนตัวแปรใหม่ ก็จะทำให้ในทำนองเดียวกับแรงดันไฟฟ้าเช่นในสมการ (3 - 28)

นั่นคือ  $\lambda_2' = \frac{N_1}{N_2} \lambda_2$  (3 - 29)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการ (3 - 27) ลงในสมการ (3 - 24) และคูณ (3 - 24) ด้วย  $\frac{N_1}{N_2}$  จะได้เทอม

$\lambda'_2$  และเมื่อแทน  $L_{m2}$  ด้วย  $\frac{N_2^2}{N_1^2} L_{m1}$  ในสมการ (3 - 23) จะได้

$$\lambda_1 = L_{11}i_1 + L_{m1}(i_1 + i'_2) \quad (3 - 30)$$

$$\lambda'_2 = L'_{12}i'_2 + L_{m1}(i_1 + i'_2) \quad (3 - 31)$$

โดยที่

$$L'_{12} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 L_{12} \quad (3 - 32)$$

สมการแรงดันไฟฟ้า จะมีรูปดังนี้

$$v_1 = R_1 i_1 + \frac{d\lambda_1}{dt} \quad (3 - 33)$$

$$v'_2 = R_2 i'_2 + \frac{d\lambda'_2}{dt} \quad (3 - 34)$$

โดยที่

$$R'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2 \quad (3 - 35)$$

### 3.2 ค่าสูญเสียทางไฟฟ้า

ค่าสูญเสียในขดลวด (copper loss) เป็น กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในขดลวดทองแดงที่มาใช้พันเป็นขดปฐมภูมิ และขดทุติยภูมิ นั้นเอง โดยกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียนี้จะเปลี่ยนรูปเป็น ความร้อน ซึ่งค่าเท่ากับ  $I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = (I_1)^2 R_{eq}$  กำลังสูญเสียนี้ ขึ้นกับปริมาณกระแสที่ไหลยกกำลังสอง และจะเห็นว่ากระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ แล้วแต่ขนาดของโหลดว่าจะมีค่าเป็นเท่าไร

ค่าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy current loss) เป็นกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กได้ไปเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในแกนเหล็ก เมื่อแกนเหล็กของหม้อแปลงเป็นเหล็กทั้งก้อน ในนั้นจะมีเส้นแรงแม่เหล็กอยู่ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ผ่านไป ดังนั้นจึงเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นในแกนเหล็กได้ เมื่อมีแรงดันจะมีกระแสไหลวน (Eddy current) ขึ้นในเนื้อเหล็ก กระแสไหลวนในทิศทางเข็มนาฬิกา เนื่องจากทางที่กระแสไหลผ่านนั้นมีค่าความต้านทาน จึงทำให้มีกำลังสูญเสียเท่ากับ  $I^2 R = \frac{V^2}{R}$  ซึ่งล้งไฟฟ้าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูญเสียนี้ จะเปลี่ยนรูปไปเป็นความร้อนในแกนเหล็ก จะเห็นว่าการเกิดความร้อนขึ้นในดลับลูกปืนได้นั้นคล้ายๆกับการเกิดความร้อนในแกนเหล็กเนื่องจากกระแสไหลวน

กฎของโอห์ม ( Ohm 's law ) พิจารณาลวดทองแดง ซึ่งต่อปลายทั้งสองเข้ากับขั้วแบตเตอรี่ที่มีความต่างศักย์  $V$  จะมีกระแสในเส้นลวด โดยกระแส  $I$  จะเป็นสัดส่วนกลับกับความต้านทาน  $R$  และจากกฎของโอห์ม กระแสไฟฟ้า  $I$  ที่ไหลจะเป็นสัดส่วนตรงกับความต่างศักย์ที่ประยุกต์เข้าไปและเป็นสัดส่วนกลับกับความต้านทานของลวด โดยที่

$$i = \frac{V}{R} \quad (3 - 36)$$

เมื่อ  $i$  = กระแสไฟฟ้า A (แอมแปร์)

$V$  = ความต่างศักย์ V ( โวลท์ )

$R$  = ความต้านทาน  $\Omega$  (โอห์ม)

ความต้านทานไฟฟ้า  $R$  ของลวดตัวนำไฟฟ้า จะเป็นสัดส่วนตรงกับความยาวและเป็นสัดส่วนกลับกับพื้นที่หน้าตัด  $A$  ปริมาณเหล่านี้จะสัมพันธ์ โดยมีค่าคงที่ของวัสดุ เรียกว่า สภาวะต้านทานไฟฟ้า  $\rho$  ดังนี้ คือ

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3 - 37)$$

หน่วยของสภาวะความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งมีค่าคงที่สำหรับวัสดุที่อุณหภูมิเฉพาะ คือ

$$\rho = R \frac{A}{l} = \frac{\Omega m^2}{m} = \Omega - m \quad (3 - 38)$$

การเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดอาจพิจารณาในรูปของสภาวะความนำไฟฟ้าแทนที่จะอยู่ในรูปของสภาวะต้านทานไฟฟ้า คือ

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3 - 39)$$

จากสมการต่างๆข้างต้นจะเห็นว่า พลังงานความร้อนสะสมจะมีค่า

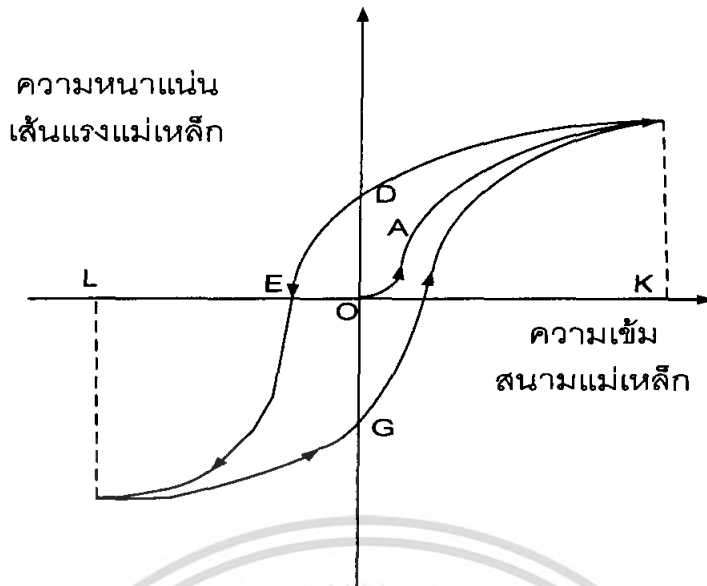
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ( 3 - 40 )  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งพลังงาน ความร้อนจะแปรผันตาม  $I$  และ  $R$  ดังนั้นจะเห็นว่าเมื่อกระแส ( $I$ ) มีค่าสูงขึ้นก็ทำให้เกิดความร้อนขึ้นในโลหะเครื่องขยายดลบลูกปืน ( Induction Bearing Heater ) เปรียบได้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้หลักการ พันขดลวดด้านปฐมภูมิจำนวนรอบมาก และพันขดลวดด้านทุติยภูมิด้วยจำนวนรอบน้อย ๆ บนแกนเหล็กเดียวกัน อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าต่อแรงดันไฟฟ้าด้านออก เท่ากับอัตราส่วนของการพันขดลวด ขณะที่กำลังไฟฟ้าคงเท่ากัน ดังนั้นขดลวดด้านทุติยภูมิที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำๆจะมีกระแสไฟฟ้าสูง

ในกรณีของเครื่องขยายดลบลูกปืน ดลบลูกปืนเสมือนขดลวดทุติยภูมิซึ่งถูกมัดวงจร และมีจำนวนรอบเพียงรอบเดียว ซึ่งทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลวน ( eddy current ) ในดลบลูกปืนสูงมาก ดังนั้นเกิดปริมาณความร้อนจำนวนมากที่ดลบลูกปืน ขณะที่คาน (Yoke) ยังคงมีอุณหภูมิปกติเหมือนเดิม

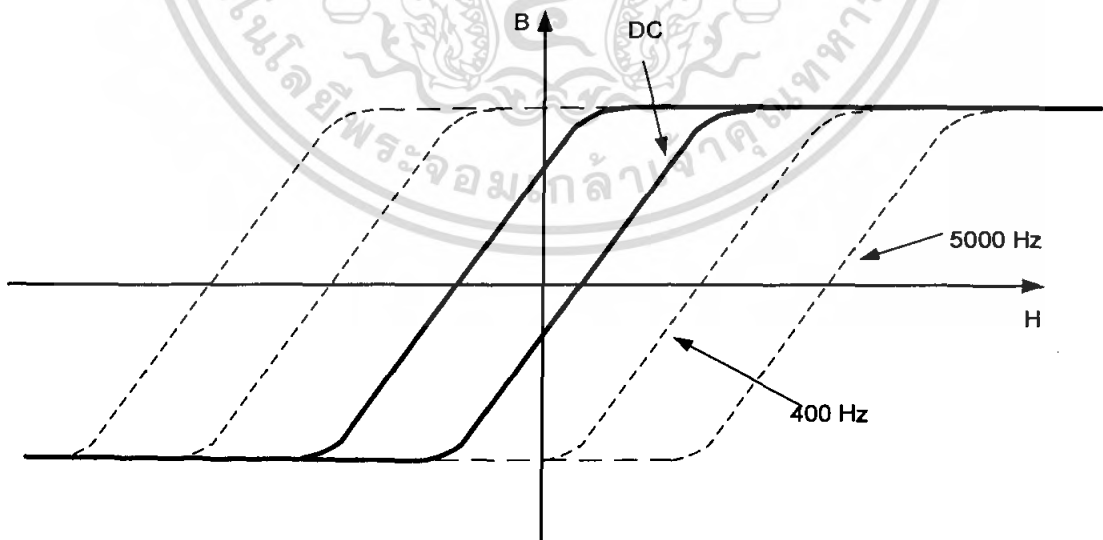
### ฮิสเตอร์ซิส(Hysteresis)

เมื่อป้อนแรงเคลื่อนแม่เหล็กให้กับสารเฟอร์โรแมกเนติก โดยการป้อนกระแสลับให้กับขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็ก เมื่อกระแสเพิ่มขึ้น ความเข้มสนามแม่เหล็ก(H)ก็จะเพิ่มขึ้นด้วยทำให้เส้นแรงแม่เหล็ก (B) เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเกิดการอึดตัวทางด้านบวก ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองแทนด้วยเส้นโค้ง OAK เมื่อลดความเข้มสนามแม่เหล็กลงเป็นศูนย์จะพบว่ายังมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเหลืออยู่ คือ OD เรียกว่าอำนาจแม่เหล็กตกค้าง (Residual magnetism) ถ้าต้องการให้อำนาจแม่เหล็กตกค้างเป็นศูนย์ จะต้องเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงข้าม ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลง จนกระทั่งเป็นศูนย์ที่จุด E ค่าของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก OE ที่ทำให้อำนาจแม่เหล็กตกค้างเป็นศูนย์มีชื่อเรียกว่า โคเออร์ซีฟ ฟอर्स(Coercive force) ถ้าหากว่ายังคงเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กต่อไปอีก จะเป็นเหตุให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงข้ามจนกระทั่งถึงจุดที่แกนเหล็กเกิดการอึดตัวทางด้านลบแทนด้วยเส้น EF หลังจากนั้นถ้าทำการกลับทิศของการป้อนความเข้มสนามแม่เหล็กอีกครั้ง ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นตามเส้นทาง FG ณ จุดนั้นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ แต่จะยังคงมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างทางด้านลบอยู่ และถ้าหากยังคงเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กต่อไปอีก จนถึงค่าค่าหนึ่งความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเป็นศูนย์ และหากยังคงเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กต่อไป ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กก็จะเพิ่มขึ้นจนเกิดการอึดตัวของแกนเหล็กทางด้านบวกเป็นการครบรอบเส้นทางเดินของกราฟ พฤติกรรมดังกล่าวนี้จะเกิดซ้ำอีกเมื่อมีการลดความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กอีกครั้งหนึ่ง เราเรียกเส้นทาง CDEFGC วงรอบฮิสเตอร์ซิส ดังแสดงในรูปที่ 3.2 พื้นที่วงรอบฮิสเตอร์ซิสจะมีความสัมพันธ์กับการสูญเสียในแกนที่จะกล่าวในตอนต่อไป



รูปที่ 3.2 วงรอบฮิสเตอรีซิส

ในการทดสอบสารแม่เหล็ก ในห้องทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กอย่างช้าๆ ซึ่งวงรอบฮิสเตอรีซิสที่ได้จากการทดสอบในลักษณะดังกล่าวเรียกว่า วงรอบฮิสเตอรีซิสไฟฟ้ากระแสตรง (dc hysteresis หรือ static hysteresis loop) แต่ถ้าทำการทดสอบสารแม่เหล็ก ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กอย่างรวดเร็ว ยกตัวอย่างเช่น เปลี่ยนแปลงด้วยความถี่ 50 Hz วงรอบฮิสเตอรีซิสที่ได้จะขยายขึ้น และยิ่งความถี่สูงมากขึ้นวงรอบฮิสเตอรีซิสก็จะยิ่งขยายใหญ่ขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.3

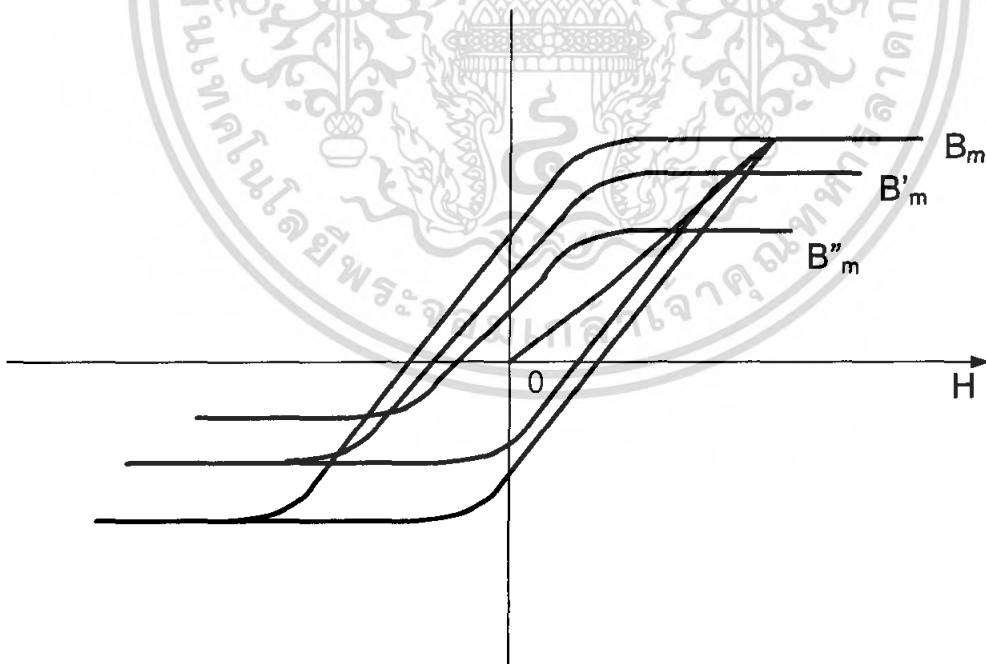


รูปที่ 3.3 ผลของความถี่ต่อการเกิดวงรอบฮิสเตอรีซิส

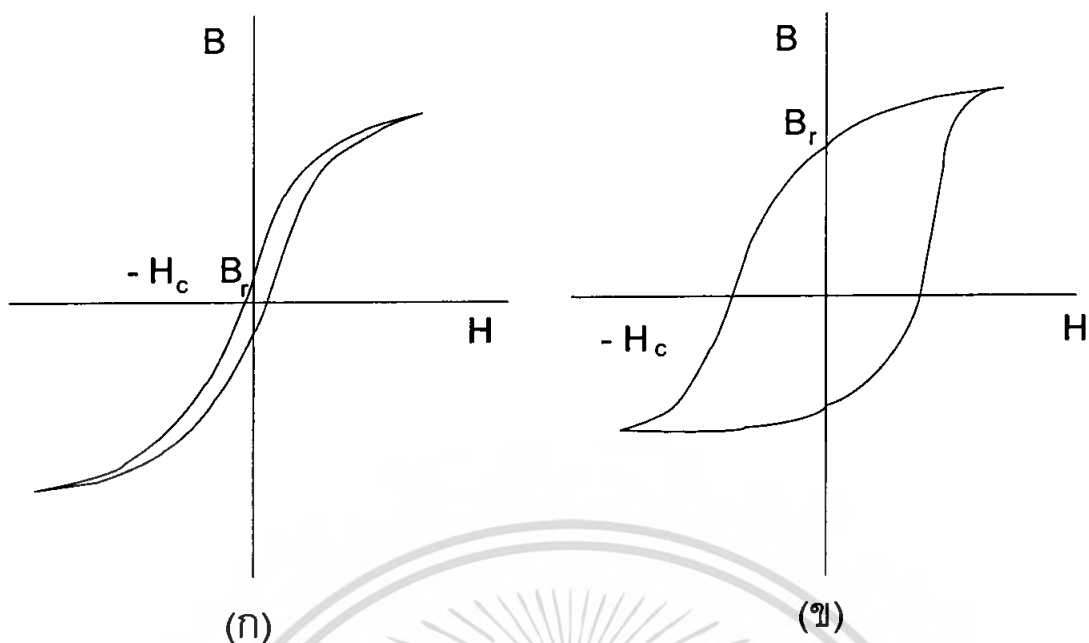
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ต่างๆ พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจากค่า  $B_m$  ไปเป็น  $-B_m$  และกลับไปเป็น  $B_m$  อีกครั้งพลังงานที่ใช้ดังกล่าวจะเรียกว่า ค่าความสูญเสียจากฮิสเตอรีซิส (hysteresis loss) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับพื้นที่วงรอบฮิสเตอรีซิสอีกด้วย สาเหตุที่วงรอบฮิสเตอรีซิสมีขนาดขยายใหญ่ขึ้นเมื่อป้อนความเข้มข้นแม่เหล็กที่ความถี่ค่าต่างๆ เพราะเมื่อความถี่สูงขึ้นก็จะทำให้เกิดจากการกระแสไหลวน (eddy current) ซึ่งเป็นพลังงานสูญเสีย ที่ทำให้วงรอบฮิสเตอรีซิสขยายใหญ่ขึ้น

และถ้ากำหนดให้ค่า ความถี่ จำนวนรอบ และค่าความหนาแน่นแม่เหล็กมีค่าคงที่ จะได้ว่าค่าเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อน ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับที่ป้อนเข้าค่าหนึ่ง ก็จะได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดค่าหนึ่ง ยกตัวอย่างเช่น ถ้ากำหนดให้ วงรอบฮิสเตอรีซิสขนาดใหญ่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.4 กำหนดให้สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสูงสุด และจะได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด  $B_m$  แต่ถ้าทำการลดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับดังกล่าวลง 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 3.4 ผลของแรงดันต่อการเกิดวงรอบฮิสเตอรีซิส



รูปที่ 3.5 (ก) วงฮิสเตอร์ซิสของแม่เหล็กอ่อน (ข) วงฮิสเตอร์ซิสของแม่เหล็กแข็ง

พฤติกรรมการเกิดวงรอบฮิสเตอร์ซิส สามารถที่จะแบ่งวัสดุแม่เหล็กออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่แม่เหล็กอ่อน (soft magnet) และแม่เหล็กแข็ง (hard magnet) ซึ่ง “แม่เหล็กอ่อน” เป็นวัสดุที่ง่ายต่อการทำให้เป็นแม่เหล็กหรือลบล้างอำนาจแม่เหล็ก จึงไม่เป็นแม่เหล็กถาวร ส่วน “แม่เหล็กแข็ง” มีสมบัติตรงข้ามกับแม่เหล็กอ่อน คือต้องใช้สนามแม่เหล็กภายนอกความแรงสูง ในการทำให้เป็นแม่เหล็กและการลบล้างอำนาจแม่เหล็กจะทำได้ยาก จึงจัดเป็นแม่เหล็กถาวร ความแตกต่างของแม่เหล็กอ่อนและแม่เหล็กแข็ง(แม่เหล็กถาวร)จะแสดงได้ด้วยวงฮิสเตอร์ซิส (hysteresis loop) โดยแม่เหล็กอ่อนจะมีวงฮิสเตอร์ซิสแคบ ส่วนแม่เหล็กแข็งจะมีวงฮิสเตอร์ซิสกว้าง ดังแสดงในรูปที่ 3.5

### 3.3 การสูญเสียในแกนเหล็ก

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

#### 3.3.1 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ซิส ( $P_h$ )

พิจารณาพื้นที่ของวงรอบฮิสเตอร์ซิส(ผลคูณของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก) พบว่าเป็นพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่เกิดขึ้นทุกคาบของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดที่พันรอบแกนเหล็ก พื้นที่ดังกล่าวจะหมายถึงความสูญเสีย ที่เรียกว่าความสูญเสียเนื่องจาก ฮิสเตอร์ซิสซึ่งสามารถได้จากสมการที่ 3-41

$$P_h = \frac{1}{2} \left[ \frac{B_m^2}{\mu} \right] V_c f \quad \text{Watt} \quad (3-41)$$

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

เพื่อที่จะลดปัญหาของความสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์ซิส จะต้องไปใช้แกนเหล็กประเภท soft material ในการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้า

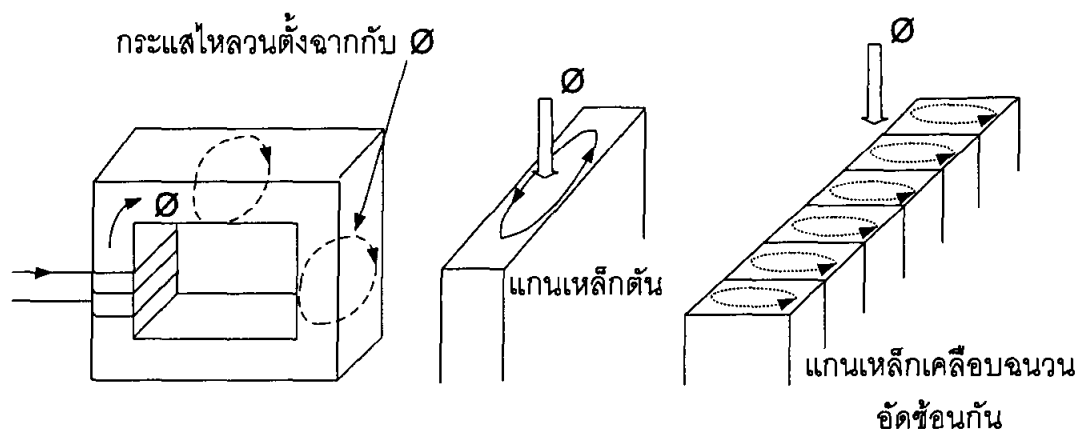
### 3.3.2 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ( $P_e$ )

เมื่อมีกระแสไหลในตัวนำที่คล้องแกนเหล็กอยู่นั้น ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในแกนเหล็กสนามแม่เหล็ก ดังกล่าวจะตัดกับแกนเหล็กซึ่งมีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นในแกนเหล็ก และกระแสก็จะสามารถไหลอยู่ในแกนเหล็กได้ เรียกว่ากระแสไหลวน การเกิดขึ้นของกระแสไหลวนก่อให้เกิดความสูญเสียในทางความร้อนขึ้น เรียกว่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-42

$$P_e = K_e f^2 B_m^2 \quad \text{Watt} \quad (3-42)$$

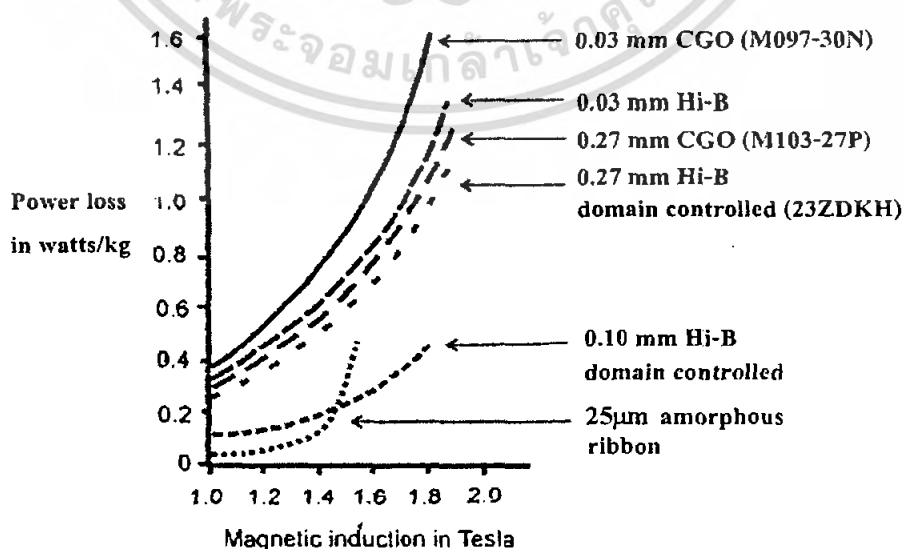
- เมื่อ  $K_e$  = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับเนื้อสารที่นำมาทำแกนเหล็ก  
 $f$  = ความถี่  
 $B_m$  = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด

ขนาดของกระแสไหลวนขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก (ความถี่) และความต้านทานไฟฟ้าของแกนเหล็ก การลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนทำได้โดยใช้แกนเหล็กเป็นแบบเหล็กแผ่นอัดซ้อนกัน (Laminated core) ดังรูปที่ 3.6 โดยแต่ละแผ่นจะใช้สารเคลือบผิวที่มีค่าความต้านทานสูง เช่น ฉาบด้วยน้ำมันวานิช



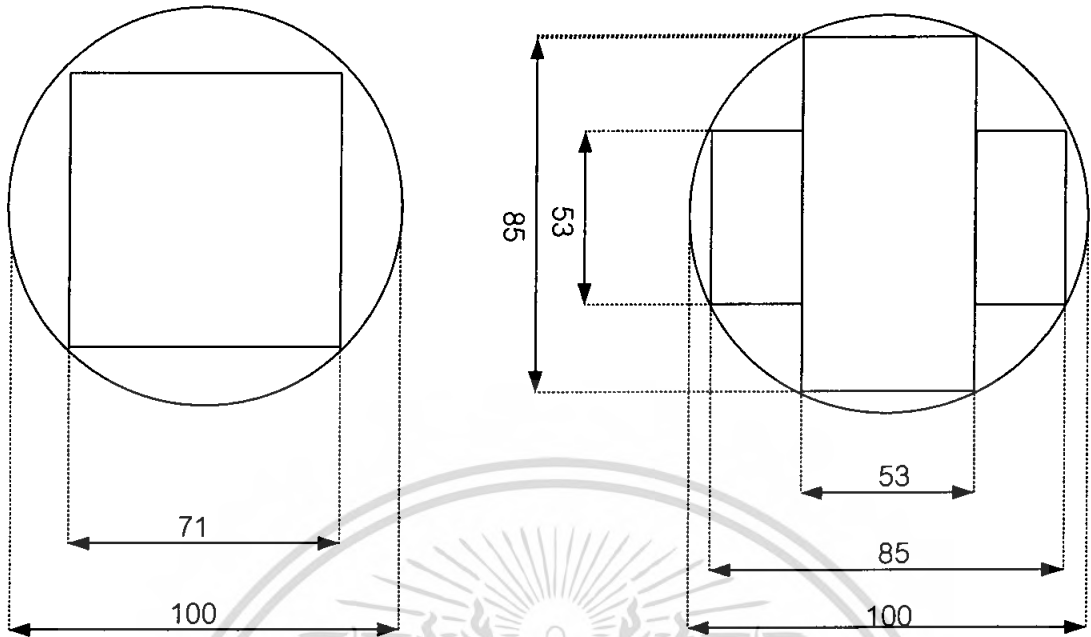
รูปที่ 3.6 การใช้แกนเหล็กแบบเหล็กแผ่นอัดซ้อน เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ซิสและกระแสไหลวนรวมกันเรียกว่าการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) การสูญเสียดังกล่าวเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนา เพราะจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในตัวเครื่องจักรไฟฟ้า วิธีการลดค่าความสูญเสียในแกนเหล็กทำได้โดยการเลือกใช้แกนเหล็กที่มีคุณสมบัติเป็นประเภทแม่เหล็กอ่อน ที่มีลักษณะแผ่นบาง รูปที่ 3.7 แสดงค่าความสูญเสียในแกนเหล็กในหน่วยวัตต์ต่อน้ำหนักของแกนเหล็ก (กิโลกรัม) ของแกนเหล็กชนิดต่างๆ ที่ความหนาต่างกัน โดยทั่วไปแล้วบริษัทผู้ผลิตแกนเหล็กจะเป็นผู้ทดสอบและรายงานค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก ให้ผู้ที่ต้องการเลือกใช้แกนเหล็กนำไปพิจารณา ข้อมูลที่ทางบริษัทนำเสนอจะเป็นค่า ความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของแกนเหล็กนั้น (Watt/kilogram) นอกจากนี้แล้วบริษัทผู้ผลิตแกนเหล็กยังจะให้ข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นกับความหนาแน่นแม่เหล็กอีกด้วย เพื่อให้เกิดความสะดวกในการนำไปใช้ออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าต่อไป



รูปที่ 3.7 ความสูญเสียในแกนเหล็กของแกนเหล็กชนิดต่างๆ ที่ความหนาต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารได้ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ขนาดพื้นที่มากที่สุดภายในวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 หน่วย

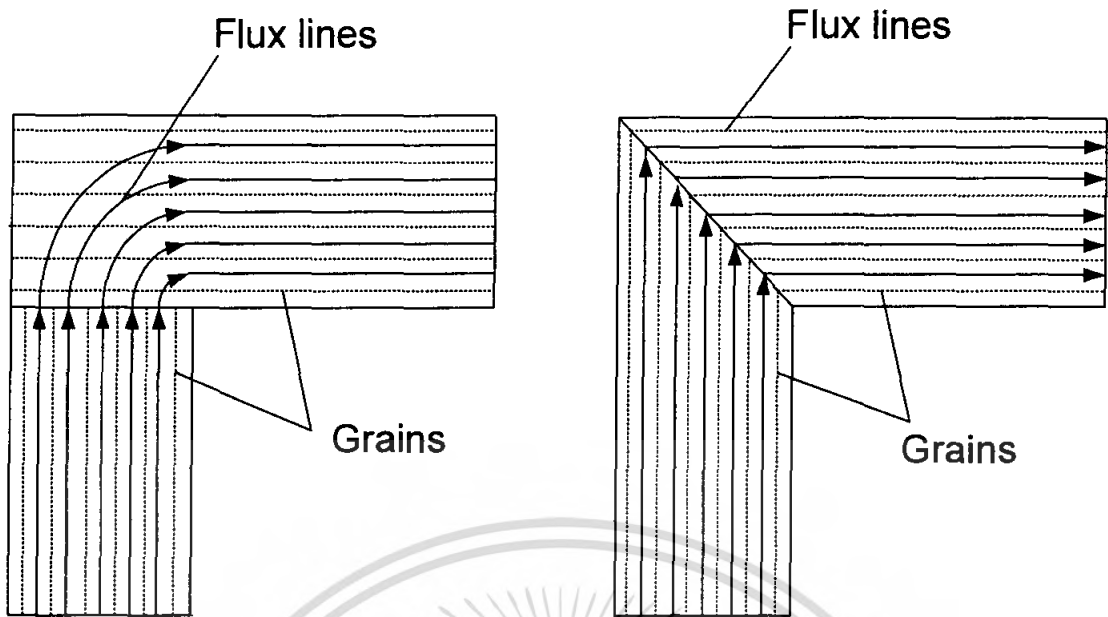
ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดพื้นที่มากที่สุดที่บรรจุในวงกลมที่มีพื้นที่ 100 ตารางหน่วยเทียบกับจำนวนชั้นของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

แบบของหน้าตัดแกนเหล็ก	สี่เหลี่ยมจัตุรัส	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น
ค่าส่วนของหน้าตัดแกนเหล็กเทียบ	64	79	84	87
พื้นที่วงกลมล้อมรอบมากที่สุด				

จากตารางการออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กให้มีหลายชั้นมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการใช้พื้นที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่การตัดแผ่นเหล็กและการประกอบกันเป็นแกนเหล็กนั้นมีความยุ่งยากมากขึ้นเป็นผลให้ค่าแรงในการประกอบสร้างแกนเหล็กมากขึ้น ฉะนั้นในการสร้างหม้อแปลงจำนวนน้อยตัวจึงพยายามออกแบบจำนวนชั้นของหน้าตัดแกนเหล็กให้น้อยที่สุด นอกจากนี้ถ้าออกแบบหน้าตัดแกนเหล็กในแต่ละด้านมีความแตกต่างของจำนวนชั้นมาก จะทำให้กำลังสูญเสียในแกนเหล็กและกระแสสร้างแม่เหล็กสูงขึ้น ตามความแตกต่างของจำนวนชั้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงช่องทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก

การตัดแผ่นเหล็กแบบมุมฉาก จะทำให้การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กไม่สะดวก เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กวิ่งข้ามรอยต่อของแผ่นเหล็ก และการที่เส้นแรงแม่เหล็กข้ามแผ่นเหล็กจากแผ่นหนึ่งไปอีกแผ่นหนึ่งเส้นแรงแม่เหล็กจะไหลในทิศทางตั้งฉากกับการเรียงตัวของเกรนเหล็ก ซึ่งทิศทางนี้แผ่นเหล็กจะมีค่าสภาพซึมซับเป็นหนึ่งในสิบถึงหนึ่งในเจ็ดเท่าของทิศที่เกรนของเหล็กเรียงตัวอยู่ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะกลับทิศทางไหล เป็นผลให้กำลังสูญเสียในแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ในชื่อโครงการแข่งขันเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยี นวัตกรรม และนวัตกรรมใหม่ ๆ เพื่อประเทศไทย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่การตัดแผ่นเหล็กแบบมุมฉากและมุม 45 องศา

เหล็กและกระแสน้ำแม่เหล็กสูงขึ้น การแก้ปัญหานี้จะทำโดยตัดแผ่นเหล็กเป็นมุม 45 องศา ซึ่งจะทำให้การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กสะดวกขึ้นลดค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กและลดค่ากระแสแม่เหล็ก

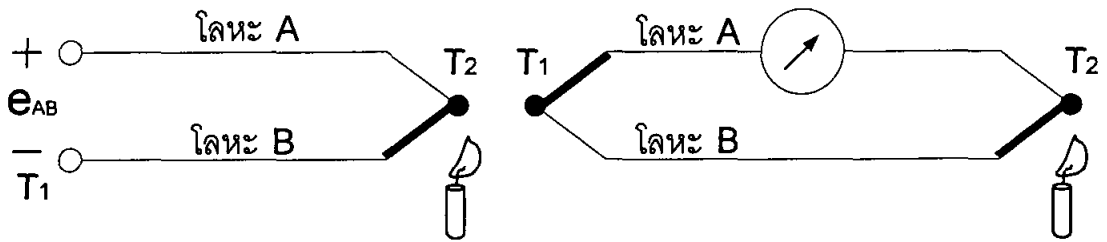
### 3.4 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ[4]

อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แปลงพลังงานความร้อน เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่นิยมใช้กันในปัจจุบันมี 4 ชนิด คือ

#### 3.4.1 เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิ้ลเป็นเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิที่เกิดจากการนำเอาโลหะ 2 ชนิดที่ไม่เหมือนกัน มาเชื่อมปลายเข้าด้วยกัน เมื่อนำปลายอีกด้านหนึ่งของเทอร์โมคัปเปิ้ล ไปวางที่บริเวณต้องการวัดอุณหภูมิจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งโดยค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จะเป็นสัดส่วนกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างปลายด้านที่เชื่อมต่อกันกับปลายด้านที่ติดอยู่ เทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้กันอยู่ มีประมาณ 10 ชนิดเท่านั้นโดย Output ที่จ่ายออกมาทำการวัดจะอยู่ที่ประมาณ 40 mV/ °C โดยเทอร์โมคัปเปิ้ลจะมีย่านการวัดประมาณ -270 °C ถึง 2,300 °C โดยแสดงดังรูป 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 หลักการทำงานของเทอร์โมคัปเปิล

ปริมาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับผลต่างอุณหภูมิของปลายจุดต่อทั้งสองโดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$e_{AB} = aDT \quad (3-43)$$

เมื่อ  $e_{AB}$  : Seebeck Voltage

$a$  : ค่าสัมประสิทธิ์ของ Seebeck มีหน่วยเป็น Volt/K

$DT$  : ผลต่างอุณหภูมิของปลายจุดต่อทั้งสอง

#### 3.4.2 RTD (Resistance Temperature Detectors)

อาร์ทีดี คือ ตัวเซ็นเซอร์อุณหภูมิที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโลหะซึ่งค่าความต้านทานดังกล่าวจะมีค่าเพิ่มตามอุณหภูมิ ความต้านทานของโลหะที่เพิ่มเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นนี้ เรียกว่า “ สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบบวก ” ( Positive Temperature Coefficient ; PTC ) นอกจากนี้อาร์ทีดียังมีชื่อเรียกได้อีกอย่างว่า “ เทอร์โมมิเตอร์แบบค่าความต้านทาน ”

( Resistance Temperatures ) การกำหนดสเกลมาตรฐานจากจุดออกซิเจน (-182.96° C ) ถึงจุดแอนติโมนี ( 630.74° C ) โดย IPTS

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

$$\sigma = -\rho_e \mu_e \quad (3-44)$$

เมื่อ

$\rho_e$  = ความหนาแน่นของประจุอิเล็กตรอนอิสระมีค่าเป็นลบ

$\mu_e$  = ความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอน ; m/V.s

ชนิดของอาร์ทีดี (Type of RTD) แบ่งเป็น 4 ชนิดโดยมีแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3.11

1. แพลทินัม เป็นแบบที่นิยมใช้มากที่สุด เขียนบอกไว้เป็น PT ได้แก่ PT-10 , PT-100, PT-1000 ความสามารถในการทำซ้ำสูง แต่ความไวต่ำ ราคาแพงมากเมื่อเทียบกับนิกเกิลซึ่งมี ความสามารถในการทำซ้ำน้อย แต่มีความไวมากกว่า และราคาถูกกว่า
2. ทองคำและเงิน ธาตุทั้งสองมีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำ
3. ทังสเตน มีค่าความต้านทานจำเพาะสัมพัทธ์สูง มักใช้กับการวัดอุณหภูมิที่มีค่าสูง เพราะ หากใช้ที่อุณหภูมิปกติจะมีความเปราะและยากต่อการใช้งาน
4. นิกเกิล ใช้กับย่านวัดอุณหภูมิสูงๆ มีความเป็นเชิงเส้นต่ำ ทำให้เกิดค่าดริฟต์ (drift) กับเวลา นอกจากนี้ยังมีวัสดุชนิดอื่นๆ ที่ใช้ทำอาร์ทีดี ได้แก่ เหล็ก เป็นต้น

คุณลักษณะของอาร์ทีดี (Characteristic of RTD)

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



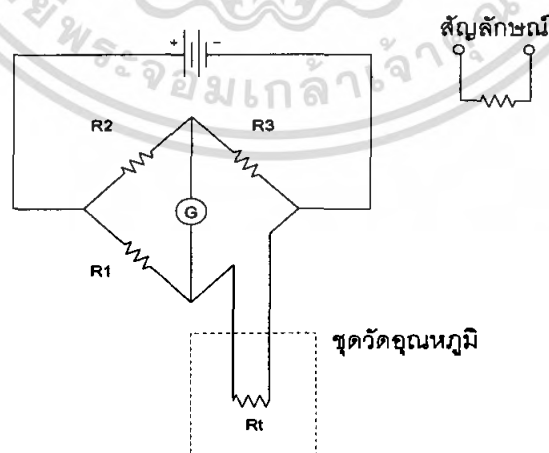
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 3.11 ลักษณะทั่วไป RTD อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลตอบสนองต่อเวลา (Response Time) เวลาในการตอบสนองของอาร์ทีดีที่เกิดจากการนำความร้อน โดยทั่วไปเวลาคงที่จะกำหนดโดยสภาวะอากาศอิสระ ( หรือสภาวะใดๆ ที่สมมูลกัน) หากว่ามันอยู่ในฝักป้องกัน (sheath) มันจะสัมผัสความร้อนได้ไม่ดี จึงทำให้ได้ผลตอบสนองต่อเวลาช้า
3. โครงสร้าง ( Construction ) แน่นนอนว่าอาร์ทีดีที่มีความยาวของสายมาก จะทำให้ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิมาก
4. การปรับสภาพสัญญาณ (Sine Conditioning)
5. ค่าคงที่ในการสูญเสีย (Dissipation Constant)
6. ย่านการใช้งาน (Range) ย่านประสิทธิภาพการใช้งานของอาร์ทีดีจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นอุปกรณ์แอททีฟ พบว่า อาร์ทีดีแบบแพลทินัม จะมีย่านใช้งานจาก  $-100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $650^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่อาร์ทีดีที่ทำจากนิกเกิลจะมีช่วงใช้งานจาก  $-180^{\circ}\text{C}$  ถึง  $300^{\circ}\text{C}$

ข้อควรจำในการวัดอุณหภูมิโดยใช้อาร์ทีดี คือ

1. ต้องมีการชิลด์สายและเดินสายบิตเกลียวเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน
2. อาร์ทีดีมีความเปราะบาง จึงต้องป้องกันและระวังการใช้งาน
3. เนื่องจากที่อาร์ทีดีไม่สามารถกำเนิดพลังได้เหมือนกับเทอร์โมคัปเปิ้ล จึงทำให้มีกระแสไหลผ่านและเกิดผลของความร้อนจูล ( $i^2R$ ) กับตัวมันเอง

- RTD 2 สาย วงจรใช้งานพื้นฐานของ RTD คือ Wheathstone Bridge โดย  $R_t$  คือ RTD ซึ่งติดตั้งอยู่ในจุดที่ต้องการวัดอุณหภูมิ มีค่าความต้านทานอีก 3 ค่าในวงจร คือ  $R_1$ ,  $R_2$ , และ  $R_3$  ซึ่งต้องอยู่ที่อุณหภูมิห้อง และเป็นความต้านทานชนิดที่มีความถูกต้องสูง ดังรูปที่ 3.12



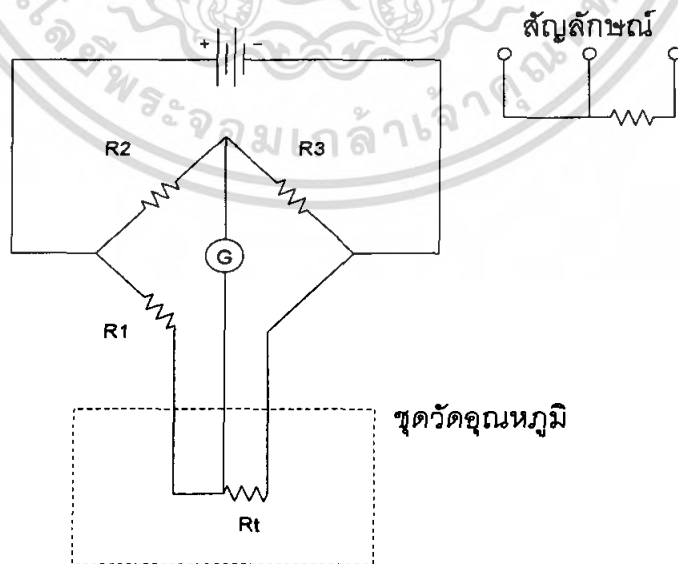
รูปที่ 3.12 วงจรการต่อ RTD แบบ 2 wire

วงจร Bridge จะอยู่ในสภาวะสมดุล เมื่อ RTD (Rt) อยู่ที่ 0 °C แล้วทำให้  $R1/R3 = R1/R2$  ซึ่งจะไม่มีการแสไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ เมื่ออุณหภูมิที่ Rt สูงขึ้น ค่า Rt จะเพิ่มขึ้นทำให้ วงจร Bridge ไม่สมดุลและมีการแสไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ เมื่ออุณหภูมิที่ Rt สูงขึ้น ค่า Rt จะเพิ่มขึ้นทำให้ วงจร Bridge ไม่สมดุลและมีการแสไหลผ่าน กัลวานอมิเตอร์ อย่างไรก็ตาม RTD 2 สาย เหมาะกับงานที่ RTD อยู่ใกล้กับวงจรเท่านั้น ไม่เหมาะกับงานที่ต้องลากสายยาว ๆ เนื่องจากจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นจากค่าความต้านทานสะสมของสายตัวนำ ทำให้ค่าที่อ่านได้ผิดเพี้ยนไป RTD 2 สายจึงเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการความถูกต้องสูงนัก

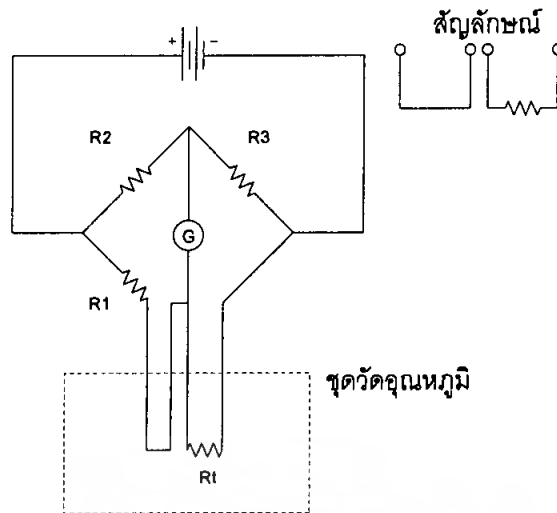
- RTD 3 สาย เป็นที่นิยมใช้ที่สุดในอุตสาหกรรม โดยสายทั้ง 3 เป็นแบบที่นิยมใช้ที่สุดในอุตสาหกรรม โดยสายทั้ง 3 ที่อยู่ระหว่างจุดที่วัดกับวงจร จะต้องมีความยาวเท่ากัน และอยู่ในอุณหภูมิเดียวกันตลอดเพื่อให้ค่าความต้านทาน r1, r2 และ r3 เปลี่ยนไปในทิศทางเดียวกันด้วยขนาดที่เท่ากัน นั่นคือ

$$\frac{Rt+r3}{R3} = \frac{R1+r1}{R2} \tag{3-45}$$

เนื่องจาก r1 เท่ากับ r3 เพราะฉะนั้นอุณหภูมิที่วัดจึงขึ้นอยู่กับ Rt เพียงตัวเดียว ทำให้ RTD 3 สายมีความถูกต้องสูงกว่า RTD แบบ 2 สาย มีการต่อวงจรดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรการต่อ RTD แบบ 3 wire



รูปที่ 3.14 วงจรการต่อ RTD แบบ 4 wire

- RTD 4 สาย RTD 4 สายเป็นแบบที่มีความถูกต้องสูงที่สุด เนื่องจากเลื่อนจุดต่อของ Bridge ออกไปอยู่ภายนอกทั้ง 4 จุด สามารถชดเชยความต้านทานของสายตัวนำได้ทั้งหมด โดยสายทั้ง 4 ต้องมีขนาด, ความยาวเท่ากัน และอยู่ในอุณหภูมิเดียวกันตลอดเหมือนกับ RTD 3 สาย ดังรูปที่ 3.14

RTD เป็น Sensor วัตถุอุณหภูมิที่มี Linearity ดีที่สุดมีความถูกต้องสูงและให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูง แต่มีงานการใช้งานไม่กว้างเท่ากับเทอร์โมคัปเปิ้ลและมีราคาแพงกว่าพอสมควร

### 3.3.3 เทอร์มิสเตอร์ (Thermister Thermally sensitive resistor)

เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้ทำเครื่องวัดอุณหภูมิ เนื่องจากคุณสมบัติของเทอร์มิสเตอร์ คือ ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมี 2 แบบ คือ

1. NTC (Negative Temperature Coefficient) เป็นเทอร์มิสเตอร์แบบที่ค่าความต้านทานจะลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็นเซรามิก ที่ผลิตจากโพลีคริสตอลไลน์ (Polycrystalline) NTC จึงมีขนาดเล็ก คงทน และสามารถตอบสนองให้ผลลัพธ์ที่รวดเร็วโดยจะมีค่าความต้านทาน 5 กิโลโอห์มที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และเนื่องจากการตอบสนองที่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ NTC ชนิดนี้จึงไม่เหมาะสำหรับเครื่องวัดอุณหภูมิที่ใช้วัตถุอุณหภูมิสูงๆ และ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้ NTC ชนิดนี้เสียหายได้
2. PTC (Positive Temperature Coefficient) หรือ Platinum (Pt) thermistors เป็นเทอร์มิสเตอร์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันเพราะสร้างจากแผ่นแพลตตินัม ค่าความต้านทานมีตั้งแต่ 0-600 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การออกแบบแกนเหล็กและวงจรวัดคุม

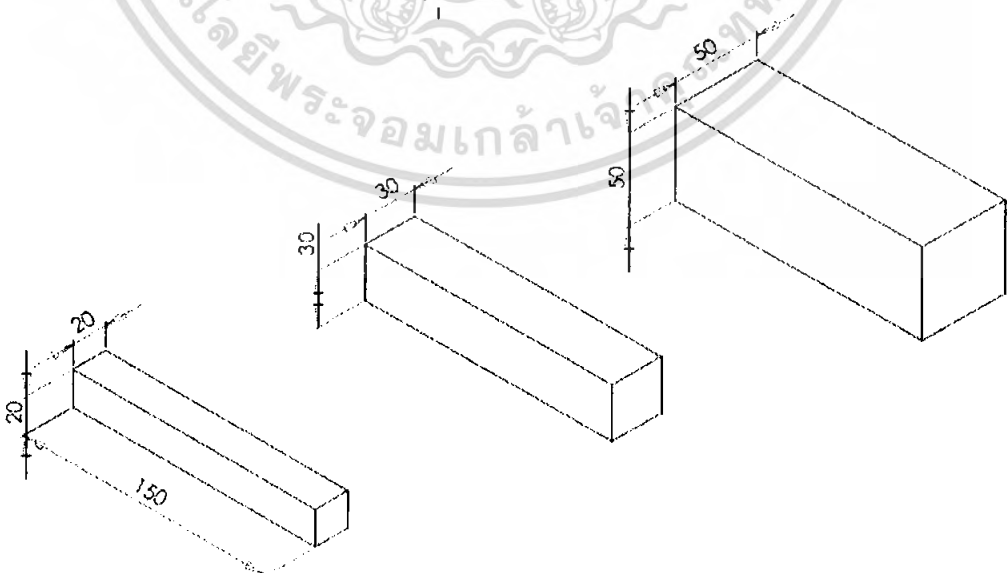
#### 4.1 การออกแบบแกนเหล็กและขดลวด

ในการออกแบบแกนในที่นี่ เราออกแบบพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กตามความเหมาะสมของดัลล์ลูกปืนโดยในที่นี้กำหนดให้ใช้พื้นที่หน้าตัดขนาด  $50 \times 50$  ตร.มม. ซึ่งจะมีคานเท่ากับ  $50 \times 50$  ตร.มม. ทำให้สามารถใช้กับลูกปืนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในตั้งแต่ 80 มม.- 140 มม. และทำการสร้างคานที่มีขนาดเล็กโดยมีขนาด  $30 \times 30$  ตร.มม. และขนาด  $20 \times 20$  ตร.มม. เพื่อที่จะสามารถใช้กับดัลล์ลูกปืนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน ตั้งแต่ 30 มม. - 80 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยกำหนดค่าเริ่มต้นการออกแบบของ

ขนาดพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก = 2,500 ตร.มม.

ขนาด KVA = 3 KVA

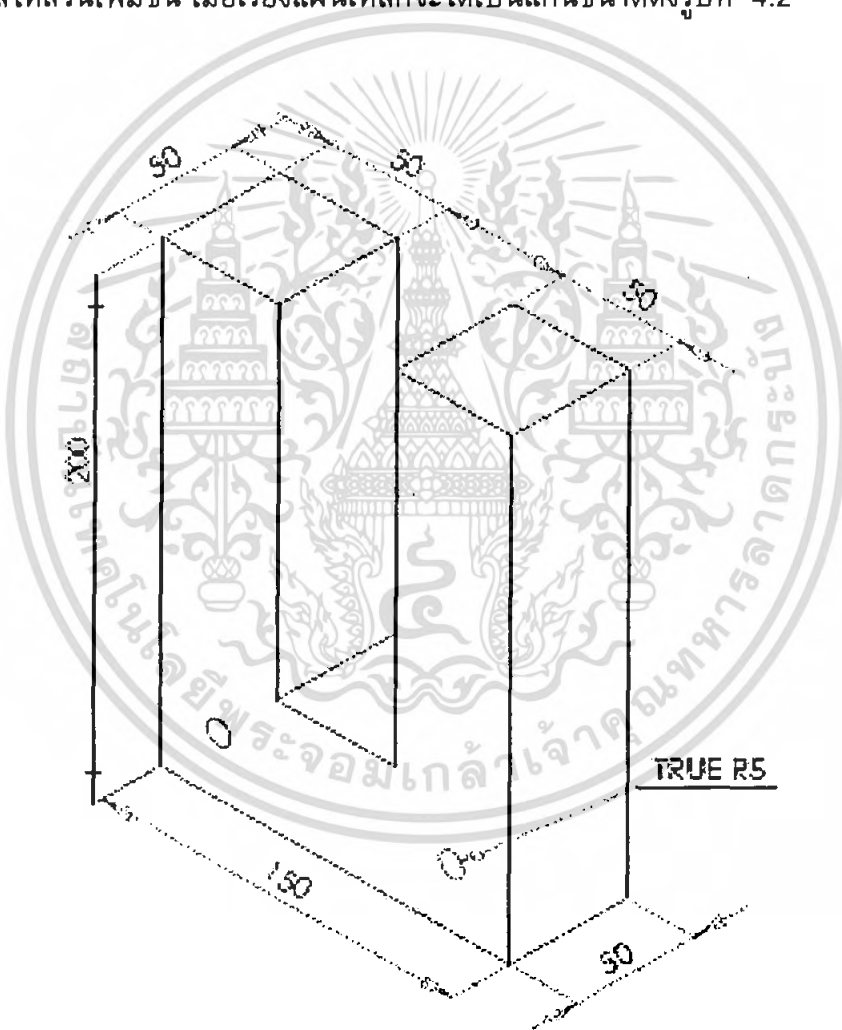
ซึ่งในการออกแบบขนาดของแกนเหล็กโดยทั้งหมดจะออกแบบ โดยคำนึงถึงลักษณะของการใช้งานจริงให้มีขนาดเหมาะสมแกนเหล็กจะประกอบขึ้น จากแผ่นเหล็กบาง เนื่องจากเหตุผลการลดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก อันเกิดจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก โดยทั่วไปแผ่นเหล็กจะหนาอยู่ระหว่าง 0.24 – 0.5 มม. การเลือกใช้แกนเหล็กที่มีความหนาน้อยกว่าค่า 0.27 มม. จะทำให้ความสามารถในการรับแรงทางกลไม่ดี แผ่นเหล็กนี้มีส่วนผสมของซิลิกอนประมาณ 3-5% การผสมซิลิกอนเข้าไปเพื่อให้ค่าความต้านทานของแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น เพื่อลดขนาดของกระแสไหลวนและเพิ่มค่า  $\mu$  ของแผ่นเหล็ก และวงรอบฮิดเดอริชิสลดลง



รูปที่ 4.1 แสดงขนาดของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก และลดกระแสแม่เหล็ก ให้ได้ขนาดตามรูปที่ 3.8 แล้วใช้ตัวจับยึด บีบให้แน่นที่สุดเพื่อลดช่องว่างระหว่างแผ่นเหล็กที่วางซ้อนกันเพื่อให้เกิดช่องว่างอากาศ (Air Gaps) ระหว่างแผ่นเหล็กน้อยที่สุด เนื่องจากช่องว่างอากาศมีผลทำให้กระแสขณะไม่มีโหลดสูง (No Load Current) ความสูญเสียขณะไม่มีโหลดสูง (No Load Losses) ระดับความดังของเสียงรบกวนสูง (Noise Levels) แล้วแกนเหล็กยังต้องรับแรงทางกล อันเกิดจากน้ำหนักของตัวเอง และน้ำหนักคานฉะนั้นแผ่นเหล็กที่เรียงเสร็จแล้ว จะต้องยึดติดให้แน่น ซึ่งอาจทำได้โดยใช้แผ่นเหล็กประกบที่ขึ้นด้วยฉนวน เพื่อป้องกันการเชื่อมทางไฟฟ้า หรืออาจจำเป็นต้องเจาะแกนเหล็กเพื่อทำการไสสอดกับสลักเกลียว โดยสอดและสลักเกลียวต้องทำมาจากฉนวน เพื่อป้องกันการเชื่อมกันทางไฟฟ้าระหว่างแกนกับสลักเกลียวอันจะทำให้กระแสไหลวนเพิ่มขึ้น เมื่อเรียงแผ่นเหล็กจะได้เป็นแกนขนาดดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงขนาดของแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาพื้นที่หน้าตัดของขดลวดทองแดง

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

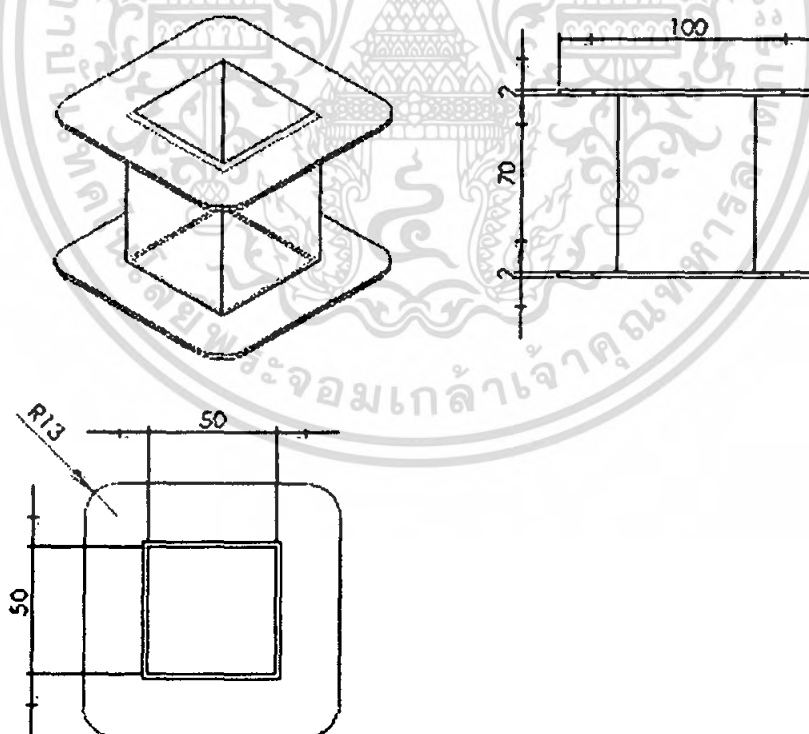
$$I = VAV$$

$$= 3.0\text{KVA}/220$$

$$= 13.63 \text{ A}$$

S = ส่วนกลับของความหนาแน่นของกระแส

ซึ่ง S มีค่าอยู่ในช่วง 0.25 ถึง 0.5 ตร.มม./A โดยที่ในการคำนวณนี้ใช้ค่า 0.4 ตร.มม./A ถ้าเราใช้ค่า S มากจะทำให้พื้นที่หน้าตัดลวดทองแดงมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้อุณหภูมิขดลวดใช้งานมีน้อย แต่ราคาลวดทองแดงขนาดใหญ่จะสูงกว่าลวดทองแดงขนาดเล็กและเมื่อพันลวดทองแดงลงบน Bobbin แล้วทำให้พื้นที่หน้าตัดตามของลวดทองแดงมีขนาดใหญ่ ซึ่งจะไม่เหมาะสมกับแกนเหล็ก ดังนั้นการเลือกใช้ค่า S ที่เหมาะสมในการออกแบบ จะส่งผลให้โครงการมีขนาดที่เหมาะสม ซึ่งในโครงการนี้ใช้ Bobbin มาตรฐานขนาด 50×50 ตร.มม. ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงขนาดของ Bobbin (หน่วย มม.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาจำนวนรอบในการพันขดลวด

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

จะได้  $N = V/(4.44fAB_{\max})$

กำหนดให้  $f = 50 \text{ Hz}$

$$A = 25 \text{ ตร.ซม.}$$

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

ได้  $N = 265 \text{ รอบ}$

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

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่หน้าตัดของลวด} &= 0.3 \times (3.0\text{KVA}/220) \\ &= 4.091 \text{ ตร.มม.} \end{aligned}$$

เทียบจากตาราง WIRE GAUGES TABLE เลือกลวดขนาดเบอร์ S.W.G. 13 (มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.3368 มม. ,มีพื้นที่หน้าตัด 4.2866 ตร.ซม.)

หาจำนวนชั้นและจำนวนรอบ /ชั้นของการพันขดลวด

จากความกว้าง Bobbin มาตรฐาน = 70 มม.

ลวด S.W.G. 13 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง = 2.3368 มม.

$$\begin{aligned} \text{ได้จำนวนรอบ/ชั้น} &= 70/(2.3368) \\ &= 29.95 \end{aligned}$$

ประมาณ = 29 รอบ/ชั้น

$$\text{ได้จำนวนชั้น} = 265/29$$

$$= 9.137$$

ประมาณ = 10 ชั้น

สรุปพันขดลวดลงบนบอบบิ้น 29 รอบ/ชั้น จำนวน 10 ชั้น ได้ 290 รอบ

การประมาณน้ำหนักของเหล็กในการสั่งซื้อ

จากคุณสมบัติของเหล็ก 1 ลบ.ซม.หนัก 6.67 กรัม

ส่วนแกนเหล็กและ YOKE 5×5 ตร.ซม.

แผ่นเหล็กขนาด  $4(15 \times 5 \times 5) = 1,500$  ลบ.ซม.

$1,500 \times 6.67 = 10.00$  kg

ส่วน YOKE 3×3 ตร.ซม.และ YOKE 2×2 ตร.ซม.

แผ่นเหล็กขนาด  $4(15 \times 5 \times 1.5) = 450$  ลบ.ซม

$450 \times 6.67 = 3.00$  kg

รวม  $10+3 = 13$  kg

การประมาณน้ำหนักของขดลวดในการสั่งซื้อ

จากแกนเหล็กขนาด 50 × 50 มม. มีเส้นรอบวง = 16 ซม. เมื่อเผื่อโดยเฉลี่ย ให้มีความยาวลวด  
ใน 1 รอบ = 28 ซม. พันทั้งหมด 290 รอบ จึงใช้ลวดยาว =  $290 \times 28 = 8,120$  ซม.

ปริมาตรทรงกระบอก = พื้นที่หน้าตัด × ความยาว

=  $4.2866 \times 8,120$

= 348.07 ลบ.ซม.(ประมาณ 350 ลบ.ซม.)

จากคุณสมบัติของลวดทองแดง 1 ลบ.ซม.หนัก 9 กรัม

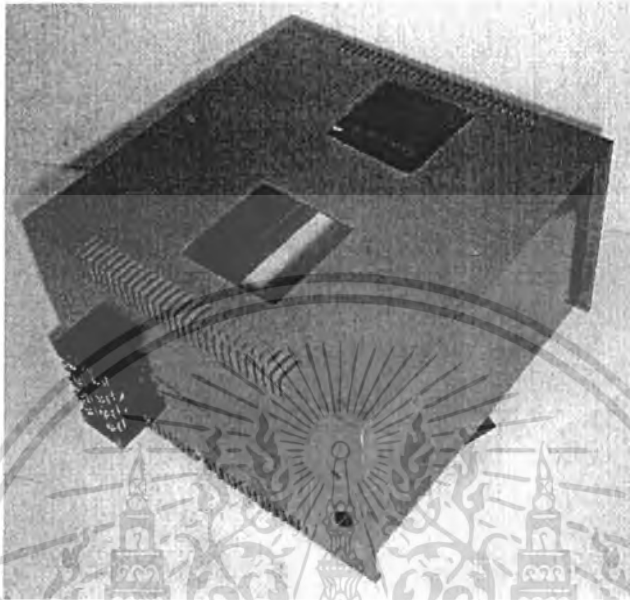
ได้น้ำหนักของลวดทั้งหมด =  $350 \times 9$  kg

= 3.15 kg

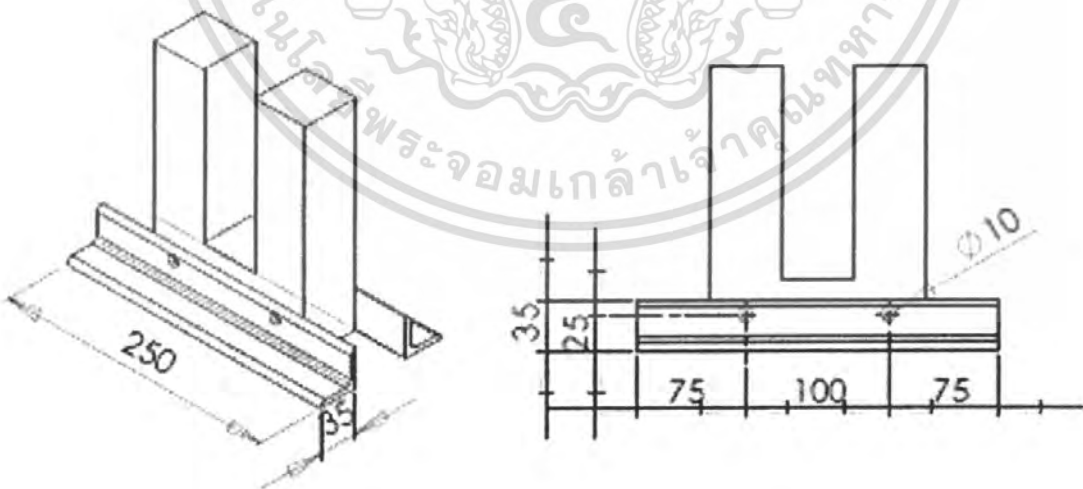
สั่งซื้อลวดทองแดง = 3.5 kg

## 4.2 การออกแบบกล่องบรรจุ

การออกแบบกล่องบรรจุใช้เหล็กกล่องเหล็กแผ่นขนาดมาตรฐาน 20×20×12.5 ซม. ประกอบแล้วครอบแกนเหล็กดังรูปที่ 4.4 และการยึดแกนเหล็กกับโครงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 กล่องบรรจุแกนเหล็ก



รูปที่ 4.5 การยึดแกนเหล็กกับโครง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

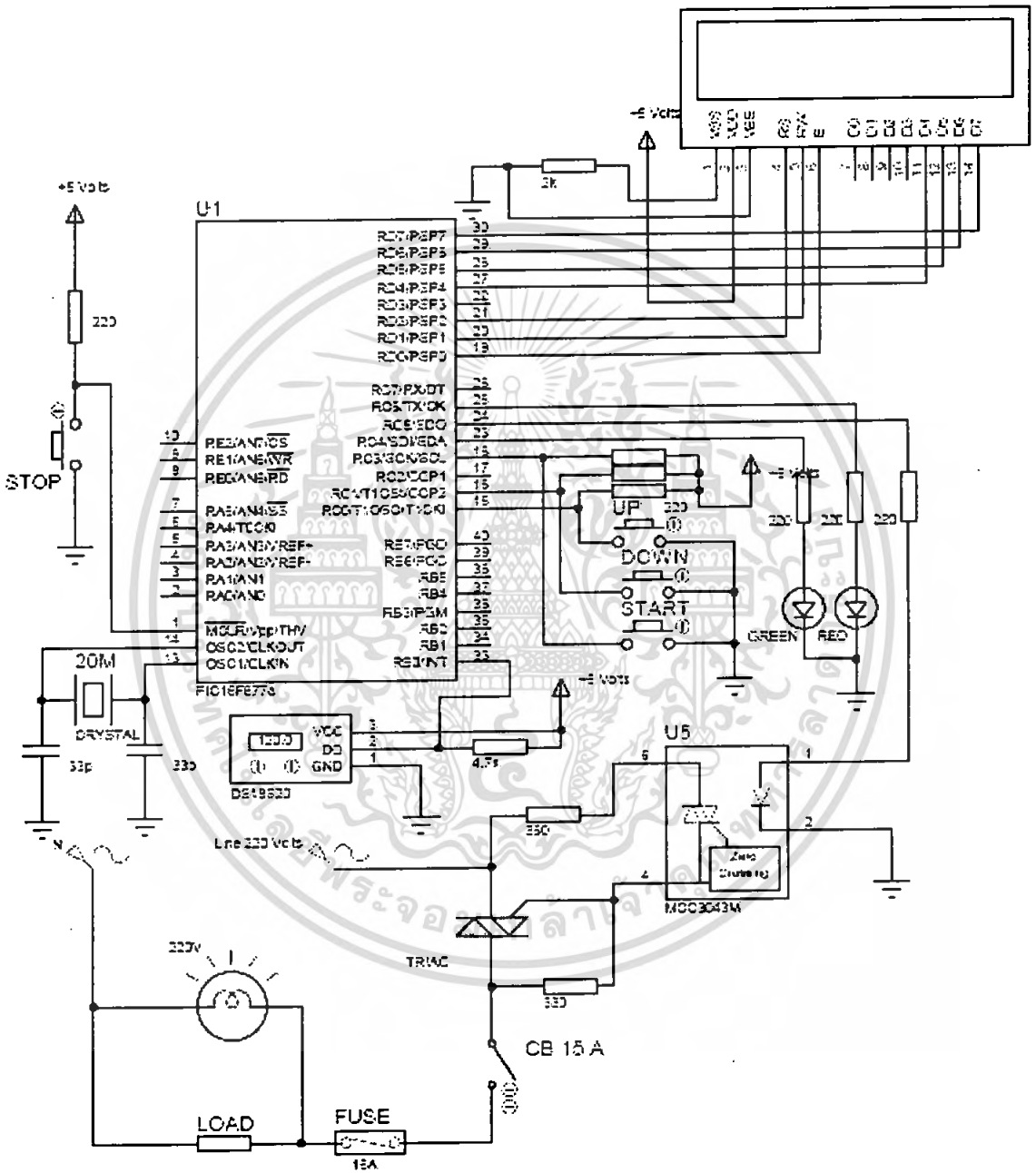
### 4.3 การออกแบบวงจรควบคุมความร้อนและวงจรถักน้ำ

#### ชุดควบคุมความร้อน

ชุดควบคุมความร้อนเครื่องขยายดัดลูกปืนเราจะอาศัยการทำงานของ Microcontroller โดยจะใช้ PIC 16F877A เป็นตัวประมวลผลต่างๆตั้งแต่การเปิดปิดอุปกรณ์ต่างๆในเครื่องขยายดัดลูกปืน โดยรับค่า input จาก Push button switch เพื่อเริ่มการทำงานโดยใช้ DS18S20 เป็น อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ PIC จะแสดงข้อความและอุณหภูมิทางจอ LCD ขนาด 16 x 2 ( 16 อักขระ จำนวน 2 บรรทัด) โดยใช้การเชื่อมต่อจอแสดงผล LCD แบบ 4 บิต คือ ใช้ขาที่ติดต่อกับ Microcontroller เพียง 4 ขา คือ D4 – D7

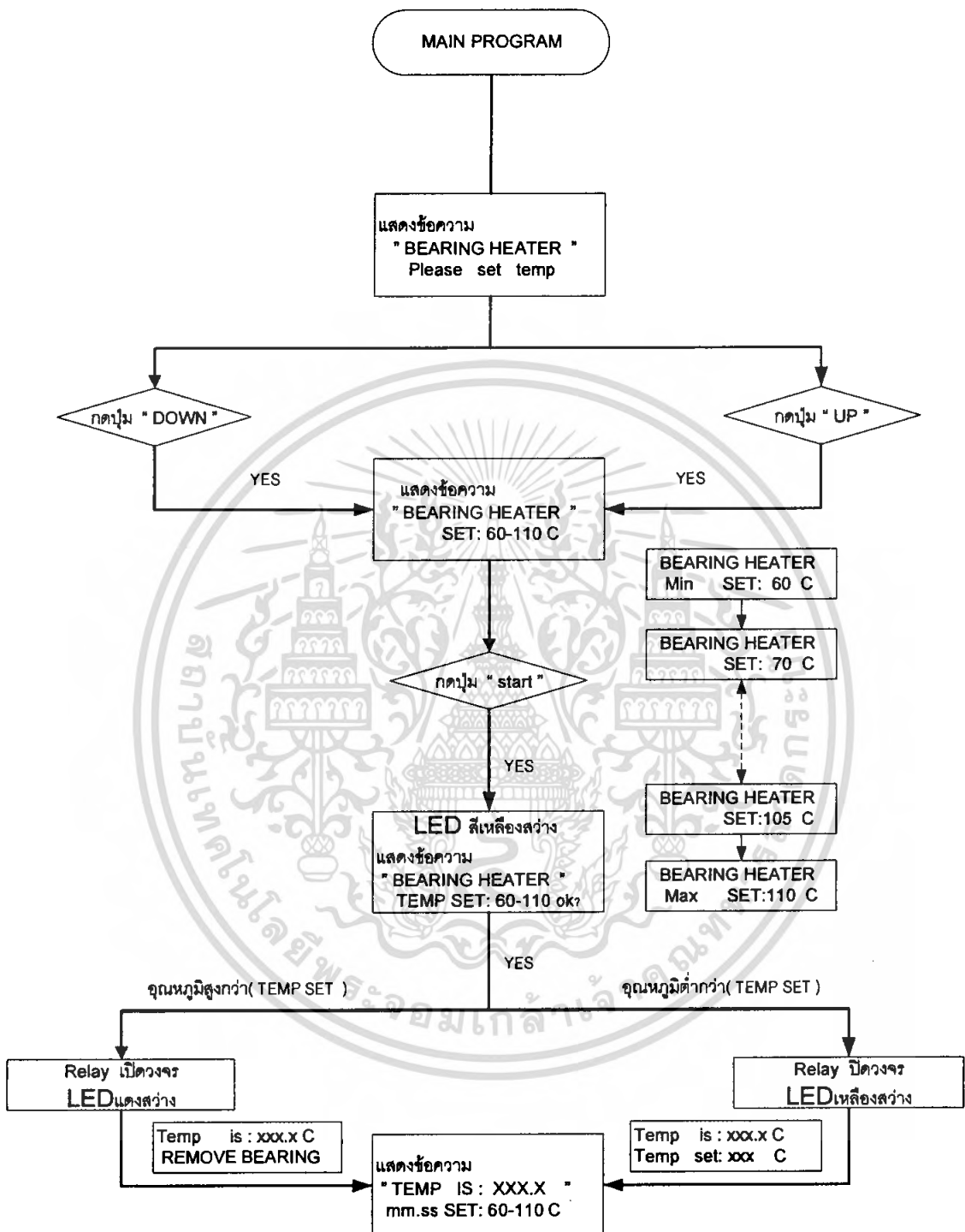
PIC 16F877A จะแสดงข้อความเพื่อติดต่อกับผู้ใช้งานว่าให้เริ่มต้นตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการในการกดปุ่ม “ UP ” หรือ “ DOWN ” โดยที่ PIC จะเก็บค่าข้อมูลอุณหภูมิที่ตั้งอันได้แก่ 60, 70, 80, 90, 95, 100, 105, 110 ° C เมื่อกดปุ่ม “ START ” จะมีการให้ยืนยันค่าที่ตั้งไว้หากกดปุ่ม เพิ่มหรือลดอุณหภูมิในช่วงนี้ PIC ก็จะให้ยืนยันการตั้งอุณหภูมิหากเรายืนยันการตั้งค่าอุณหภูมินั้น กดปุ่ม “ START ” อีกครั้ง PIC จะสั่งให้ DS1820 เริ่มอ่านค่าอุณหภูมิ ทางพอร์ต B0 จะติดต่อสื่อสารกันในระบบบัสหนึ่งสาย ( 1 – Wire Serial Bus ) สายสัญญาณจะเป็นแบบสองทิศทาง แต่ข้อมูลจะสามารถเดินได้ทางเดียวในช่วงเวลาหนึ่งๆ เท่านั้น DS1820 มีย่านการวัดที่ - 55 ° C ถึง 125 ° C ความละเอียดถึง 0.5 ° C สายที่ใช้ส่งสัญญาณต้องมีการชิลเพื่อป้องกันการเหนี่ยวนำที่เกิดจากแกนเหล็กอันจะทำให้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้ผิดพลาดจากค่าจริงได้

PIC จะทำการเปรียบเทียบค่าจากวงจรวัดอุณหภูมิเพื่อมาทำการ เปิด - ปิด วงจร โดย TRIAC มีเงื่อนไขว่าเมื่อค่าจากวงจรวัดอุณหภูมิมียุคสูงกว่าค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้จะสั่งให้ TRIAC เปิดวงจร ทำให้ขดลวดไม่มีกระแสไหลทำให้อุณหภูมิลดลงและเมื่ออุณหภูมิลดลงน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ PIC ก็จะสั่งให้ TRIAC ปิดวงจร Heater อีกครั้งโดยหน่วงเวลา 5 วินาทีเพื่อป้องกันการเปิด - ปิดวงจรซ้ำๆกันในเวลาอันสั้นอันจะทำให้อายุการใช้งาน TRIAC สั้นลง การทำงานแบบนี้เรียกว่า ON – OFF Control โดยจะมีโปรแกรมที่คอยทำนายเวลาการทำงานเสร็จสิ้นโดยการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาที่ใช้ไปแล้วแสดงผลเป็นหน่วยนาฬิกา ซึ่งลักษณะของ flow chart โปรแกรมการทำงานของ Microcontroller จะแสดงในรูปที่ 4.6 และรูปวงจรถควบคุมจะแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 ลักษณะของวงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 flow chart แสดงการทำงานของ Microcontroller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อรวบรวมอุปกรณ์ต่างๆ มาประกอบเป็นตู้เครื่องขยายตัวกลับป้อนแล้ว ยังต้องมีการป้องกันการเชื่อมกันทางไฟฟ้า คือ

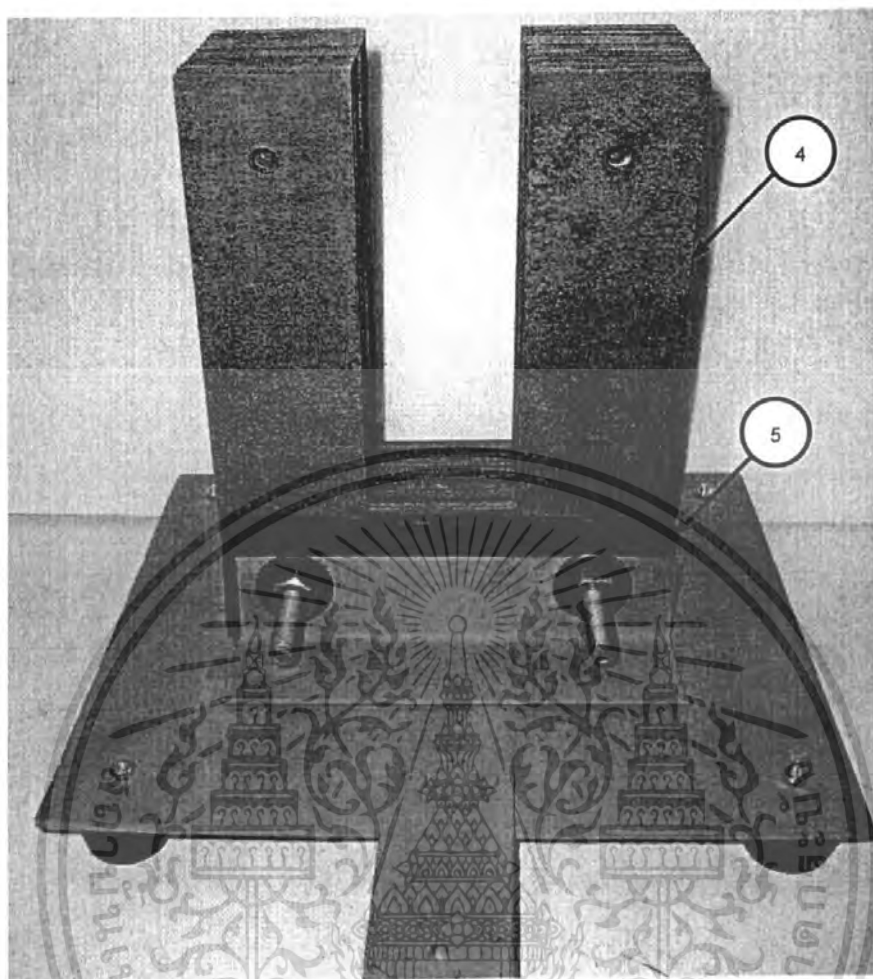
1. การใช้กระดาษครีฟกันระหว่างชั้นของขดลวด (layer) เมื่อพันได้รอบเต็ม 29 รอบ
2. เมื่อพันขดลวดจนครบ 10 ชั้นแล้วพันทับด้วยเทปฉนวน
3. ลวดทองแดงที่อยู่นอกขดลวดหุ้มด้วยปลอกสายทนไฟ
4. ระหว่างแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นในแกนเหล็ก ด้วยความต้องการที่จะลดผลของกระแสไหลวนในแกนมีการเคลือบฉนวนและเมื่อเรียงแผ่นได้เป็นแกนตามขนาดที่ต้องการแล้วมีการใช้ วานิช "CLASS H" ชนิดที่แห้งในอากาศปกติเคลือบทับอีกชั้นซึ่งวานิชสามารถทนความร้อนได้ ถึง  $180^{\circ}\text{C}$
5. การใช้ไม้อัดฉนวนระหว่างแกนเหล็กกับฐานยึดและไม้อัดฉนวนนี้เอง ยังสามารถป้องกันการเชื่อมกันทางไฟฟ้าของนอตกับแกนเหล็ก โดยการเว้นช่องอากาศด้วย

โดยภาพของการป้องกันการเชื่อมกันทางไฟฟ้าในขดลวดและแกนเหล็ก แสดงดังรูป

4.8 และ 4.9



เอกสารนี้เป็นเอกสาร **รูปที่ 4.8** การป้องกันการเชื่อมกันทางไฟฟ้าในขดลวดทองแดง ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 การป้องกันการเชื่อมกันทางไฟฟ้าในแกนเหล็ก

#### 4.4 การออกแบบการทดลอง

ตอนที่ 1 การทดสอบความเที่ยงตรงค่าอุณหภูมิที่วัดโดยเครื่องขยายตัวลูกปืน กับ Thermo Hunter ( ความละเอียด  $1^{\circ}\text{C}$  )

##### ขั้นตอนการทดลอง

1. ให้ความร้อนแก่ตัวลูกปืน โดยตั้งพิกัดอุณหภูมิสูงสุดที่  $110^{\circ}\text{C}$  แล้วกด "START"
2. ใช้ Thermo Hunter วัดอุณหภูมิที่รังลูกปืนเมื่อเครื่องขยายตัวลูกปืนวัดค่าได้ ตั้งแต่  $30^{\circ}\text{C}$  และวัดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ  $10^{\circ}\text{C}$  บันทึกค่าลงในตาราง
3. หาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่วัดได้จาก Thermo Hunter

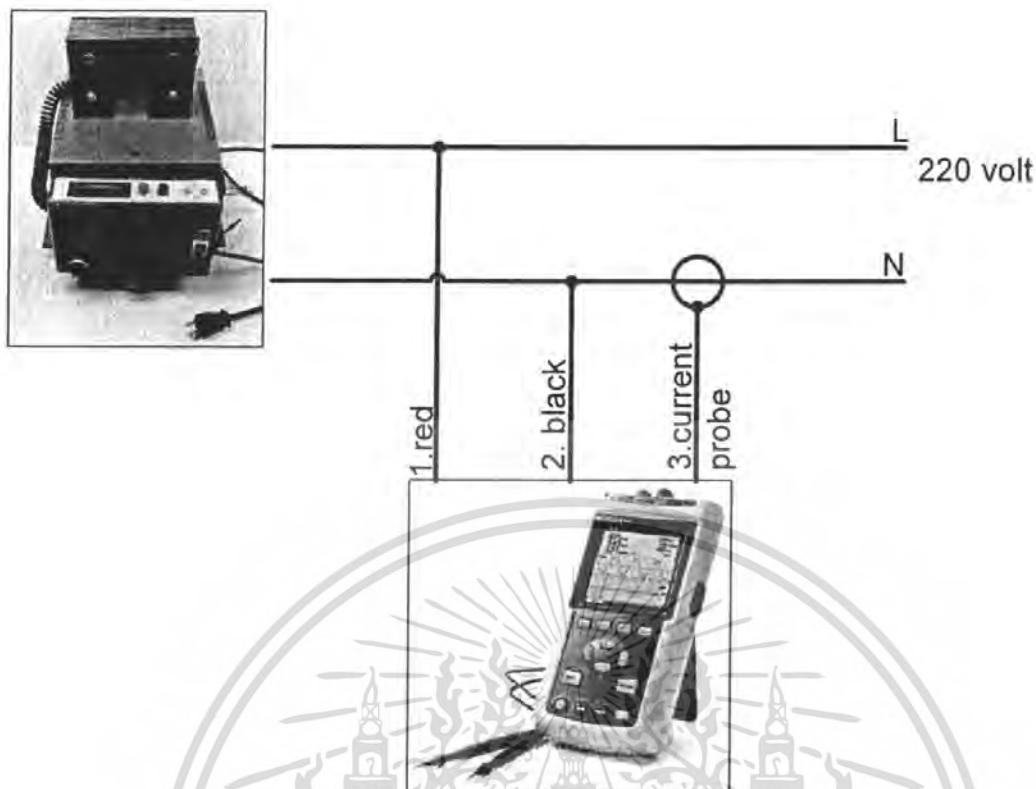
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการวัดอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องขยายดัลบลูกปืนและ Thermo Hunter

ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากตัวเครื่อง (°c)	ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จาก Thermo hunter (°c)					MEAN	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
30	31	32	31	33	32	32	1
40	42	41	44	43	43	43	1
50	53	54	52	51	52	52	1
60	63	61	61	62	63	62	1
70	71	74	72	72	73	72	1
80	82	83	82	81	80	82	1
90	95	92	93	91	94	93	2
100	102	104	101	102	103	102	1
110	114	112	111	113	113	113	1

**ตอนที่ 2 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของเครื่องขยายดัลบลูกปืนที่อุณหภูมิต่างๆ**  
**ขั้นตอนการทดลอง**

1. ต่อบริการทดลองดังรูปที่ 4.10 โดยติดหัววัดอุณหภูมิที่ดัลบลูกปืน
2. ให้ความร้อนแก่ดัลบลูกปืน โดยตั้งพิกัดอุณหภูมิสูงสุดที่ 30 ° C แล้วกด "START" เมื่ออุณหภูมิถึงพิกัดแล้ว จะมีไฟเตือนสีแดงกระพริบ เริ่มจับเวลาและบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ลงในตาราง
3. เพิ่มพิกัดอุณหภูมิสูงสุดขึ้นเป็น 40 ,50 ,.....110 ° C โดยทำตามข้อ 1 และ 2
4. เปลี่ยนขนาดดัลบลูกปืนและ YOKE ที่สามารถสวมเข้ากันได้พอและทำการทดลองซ้ำตาม ข้อ 1 ถึง 3
5. เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องขยายดัลบลูกปืนที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.10 วงจรการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองครั้งที่ 1 ตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. กับ YOKE 2 ซม.  
%THDv ก่อนการทดลอง 1.5 %

Temperature (° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	POWER FACTOR	%THDv
30	0.00	220.4	10.62	110	0.0470	1.8
40	0.20	219.4	10.65	110	0.0471	1.8
50	0.47	219.5	10.65	110	0.0471	1.8
60	1.07	219.6	10.65	110	0.0470	1.8
70	1.32	219.7	10.65	110	0.0470	1.8
80	2.01	219.3	10.65	110	0.0471	1.8
90	2.34	219.4	10.65	110	0.0471	1.8
100	2.58	219.4	10.68	110	0.0469	1.8
110	3.50	219.5	10.65	110	0.0471	1.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองครั้งที่ 2 ดัดลูปปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. กับ YOKE 2 ซม.  
%THDv ก่อนการทดลอง 1.6 %

Temperature (° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	POWER FACTOR	%THDv
30	0.00	219.6	10.65	110	0.0470	1.8
40	0.25	219.5	10.65	110	0.0471	1.8
50	0.44	219.5	10.65	110	0.0471	1.8
60	1.03	219.6	10.64	110	0.0471	1.8
70	1.30	219.8	10.64	110	0.0470	1.8
80	2.00	219.4	10.64	110	0.0471	1.8
90	2.33	219.6	10.64	110	0.0471	1.8
100	2.53	219.4	10.64	110	0.0471	1.8
110	3.46	219.5	10.63	110	0.0471	1.9

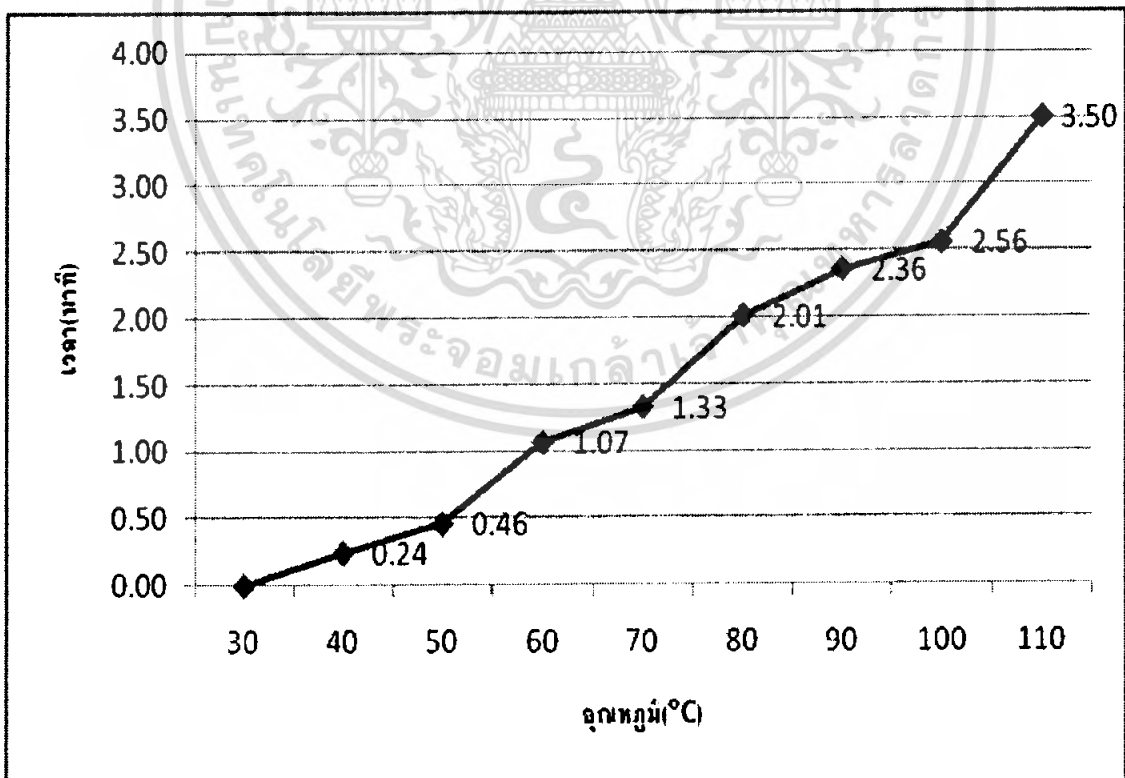
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองครั้งที่ 3 ดัดลูปปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. กับ YOKE 2 ซม.  
%THDv ก่อนการทดลอง 1.5 %

Temperature (° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	POWER FACTOR	%THDv
30	0.00	219.9	10.65	110	0.0470	1.8
40	0.28	219.9	10.65	110	0.0470	1.8
50	0.47	219.9	10.65	110	0.0470	1.8
60	1.10	219.9	10.65	110	0.0470	1.8
70	1.37	219.9	10.65	110	0.0470	1.8
80	2.03	219.8	10.65	110	0.0470	1.8
90	2.41	219.6	10.65	110	0.0470	1.8
100	2.57	219.7	10.64	110	0.0471	1.8
110	3.55	219.7	10.64	110	0.0471	1.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

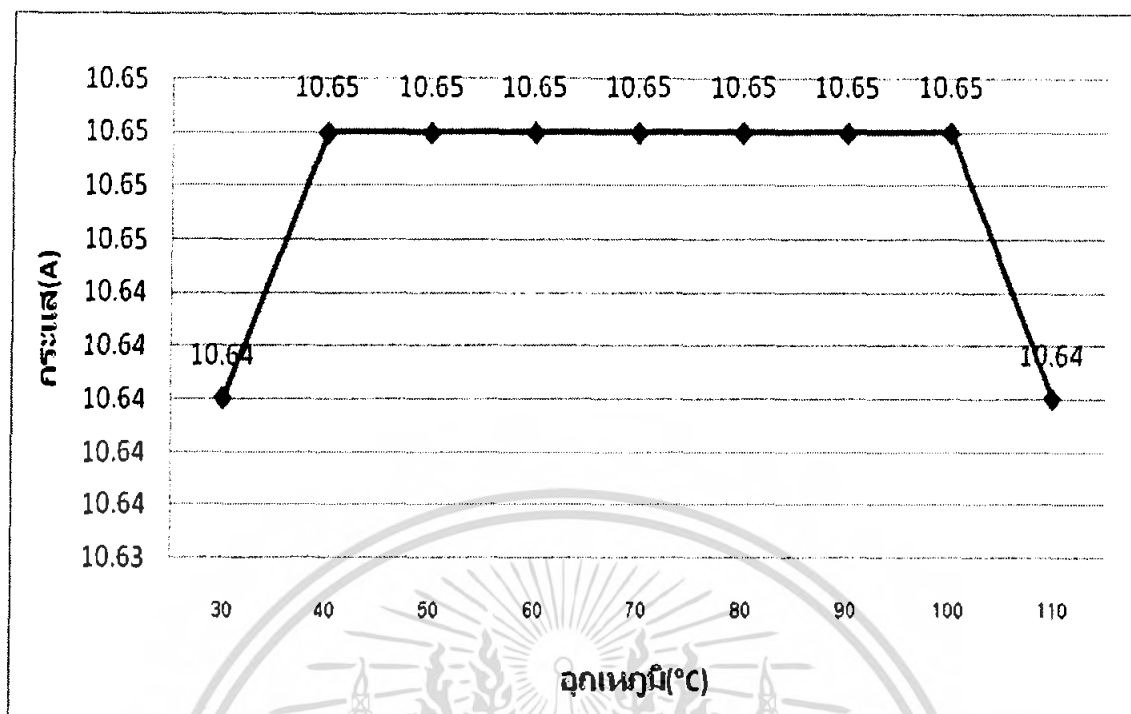
ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง ดับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. ค่าเฉลี่ย %THDv ก่อนการทดลอง 1.53 %

Temperature (°C)	Time(Min)		Voltage(V)		Current(A)		Power(W)		%THDv	
	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD
30	0.00	0.00	219.97	0.40	10.64	0.02	110.00	0.00	1.80	0.00
40	0.24	0.04	219.60	0.26	10.65	0.00	110.00	0.00	1.80	0.00
50	0.46	0.02	219.63	0.23	10.65	0.00	110.00	0.00	1.80	0.00
60	1.07	0.04	219.70	0.17	10.65	0.01	110.00	0.00	1.80	0.00
70	1.33	0.04	219.80	0.10	10.65	0.01	110.00	0.00	1.80	0.00
80	2.01	0.02	219.50	0.26	10.65	0.01	110.00	0.00	1.80	0.00
90	2.36	0.04	219.53	0.12	10.65	0.01	110.00	0.00	1.83	0.06
100	2.56	0.03	219.50	0.17	10.65	0.02	110.00	0.00	1.87	0.06
110	3.50	0.05	219.57	0.12	10.64	0.01	110.00	0.00	1.90	0.00



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิกับเวลาของดัลลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิกับกระแสอินพุตของดัลลัสถูกป็นเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม.

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองครั้งที่ 1 ดัลลัสถูกป็นเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. กับ YOKE 3 ซม.  
%THDv ก่อนการทดลอง 1.5 %

Temperature (° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	POWER FACTOR	%THDv
30	0.00	219.9	8.15	520	0.2901	1.8
40	0.30	219.9	8.12	520	0.2912	1.8
50	0.43	219.9	8.11	520	0.2916	1.8
60	0.59	219.8	8.11	520	0.2917	1.8
70	1.04	219.8	8.11	570	0.3198	1.8
80	1.24	219.8	7.98	520	0.2965	1.8
90	1.45	219.8	7.96	520	0.2972	1.8
100	1.56	219.8	7.94	520	0.2980	1.8
110	2.06	219.7	7.93	520	0.2985	1.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองครั้งที่ 2 ตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. กับ YOKE 3 ซม.

%THDv ก่อนการทดลอง 1.4 %

Temperature (° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	POWER FACTOR	%THDv
30	0.00	220.3	8.17	520	0.2889	1.8
40	0.35	220.3	8.17	520	0.2889	1.8
50	0.44	220.3	8.15	520	0.2896	1.8
60	0.58	220.3	8.15	520	0.2896	1.8
70	1.07	220.3	8.14	520	0.2900	1.8
80	1.26	220.4	8.13	520	0.2902	1.8
90	1.50	220.4	8.08	520	0.2920	1.8
100	2.08	220.3	8.05	520	0.2932	1.8
110	2.18	220.3	8.03	520	0.2939	1.9

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองครั้งที่ 3 ตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. กับ YOKE 3 ซม.

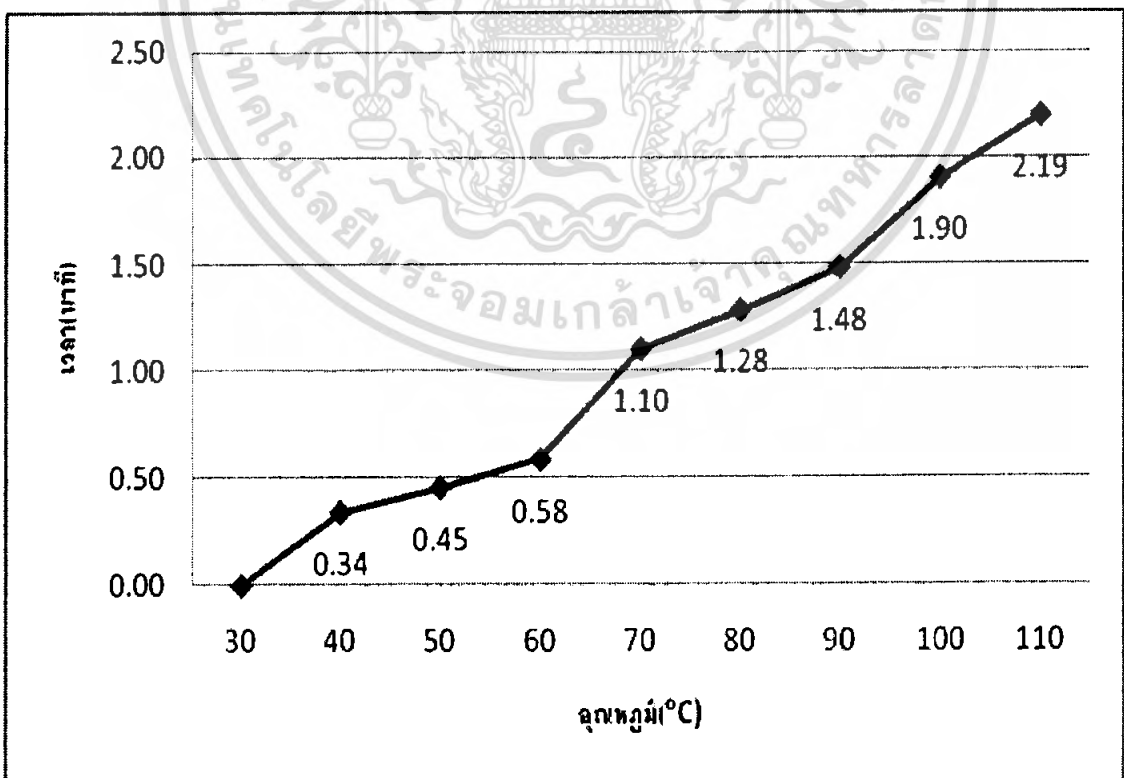
%THDv ก่อนการทดลอง 1.4 %

Temperature (° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	POWER FACTOR	%THDv
30	0.00	219.9	8.22	520	0.2877	1.8
40	0.37	219.9	8.18	520	0.2891	1.8
50	0.49	219.9	8.14	520	0.2905	1.8
60	0.58	219.8	8.13	520	0.2910	1.8
70	1.19	219.8	8.11	520	0.2917	1.8
80	1.34	219.8	8.04	520	0.2943	1.8
90	1.49	219.8	8.01	520	0.2954	1.8
100	2.06	219.8	7.98	520	0.2965	1.8
110	2.34	219.7	7.94	520	0.2981	1.9

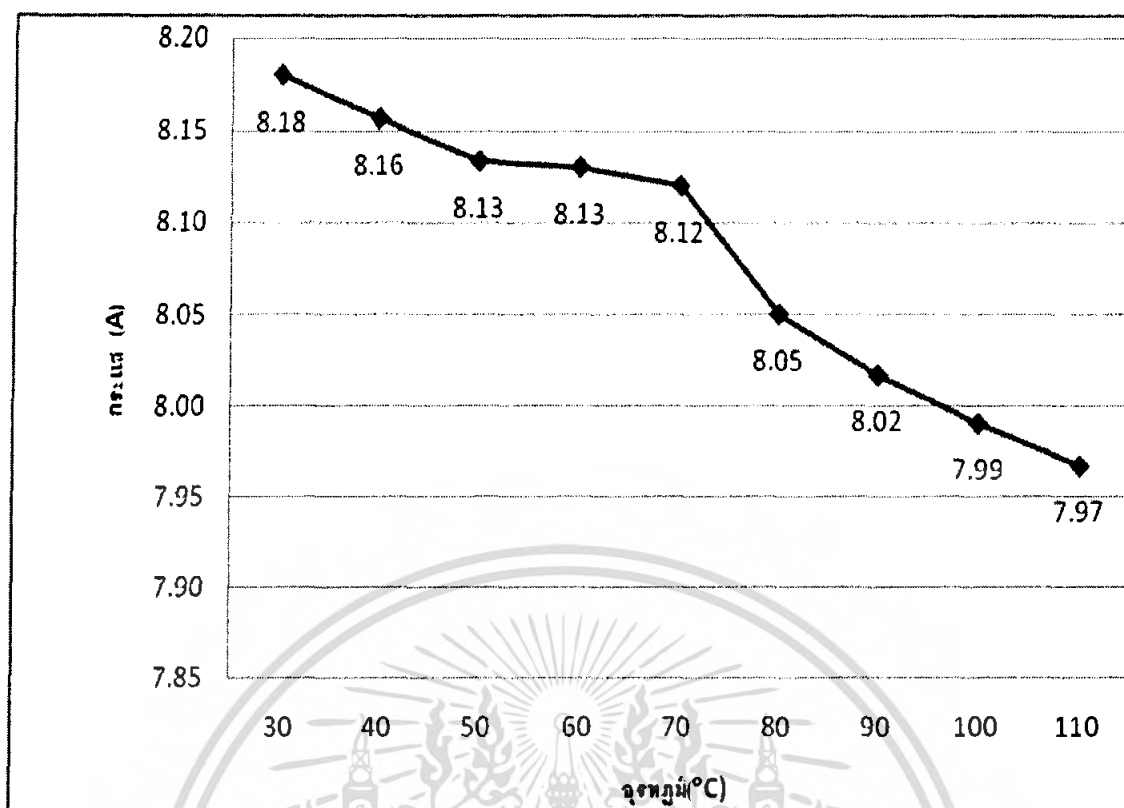
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง ตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. ค่าเฉลี่ย %THDv ก่อนการทดลอง 1.4 %

Temperature (° C)	Time(Min)		Voltage(V)		Current(A)		Power(W)		%THDv	
	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD
30	0.00	0.00	220.03	0.23	8.18	0.04	520	0.00	1.63	0.06
40	0.34	0.04	220.03	0.23	8.16	0.03	520	0.00	1.60	0.00
50	0.45	0.03	220.03	0.23	8.13	0.02	520	0.00	1.63	0.06
60	0.58	0.01	219.97	0.29	8.13	0.02	520	0.00	1.60	0.00
70	1.10	0.08	219.97	0.29	8.12	0.02	570	0.00	1.60	0.00
80	1.28	0.05	220.00	0.35	8.05	0.08	520	0.00	1.60	0.00
90	1.48	0.03	220.00	0.35	8.02	0.06	520	0.00	1.67	0.06
100	1.90	0.29	219.97	0.29	7.99	0.06	520	0.00	1.67	0.06
110	2.19	0.14	219.90	0.35	7.97	0.06	520	0.00	1.70	0.00



เอกสารนี้ **รูปที่ 4.13** กราฟแสดงค่าอุณหภูมิกับเวลาของตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิกับกระแสอินพุตของดัลลูปป็นเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม.

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองครั้งที่ 1 ดัลลูปป็นเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. กับ YOKE 5 ซม.

%THDv ก่อนการทดลอง 1.3 %

Temperature (° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	POWER FACTOR	%THDv
30	0.00	220.8	6.61	590	0.4043	1.8
40	0.30	220.8	6.51	590	0.4105	1.8
50	0.49	220.8	6.48	590	0.4124	1.8
60	0.59	220.8	6.46	590	0.4136	1.8
70	1.18	220.8	6.45	590	0.4143	1.8
80	1.30	220.8	6.42	590	0.4162	1.8
90	1.55	220.7	6.41	590	0.4171	1.8
100	2.01	220.7	6.39	590	0.4184	1.8
110	2.16	219.7	6.35	590	0.4229	1.9

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองครั้งที่ 2 ดลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. กับ YOKE 5 ซม.  
%THDv ก่อนการทดลอง 1.3 %

Temperature (° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	POWER FACTOR	%THDv
30	0.00	220.7	6.63	590	0.4032	1.8
40	0.23	220.7	6.62	590	0.4038	1.8
50	0.41	220.7	6.61	590	0.4044	1.8
60	0.52	220.7	6.58	590	0.4063	1.8
70	1.14	220.7	6.57	590	0.4069	1.8
80	1.24	220.8	6.55	590	0.4080	1.8
90	1.45	220.7	6.53	590	0.4094	1.8
100	1.52	220.7	6.51	590	0.4106	1.8
110	2.03	219.7	6.47	590	0.4151	1.9

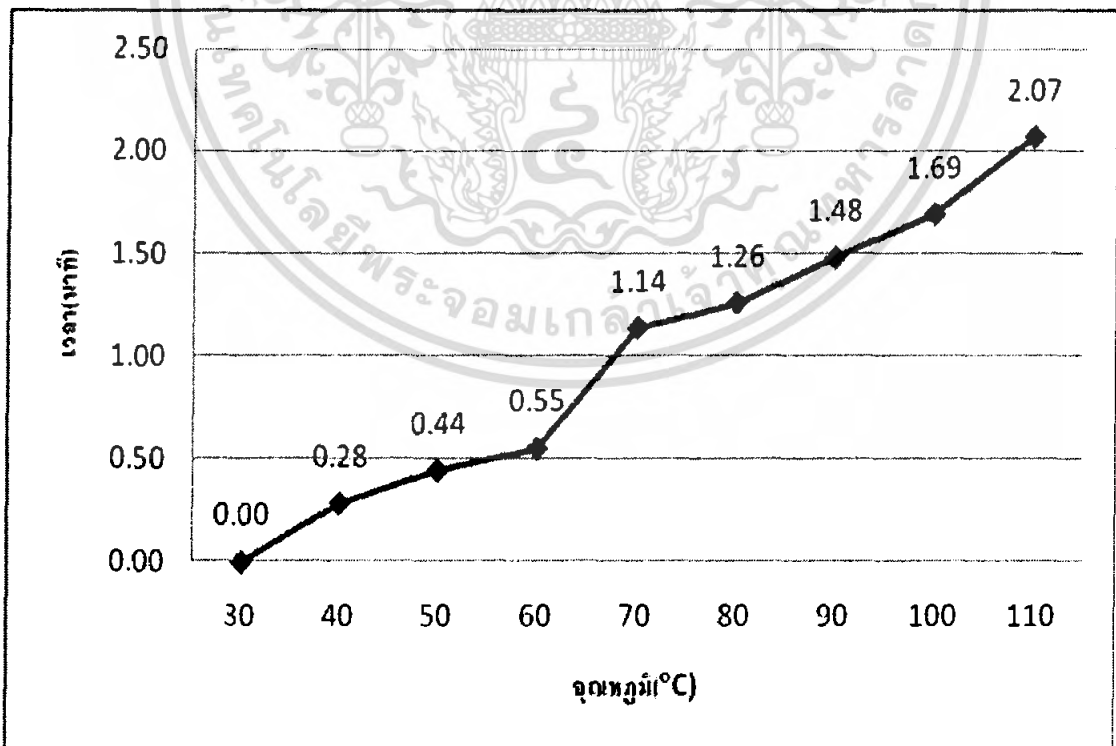
ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองครั้งที่ 3 ดลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. กับ YOKE 5 ซม.  
%THDv ก่อนการทดลอง 1.2 %

Temperature (° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	POWER FACTOR	%THDv
30	0.00	220.8	6.61	590	0.4043	1.8
40	0.32	220.8	6.61	590	0.4043	1.8
50	0.43	220.8	6.59	590	0.4055	1.8
60	0.54	220.8	6.56	590	0.4073	1.8
70	1.09	220.8	6.55	590	0.4080	1.8
80	1.23	220.8	6.54	590	0.4086	1.8
90	1.43	220.8	6.53	590	0.4092	1.8
100	1.54	220.8	6.53	590	0.4092	1.8
110	2.01	220.8	6.51	590	0.4105	1.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

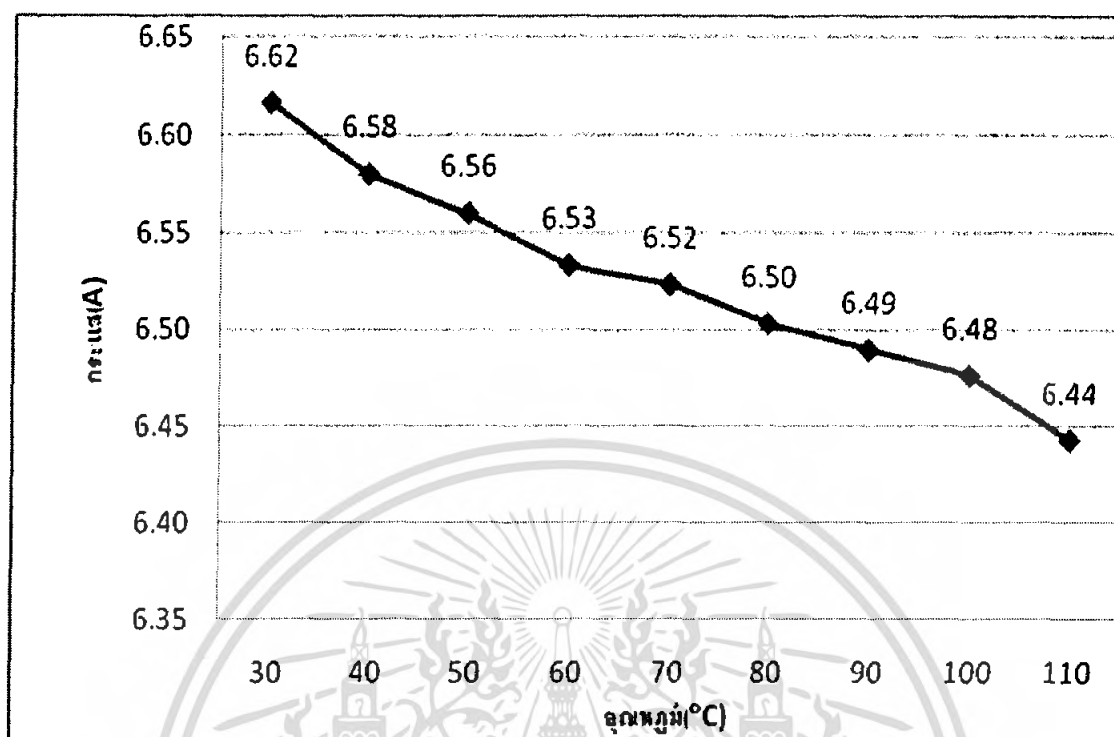
ตารางที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง ตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. ค่าเฉลี่ย %THDv ก่อนการทดลอง 1.27 %

Temperature (°C)	Time(Min)		Voltage(V)		Current(A)		Power(W)		%THDv	
	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD
30	0.00	0.00	220.77	0.06	6.62	0.01	590	0.00	1.57	0.06
40	0.28	0.05	220.77	0.06	6.58	0.06	590	0.00	1.53	0.06
50	0.44	0.04	220.77	0.06	6.56	0.07	590	0.00	1.53	0.06
60	0.55	0.04	220.77	0.06	6.53	0.06	590	0.00	1.57	0.06
70	1.14	0.05	220.77	0.06	6.52	0.06	590	0.00	1.53	0.06
80	1.26	0.04	220.80	0.00	6.50	0.07	590	0.00	1.53	0.06
90	1.48	0.06	220.73	0.06	6.49	0.07	590	0.00	1.53	0.06
100	1.69	0.28	220.73	0.06	6.48	0.08	590	0.00	1.60	0.00
110	2.07	0.08	220.07	0.64	6.44	0.08	590	0.00	1.63	0.06



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิกับเวลาของตลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิกับกระแสอินพุตของดัลบลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม.

### ตอนที่ 3 การทดสอบผลของพื้นที่หน้าตัดขนาดต่างๆ ของ Yoke ต่อดัลบลูกปืนขนาดเดียวกัน ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อดวงจรการทดลองดังรูปที่ 4.10
2. ให้ความร้อนแก่ดัลบลูกปืน โดยตั้งพิกัดอุณหภูมิสูงสุดที่  $110^{\circ}\text{C}$  เมื่ออุณหภูมิถึงพิกัดแล้วบันทึกค่า กระแส แรงดัน เวลาและกำลังไฟฟ้าลงในตาราง
3. บันทึกค่าต่างๆลงในตาราง แล้วเปลี่ยน YOKE
4. เปรียบเทียบค่าเวลาและกระแสที่ได้จากการทดลองในดัลบลูกปืนขนาดเดียวกันแต่ขนาด YOKE ต่างกัน

ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองดลัปลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. กับ YOKE 5 ซม.

%THDv ก่อนการทดลอง 1.3 %

Temperature (° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	POWER FACTOR	%THDv
30	0.00	220.8	6.61	590	0.4043	1.8
40	0.30	220.8	6.51	590	0.4105	1.8
50	0.49	220.8	6.48	590	0.4124	1.8
60	0.59	220.8	6.46	590	0.4136	1.8
70	1.18	220.8	6.45	590	0.4143	1.8
80	1.30	220.8	6.42	590	0.4162	1.8
90	1.55	220.7	6.41	590	0.4171	1.8
100	2.01	220.7	6.39	590	0.4184	1.8
110	2.16	219.7	6.35	590	0.4229	1.9

ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองดลัปลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. กับ YOKE 3 ซม.

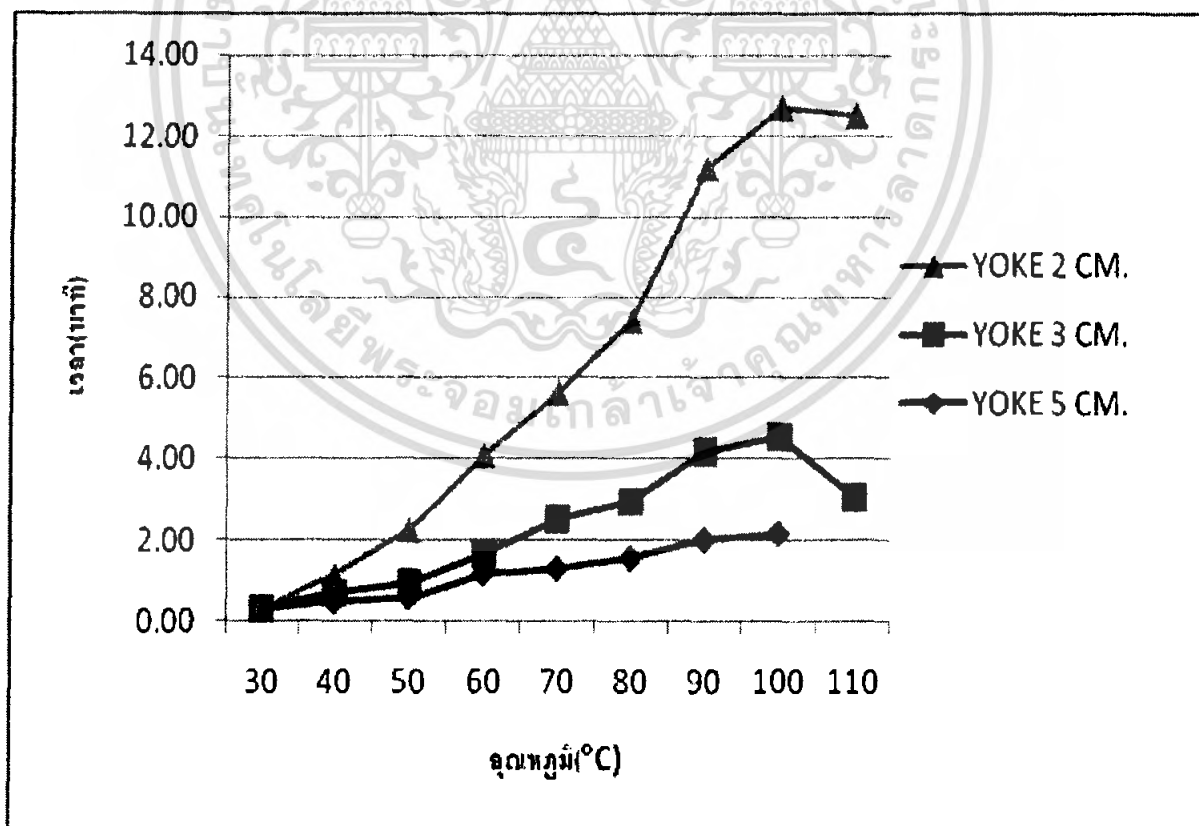
%THDv ก่อนการทดลอง 1.3 %

Temperature (° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	POWER FACTOR	%THDv
30	0.00	219.6	7.62	500	0.2988	1.8
40	0.20	219.6	7.55	460	0.2774	1.8
50	0.35	219.6	7.54	460	0.2778	1.8
60	0.47	219.6	7.53	460	0.2782	1.8
70	1.21	219.7	7.51	460	0.2788	1.8
80	1.39	219.6	7.48	460	0.2800	1.8
90	2.15	219.6	7.45	460	0.2812	1.8
100	2.38	219.6	7.43	460	0.2819	1.8
110	3.06	219.8	7.4	490	0.3013	1.9

ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองดลับลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. กับ YOKE 2 ซม.

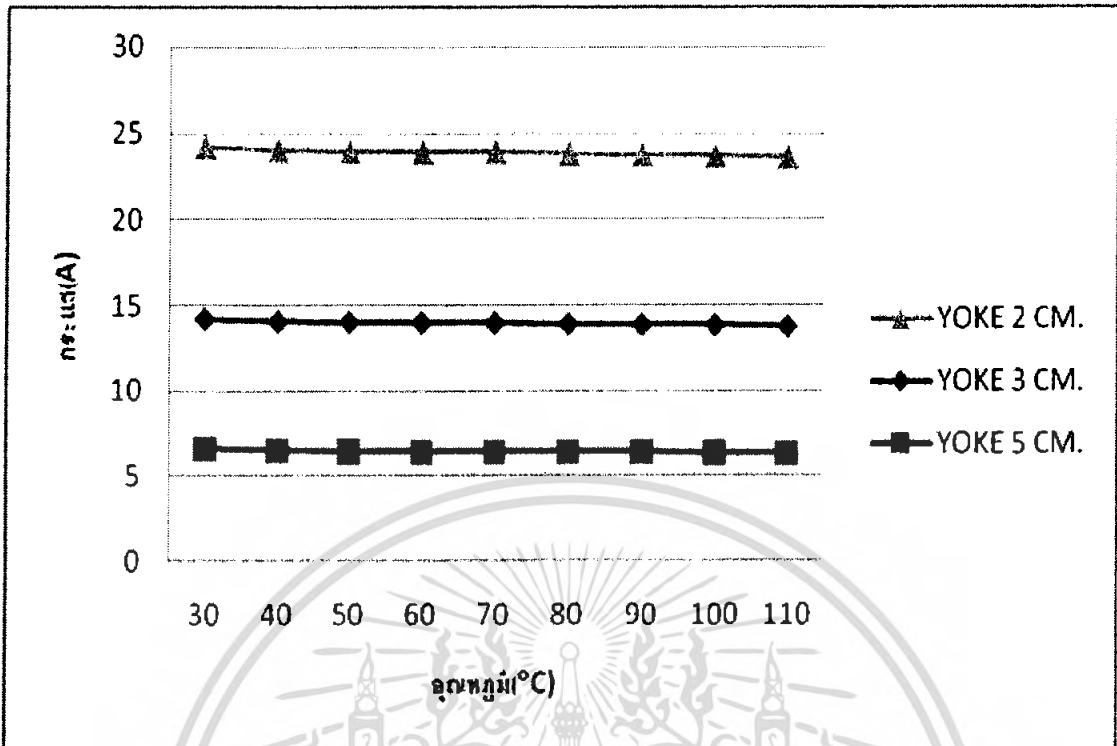
%THDv ก่อนการทดลอง 1.6 %

Temperature (° C )	Time(Min)	Primary Voltage(V)	Primary Current(A)	Power(W)	POWER FACTOR	%THDv
30	0.00	219.9	9.99	240	0.1092	1.8
40	0.45	220.4	9.99	210	0.0954	1.8
50	1.32	220.3	9.96	210	0.0957	1.8
60	2.45	220	9.96	210	0.0958	1.8
70	3.12	220.7	9.96	210	0.0955	1.8
80	4.47	220.4	9.92	210	0.0960	1.8
90	7.06	220.3	9.92	210	0.0961	1.8
100	8.17	220.3	9.91	210	0.0962	1.8
110	9.46	220.3	9.91	210	0.0962	1.9



รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าเวลาที่ดลับลูกปืนร้อนที่ YOKE ขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบค่าขนาดกระแสไฟฟ้าที่ลดลงกับ YOKE ขนาดต่างๆ

#### ตอนที่ 4 การทดสอบการขยายตัวของดัดลูปปืนที่อุณหภูมิ 110 °C ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการให้ความร้อนแก่ดัดลูปปืน โดยตั้งพิกัดอุณหภูมิสูงสุดที่ 30 °C เมื่ออุณหภูมิถึงพิกัดแล้วบันทึกค่าเส้นผ่านศูนย์กลางวงในของรังลูปปืนด้วย เวอร์เนีย คาร์ลิปเปอร์ ( ความละเอียด 25  $\mu\text{m}$  )
2. ทำการให้ความร้อนแก่ดัดลูปปืน โดยตั้งพิกัดอุณหภูมิสูงสุดที่ 110 °C เมื่ออุณหภูมิถึงพิกัดแล้วบันทึกค่าเส้นผ่านศูนย์กลางวงในของรังลูปปืนด้วย เวอร์เนีย คาร์ลิปเปอร์ ลงในตาราง
3. เปลี่ยนขนาดดัดลูปปืนและ YOKE ที่สามารถสวมเข้ากันได้พอและทำการทดลองซ้ำตามข้อ ข้อ 1 ถึง 2
4. หาค่าเฉลี่ยของความยาวที่เพิ่มขึ้น จากการทดลอง 10 ครั้ง

ตารางที่ 4.17 แสดงขนาดการขยายตัวของดัลล์ลูกปีน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. ที่อุณหภูมิ 110 °C

ครั้งที่	การขยายตัว( $\mu\text{m}$ )
1	175
2	185
3	175
4	175
5	170
6	175
7	175
8	180
9	175
10	175
เฉลี่ย	176
SD	3.94

ตารางที่ 4.18 แสดงขนาดการขยายตัวของดัลล์ลูกปีน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. ที่อุณหภูมิ 110 °C

ครั้งที่	การขยายตัว( $\mu\text{m}$ )
1	195
2	210
3	215
4	210
5	195
6	195
7	210
8	200
9	200
10	190
เฉลี่ย	202
SD	8.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น 8.56 มอนูญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 แสดงขนาดการขยายตัวของตลับลูกปืน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซม. ที่อุณหภูมิ 110 °C

ครั้งที่	การขยายตัว( $\mu\text{m}$ )
1	230
2	220
3	225
4	220
5	225
6	230
7	215
8	215
9	220
10	220
เฉลี่ย	222
SD	5.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนการใช้งานเครื่องขยายดัลลูปปืน

1. จ่ายไฟ 220 VAC ให้กับเครื่องขยายดัลลูปปืนโดยการเปิดเบรกเกอร์
2. นำดัลลูปปืนที่ต้องการจะขยายสอดเข้าแกนเหล็ก( YOKE )
3. นำแกนเหล็กพร้อมดัลลูปปืนวางบนแกนให้หน้าแกนเหล็กสัมผัสกันสนิท
4. นำหัววัดอุณหภูมิติดที่รังลูกปืนของดัลลูปปืน
5. ตั้งอุณหภูมิที่ 110 ° C และกดปุ่ม " START " เมื่อเครื่องทำงานจะมีไฟสีเหลืองขึ้น เครื่องจะคำนวณเวลาที่จะทำให้ดัลลูปปืนร้อนและแสดงผลเป็นหน่วยนาที
6. ขณะที่เครื่องทำงานสามารถกดปุ่ม " STOP " เพื่อหยุดการทำงานทันทีหรือกดเมื่อเครื่องแสดงไฟสีแดง และข้อความ " REMOVE BEARING " แสดงว่าเครื่องขยายดัลลูปปืนเสร็จสมบูรณ์แล้วแต่เครื่องจะหยุดการทำงานชั่วคราว เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าที่ตั้งไว้ เครื่องจะทำงานอีกจนกว่าจะมีการกดปุ่ม " STOP "
7. เมื่อกดปุ่ม " STOP " แล้วเครื่องขยายดัลลูปปืนจะไม่มีไฟสัญญาณใดๆ ปิดเบรกเกอร์ แล้วย้ายดัลลูปปืนไปติดตั้งกับเพลลา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

การทดลองตอนที่ 1 การทดสอบความเที่ยงตรงค่าอุณหภูมิที่วัดโดยเครื่องขยายดัลบลูกปืน กับ Thermo Hunter ( ความละเอียด  $1^{\circ}\text{C}$  ) จากผลการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณทำให้ทราบว่าค่าที่ได้จากเครื่องขยายดัลบลูกปืนมีค่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่าค่าอุณหภูมิที่วัดจากเครื่องวัดมาตรฐานประมาณ  $2 - 3^{\circ}\text{C}$  ทั้งๆที่ เช่น เซอร์วอโรนิคส์มีความละเอียดกว่าเครื่องวัดมาตรฐาน( Thermo Hunter) คืออยู่ที่  $0.5^{\circ}\text{C}$  น่าจะเป็นผลมาจากการที่ดัลบลูกปืนสันทำให้การวัดมีความคลาดเคลื่อนและ Thermo Hunter วัดอุณหภูมิเป็นพื้นที่วงกลมผู้ทดลองต้องพยายามวัดค่าค้างไว้แล้วจะทำให้ทราบค่าความร้อนสูงสุดทำให้ค่าที่วัดได้น่าจะเป็นค่ามากกว่าอุณหภูมิจริงหรือมากกว่าเครื่องขยายดัลบลูกปืนนั่นเอง

การทดลองตอนที่ 2 การทดสอบกำลังไฟฟ้า ของดัลบลูกปืนเครื่องขยายดัลบลูกปืนที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความร้อนของดัลบลูกปืนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสันและไม่เสถียรของโมเลกุล ส่งผลให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นแต่กระแสที่วัดได้ค่อย ๆ ลดลงดังแสดงในกราฟของกระแสกับอุณหภูมิที่กราฟมีความชันเป็นลบ ตามหลักของความต้านทานของตัวนำโลหะจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และกำลังไฟฟ้าที่ให้แกดัลบลูกปืนต่างขนาดกันเนื่องดัลบลูกปืนเปรียบเสมือนขดลวดความต้านทานทางด้านทุติยภูมิ ดังนั้นยิ่งดัลบลูกปืนมีพื้นที่หน้าตัดมากก็จะทำให้มีความต้านทานต่ำ และดัลบลูกปืนที่มีความหนาของรังลูปืนมากจะทำให้ได้กำลังไฟฟ้า

จากการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ซึ่งสังเกตจาก %THDv นั้นก่อนทำการทดลองมีค่าประมาณ  $1 - 2\%$  เมื่อเครื่องขยายดัลบลูกปืนทำงานจ่ายไฟฟ้า ให้แก่ชิ้นงานค่าของ %THDv เพิ่มขึ้นเล็กน้อยไม่เกิน  $2\%$  ( ตามมาตรฐานของคุณภาพไฟฟ้าไม่ควรเกิน  $3\%$  ) แสดงว่าเครื่องขยายดัลบลูกปืนสร้างกระแสฮาร์มอนิกส์ต่ำ

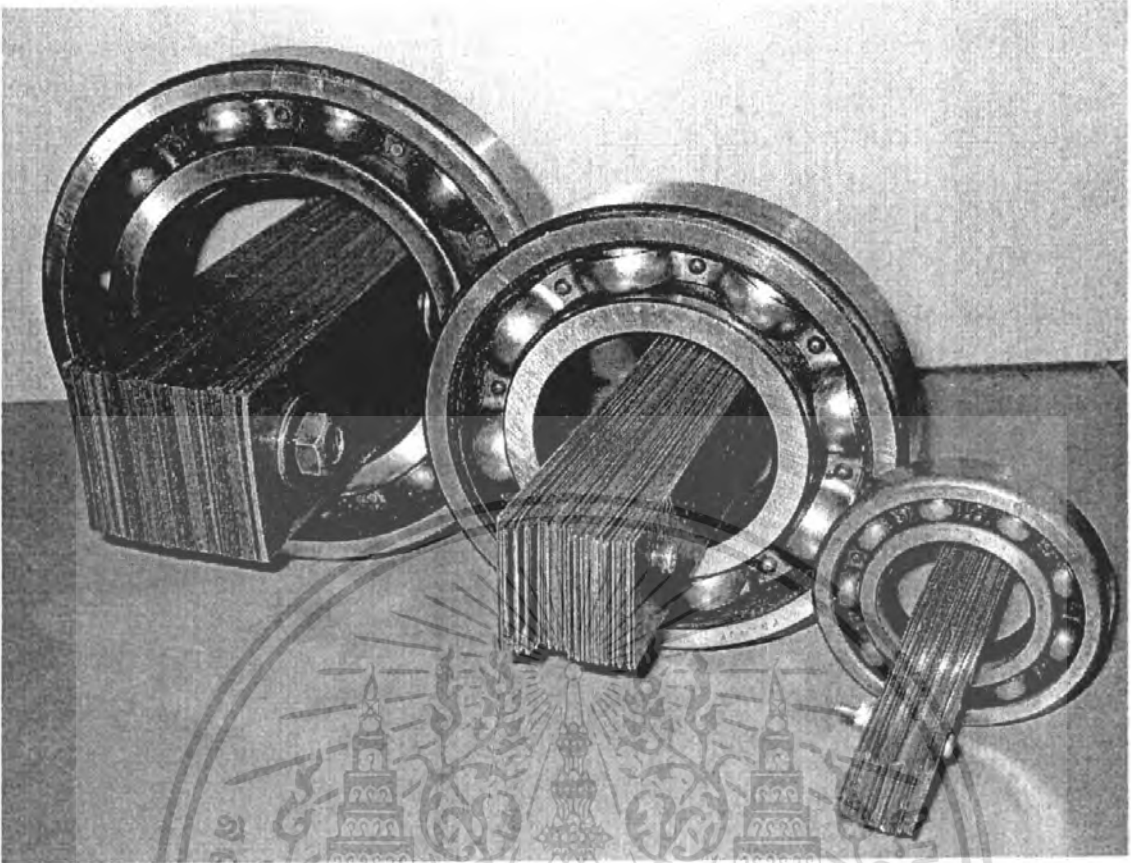
ตอนที่ 3 เมื่อพิจารณาที่ขนาดของ YOKE ต่อการส่งกำลังที่ดัลบลูกปืนขนาดเท่ากัน จากผลการทดลองอธิบายได้ว่าเมื่อขนาด YOKE เล็กลงจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กเพิ่มขึ้นทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กลดลงจึงไปคล้องแล้วเกิดกำลังงานที่ดัลบลูกปืนได้กำลังไฟฟ้างต่ำลงทำให้เสียเวลาในการทำความร้อนแกดัลบลูกปืน ดังนั้นการขยายดัลบลูกปืนจึงควรใช้ YOKE ขนาดที่พอดีกับดัลบลูกปืนให้มากที่สุด

ตอนที่ 4 จากการทดลองเมื่อรวบรวมผลการทดลองการขยายตัวของดัลบลูกปืน ที่  $110^{\circ}\text{C}$  แล้วนั้นค่าเฉลี่ยของการขยายตัวต่ำที่สุดอยู่ที่  $176\ \mu\text{m}$  สำหรับดัลบลูกปืนเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3.5 ซม. ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าตามวิธีการติดตั้งดัลบลูกปืนแบบขยายรังในลูปืนให้เข้ากับเพลลา คือ  $110 - 150\ \mu\text{m}$  ซึ่งทำให้สามารถติดตั้งดัลบลูกปืนเข้ากับเพลลาด้วยวิธีการขยายด้วยความร้อนได้

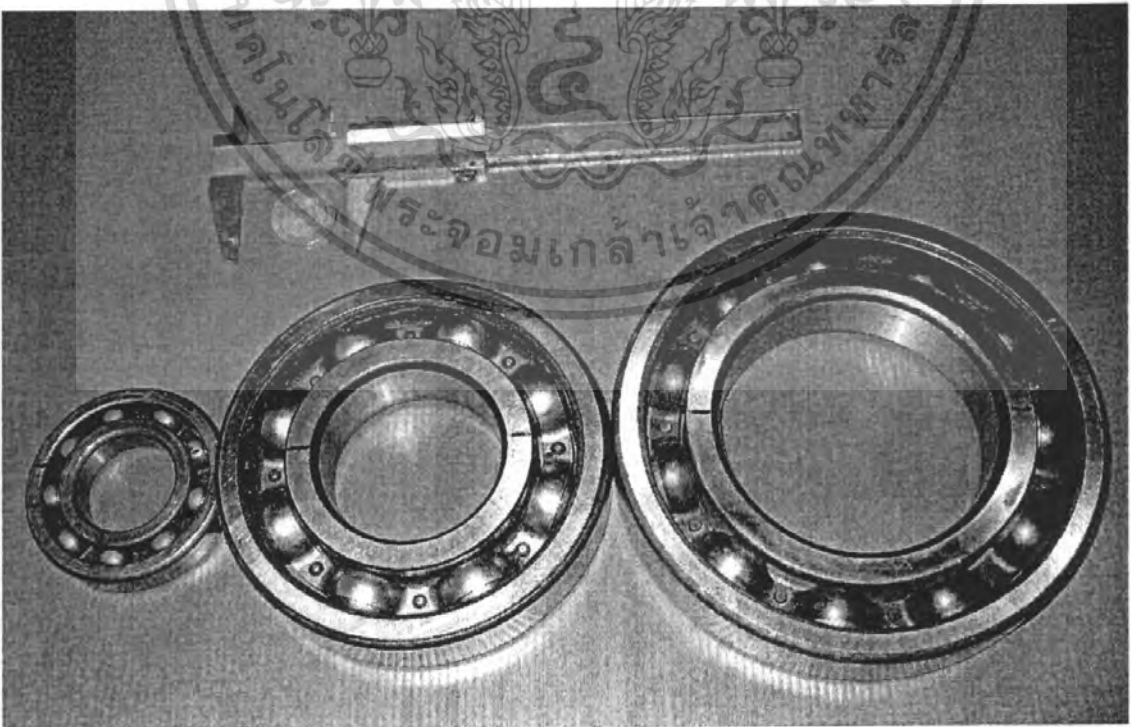
โดยสรุปแล้วความสามารถของเครื่องขยายดัลลูปปืนสามารถใช้ในงานจริงได้จากผลการทดลองทั้ง 4 ตอนข้างต้นทั้งความเที่ยงตรงในการวัดอุณหภูมิ ,พิกัดกำลังของเครื่อง ,การใช้งานร่วมกับ Yoke ขนาดต่างกัน ,การสร้างกระแสฮาร์โมนิกส์และการขยายตัวของดัลลูปปืนที่อุณหภูมิพิกัด โดยขณะที่เครื่องทำงานยังมีการสั่นและไม่มีการซีลสนามแม่เหล็กซึ่งยังต้องพัฒนาต่อไป โดยเมื่อเทียบราคาและความสามารถกับเครื่องขยายดัลลูปปืนของต่างประเทศที่มีขาย ก็อยู่ในเกณฑ์พอใช้เมื่อต้นทุนการทำราคาประมาณ 5,100 บาทต่อเครื่อง

ความสามารถ	TIH 030	TIH 100	เครื่องขยาย ดัลลูปปืน
การควบคุมอุณหภูมิ:			
- ช่วงอุณหภูมิ	0 - 250 °C	0 - 250 °C	0 - 125 °C
- หัววัดอุณหภูมิแม่เหล็ก	K-type	K-type	Electronic
- ความแม่นยำ (อิเล็กทรอนิกส์)	± 2 °C	±2 °C	±3°C
การควบคุมเวลา:			
- ช่วงเวลา	0 - 60 นาที	0 - 60 นาที	คำนวณอัตโนมัติ
- โหมดวัดอุณหภูมิ	มี	มี	มี
- การขจัดสนามแม่เหล็ก	มี (<2 A/cm)	มี (<2 A/cm)	ไม่มี
- ระบบป้องกันความร้อน สูงเกินไป(110 °C)	มี	ปุ่มกดพร้อมจอ LED เป็นแบบ รีโมท	มี
- กำลังไฟฟ้าสูงสุด	2.0 kVA	3.6 kVA	3 kVA
ราคา (1 US/ 35 bath)	47,250	70,350	5,100

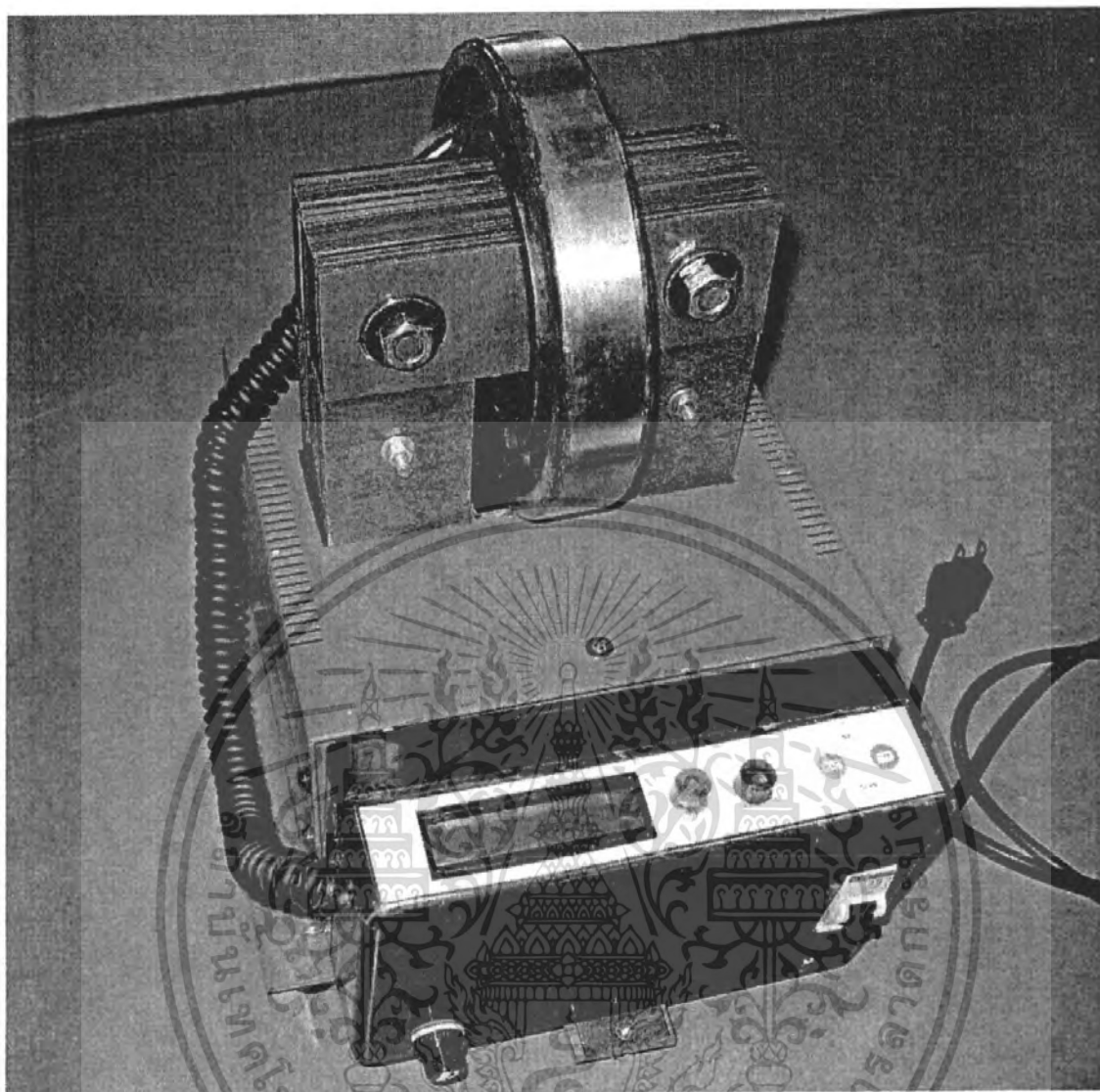
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 การสวม YOKE เข้ากับตลับลูกปืน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 4.20 ตลับลูกปืนและเวอร์เนีย คาร์ลิปเปอร์ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 เครื่องขยายดัลลิ่งลูบีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] แผนกผลิตภัณฑ์ซ่อมบำรุงและสารหล่อลื่น บริษัท เอส เค เอฟ (ประเทศไทย), “ผลิตภัณฑ์ซ่อมบำรุงและสารหล่อลื่น SKF “ , กรุงเทพ , 2004 .
- [2] ประเวทย์ วุฒิประเสริฐสง และคณะ, “ เครื่องขยายตลับลูกปืน “ ,ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541.
- [3] พรศักดิ์ อรรถวานิช , “ โลหการ วิศวกรรม ” ,แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพ, 2546
- [4] [www.be2hand.com/scripts/shop](http://www.be2hand.com/scripts/shop)
- [5] นรเศรษฐ พัทฒนเดช , “ เอกสารประกอบการสอน วิชาวัสดุทางวิศวกรรมไฟฟ้า”, เล่มที่ 2 ,พิมพ์ครั้งที่ 1,กรุงเทพ,แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2550

## ภาคผนวก ก

## โปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์

```

#include<16F877a.h>
#fuses HS,NOPROTECT,NOPUT,NOWDT
#use delay(clock=20000000)
#use standard_io(B)
#use fast_io(D)
#include <lcd.c>
#define TOUCH_PIN PIN_B0
#bit TOUCH_PIN_BIT = 0x06.0

char ascii[17] = "0123456789ABCDEF";
unsigned char temp_msb,temp_lsb,
             temp_half,temp_buff,chk;

int1 sign;
float a,b;
unsigned int j,k,l,x,y,z;

byte touch_read_byte() {
    byte i,data;
    for(i=1;i<=8;++i) {
        output_low(TOUCH_PIN);
        delay_us(14);
        output_float(TOUCH_PIN);
        delay_us(5);
        shift_right(&data,1,input(TOUCH_PIN));
        delay_us(100);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

return(data);
}

```

```

byte touch_write_byte(byte data) {
    byte i;
    for(i=1;i<=8;++i) {
        output_low(TOUCH_PIN);
        delay_us(10);
        if(shift_right(&data,1,0)) {
            output_high(TOUCH_PIN);
            delay_us(10);
            if(!TOUCH_PIN_BIT)
                return(0);
        } else {
            output_low(TOUCH_PIN);
            if(TOUCH_PIN_BIT)
                return(0);
        }
        delay_us(50);
        output_high(TOUCH_PIN);
        delay_us(50);
    }
    return(TRUE);
}

```

```

byte touch_present() {

```

```

    boolean present;
    output_low(TOUCH_PIN);
    delay_us(500);
    output_float(TOUCH_PIN);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

delay_us(5);
if(!input(TOUCH_PIN))
    return(FALSE);
delay_us(65);
present=!input(TOUCH_PIN);
delay_us(240);
if(present)
    return(TRUE);
else
    return(FALSE);
}

```

```

byte ReadTemp_DS1820(){
    byte i,buffer[9];
    if(touch_present()){
        touch_write_byte(0xcc);
        touch_write_byte(0x44);
        delay_ms(300);
        touch_present();
        touch_write_byte(0xcc);
        touch_write_byte(0xbe);
        for(i=0;i<9;i++) buffer[i] = touch_read_byte();
        temp_lsb = buffer[0];
        temp_msb = buffer[1];
        sign = 0;
        if(temp_msb!=0){
            sign = 1;
            temp_lsb = (~temp_lsb)+1;
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

temp_lsb = temp_lsb >> 1;
return(TRUE);
}
return(FALSE);
}

```

```

void ShowTemp_DS1820(){
char i;
lcd_send_byte(0,0x8a);
if(ReadTemp_DS1820()){
if(temp_buff!=temp_lsb){
temp_buff = temp_lsb;
lcd_putc(" ");
lcd_send_byte(0,0x8a);
if(sign) lcd_putc("-");
i = temp_lsb/100;
if(i!=0) lcd_putc(ascii[i]);
lcd_putc(ascii[(temp_lsb%100)/10]);
lcd_putc(ascii[(temp_lsb%100)%10]);
if(temp_half == 1)
lcd_putc(".5 C");
else lcd_putc(".0 C");
}
} else lcd_putc("Error");
}

```

```

void Showtemp(){

```

```

lcd_gotoxy(1,2);

```

```

lcd_putc(" Temp set:");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    if (j==1){lcd_putc(" 60 C");lcd_gotoxy(1,2);lcd_putc(" Min set:");
delay_ms(50);l=60;}
    if (j==2){lcd_putc(" 70 C"); delay_ms(50);l=70;}
    if (j==3){lcd_putc(" 80 C"); delay_ms(50);l=80;}
    if (j==4){lcd_putc(" 90 C"); delay_ms(50);l=90;}
    if (j==5){lcd_putc(" 95 C"); delay_ms(50);l=95;}
    if (j==6){lcd_putc(" 100 C"); delay_ms(50);l=100;}
    if (j==7){lcd_putc(" 105 C"); delay_ms(50);l=105;}
    if (j==8){lcd_putc(" 110 C");lcd_gotoxy(1,2);lcd_putc(" Max set:");
delay_ms(50);l=110;}
}
void Showtime(){ if((temp_lsb-x) >=1){
    z = l - temp_lsb ;
    y = temp_lsb - x ;
    x = temp_lsb ;
    a = (z*b)/(y*60) ;
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc,"wait for(min):%f ",a);
    b=0;}
    else if(a>61){ lcd_gotoxy(1,2); lcd_putc("OVERLOAD
BEARING");output_C(0x40);}
}

```

```

void main() {
    unsigned char i,buff,dat;
    int1 sw0,sw1,sw2;
    lcd_init();
    lcd_putc(" BEARING HEATER");
    delay_ms(2000);
    lcd_gotoxy(1,2);
    lcd_putc(" Please set temp");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

delay_ms(2000);
j=0;
k=0;
b=0;

while (1) {
    sw0 = input(pin_C0);
    sw1 = input(pin_C1);
    sw2 = input(pin_C3);
    if(sw0==0){output_C(0x10);j++;Showtemp();delay_ms(500);}
    if(sw1==0){output_C(0x10);j--;Showtemp();delay_ms(500);}
    if(sw2==0){k++;}
    if(k==1){lcd_gotoxy(14,2);lcd_putc("ok?");delay_ms(500);}
    if(k>1){if(temp_lsb>1){output_C(0x40);lcd_gotoxy(1,2);lcd_putc(" REMOVE
BEARING");}
        lcd_gotoxy(1,1);lcd_putc(" Temp is :");ShowTemp_DS1820();
        if(temp_lsb<1){output_C(0x20);b=b+1;Showtime();delay_ms(1000);}
    }
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ข้อมูลอุปกรณ์

คุณสมบัติหลักๆของ PIC16F877 มีดังนี้

1. มีคำสั่งที่เป็นภาษา แอสเซมบลี 35 คำสั่ง
2. ใน 1 คำสั่งใช้เวลาทำงาน 1 ถึง 2 ไซเคิล
3. ทำงานสูงสุดที่สัญญาณนาฬิกาตั้งแต่ไฟตรงถึง 20 MHz
4. ทำงานแบบ Pipe-line สามารถทำงาน 2 อย่างในเวลาเดียวกัน
5. หน่วยความจำเป็นแบบ Flash มีขนาด 8 kWord ( 1 word = 14 บิต )
6. มีหน่วยความจำข้อมูล ( Data Memory RAM ) ขนาด 368 ไบต์
7. มีหน่วยความจำข้อมูลแบบ EEPROM ขนาด 256 ไบต์
8. ดอปสนองการอินเทอร์รัปต์ได้ทั้งหมด 14 แหล่ง
9. มี Stack ให้ใช้ได้สูงสุด 14 แหล่ง
10. มีระบบ Power On Reset, Power Up timer, Oscillator Start-up และ Watchdog Timer
11. มีระบบ Code Protection กันการคัดลอก
12. มีโหมดประหยัดพลังงาน
13. สัญญาณนาฬิกา有多种ให้เลือกใช้งาน คือ อาจจะใช้ XTAL หรือ วงจร RC ก็ได้
14. สามารถโปรแกรมด้วยไฟ + 5 VDC ได้
15. ใช้โปรแกรมแบบ In-Circuit Serial Programming
16. ทำงานที่ไฟเลี้ยง 2 VDC ถึง 5 VDC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. Current Sink และ Current Source อยู่ที่ 25 mA
18. ที่ Timer/Counter 3 ตัวคือ Timer 0 ขนาด 8 บิต , Timer 1 ขนาด 16 บิต และ Timer 2 ขนาด 8 บิต
19. Capture/Compare/PWM ( Pulse Width Moduration ) 2 ชุด
20. มีวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ( A/D Converter ) ขนาด 10 บิต
21. มีระบบ USART สำหรับต่อการสื่อสารแบบ RS232
22. มีระบบตรวจสอบระดับไฟเลี้ยง ( Brown-out Reset )
23. มี I/O พอร์ตทั้งหมด 5 พอร์ต แต่ละพอร์ตมีจำนวนบิตไม่เท่ากัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

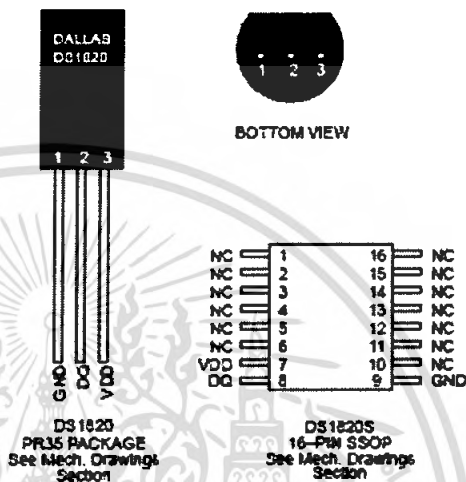
# DALLAS SEMICONDUCTOR

## DS1820 1-Wire™ Digital Thermometer

### FEATURES

- Unique 1-Wire™ interface requires only one port pin for communication
- Multidrop capability simplifies distributed temperature sensing applications
- Requires no external components
- Can be powered from data line
- Zero standby power required
- Measures temperatures from  $-55^{\circ}\text{C}$  to  $+125^{\circ}\text{C}$  in  $0.5^{\circ}\text{C}$  increments. Fahrenheit equivalent is  $-67^{\circ}\text{F}$  to  $+257^{\circ}\text{F}$  in  $0.9^{\circ}\text{F}$  increments
- Temperature is read as a 9-bit digital value.
- Converts temperature to digital word in 200 ms (typ.)
- User-definable, nonvolatile temperature alarm settings
- Alarm search command identifies and addresses devices whose temperature is outside of programmed limits (temperature alarm condition)
- Applications include thermostatic controls, industrial systems, consumer products, thermometers, or any thermally sensitive system

### PIN ASSIGNMENT



### PIN DESCRIPTION

GND	—	Ground
DQ	—	Data In/Out
VDD	—	Optional VDD
NC	—	No Connect

### DESCRIPTION

The DS1820 Digital Thermometer provides 9-bit temperature readings which indicate the temperature of the device.

Information is sent to/from the DS1820 over a 1-Wire interface, so that only one wire (and ground) needs to be connected from a central microprocessor to a DS1820. Power for reading, writing, and performing temperature conversions can be derived from the data line itself with no need for an external power source.

Because each DS1820 contains a unique silicon serial number, multiple DS1820s can exist on the same 1-Wire bus. This allows for placing temperature sensors in many different places. Applications where this feature is useful include HVAC environmental controls, sensing temperatures inside buildings, equipment or machinery, and in process monitoring and control.

D30596 1/27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DS18B20

**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS\***

Voltage on Any Pin Relative to Ground	-0.5V to +7.0V
Operating Temperature	-55°C to +125°C
Storage Temperature	-55°C to +125°C
Soldering Temperature	250°C for 10 seconds

\* This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.

**RECOMMENDED DC OPERATING CONDITIONS**

PARAMETER	SYMBOL	CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Supply Voltage	$V_{DD}$	I/O Functions	2.8	5.0	5.5	V	1, 2
		$\pm 1/2^\circ\text{C}$ Accurate Temperature Conversions	4.3		5.5		
Data Pin	$V_{IO}$		-0.5		+5.5	V	2
Logic 1	$V_{IH}$		2.0		$V_{DD}+0.3$	V	2, 3
Logic 0	$V_{IL}$		-0.3		+0.8	V	2, 4

**DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS**(-55°C to +125°C;  $V_{DD}=3.6\text{V}$  to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Thermometer Error	$\epsilon_{ERR}$	-0°C to +70°C			$\pm 1/2$	$^\circ\text{C}$	1, 9, 10
		-55°C to 0°C and +70°C to +125°C			See Typical Curve		
Input Logic High	$V_{IH}$		2.2		5.5	V	2, 3
Input Logic Low	$V_{IL}$		-0.3		+0.8	V	2, 4
Sink Current	$I_L$	$V_{IO} = 0.4\text{V}$	-4.0			mA	2
Standby Current	$I_O$			230	350	nA	8
Active Current	$I_{DD}$			1	1.5	mA	5, 6
Input Load Current	$I_L$			5		$\mu\text{A}$	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D64220

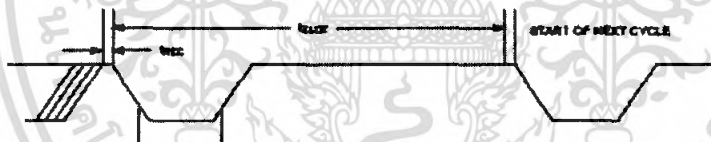
AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS: (-55°C to +125°C;  $V_{DD}=3.6V$  to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Temperature Conversion Time	$t_{CONV}$		200	500	ms	
Time Slot	$t_{SLOT}$	60		120	$\mu s$	
Recovery Time	$t_{REC}$	1			$\mu s$	
Write 0 Low Time	$t_{LOW0}$	60		120	$\mu s$	
Write 1 Low Time	$t_{LOW1}$	1		15	$\mu s$	
Read Data Valid	$t_{RDV}$			16	$\mu s$	
Reset Time High	$t_{RSTH}$	430			$\mu s$	
Reset Time Low	$t_{RSTL}$	430		4800	$\mu s$	
Presence Detect High	$t_{PD-H}$	15		60	$\mu s$	
Presence Detect Low	$t_{PD-L}$	60		240	$\mu s$	
Capacitance	$C_{INOUT}$			25	PF	

## NOTES:

- Temperature conversion will work with  $\pm 2^\circ C$  accuracy down to  $V_{DD} = 3.4$  volts.
- All voltages are referenced to ground.
- Logic one voltages are specified at a source current of 1 mA.
- Logic zero voltages are specified at a sink current of 4 mA.
- $I_{DD}$  specified with  $V_{OC}$  at 5.0 volts.
- Active current refers to either temperature conversion or writing to the E<sup>2</sup> memory. Writing to E<sup>2</sup> memory consumes approximately 200  $\mu A$  for up to 10 ms.
- Input load is to ground.
- Standby current specified up to 70°C. Standby current typically is 5  $\mu A$  at 125°C.
- See Typical Curve for specification limits outside the 0°C to 70°C range. Thermometer error reflects sensor accuracy as tested during calibration.
- Typical accuracy curve valid for 4.3V  $\leq V_{DD} \leq$  5.5V.

## 1-WIRE WRITE ONE TIME SLOT

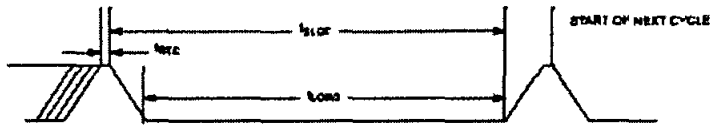


06/2008 25/27

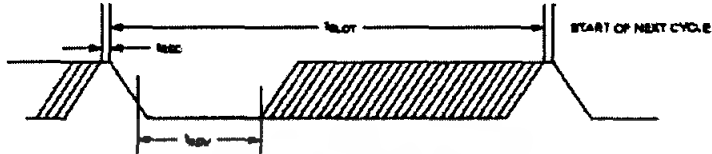
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

08420

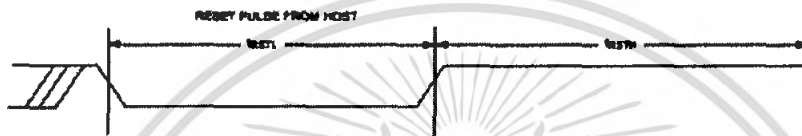
## 1-WIRE WRITE ZERO TIME SLOT



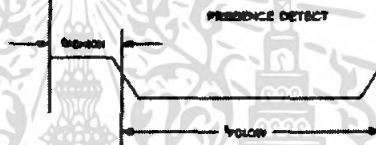
## 1-WIRE READ ZERO TIME SLOT



## 1-WIRE RESET PULSE



## 1-WIRE PRESENCE DETECT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# BTA/BTB16 and T16 Series

SNUBBERLESS™, LOGIC LEVEL & STANDARD

16A TRIACs

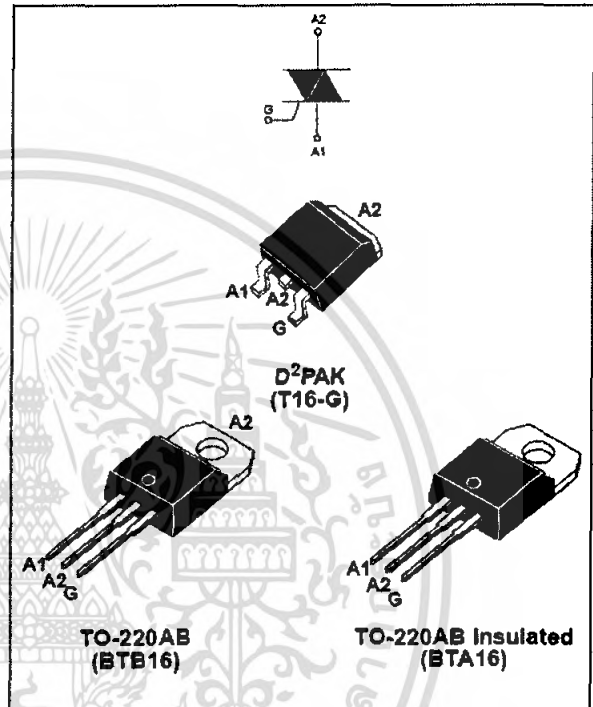
## MAIN FEATURES:

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	16	A	
		TO-220AB			
		TO-220AB Ins.			
$I_{TSM}$	Non repetitive surge peak on-state current (full cycle, $T_j$ initial = 25°C)	F = 60 Hz	t = 16.7 ms	168	A
		F = 50 Hz	t = 20 ms	160	
$I^2t$	$I^2t$ Value for fusing	tp = 10 ms		144	A <sup>2</sup> s
$di/dt$	Critical rate of rise of on-state current $I_G = 2 \times I_{GT}$ , tr ≤ 100 ns	F = 120 Hz	$T_j = 125^\circ\text{C}$	50	A/ $\mu\text{s}$
$V_{DSM}/V_{RSM}$	Non repetitive surge peak off-state voltage	tp = 10 ms	$T_j = 25^\circ\text{C}$	$V_{DRM}/V_{RRM} + 100$	V
$I_{GM}$	Peak gate current	tp = 20 $\mu\text{s}$	$T_j = 125^\circ\text{C}$	4	A
$P_{G(AV)}$	Average gate power dissipation	$T_j = 125^\circ\text{C}$		1	W
$T_{stg}$ $T_j$	Storage junction temperature range Operating junction temperature range			- 40 to + 150 - 40 to + 125	°C

## 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>			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 IV	MAX.	25 50	50 100	mA
V <sub>GT</sub>			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	ALL	MIN.	0.2		V
I <sub>H</sub> (2)	I <sub>T</sub> = 500 mA		MAX.	25	50	mA
I <sub>L</sub>	I <sub>G</sub> = 1.2 I <sub>GT</sub>	I - III - IV	MAX.	40	60	mA
		II		80	120	
dV/dt (2)	V <sub>D</sub> = 67 % V <sub>DRM</sub> gate open T <sub>j</sub> = 125°C		MIN.	200	400	V/μs
(dV/dt) <sub>c</sub> (2)	(dI/dt) <sub>c</sub> = 7 A/ms T <sub>j</sub> = 125°C		MIN.	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> I <sub>RRM</sub>	V <sub>DRM</sub> = V <sub>RRM</sub>	T <sub>j</sub> = 25°C	MAX.	5	μA
		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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BTA/BTB16 and T16 Series

THERMAL RESISTANCES

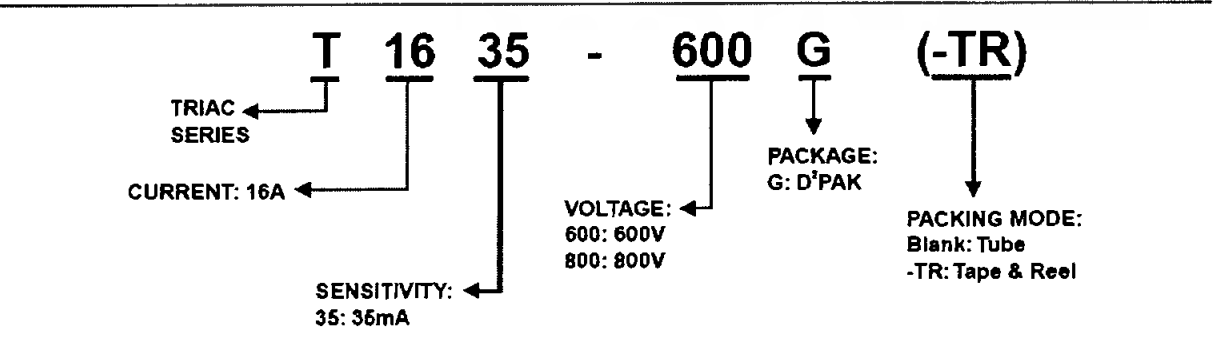
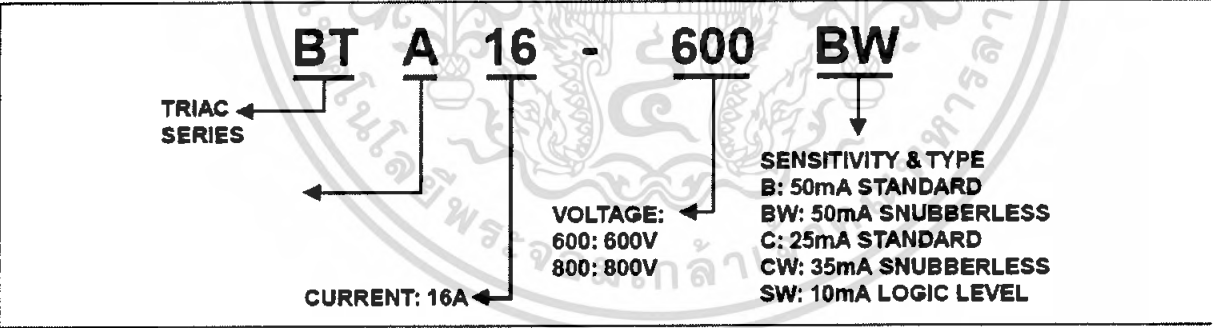
Symbol	Parameter		Value	Unit	
R <sub>th(j-c)</sub>	Junction to case (AC)		D <sup>2</sup> PAK TO-220AB	1.2	°C/W
			TO-220AB Insulated	2.1	
R <sub>th(j-a)</sub>	Junction to ambient	S = 1 cm <sup>2</sup>	D <sup>2</sup> PAK	45	°C/W
			TO-220AB	60	
			TO-220AB Insulated		

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



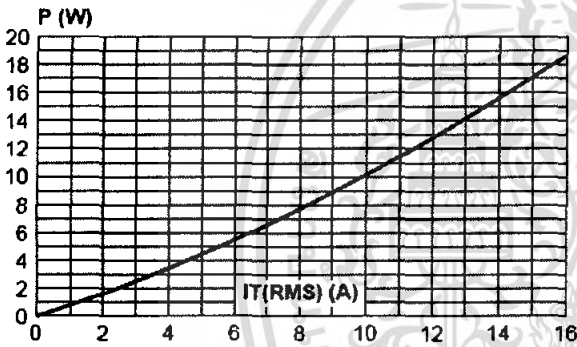
**BTA/BTB16 and T16 Series**

**OTHER INFORMATION**

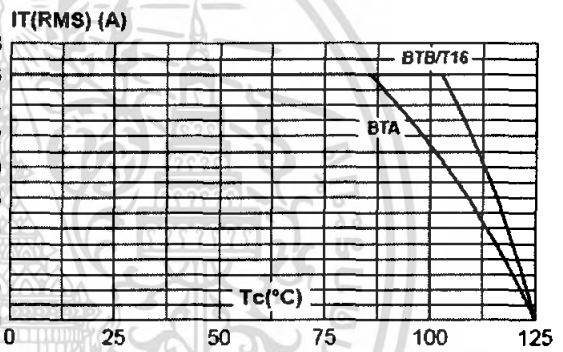
Part Number	Marking	Weight	Base quantity	Packing mode
BTA/BTB16-xxxxyz	BTA/BTB16xxxxyz	2.3 g	250	Bulk
T1635-xxxG	T1635xxxG	1.5 g	50	Tube
T1635-xxxG-TR	T1635xxxG	1.5 g	1000	Tape & reel

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

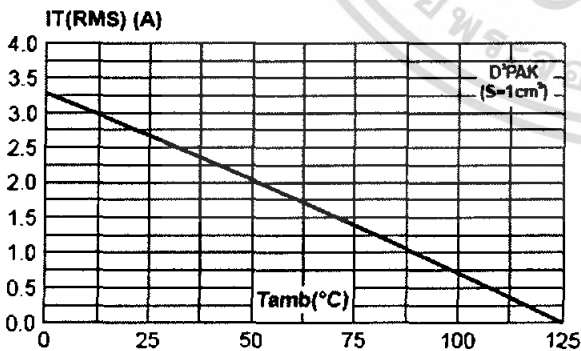
**Fig. 1:** Maximum power dissipation versus RMS on-state current (full cycle).



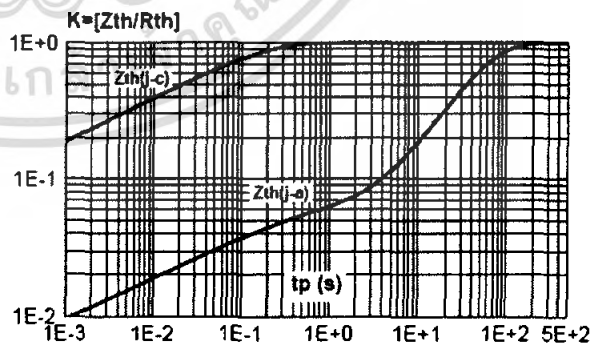
**Fig. 2-1:** RMS on-state current versus case temperature (full cycle).



**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.



BTA/BTB16 and T16 Series

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

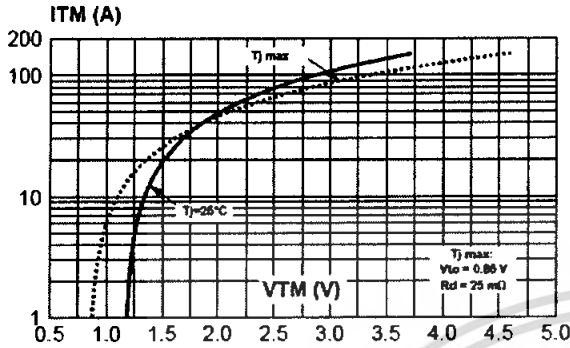


Fig. 5: Surge peak on-state current versus number of cycles.

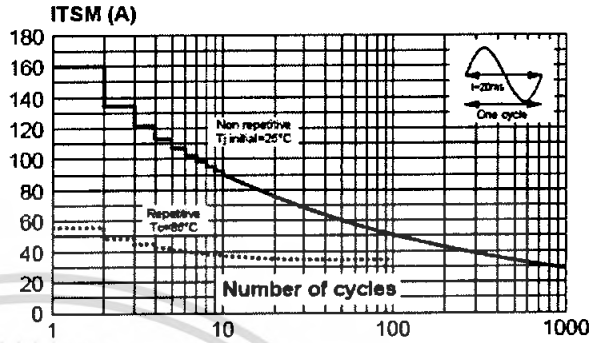


Fig. 6: Non-repetitive surge peak on-state current for a sinusoidal pulse with width  $t_p < 10 \text{ ms}$ , and corresponding value of  $I^2 t$ .

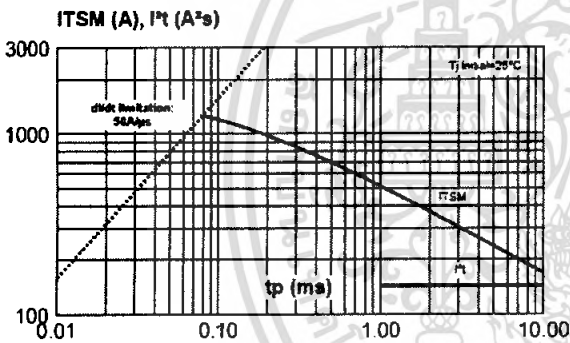


Fig. 7: Relative variation of gate trigger current, holding current and latching current versus junction temperature (typical values).

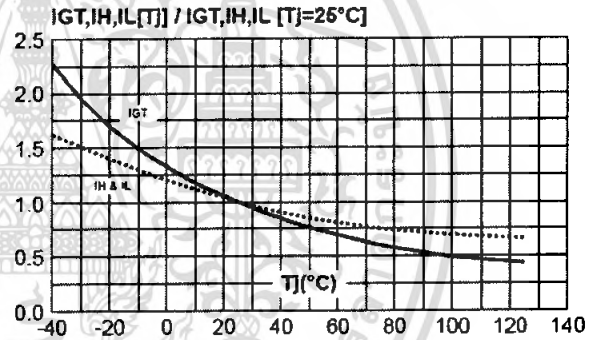


Fig. 8: Relative variation of critical rate of decrease of main current versus  $(dV/dt)_c$  (typical values).

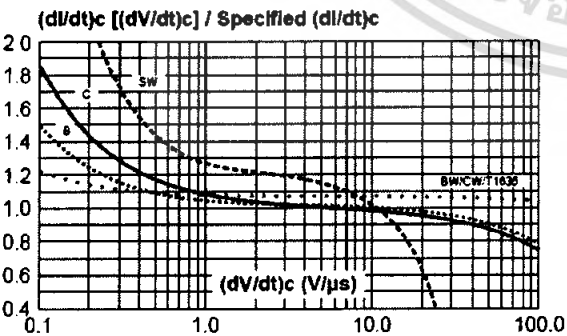
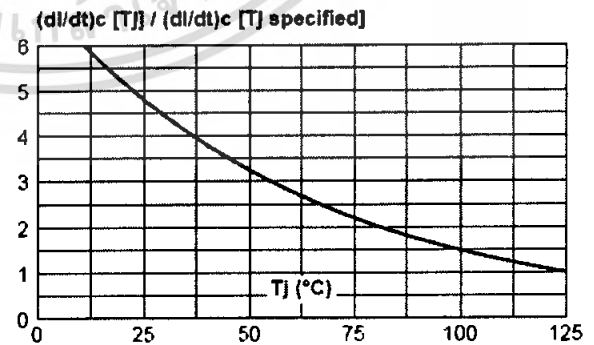
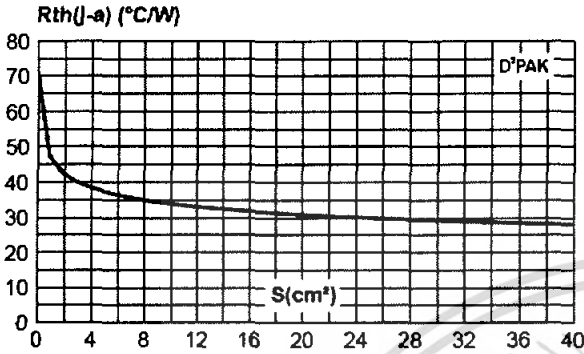


Fig. 9: Relative variation of critical rate of decrease of main current versus junction temperature.



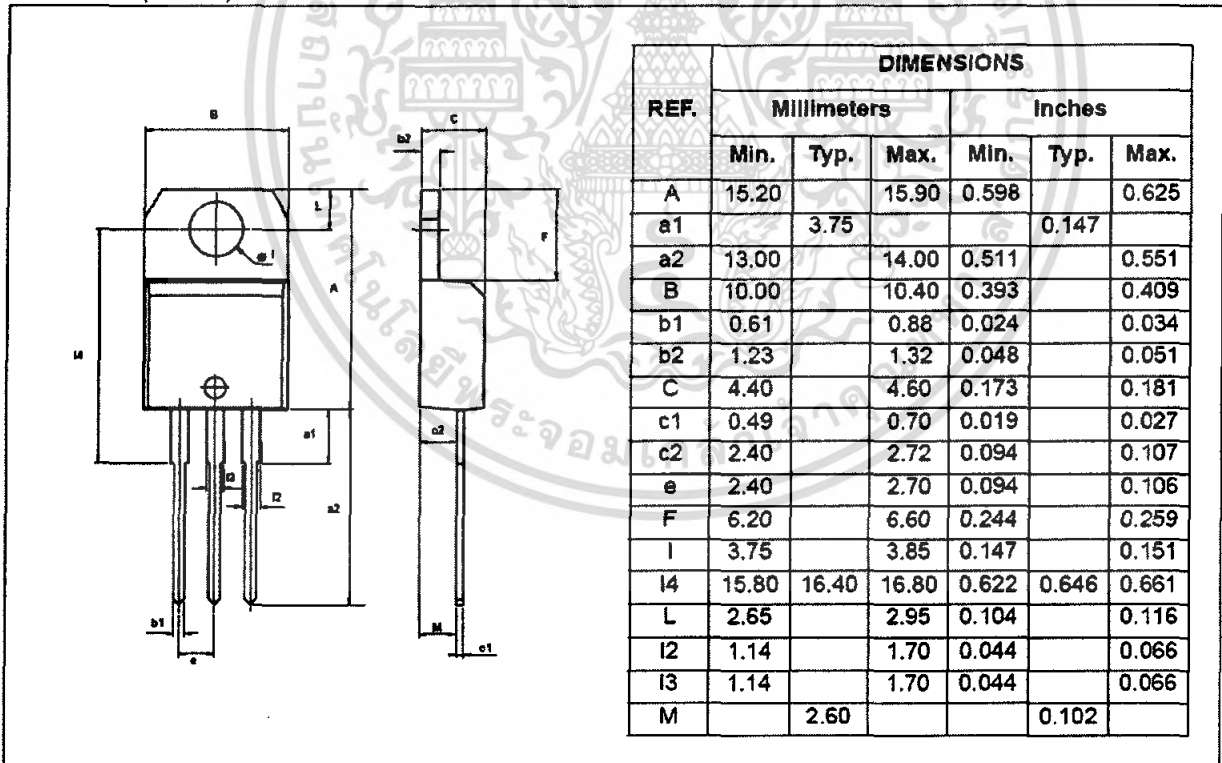
## BTA/BTB16 and T16 Series

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

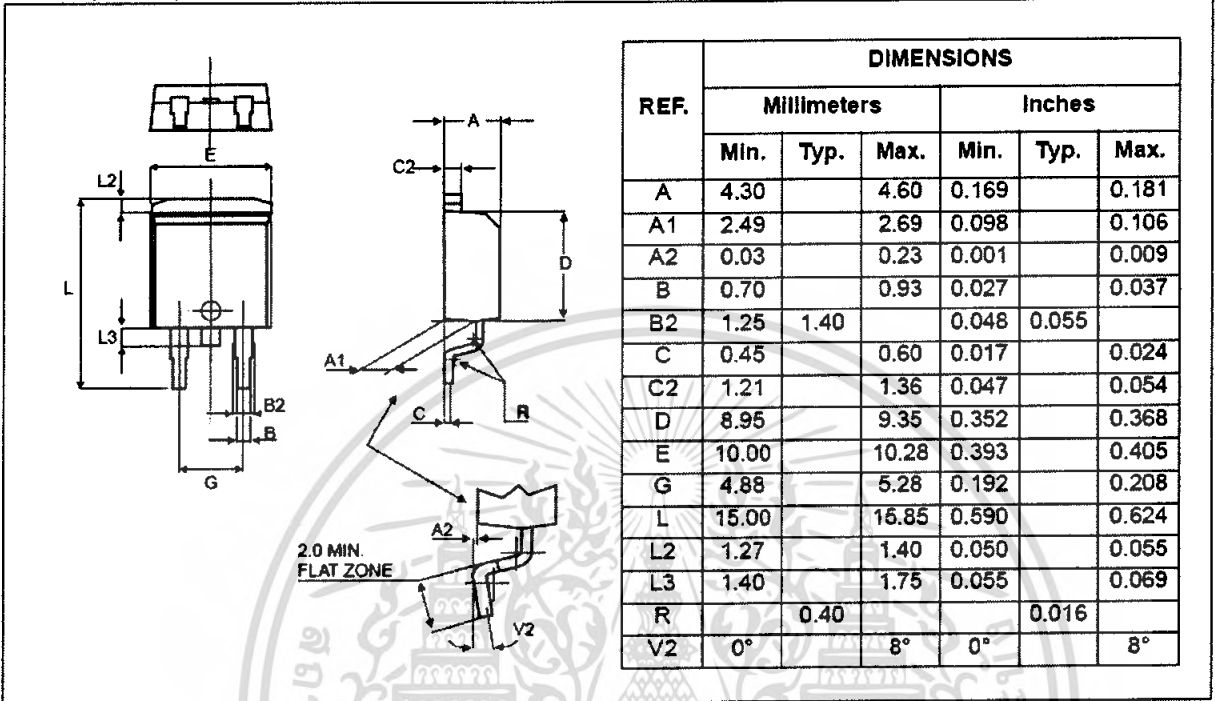
TO-220AB (Plastic)



BTA/BTB16 and T16 Series

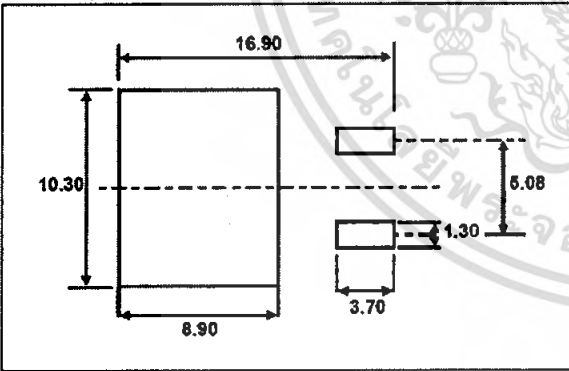
PACKAGE MECHANICAL DATA

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>

**FAIRCHILD**  
SEMICONDUCTOR®

## 6-PIN DIP ZERO-CROSS OPTOISOLATORS TRIAC DRIVER OUTPUT (250/400 VOLT PEAK)

MOC3031M MOC3032M MOC3033M MOC3041M MOC3042M MOC3043M

### DESCRIPTION

The MOC303XM and MOC304XM devices consist of a AlGaAs infrared emitting diode optically coupled to a monolithic silicon detector performing the function of a zero voltage crossing bilateral triac driver.

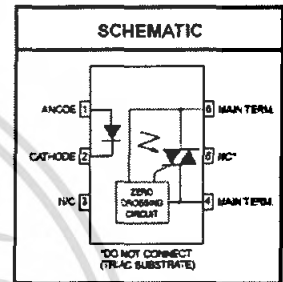
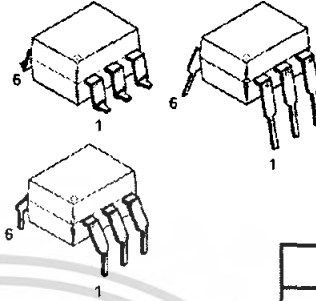
They are designed for use with a triac in the interface of logic systems to equipment powered from 115 VAC lines, such as teletypewriters, CRTs, solid-state relays, industrial controls, printers, motors, solenoids and consumer appliances, etc.

### FEATURES

- Simplifies logic control of 115 VAC power
- Zero voltage crossing
- $dv/dt$  of 2000 V/ $\mu$ s typical, 1000 V/ $\mu$ s guaranteed
- VDE recognized (File # 94766)
- ordering option V (e.g., MOC3043VM)

### APPLICATIONS

- Solenoid/valve controls
- Static power switches
- Temperature controls
- AC motor starters
- Lighting controls
- AC motor drives
- E.M. contactors
- Solid state relays



### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Parameters	Symbol	Device	Value	Units
<b>TOTAL DEVICE</b>				
Storage Temperature	$T_{STG}$	All	-40 to +150	$^\circ\text{C}$
Operating Temperature	$T_{OPR}$	All	-40 to +85	$^\circ\text{C}$
Lead Solder Temperature	$T_{SOL}$	All	260 for 10 sec	$^\circ\text{C}$
Junction Temperature Range	$T_J$	All	-40 to +100	$^\circ\text{C}$
Isolation Surge Voltage <sup>(1)</sup> (peak AC voltage, 60Hz, 1 sec duration)	$V_{ISO}$	All	7500	Vac(pk)
Total Device Power Dissipation @ 25 $^\circ\text{C}$ Derate above 25 $^\circ\text{C}$	$P_D$	All	250	mW
			2.94	mW/ $^\circ\text{C}$
<b>EMITTER</b>				
Continuous Forward Current	$I_F$	All	60	mA
Reverse Voltage	$V_R$	All	6	V
Total Power Dissipation 25 $^\circ\text{C}$ Ambient Derate above 25 $^\circ\text{C}$	$P_D$	All	120	mW
			1.41	mW/ $^\circ\text{C}$
<b>DETECTOR</b>				
Off-State Output Terminal Voltage	$V_{DRM}$	MOC3031M/2M/3M	250	V
		MOC3041M/2M/3M	400	
Peak Repetitive Surge Current (PW = 100 $\mu$ s, 120 pps)	$I_{TSM}$	All	1	A
Total Power Dissipation @ 25 $^\circ\text{C}$ Ambient Derate above 25 $^\circ\text{C}$	$P_D$	All	150	mW
		All	1.76	mW/ $^\circ\text{C}$

#### Note

1. Isolation surge voltage,  $V_{ISO}$ , is an internal device dielectric breakdown rating. For this test, Pins 1 and 2 are common, and Pins 4, 5 and 6 are common.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**FAIRCHILD**  
SEMICONDUCTOR®

**6-PIN DIP ZERO-CROSS  
OPTOISOLATORS TRIAC DRIVER OUTPUT  
(250/400 VOLT PEAK)**

MOC3031M MOC3032M MOC3033M MOC3041M MOC3042M MOC3043M

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  Unless otherwise specified)

**INDIVIDUAL COMPONENT CHARACTERISTICS**

Parameters	Test Conditions	Symbol	Device	Min	Typ	Max	Units
<b>EMITTER</b>							
Input Forward Voltage	$I_F = 30\text{ mA}$	$V_F$	All		1.25	1.5	V
Reverse Leakage Current	$V_R = 6\text{ V}$	$I_R$	All		0.01	100	$\mu\text{A}$
<b>DETECTOR</b>							
Peak Blocking Current, Either Direction	Rated $V_{DRM}$ , $I_F = 0$ (note 1)	$I_{DRM1}$	All			100	nA
Peak On-State Voltage, Either Direction	$I_{TM} = 100\text{ mA peak}$ , $I_F = 0$	$V_{TM}$	All		1.8	3	V
Critical Rate of Rise of Off-State Voltage	$I_F = 0$ (figure 9, note 3)	$dv/dt$	All	1000			V/ $\mu\text{s}$

**TRANSFER CHARACTERISTICS** ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  Unless otherwise specified.)

DC Characteristics	Test Conditions	Symbol	Device	Min	Typ	Max	Units
LED Trigger Current	Main terminal voltage = 3V (note 2)	$I_{FT}$	MOC3031M/MOC3041M			15	mA
			MOC3032M/MOC3042M			10	
			MOC3033M/MOC3043M			5	
Holding Current, Either Direction		$I_H$	All		400		$\mu\text{A}$

**ZERO CROSSING CHARACTERISTICS** ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  Unless otherwise specified.)

Characteristics	Test Conditions	Symbol	Device	Min	Typ	Max	Units
Inhibit Voltage	$I_F = \text{rated } I_{FT}$ , MT1-MT2 voltage above which device will not trigger off-state	$V_{IH}$	All			20	V
Leakage in Inhibited State	$I_F = \text{rated } I_F$ , rated $V_{DRM}$ , off-state	$I_{DRM2}$	All			500	$\mu\text{A}$

**Note**

1. Test voltage must be applied within  $dv/dt$  rating.
2. All devices are guaranteed to trigger at an  $I_F$  value less than or equal to max  $I_{FT}$ . Therefore, recommended operating  $I_F$  lies between max  $I_{FT}$  (15 mA for MOC3031M & MOC3041M, 10 mA for MOC3032M & MOC3042M, 5 mA for MOC3033M & MOC3043M) and absolute max  $I_F$  (60 mA).
3. This is static  $dv/dt$ . See Figure 9 for test circuit. Commutating  $dv/dt$  is a function of the load-driving thyristor(s) only.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**6-PIN DIP ZERO-CROSS OPTOISOLATORS TRIAC DRIVER OUTPUT (250/400 VOLT PEAK)**

MOC3031M MOC3032M MOC3033M MOC3041M MOC3042M MOC3043M

Figure 1. LED Forward Voltage vs. Forward Current

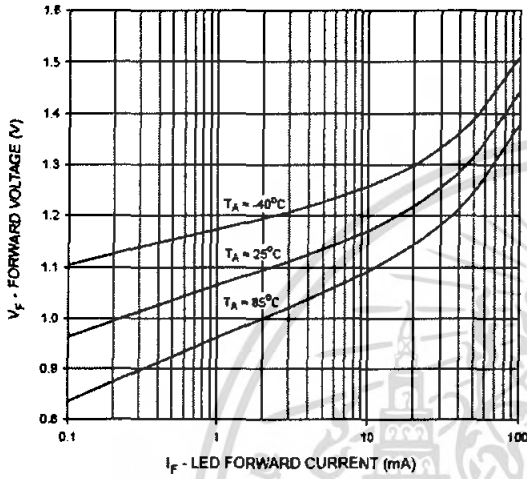


Figure 2. On-State Characteristics

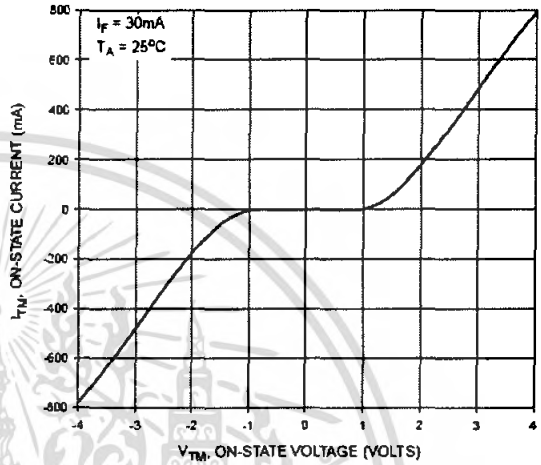


Figure 3. Trigger Current vs. Temperature

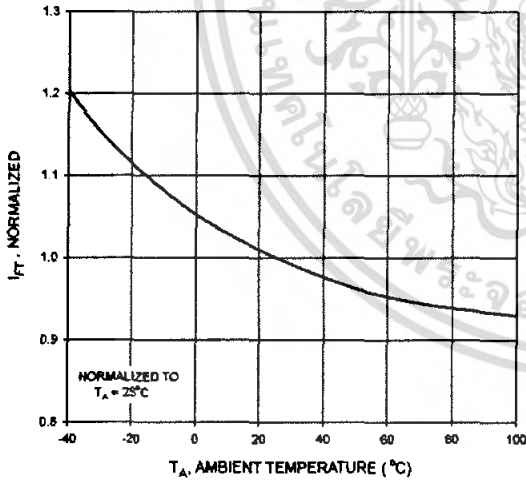
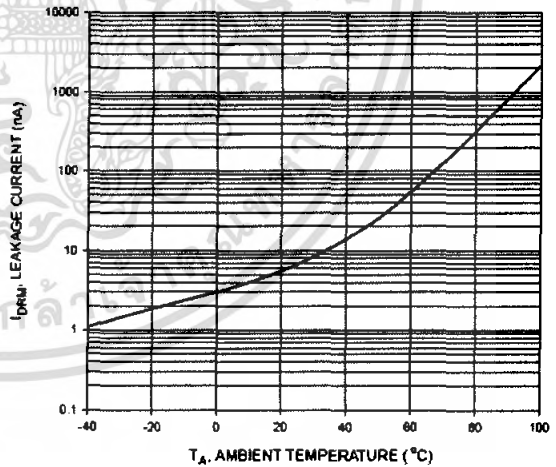


Figure 4. Leakage Current, I<sub>DRM</sub> vs. Temperature



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 5.  $I_{DRM2}$  - Leakage in Inhibit State vs. Temperature

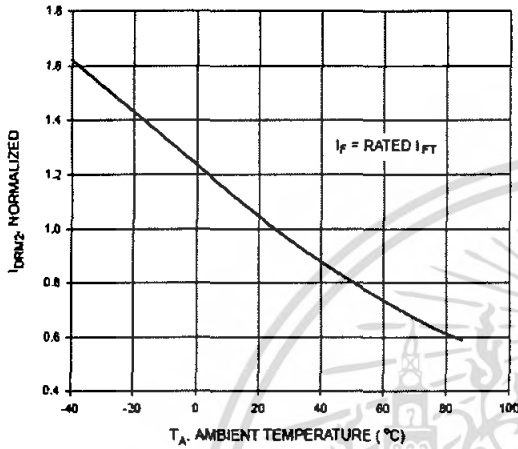


Figure 6. LED Current Required to Trigger vs. LED Pulse Width

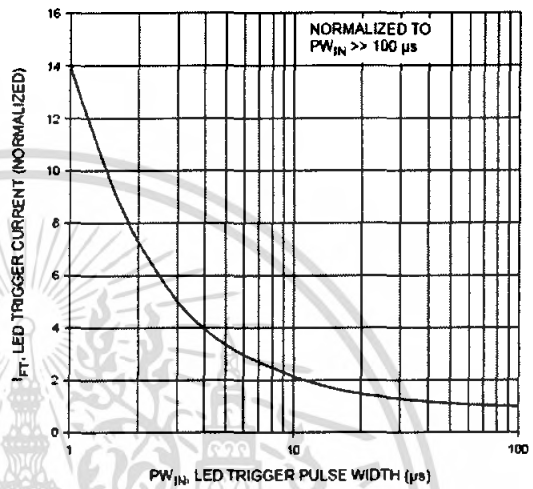


Figure 7. Holding Current,  $I_H$  vs. Temperature

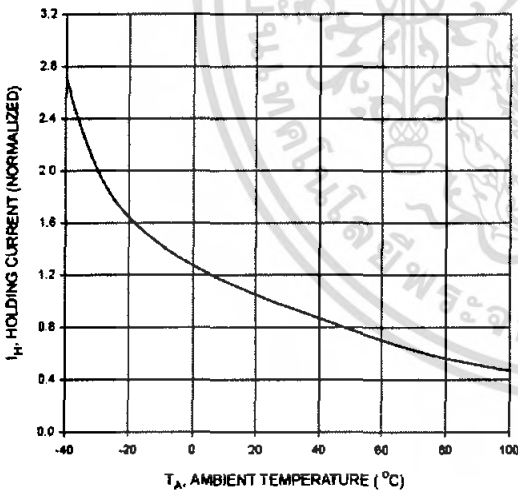
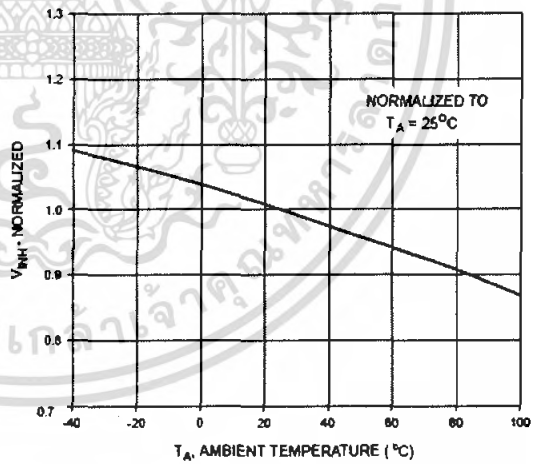


Figure 8. Inhibit Voltage vs. Temperature



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**6-PIN DIP ZERO-CROSS  
 OPTOISOLATORS TRIAC DRIVER OUTPUT  
 (250/400 VOLT PEAK)**

MOC3031M

MOC3032M

MOC3033M

MOC3041M

MOC3042M

MOC3043M

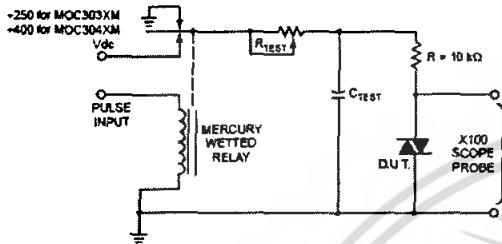
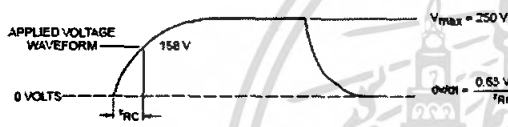
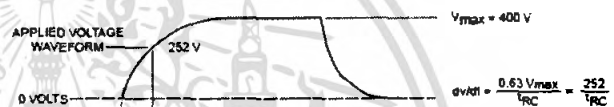


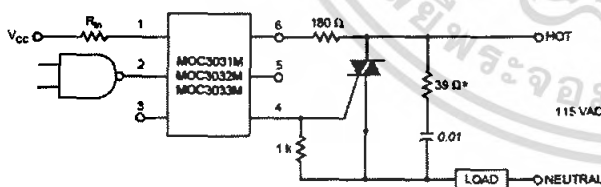
Figure 9. Static dv/dt Test Circuit

1. The mercury wetted relay provides a high speed repeated pulse to the D.U.T.
2. 100x scope probes are used, to allow high speeds and voltages.
3. The worst-case condition for static dv/dt is established by triggering the D.U.T. with a normal LED input current, then removing the current. The variable  $R_{TEST}$  allows the dv/dt to be gradually increased until the D.U.T. continues to trigger in response to the applied voltage pulse, even after the LED current has been removed. The dv/dt is then decreased until the D.U.T. stops triggering.  $\tau_{RC}$  is measured at this point and recorded.

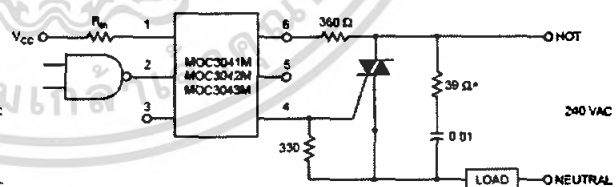
Figure 10. Static dv/dt Test Waveform  
(MOC3031M, MOC3032M, MOC3033M)Figure 11. Static dv/dt Test Waveform  
(MOC3041M, MOC3042M, MOC3043M)

Typical circuit (Fig 12, 13) for use when hot line switching is required. In this circuit the "hot" side of the line is switched and the load connected to the cold or neutral side. The load may be connected to either the neutral or hot line.

$R_{th}$  is calculated so that  $I_F$  is equal to the rated  $I_{FT}$  of the part, 5 mA for the MOC3033M and MOC3043M, 10 mA for the MOC3032M and MOC3042M, or 15 mA for the MOC3031M and MOC3041M. The 39 ohm resistor and 0.01  $\mu$ F capacitor are for snubbing of the triac and load used.



\*For highly inductive loads (power factor < 0.5), change this value to 360 ohms.

Figure 12. Hot-Line Switching Application Circuit  
(MOC3031M, MOC3032M, MOC3033M)

\*For highly inductive loads (power factor < 0.5), change this value to 360 ohms.

Figure 13. Hot-Line Switching Application Circuit  
(MOC3041M, MOC3042M, MOC3043M)

**FAIRCHILD**  
SEMICONDUCTOR\*

**6-PIN DIP ZERO-CROSS  
OPTOISOLATORS TRIAC DRIVER OUTPUT  
(250/400 VOLT PEAK)**

MOC3031M

MOC3032M

MOC3033M

MOC3041M

MOC3042M

MOC3043M

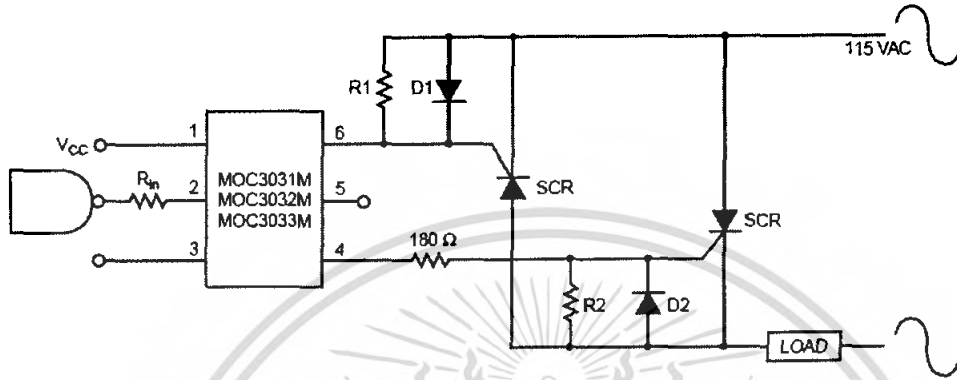


Figure 14. Inverse-Parallel SCR Driver Circuit  
(MOC3031M, MOC3032M, MOC3033M)

Suggested method of firing two, back-to-back SCR's with a Fairchild triac driver. Diodes can be 1N4001; resistors, R1 and R2, are optional 1 k ohm.

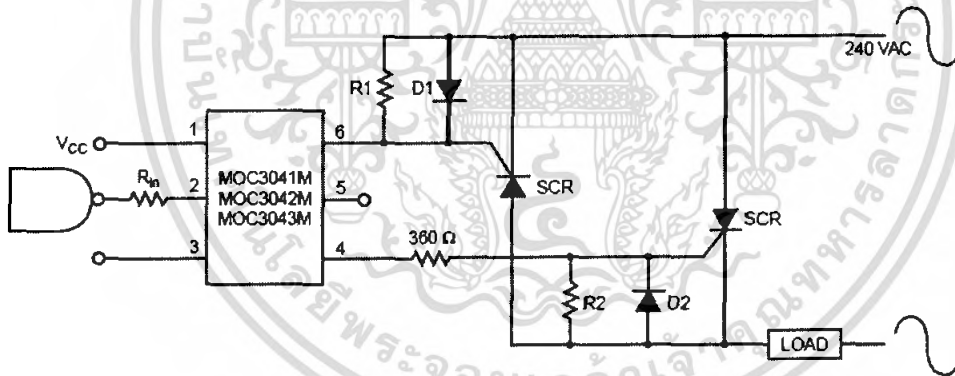


Figure 15. Inverse-Parallel SCR Driver Circuit  
(MOC3041M, MOC3042M, MOC3043M)

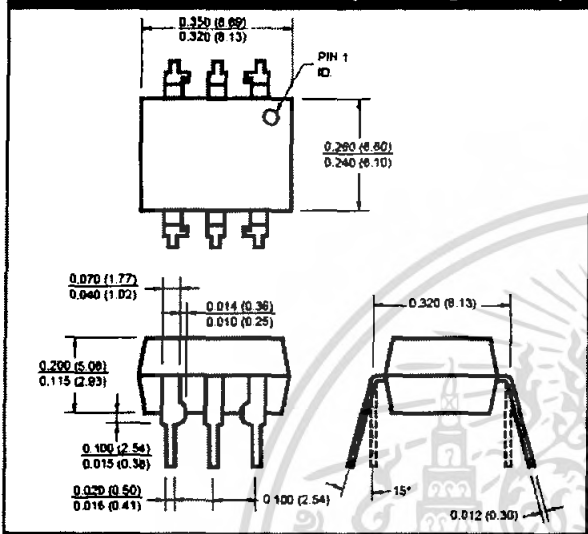
Suggested method of firing two, back-to-back SCR's with a Fairchild triac driver. Diodes can be 1N4001; resistors, R1 and R2, are optional 330 ohm.

Note: This optoisolator should not be used to drive a load directly. It is intended to be a trigger device only.

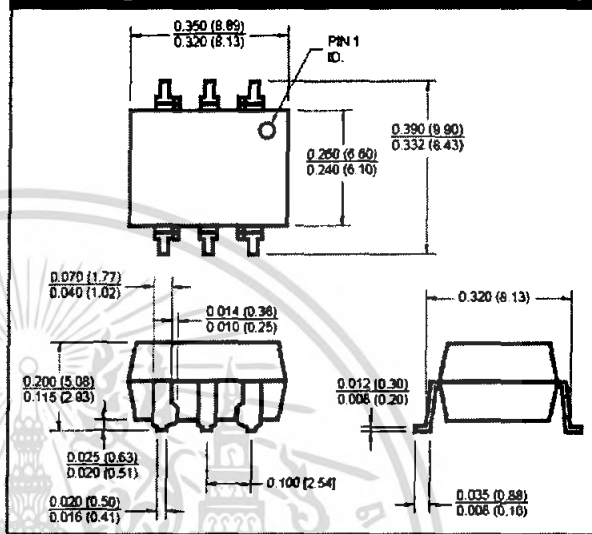
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MOC3031M MOC3032M MOC3033M MOC3041M MOC3042M MOC3043M

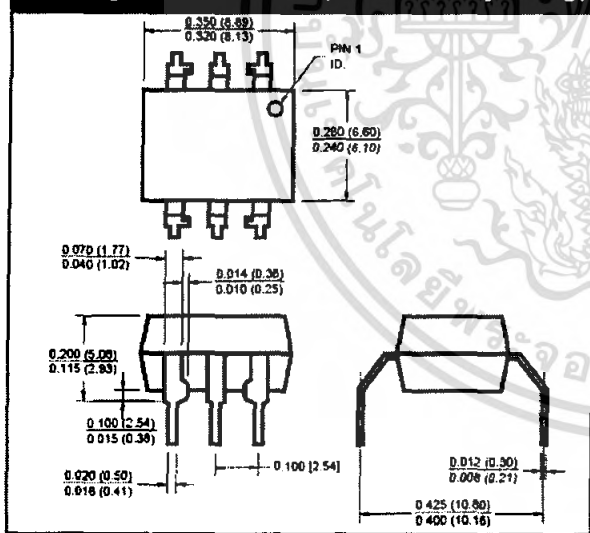
**Package Dimensions (Through Hole)**



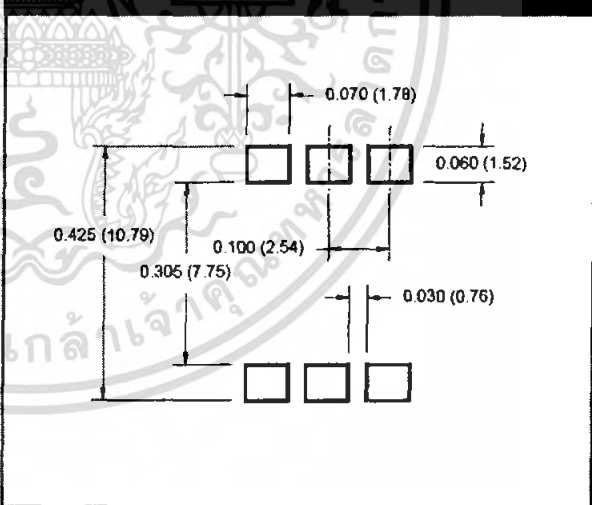
**Package Dimensions (Surface Mount)**



**Package Dimensions (0.4" Lead Spacing)**



**Recommended Pad Layout for Surface Mount Leadform**



**NOTE**  
All dimensions are in Inches (millimeters)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**FAIRCHILD**  
SEMICONDUCTOR®

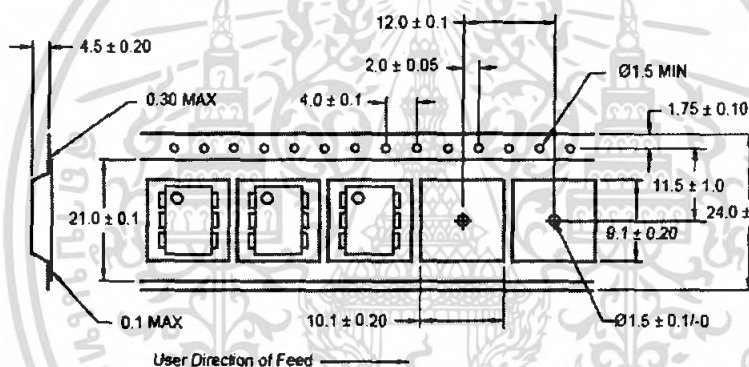
**6-PIN DIP ZERO-CROSS  
OPTOISOLATORS TRIAC DRIVER OUTPUT  
(250/400 VOLT PEAK)**

MOC3031M MOC3032M MOC3033M MOC3041M MOC3042M MOC3043M

**ORDERING INFORMATION**

Option	Order Entry Identifier	Description
S	S	Surface Mount Lead Bend
SR2	SR2	Surface Mount; Tape and reel
T	T	0.4" Lead Spacing
V	V	VDE 0884
TV	TV	VDE 0884, 0.4" Lead Spacing
SV	SV	VDE 0884, Surface Mount
SR2V	SR2V	VDE 0884, Surface Mount, Tape & Reel

**Carrier Tape Specifications ("D" Taping Orientation)**



**NOTE**

All dimensions are in inches (millimeters)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**FAIRCHILD**  
SEMICONDUCTOR®

**6-PIN DIP ZERO-CROSS  
OPTOISOLATORS TRIAC DRIVER OUTPUT  
(250/400 VOLT PEAK)**

**MOC3031M MOC3032M MOC3033M MOC3041M MOC3042M MOC3043M**

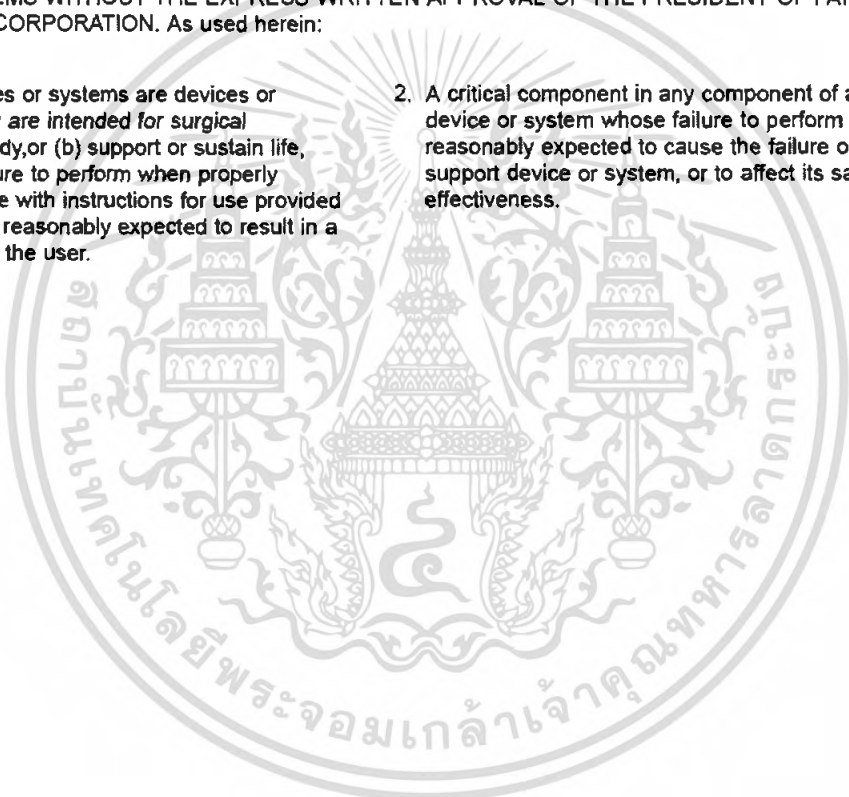
**DISCLAIMER**

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

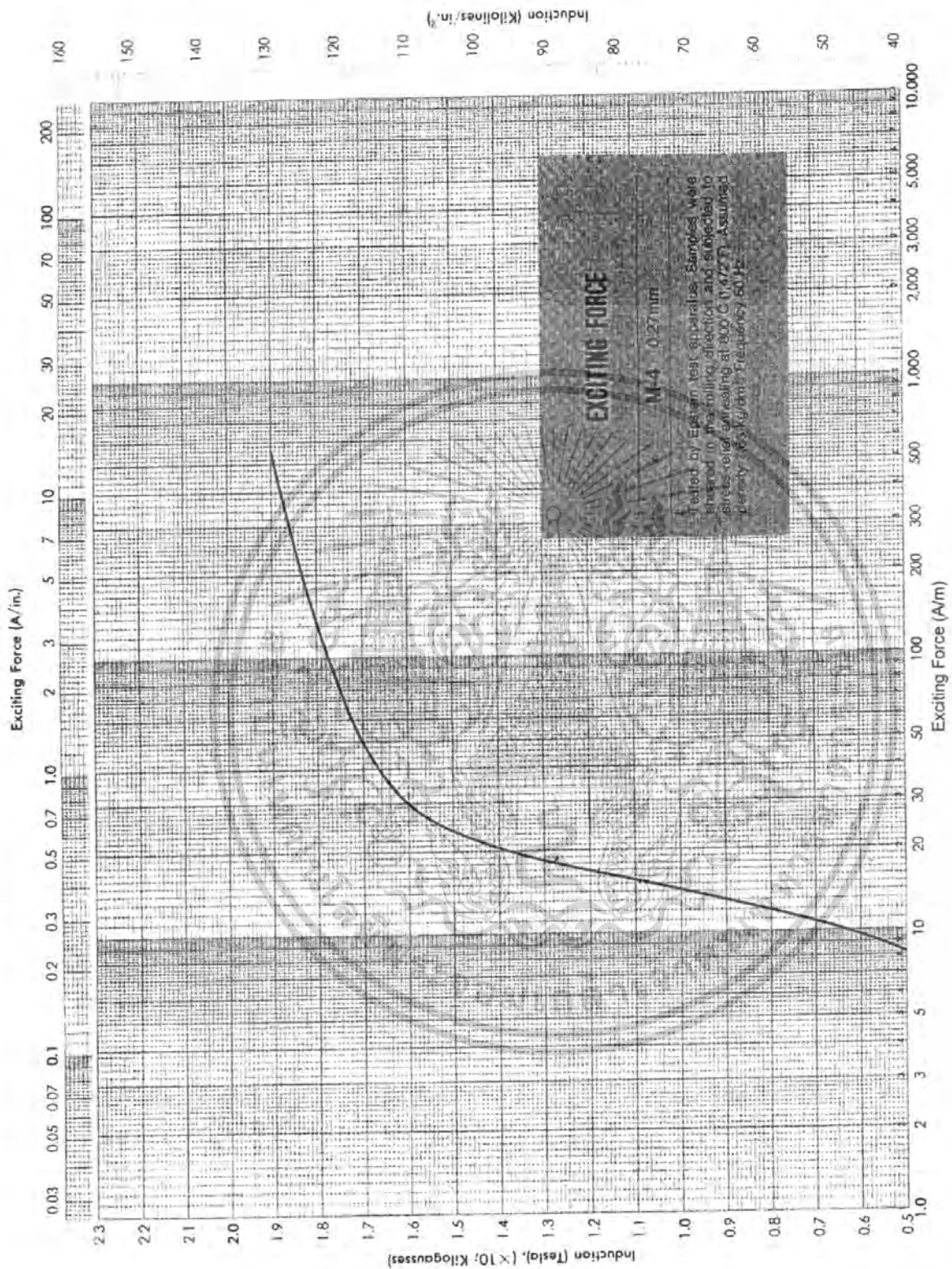
**LIFE SUPPORT POLICY**

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury of the user.
2. A critical component in any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.



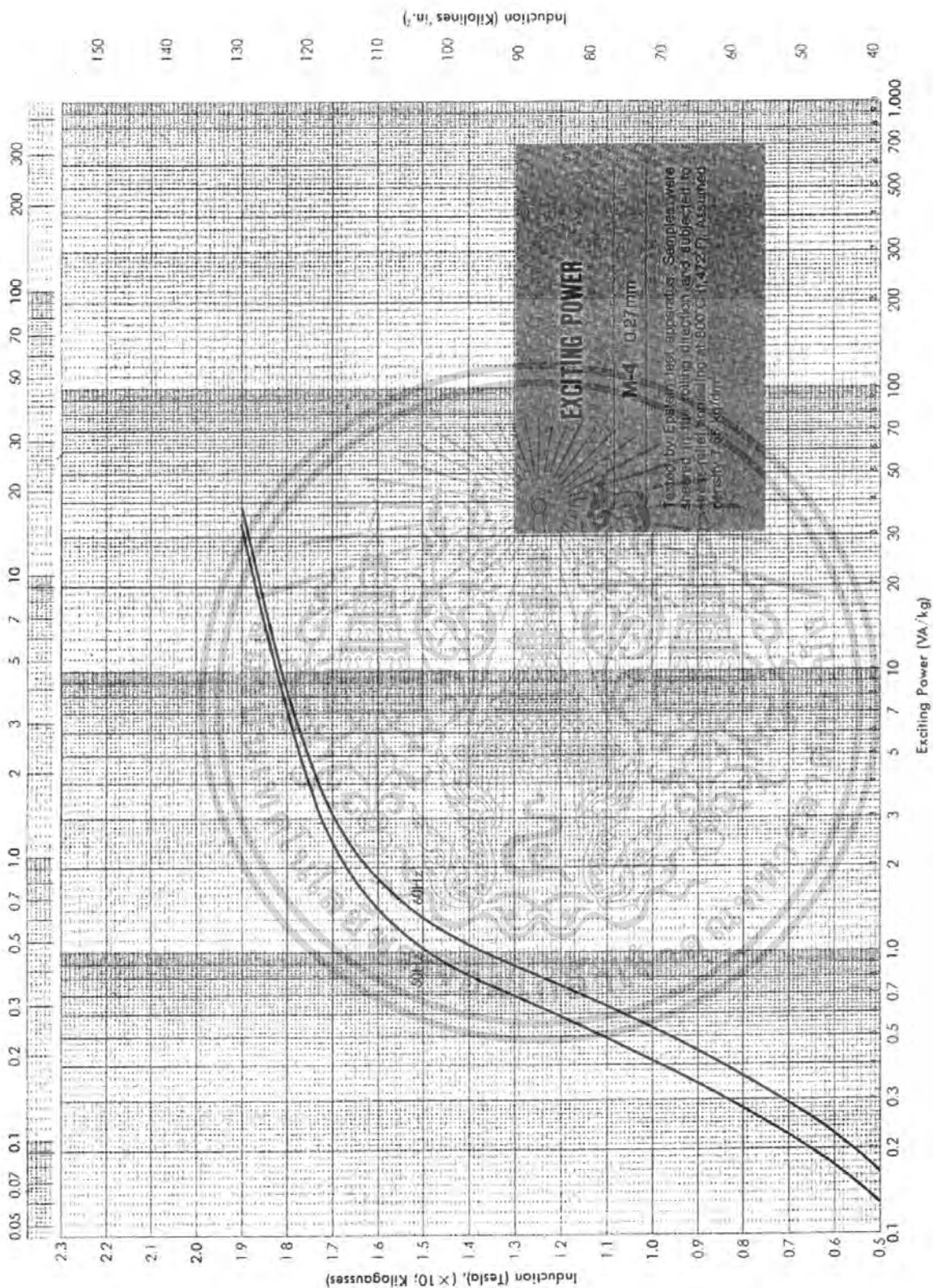
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



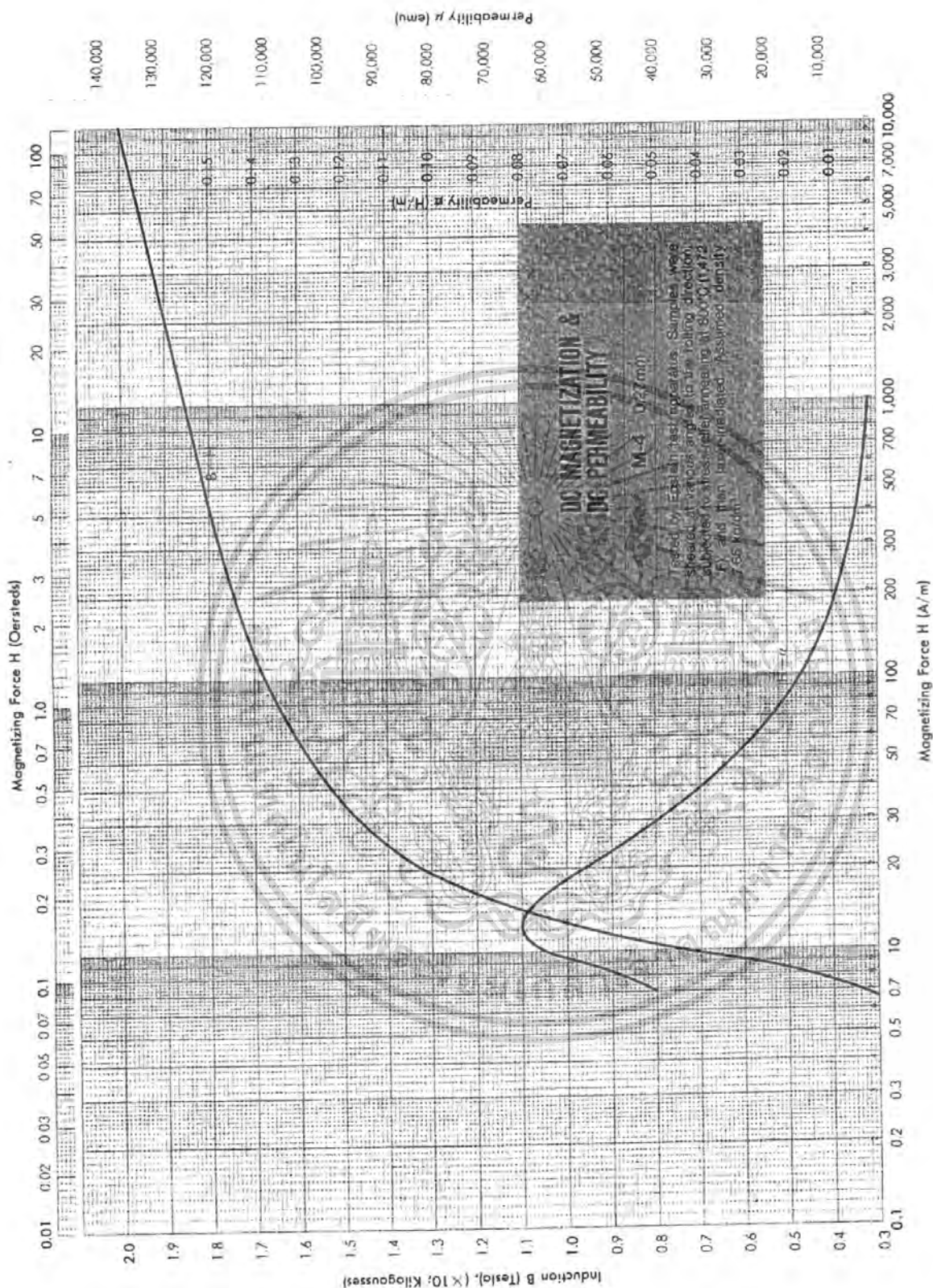
ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้น ( Exciting Force ) กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

ของแผ่นเหล็ก M4 หนา 0.27 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

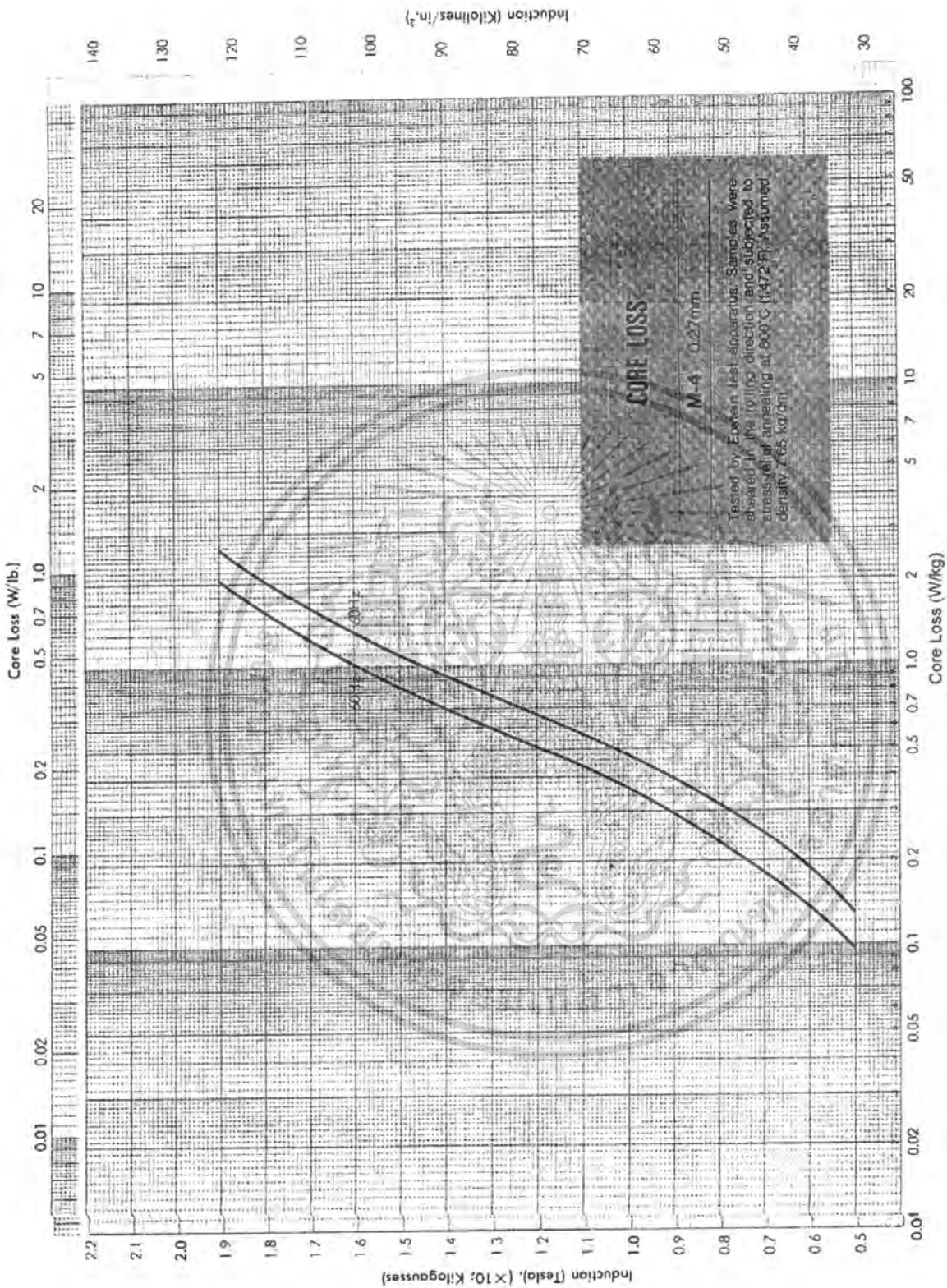


ความสัมพันธ์ B - H ที่ใช้ทำแกนเหล็กของแผ่นเหล็ก M4 หน้า 0.27 มม.  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น. เมื่อนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ความสูญเสียในแกนเหล็กของแผ่นเหล็ก M4 ทน 0.27 มม.**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้จัดทำ



นาย ประเสริฐ มงคลแสน ชื่อเล่น แอ้ม รหัส 47010429 4B  
 วันที่เกิด 29 มิถุนายน พ.ศ. 2528  
 ที่อยู่ปัจจุบัน 97 ม.11 ต.ศรีธาตุ อ.ศรีธาตุ จ. อุดรธานี 41230  
 จบการศึกษามัธยมศึกษา จากโรงเรียนศรีธาตุพิทยาคม  
 ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 อีเมลล์ mongkhol-san@hotmail.com  
 โทรศัพท์ 081-3425047



นาย ปิยชาติ ศรีแก้ว ชื่อเล่น ช้าง รหัส 47010456 4B  
 วันที่เกิด 23 ตุลาคม พ.ศ. 2528  
 ที่อยู่ปัจจุบัน 97 ม.4 ต.จอมพระ อ.จอมพระ จ.สุรินทร์ 32180  
 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสุรวิทยาคาร  
 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนช่างการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค  
 ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 อีเมลล์ kotama\_jr@hotmail.com  
 โทรศัพท์ 085-7648989

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้