

การออกแบบหม้อแปลง  
TRANSFORMER DESIGN



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ **ปีการศึกษา 2536** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

033153

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2536

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร-ลาดกระบัง

เรื่อง

การออกแบบหม้อแปลง

TRANSFORMER DESIGN



(วิระศักดิ์ วงศ์วิวัต)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

## TRANSFORMER DESIGN

นายรุ่งวิวัฒน์      พิรุณรัตน์  
นายอดิสรณ์      ฟังพา  
อาจารย์วีระศักดิ์      วงศ์วิวัติ      อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2536

### บทคัดย่อ

โครงการนี้มุ่งเพื่อที่จะทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆ ของหม้อแปลงที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไป และศึกษาขั้นตอนในการออกแบบสร้างของหม้อแปลงไฟ 1 เฟส ตลอดจนหม้อแปลงสำหรับวงจร เรกติไฟเออร์ แล้วจึงทำการสร้างหม้อแปลงขึ้นมา จากขั้นตอนในการออกแบบที่ได้ศึกษาไว้ แล้วจากนั้นจึงทำการทดสอบ และวัดค่าต่าง ๆ ของหม้อแปลงที่ได้สร้างขึ้น มาเพื่อให้เข้าใจถึงทฤษฎี และหลักการของหม้อแปลงมากยิ่งขึ้น

### ABSTRACT

This project educates about the property of transformers which is used in any applications and educates steps in desier method of 1 phase transformer throughs a transformer for rectifier circuit and offer this education then we will build a transformer from steps in desier method which is educated then we will test the transformer and measure any transformer parameters which is build for more understarnding the theory and principle of transformer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

		หน้า
บทที่ 1	สมการเบื้องต้นในการออกแบบหม้อแปลง	1 - 9
บทที่ 2	คำนวณหาความยาวของขดลวดทองแดง	10-11
บทที่ 3	วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลง	12-18
บทที่ 4	โวลท์เตจเลคกูเลชัน	19-27
บทที่ 5	ตัวอย่างการคำนวณหม้อแปลงอย่างละเอียด	28- 32
บทที่ 6	วงจรเรียงกระแส	33 - 41

ภาคผนวก

เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วัตถุประสงค์และขอบเขตของโครงการ

วัตถุประสงค์ และขอบเขตของโครงการนี้ เพื่อสร้างและศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของหม้อแปลงตาม  
ที่ได้ออกแบบไว้ แล้วจึงทำการทดสอบและวัดค่าต่าง ๆ ของหม้อแปลง เพื่อหาประสิทธิภาพ และอื่น ๆ ได้  
ตามต้องการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างยิ่งในระบบไฟฟ้าที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไป ซึ่งปกติการนำไปใช้งานนั้นก็ยังสามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด หากหม้อแปลงมีขนาดไม่ใหญ่มากนักดูแล้วก็ไม่ใช่เรื่องยากเลย แต่หม้อแปลงที่เราใช้กันอยู่นั้นสร้างมาได้อย่างไร มีวิธีการ และขั้นตอนในการออกแบบอย่างไรนั้น เป็นสิ่งที่น่าสนใจมาก ผู้จัดทำจึงได้เห็นความสำคัญในส่วนนี้ จึงปรึกษากับอาจารย์ที่ปรึกษาและได้จัดทำเป็นโครงการเรื่อง การออกแบบหม้อแปลง (TRANSFORMER DESIGN) เพื่อที่จะได้ศึกษาและทำความเข้าใจถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของหม้อแปลง และขั้นตอนในการออกแบบสร้างหม้อแปลงโดยละเอียด ซึ่งปกติแล้วตำราภาษาไทยหายากมาก

สำหรับรายงานโครงการ นี้ทางผู้จัดทำได้กล่าวถึงเฉพาะคุณสมบัติของหม้อแปลงและขั้นตอนในการออกแบบหม้อแปลงเท่านั้น ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลในการสร้างหม้อแปลงต่อไป

อย่างไรก็ดีในการจัดทำรายงานโครงการ นี้ ผู้จัดทำต้องเรียบเรียงเนื้อหาส่วนใหญ่มาจากตำราต่างประเทศ แต่ทางผู้จัดทำก็ได้รับคำแนะนำ และข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการจัดทำโครงการนี้ จากอาจารย์ที่ปรึกษาอย่างดียิ่ง คือ อาจารย์วีระศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์ ดังนั้นผู้จัดทำจึงใคร่ขอขอบคุณท่านอาจารย์ที่ได้ช่วยให้คำแนะนำดังกล่าวมา ณ ที่นี้ด้วย

รุ่งวิวัฒน์ พิรุณรัตน์  
อดิสรณ์ พึ่งพา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

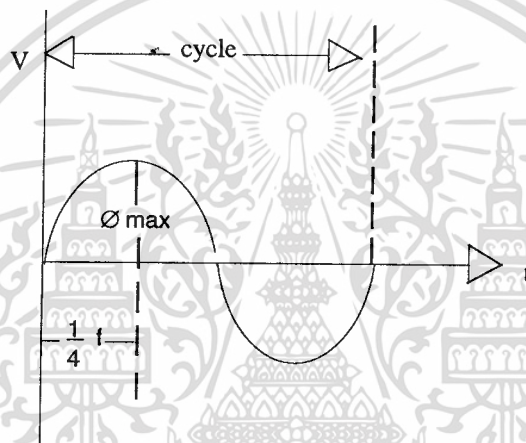
# บทที่ 1

## สมการเบื้องต้นในการออกแบบหม้อแปลง

### สมการเบื้องต้นในการออกแบบหม้อแปลง

1. สมการการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า
2. สมการความสามารถของกำลัง

ในการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงนี้สามารถได้จากคำจำกัดความของ Faraday โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ flux ที่เกิดขึ้นต่อหน่วยเวลาจากการพิจารณาจากรูป Sine wave พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กจาก 0 ถึงค่าสูงสุดคือ  $\phi_{max}$  ภายในเวลา  $\frac{1}{4f}$  วินาที



รูปแสดง flux wave

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงเวลา  $\frac{1}{4f}$  สำหรับตัวนำ 1 รอบ มีค่าเท่ากับ  $\frac{\phi_{max}}{\frac{1}{4f}}$

$$\begin{aligned} \text{average e.m.f/turn} &= \frac{\phi_{max}}{\frac{1}{4f}} \\ &= 4f \phi_{max} \end{aligned}$$

สำหรับ Sine wave นั้นมีค่า form factor = 1.11  
form factor = 1.11 =  $\frac{\text{R.M.S. value}}{\text{average value}}$

R.M.S. value of e.m.f. for N turn =  $4.44 Nf \phi_{max}$

$$B = \frac{\phi_{max}}{A}$$

เมื่อ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ผู้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 $\phi_{max}$  = เส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด  
A = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

หรือ	V	=	$4F faNB \times 10^8$
เมื่อ	V	:	แรงเคลื่อนไฟฟ้าทางด้านที่กำลังพิจารณาอยู่
	F	:	form factor
	f	:	ความถี่ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)
	a	:	พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก
	N	:	จำนวนรอบของขดลวดที่กำลังพิจารณาอยู่
	B	:	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็น maxwells

ต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย

### สมการกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง

เมื่อ	P	:	$0.707 Jfwab \times 10^{-8}$
	J	:	ความหนาแน่นกระแสของหม้อแปลงมีหน่วยเป็นแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร
	f	:	ความถี่ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (HZ)
	W	:	พื้นที่ของ Window มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร
	a	:	พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร
	B	:	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็น gauss (maxwells per Square centimeter) หรือ $10,000 \text{ gauss} = 1 \text{ Wb/m}^2$

จากสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้า

$$V = 4F faNB \times 10^8$$

จะได้จำนวนรอบขอบขดลวดต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้า

$$\begin{aligned} \frac{N}{V} &= \frac{10^8}{4F faB} \\ &= \frac{10^8}{4.44 faB} \\ \frac{N}{V} &= \frac{10^8}{4.44 \times 6.45 faB} = \frac{10^8}{28.64 faB} \end{aligned}$$

Stacking factor =  $\frac{\text{ปริมาตรของเนื้อแกนเหล็ก}}{\text{ปริมาตรภายนอกเมื่อซ้อนกัน}}$

ค่าอัตราส่วน s.f นี้จะเห็นได้ว่ามีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ โดยทั่วไปค่าอัตราส่วน s.f ของแกนเหล็กแต่ละอย่างจะต่างกันออกไปตามแต่ชนิดและกรรมวิธีการผลิต การฉาบผิวหน้า การอัดแกนเหล็ก s.f จะมีค่าระหว่าง 0.85 ถึง 0.95 สำหรับใบที่นี้จะใช้ s.f เท่ากับ 0.9 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\frac{N}{V} = \frac{10^8}{28.64 \times 0.9 \text{ faB}} = \frac{10^8}{25.77 \text{ faB}}$$

$$= \frac{3.88 \times 10^8}{\text{faB}}$$

### สมการกำลังไฟฟ้า

$$P = 0.707 \times 6.45 \text{ J fwaB} \times 10^{-8}$$

$$P = 4.55 \text{ J fwaB} \times 10^{-8}$$

เมื่อ

J : ความหนาแน่นของกระแสมีหน่วยเป็นแอมป์ต่อตารางนิ้ว

w : พื้นที่ Window มีหน่วยเป็นตารางนิ้ว

a : พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมีหน่วยเป็นตารางนิ้ว

B : ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็น gauss

f : ความถี่ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นเฮทซ (HZ)

P : กำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็นวัตต์-แอมป์

ดังนั้น

$$W_a = \frac{P \times 10^8}{4.55 \text{ JBf}}$$

เปลี่ยนตารางนิ้วให้เป็นเซอร์คูลาร์มิล

$$W_a = \frac{P \times 10^8}{4.55 \times 1274000 \text{ JBf}}$$

$$P = \frac{fBwa}{17.26S}$$

$$w_a = \frac{17.26S P}{fB}$$

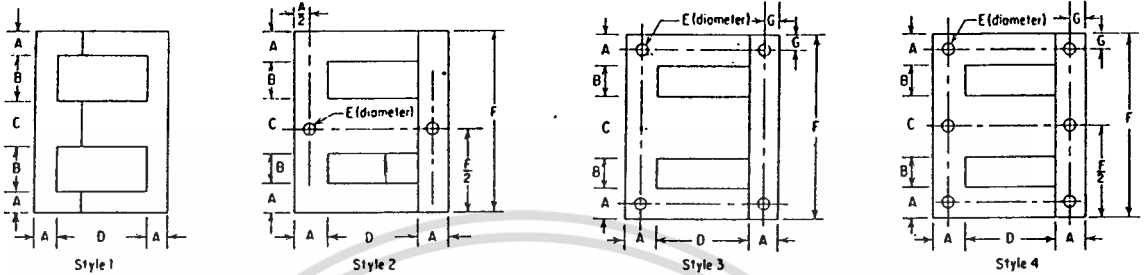
S : ความหนาแน่นกระแสมีหน่วยเป็น ampere per circular mils

การออกแบบหม้อแปลงขนาดเล็กโดยทั่วความหนาแน่นกระแสโดยประมาณ A/500 - 1200 CM

ใช้แกนเหล็กเป็นชนิด Silicon iron และความหนาแน่นของเส้นของแม่เหล็กประมาณ 10,000 - 13,000 gauss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

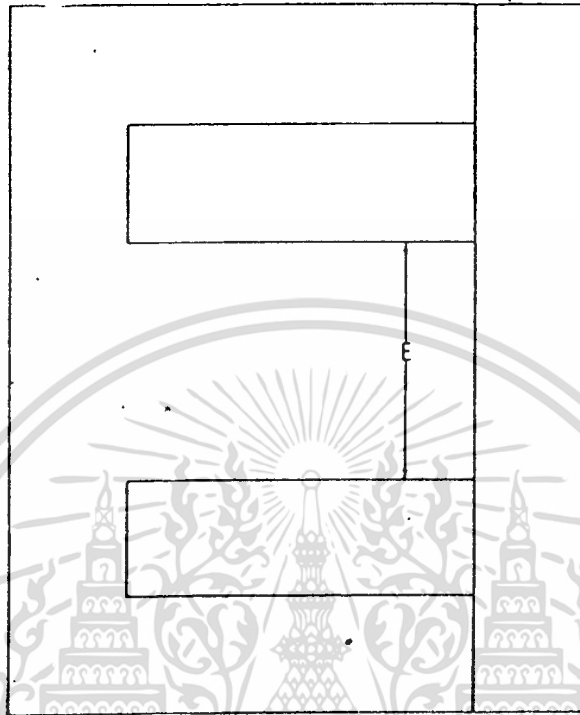
**แกนเหล็กขนาดต่าง ๆ**



<i>Dimensions</i>									
Lamination	Style	Units	A	B	C	D	E	F	G
EE 2425	1	in	3/8	3/8	3/8	3/8			
		mm	3.2	6.4	6.4	12.7			
EE 2627	1	in	3/8	3/8	3/8	1 1/8			
		mm	4.8	6.4	9.5	17.5			
EI-1/8	2	in	3/8	3/8	3/8	3/8	1/2	1 1/8	
		mm	4.8	7.9	9.5	19.1	2.4	34.9	
EI-1/8	2	in	3/8	3/8	3/8	1 1/8	3/8	1 1/8	
		mm	6.4	7.9	12.7	20.6	3.2	41.3	
EI-1/8	2	in	3/8	3/8	3/8	1 1/8	1/2	1 1/8	
		mm	7.9	7.9	15.8	23.8	4.0	47.6	
EI-1/8	2	in	3/8	3/8	3/8	1 1/8	0.132	2 1/8	
		mm	9.5	9.5	19.1	28.6	3.4	57.2	
EI-1/8	3	in	3/8	3/8	3/8	1 1/8	3/8	2 1/8	3/8
		mm	11.1	11.1	22.2	33.3	4.0	66.7	5.6
EI-1	3	in	3/8	3/8	1	1 1/8	3/8	3	3/8
		mm	12.7	12.7	25.4	38.1	5.6	76.2	6.4
EI-1 1/8	3	in	3/8	3/8	1 1/8	1 1/8	3/8	3 3/8	3/8
		mm	14.3	14.3	28.6	42.9	5.6	95.3	7.9
EI-1 1/8	3	in	3/8	3/8	1 1/8	1 1/8	3/8	3 3/8	3/8
		mm	15.9	15.9	31.8	47.6	5.6	85.7	7.1
EI-1 1/8	3	in	3/8	3/8	1 1/8	2 1/8	3/8	3 3/8	3/8
		mm	17.5	17.5	34.9	52.4	5.6	104.8	8.7
EI-1 1/8	3	in	3/8	3/8	1 1/8	2 1/8	3/8	4 1/8	3/8
		mm	19.1	19.1	38.1	57.2	5.6	114.3	9.5
EI-1 1/8	3	in	3/8	3/8	1 1/8	2 1/8	3/8	5 1/8	3/8
		mm	22.2	22.2	44.4	66.7	7.1	133.4	11.1
EI-1 9/16	3	in	3/8	1 1/8	1 1/8	3	3/8	7	3/8
		mm	22.2	44.4	44.4	76.2	6.7	177.8	11.1
EI-2	3	in	1	1	2	3	3/8	6	3/8
		mm	25.4	25.4	50.8	76.2	7.9	152.4	7.9
EI-2 1/8	4	in	1 1/8	1 1/8	2 1/8	3 3/8	3/8	6 3/8	3/8
		mm	28.6	28.6	57.2	85.7	7.9	171.5	7.9
EI-2 1/8	4	in	1 1/8	1 1/8	2 1/8	3 3/8	3/8	7 1/8	3/8
		mm	31.8	31.8	63.5	95.3	9.9	190.5	9.5
EI-3	3	in	1 1/8	1 1/8	3	4 1/8	3/8	9	3/8
		mm	38.1	38.1	76.2	114.3	9.5	228.6	9.5
EI-4	4	in	2	2	4	6	3/8	12	3/8
		mm	50.8	50.8	101.6	152.4	10.3	304.8	11.1
EI-5	4	in	2 1/8	2 1/8	5 1/8	7 1/8	3/8	15 1/8	3/8
		mm	63.5	63.5	127	190.5	13.9	381	14.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านต่าง ๆ ของแกนเหล็กชนิด EI

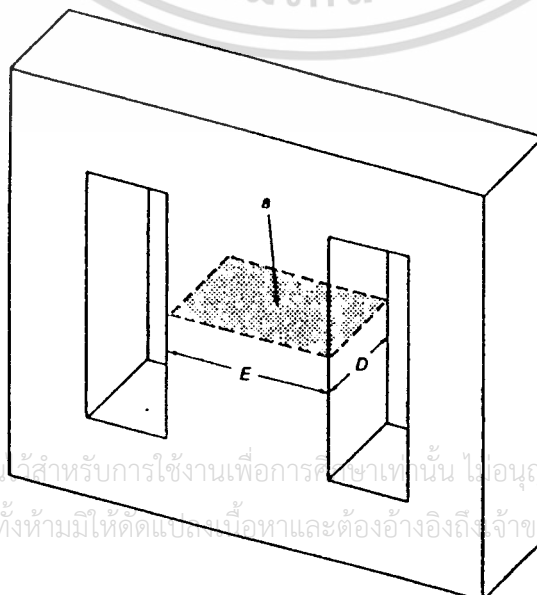


$w = B \times D$  ; รูปข้างบนประกอบ

$a = E \times D$  ; รูปข้างล่างประกอบ

$$P = \frac{fB \times (B \times D) \times (E \times D)}{17.26 \times S}$$

พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (a)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาของแกนเหล็กที่วางซ้อนกัน (Stack) =  $\frac{a}{E}$

พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (a) =  $\frac{W_a}{w}$

โดยทั่วไปพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (a) = 2 x c หรือ 2 x E

**ตารางการพิจารณา  $W_a$  ( $w_a$  product)**

$$a = c \times c$$

$$\text{Stack} = \frac{a}{c}$$

$$w = B \times D$$

$$W_a = a \times w$$

$$a = \frac{W_a}{w}$$

$$w_a = \frac{17.26 \text{ SP}}{fB} \text{ จากการคำนวณนำมาหา}$$

**หาขนาดของแกนเหล็กชนิด EI ได้จากตารางข้างล่าง**

C	a	w	$W_a$
3/8	0.14	0.23	0.03
1/2	0.25	0.25	0.06
5/8	0.39	0.29	0.11
3/4	0.56	0.42	0.23
7/8	0.76	0.57	0.42
1	1	0.75	0.75
1 $\frac{1}{8}$	1.12	0.94	0.05
1 $\frac{1}{4}$	1.25	1.05	1.31
1 $\frac{3}{8}$	1.37	1.41	1.93
1 $\frac{1}{2}$	2.25	1.68	3.78
1 $\frac{3}{4}$	3.06	2.29	7.00
2	4	3	12
2 $\frac{1}{4}$	5.06	3.79	19.17
2 $\frac{1}{2}$	6.25	4.68	29.25
3	9	6.78	61.02
4	16	12	192
5	25	18.75	468.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางวัสดุที่นำมาเป็นแกนเหล็ก

Density or Weight per Unit Volume  
(Specific Weight) or Various Alloys

Alloy	Grams/cu cm	Pounds/cu in
Super Perm 8. Super Q80	8.74	0.316
Super Perm 49	8.25	0.298
Microsil , silicon	7.65	0.276
Super Flux	8.20	0.296
Hypertran	7.85	0.284

### ปริมาตรของแกนเหล็ก

$$v = a \times l$$

= พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

$$l = \text{ความยาวโดยเฉลี่ยของ Magnetic Path}$$

### น้ำหนักของแกนเหล็ก

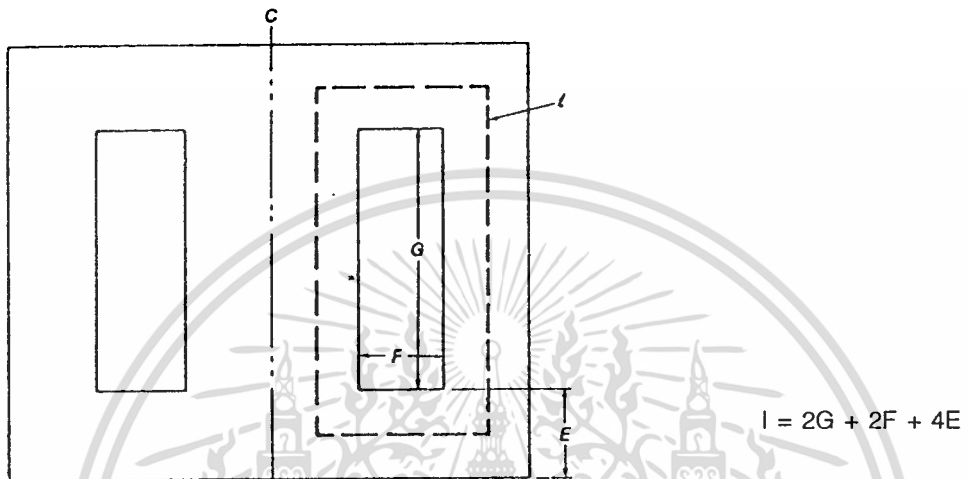
$$wt = v \times r$$

= ปริมาตรของแกนเหล็ก

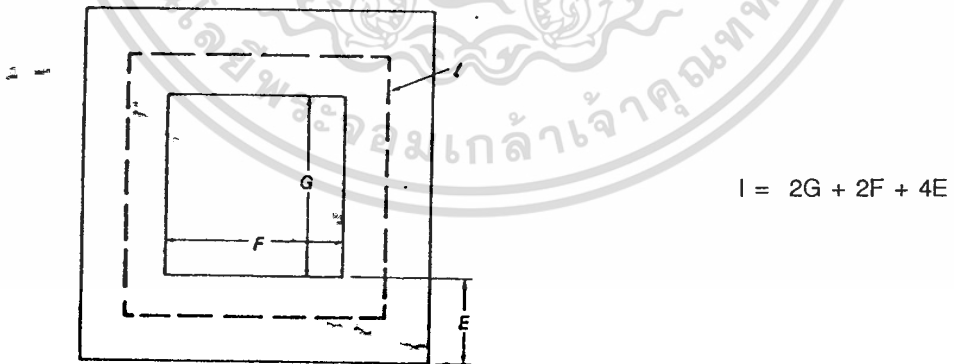
$$r = \text{Specific-weight ของวัสดุที่นำมาทำแกนเหล็ก}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ความยาวโดยเฉลี่ยของ Magnetic Path

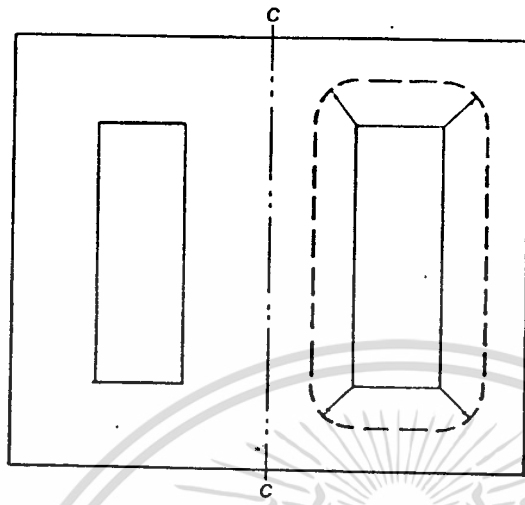


(A) Of shell type core.



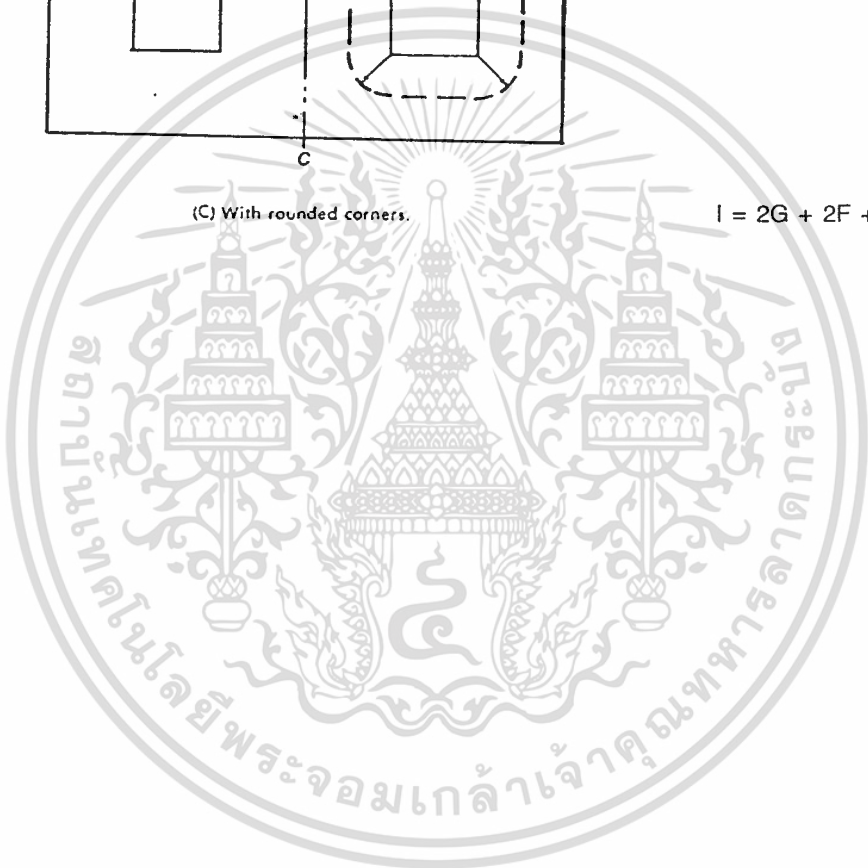
(B) Of cut type core.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(C) With rounded corners.

$$I = 2G + 2F + \pi E$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



คำนวณหาความยาวของขดลวดทองแดง

คำนวณหาความยาวของขดลวดทองแดง

จากรูปข้างล่าง ภาพตัดของรูปการพันขดลวดแบบสามชุดโดยมีขดลวดปฐมภูมิ 2 ชุด และมีขดลวดทางด้านทุติยภูมิ 1 ชุด และให้มีความหนาแต่ละชุดเป็น  $w_1$  ,  $w_2$  , และ  $w_3$  ตามลำดับ และมีความยาวขดลวดเฉลี่ยแต่ละชุดเท่ากับ  $M_1$  ,  $M_2$  และ  $M_3$  และความยาวทั้งหมดของขดลวดเท่ากับ ความยาวโดยเฉลี่ยคูณกับจำนวนรอบที่คำนวณได้

$$M_1 = 2 (C + D + 4B) + 6.28 \frac{w_1}{2}$$

$$M_2 = 2 (C + D + 4B) + 6.28 \left( w_1 + \frac{w_2}{2} \right)$$

$$M_3 = 2 (C + D + 4B) + 6.28 \left( w_1 + w_2 + \frac{w_3}{2} \right)$$

D : ความหนาของแกนเหล็กที่วางซ้อนกัน  
 B : ความหนาของ Bobbin

จะเห็นว่าเทอม  $2 (C + D + 4B)$  จะมีค่าคงที่ให้เท่ากับ (k) แต่จะรอบจะห่างออกจาก Bobbin เป็น

$d_1$  ,  $d_2$  ,  $d_3$   
เมื่อ

$$d_1 = \frac{w_1}{2}$$

$$d_2 = w_1 + \frac{w_2}{2}$$

$$d_3 = w_1 + w_2 + \frac{w_3}{2}$$

ดังนั้น

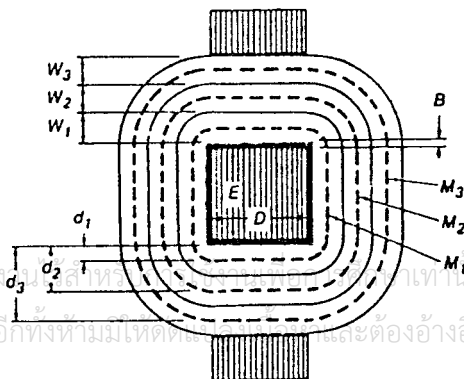
$$M_i = 6.28 d_i$$

ความยาวของขดลวดแต่ละชุด

$$L_1 = M_1 \times N_1$$

$$L_2 = M_2 \times N_2$$

$$L_3 = M_3 \times N_3$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดย บริษัท สยาม อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางลวดตัวนำยาน้ำยาสำหรับพันหม้อแปลง**

Wire Size AWG	Circular Mills	Diameter (in)		Resistance ohms/1000 ft.	Weight lbs./1000 ft.	Random Winding		Layer Winding			Wire Size AWG	
		Single Insulation	Heavy Insulation			Single Turns/in'	Heavy Turns/in'	Single Turns/in	Heavy Turns/in	Layer Insulation (in)		Edge Distance (in)
10	10384		.106	999	31.7	86	75	9	8	010	250	10
11	8226		.094	1 26	25.2	108	95	10	9	0100	250	11
12	6529		.084	1.59	20.1	133	130	11	11	0100	250	12
13	5184		.075	2.00	15.9	162	159	12	12	0100	250	13
14	4109	.0658	.067	2 52	12.6	212	193	14	13	0100	188	14
15	3260	.0587	.060	3.18	10.0	255	248	15	15	0100	188	15
16	2581	.0524	.054	4 02	7.95	324	316	17	17	0100	188	16
17	2052	.0468	.048	5 05	6.32	405	394	19	19	0070	188	17
18	1624	.0418	.043	6.39	5 02	525	487	22	21	0070	125	18
19	1289	.0373	.039	8 05	3.99	641	596	24	23	0070	125	19
20	1024	.0334	.035	10.13	3.16	850	792	27	26	0050	125	20
21	812.3	.0298	.031	12.77	2 51	1055	982	30	29	0050	125	21
22	640.1	.0266	.028	16 20	1 99	1340	1210	34	32	0050	125	22
23	510.8	.0238	.025	20.30	1.59	1370	1260	38	36	0050	125	23
24	404.0	.0213	.022	25.67	1 26	1730	1550	42	40	0020	125	24
25	320.4	.0190	.020	32 37	1 01	2150	1940	47	45	0020	125	25
26	252 8	.0170	.018	41 02	.799	2990	2700	53	50	0020	125	26
27	201.6	.0152	.016	51 44	.634	3700	3550	59	55	0020	125	27
28	158.8	.0136	.014	65.31	.504	4680	4180	66	62	0015	125	28
29	127.7	.0122	.013	81 21	.401	5900	5160	73	68	0015	125	29
30	100.0	.0109	.012	103.7	.318	7500	6560	82	77	0015	093	30
31	79.21	.0097	.011	130.9	.254	9270	8090	91	85	0015	093	31
32	64.00	.0088	.010	162.0	.202	11400	10000	100	94	0013	093	32
33	50.41	.0078	.009	205.7	.161	14500	12500	113	105	0013	093	33
34	39.69	.0070	.008	261.3	.127	18800	16250	128	119	0010	093	34
35	31.36	.0062	.007	330.7	.101	24000	20600	144	133	0010	093	35
36	25.00	.0056	.0060	414.8	.0803	29650	25000	158	145	0010	093	36
37	20.25	.0050	.0055	512.1	.0641	37400	30900	177	161	0010	093	37
38	16.00	.0045	.0049	648.2	.0509	46700	39300	198	181	0010	062	38
39	12.25	.0039	.0043	846.6	.0403	62700	51500	226	205	0007	062	39
40	9.61	.0035	.0038	1079	.0319	89600	72000	262	226	0007	062	40
41	7.84	.0031	.0034	1323	.0252	107800	89800	274	250	0007	062	41
42	6.25	.0028	.0030	1659	.0199	133500	116500	304	283	0005	062	42
43	4.84	.0025	.0027	2143	.0159	167000	143000	340	315	0005	062	43
44	4.00	.0022	.0025	2593	.0127	217000	188500	386	340	0005	062	44

Courtesy Magnetic Metals Corp.

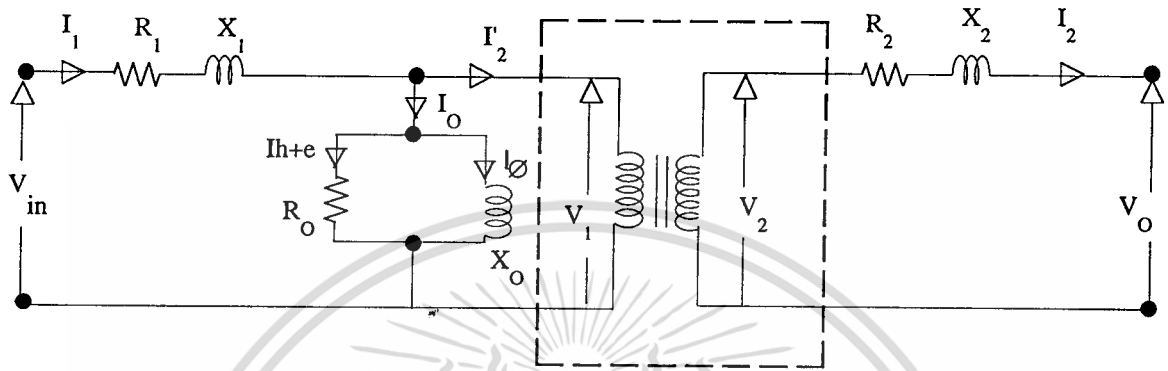
**ตารางการเปลี่ยนหน่วย**

Length	mil	in	ft	yd	mm	cm	m
	mil	1	0.001			0.0254	
inch	1000	1	0.083	0.0278	25.4	2.54	
foot		12	1	0.33	304.8	30.48	0.305
yard		36	3	1	914.4	91.44	0.914
millimeter	39.37	0.03937			1	0.1	0.001
centimeter		0.3937	0.0328		10	1	0.01
meter		39.37	3.28	1.094	1000	100	1
Area	cir mil	sq mil	sq in	sq ft	sq yd	sq cm	sq m
	1	0.7854					
circular mil	1.274	1	10 <sup>-6</sup>				
square mil	1274000	10 <sup>6</sup>	1	0.00694		6.451	
square inch			144	1	0.1111	929.03	0.0929
square foot	1973	1550	0.00155				
square millimeter	197300		0.155	0.00108			
square centimeter							
Volume	cu in	cu cm	oz	lb	gram		
	1	16.39	ounce	1	0.0625	28.35	
cubic inch	0.061	1	pound	16	1	453.6	
cubic centimeter							

### บทที่ 3

#### วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลง

#### วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลง



จะได้

- $V_1 = V_1 - V_{d1}$
- $V_{d1} = I_1 \times R_1$
- $R_1$  : ความต้านทานของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ
- $I_1$  : กระแสทางด้านปฐมภูมิ
- $V_{d1}$  : แรงดันตกคร่อมที่ขดลวดทางด้านปฐมภูมิ
- $V_2 = V_{d2} + V_o$
- $V_{d2}$  : แรงดันตกคร่อมที่ขดลวดทางด้านทุติยภูมิ
- $V_o$  : แรงดัน (output) ที่จ่ายให้กับโหลด

จากอัตราส่วนของหม้อแปลง

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$$\therefore \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1 - V_{d1}}{V_{d2} + V_o}$$

ดังนั้น ,  $V_o$  ขณะ full - load

$$V_o = \frac{N_2 (V_{in} - V_{d1})}{N_1} - V_{d2}$$

$$V_o \text{ (no load)} = \frac{N_2 (V_{in} - V_{d1} \text{ (no load)})}{N_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การปรับปรุงแรงดันตกคร่อมในชดลวดเพื่อให้ $V_0$ ขณะ full load ตามที่ต้องการ

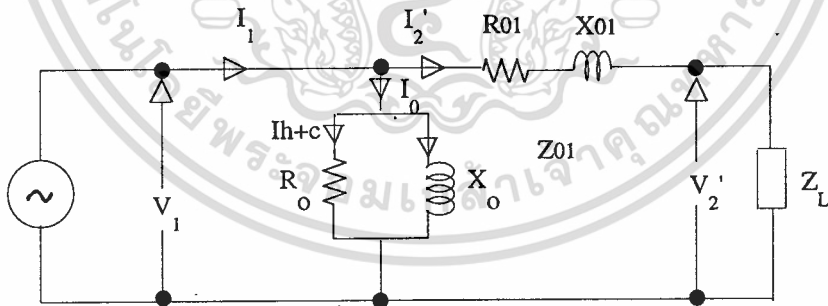
สามารถปรับจำนวนรอบทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิตามสมการ

$$N_2 = \frac{N_1 (V_0 - V_{d2})}{V_{in} + v_{d1}}$$

$$N_1 = \frac{N_2 (V_{in} - V_{d1})}{v_0 + v_{d2}}$$

### วงจรสมมูลย์ (Equivalent Circuits)

เพื่อความสะดวกในการคำนวณมองเห็นภาพพจน์และเข้าใจได้ง่ายและดีขึ้นจึงเขียนวงจรสมมูลย์ขึ้นเพื่อแทนหม้อแปลง โดยมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับหม้อแปลงจริง ๆ นั่นคือ เมื่อกำหนดกระแส ขนาดแรงดันเพาเวอร์แฟคเตอร์ทางด้าน Secondary ให้แล้ว ทาง primary จึงต้องดึงกระแสที่แรงดันและเพาเวอร์แฟคเตอร์ให้เหมือนกับหม้อแปลงจริง ๆ นั่นคือให้มีการสูญเสียเปล่า (Power loss) มี Magnetizing , core - loss current เปอร์เซนต์ แรงดันตกคร่อมมีที่แดนซ์ทั้งทางด้าน Primary และ Secondary และ counter electromotive เหมือนกันซึ่งถ้าเขียนสมการ



รูปวงจรสมมูลย์โดยประมาณที่คิดทางด้านรับไปหรือ (Primary)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถหาค่า Parameter ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$I_1 = I'_2 + I_0 = \frac{I_2}{a} + I_0$$

$$R_0 = \frac{V_1}{I_1 + e}$$

$$X_0 = \frac{V_1}{I_\phi}$$

$$R_{01} = R_1 + R'_1 = R_1 + a^2 R_2$$

$$X_{01} = X_1 + X'_1 = X_1 + a^2 X_2$$

### การทดสอบหม้อแปลง (Transformer test)

การทดสอบหม้อแปลงนั้นเป็นส่วนในการหา parameter ต่าง ๆ ของตัวหม้อแปลงซึ่งทำให้วงจรสมมูลย์ (equivalent circuit) ของหม้อแปลงทั้งตัวได้ โดยหาค่าต่าง ๆ เหล่านั้นทางด้านใดด้านหนึ่งก็ได้ นอกจากนี้ยังสามารถหาหรือเขียน รูปเวกเตอร์แทนการทดลองที่เกิดขึ้นเท่านั้น จากการหาวงจรสมมูลย์ได้นี้ทำให้สามารถพยากรณ์หม้อแปลงได้ว่ามีประสิทธิภาพ แรงเคลื่อนที่หายไป (voltage drop) เนื่องจาก impedance ของขดลวด กำลังไฟที่ต้องการใช้ กำลังไฟที่ส่งออกมาและอื่น ๆ ได้อีกตามการในเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระชนิตต่าง ๆ ให้กับหม้อแปลงอย่างไรก็ดีในการทดสอบนี้แบ่งได้ออกเป็น 2 ตอนคือ

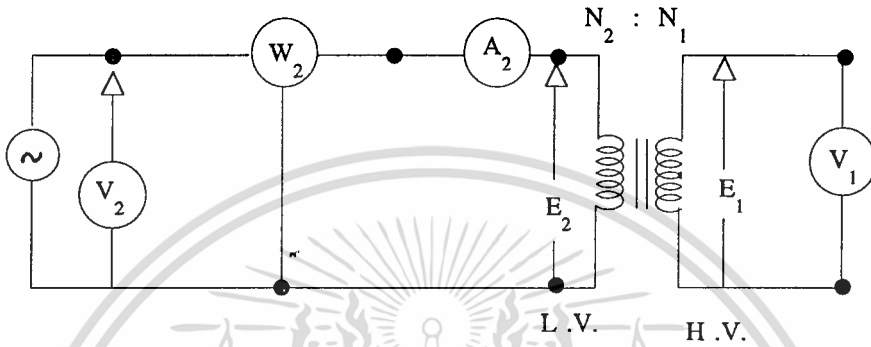
#### 1. เมื่อเปิดวงจรหรือตอนที่หม้อแปลงไม่มีภาระไฟฟ้า (open circuit or no load test)

จุดประสงค์ของการทดสอบนี้ก็เพื่อหาส่วนสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กและกระแสในขณะที่ไม่ต้องจ่ายภาระ  $I_0$  ซึ่งช่วยทำให้หา  $R_0$  และ  $X_0$  ได้ ในการทดสอบนี้โดยปกติมักทำการเปิดวงจรทางด้านที่มีแรงเคลื่อนไฟสูง (H.V) และทำการวัดทางด้านแรงเคลื่อนไฟต่ำ (L.V) ในการทดสอบนี้อาจวัดหรือเปิดวงจรทางด้านใดด้านหนึ่งก็ได้

จุดประสงค์ที่ทำการวัดทางด้านไฟแรงต่ำก็เพื่อลดความผิดพลาดที่อาจเกิดจากการอ่านและวัดค่ากระแสขณะที่ไม่มีภาระซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก (คือประมาณ 2-10% ของ rated load) ฉะนั้นเมื่อวัดทางด้าน L.V จึงทำให้ได้  $I_0$  สูงกว่าเมื่อวัดทางด้าน H.V ไปเป็นจำนวน  $N_1/N_2$  เท่าขอบทางด้านแรงสูง

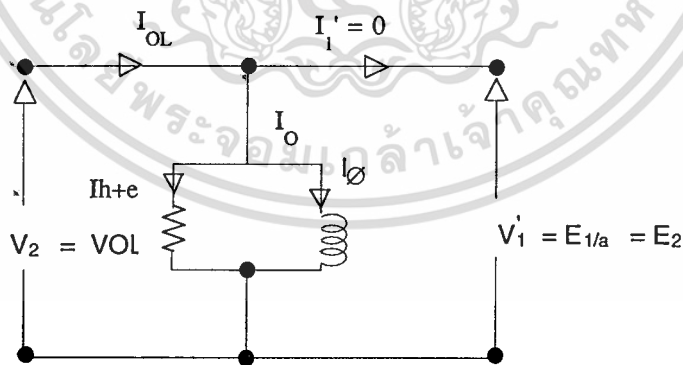
ในการทดสอบนี้จะต้องปรับให้  $V_2$  สูงเท่ากับพิกัดทางด้านไฟแรงต่ำแล้วก็วัดค่าต่าง ๆ ของ  $V_2$ ,  $W_2$  และ  $A_2$  ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปหม้อแปลงขณะทำการทดสอบโดยการเปิดวงจรทางด้านไฟแรงสูง

แต่ทำการวัดค่าต่าง ๆ ของโวลท์ แอมป์ วัดต์ ทางด้านไฟแรงต่ำโดยได้ค่าออกมาเป็น  $V_{oL}$ ,  $W_{oL}$  และ  $I_{oL}$  ตามลำดับ ในขณะที่ทำการทดลองนี้ค่าแรงเคลื่อนไปที่ตกคร่อม impedance ของด้านที่วัด (L.V) มีค่าน้อยมาก (ทั้งนี้เพราะ  $I_o$  น้อยมาก ฉะนั้นจึงอาจตัดทิ้งค่านี้ไปได้และอาจเขียนวงจรสมมุทธ์ขณะที่ทำการทดลองนี้ได้ ซึ่งเป็นวงจรสมมุทธ์ทั้งหมดที่คิดอยู่ทางด้าน L.V เท่านั้น



รูปวงจรสมมุทธ์โดยประมาณของหม้อแปลงขณะทำการทดสอบ โดยการเปิดวงจรทางด้าน H.V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบโดยการเปิดวงจรทางด้าน H.V

จากการทดสอบนี้สรุปความสัมพันธ์ของ parameter ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E_1 &= V_1 \\ E_2 &= V_2 \dots \dots \dots \text{โดยประมาณ} \\ I_1 &= 0 \dots \dots \dots (\text{เปิดวงจรทาง H.V}) \\ I_{oL} &= I_{n+e} + I_\phi \end{aligned}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} I_{oL} &= \text{กระแสขณะไม่มีภาระทางด้าน L.V} \\ I_{n+e} &= \text{กระแสส่วนที่เป็น hysteresis และ eddy} \\ I_\phi &= \text{กระแสส่วนที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก} \\ I_{n+e} &= I_{oL} \cos \theta_{oL} \\ I_\phi &= I_{oL} \sin \theta_{oL} \end{aligned}$$

เมื่อ

$\theta_{oL}$  คือมุมที่  $I_{oL}$  ทำกับ  $V_2$  โดยที่  $\theta_{oL}$  นี้มีค่าเข้าใกล้  $90^\circ$  และ  $I_{oL}$  นี้มาทีหลัง (lag)  $V_2$  เป็นมุม =  $\theta_{oL}$

จากการทดลองที่ได้นี้ทำให้หาค่า  $R_{oL}$ ,  $I_{oL}$ ,  $\theta_{oL}$ ,  $I_{n+e}$  และ  $I_\phi$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \therefore W &= VI \cos \theta \\ \therefore W_{oL} &= V_{oL} I_{oL} \cos \theta \\ \therefore \cos \theta_{oL} &= \frac{W_{oL}}{V_{oL} I_{oL}} \\ \therefore R_{oL} &= \frac{V_{oL}}{I_{n+e}} \\ \therefore X_{oL} &= \frac{V_{oL}}{I_\phi} \end{aligned}$$

การทดสอบโดยการลัดวงจรของหม้อแปลง (Short Circuit or impedance test)

การทดสอบแบบนี้เป็นวิธีที่ประหยัดอย่างหนึ่งในการหาสิ่งต่าง ๆ ต่อไปนี้

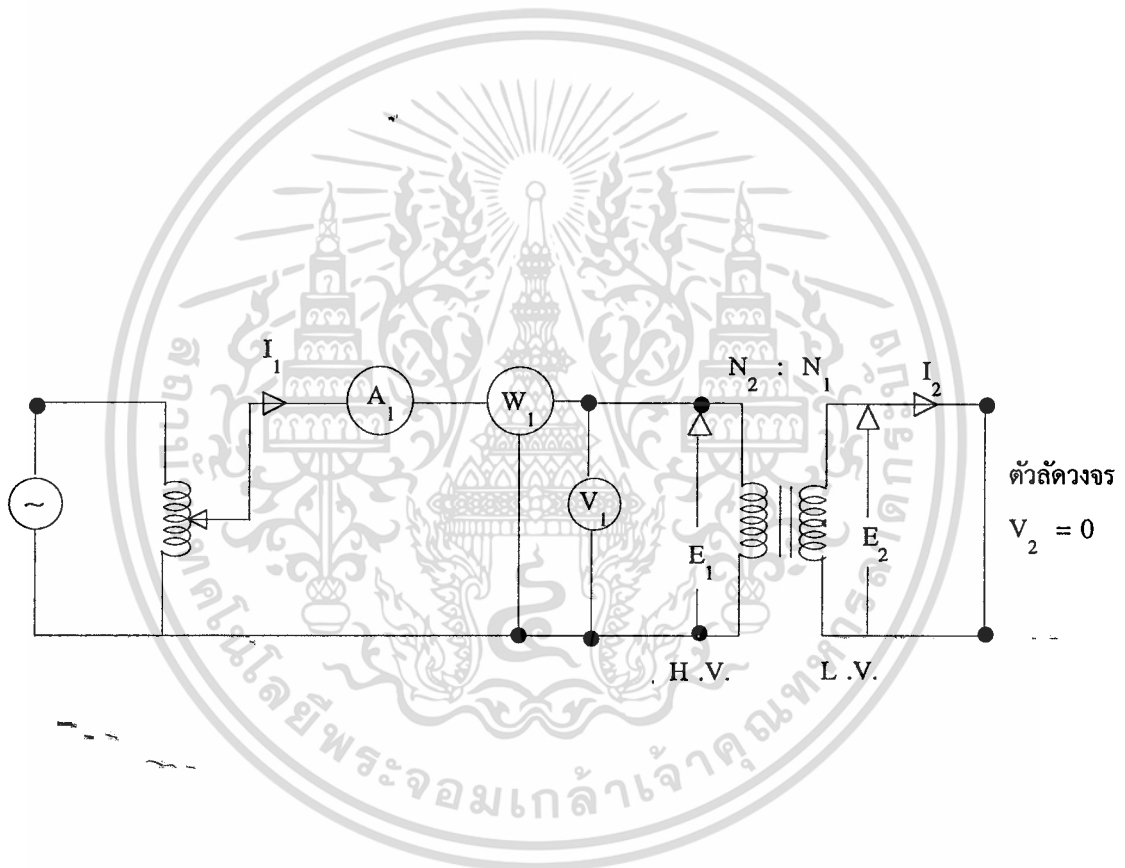
1. impedance สมมูลย์ ( $Z_{o1}$  หรือ  $Z_{o2}$ ) สมมูลย์ leakage reactance ( $X_{o1}$  หรือ  $X_{o2}$ ) และความต้านทานสมมูลย์ ( $R_{o1}$  หรือ  $R_{o2}$ ) ของหม้อแปลงที่คิดทางด้านที่ใส่มีเตอร์ต่าง ๆ เข้าไปวัดทางด้านนั้น
2. ส่วนสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของขดลวด (Cu loss) ที่พิกัดของภาระ (หรือที่ load ใด ๆ ก็ได้ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่หาได้นี้ใช้สำหรับคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงด้วยระเบียบขั้นตอนการคำนวณ  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สามารถคำนวณหา Regulation ของหม้อแปลงได้ ตามต้องการที่ทราบค่าของ  $Z_{o1}$  หรือ  $Z_{o2}$  ทำให้รู้ว่าแรง

เคลื่อนที่หายไปทั้งหมด เมื่อคิดทางด้านรับไฟหรือจ่ายไฟเป็นค่าเท่าใด

ในการทดสอบนี้ ตามปกติแล้วมักทำการลัดวงจรทางด้านไปต่ำโดยใช้ลวดทองแดงขนาดใหญ่ลัดวงจร หรืออาจใช้แอมมิเตอร์เป็นตัวลัดวงจรแทนก็ได้เพื่อชี้ให้เห็นถึงกระแสที่พัดในขณะลัดวงจร



รูปแสดงการลัดวงจรของหม้อแปลงเข้ากับเครื่องวัดต่าง ๆ ( $A_1$  ,  $V_1$  ,  $W_1$ )  
ของการทดสอบในขณะลัดวงจรของหม้อแปลง

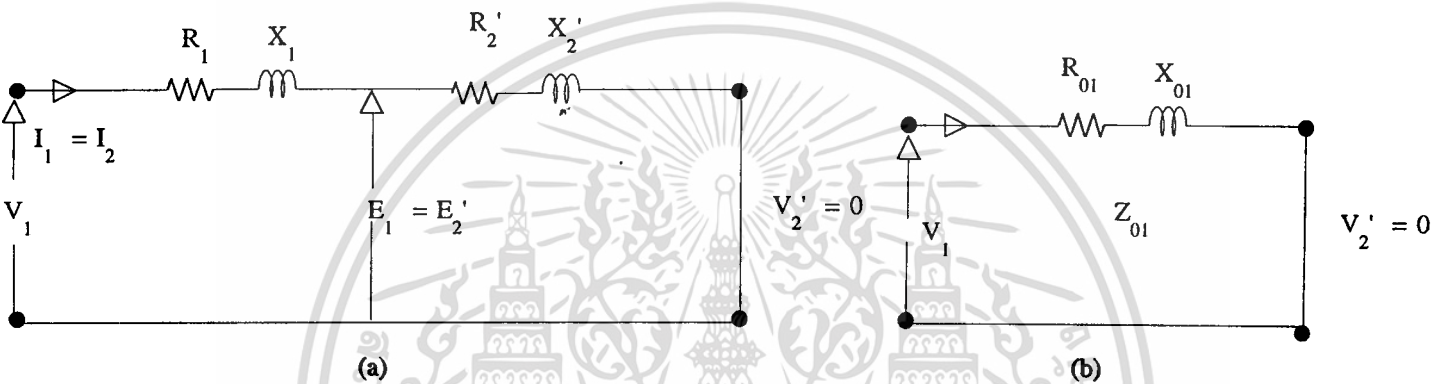
การทดลองนี้ทำได้โดยการค่อยปรับแรงเคลื่อนไป  $V_1$  จาก variac โดยเริ่มต้นจาก  $V_1 = 0$  โวลต์ จนกระทั่งทำให้  $A_1$  อ่านค่ากระแสได้ตามพิกัด (rated current) ของทางด้าน H.V. (หรือ  $I_2 =$  พิกัดของกระแสถ้าหากว่าใส่แอมมิเตอร์เข้าไปลัดวงจรทางด้าน L.V.) โดยปกติแล้ว  $V_1$  มีค่าประมาณ 5-10 % ของแรงเคลื่อนไปที่หม้อแปลงได้รับความผิดปกติที่ความถี่ของไฟฟ้าเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการทดลองนี้หม้อแปลงได้รับไปทีใส่เข้าไปต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับระดับไฟที่ได้รับตามปกติ ดังนั้นจึงทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่คล่องขดลวดทั้งสองด้านมีค่าต่ำ ฉะนั้นค่าของการสูญเสียในแกนเหล็กจึงมีค่าน้อยมาก นั่นคือค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์จึงเป็นค่าที่เกิดจากการสูญเสียทั้งหมดของหม้อแปลงอันเนื่องมาจากความต้านทานของขดลวดทั้งสองด้าน ( $I_1^2 R_{01}$  หรือ  $I_2^2 R_{02}$ )

จากการทดสอบและจากเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้วจึงทำให้เขียนวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลง



รูปวงจรมูลย์ของหม้อแปลงที่คิดทางด้าน H.V ขณะทีลัดวงจรทางด้าน L.V

- (a) แยกค่า  $R_1$ ,  $R'_2$  และ  $X_1$ ,  $X'_2$  เมื่อ  $R'_2$  และ  $X'_2$  เป็นค่าสมมูลย์ความต้านทานและ veactance ของทาง L.V ที่นำมาคิดทางด้าน H.V
- (b) รวมค่า  $R_1$  กับ  $R'_2$  เข้าด้วยกันเป็น  $R_{01}$  และรวม  $X_1$  กับ  $X'_2$  เข้าด้วยกันเป็น  $X_{01}$

จากรูปค่าที่วัดได้  $V_1$ ,  $W_1$  และ  $A_1$  มีค่าเป็น  $V_{sc}$ ,  $W_{sc}$  และ  $I_{sc}$  ตามลำดับ ค่าที่ได้ก็นำไปคำนวณหาค่า  $R_{01}$ ,  $X_{01}$ ,  $Z_{01}$  ได้ดังนี้

$$W_{sc} = I_{sc}^2 R_{01}$$

$$R_{01} = \frac{W_{sc}}{I_{sc}^2}$$

แต่  $Z_{01} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}}$

และ  $Z_{01}^2 = R_{01}^2 + X_{01}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดหรือต้องการแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### โวลต์เตจเลคกูชัน

#### Voltage Regulation

Voltage Regulation คืออัตราส่วนของความแตกต่างระหว่างแรงดันทาง Secondary เมื่อไม่มีโหลดและเมื่อมีโหลดเต็มพิกัดต่อแรงดันทาง Secondary เมื่อโหลดเต็มพิกัด

$$\text{Regulation} = \frac{V_2 \text{ no load} - V_2 \text{ full load}}{V_2 \text{ full load}} \times 100 \%$$

#### การกำหนดค่า Regulation

1. กำหนดที่พิกัดของแรงดัน กระแส และความถี่
2. การพูดถึง Regulation ใด ๆ โดยไม่กำหนดค่าของโหลดให้เข้าใจได้ว่าเป็นค่าที่เต็มพิกัด
3. โดยทั่วไปคิดจาก Sine wave \*
4. หากมิได้ระบุว่า Power factor เท่าใด ให้ถือว่าเป็น 100 %
5. อุณหภูมิมีมักคิดเทียบที่ 75 °C

$$\% \text{ Regulation} = 100 \left[ \frac{1}{\eta} - 1 \right]$$

$\eta$  = ประสิทธิภาพของหม้อแปลง

$$\% \eta = 100 \left[ \frac{1}{\text{Regulation} + 1} \right]^2$$

#### ประสิทธิภาพ (efficiency)

ประสิทธิภาพของหม้อแปลง คือ อัตราส่วนของ output ต่อ input นั่นคือ

$$\eta = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{\text{output}}{\text{output} + \text{losses}}$$

Losses คือ ค่าสูญเสียเปล่าในหม้อแปลงอาจแบ่งออกได้ดังนี้

- (1) core loss
- (2) copper loss
  - ใน primary
  - ใน Secondary

ค่า core loss นั้นเกือบคงที่คือไม่ขึ้นอยู่กับโหลดแต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของเส้นแม่เหล็กในแกนเหล็กและขึ้นอยู่กับความถี่ ความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแม่เหล็กในแกนเหล็กคุณภาพของเหล็ก ปริมาตรหรือน้ำหนักของแกนเหล็กค่าสูญเสียเปล่าในแกนเหล็ก อาจแบ่งออกได้เป็น 2 พวก คือ

- Eddy current loss
- Hyrteresis loss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า core loss นี้ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันเหนี่ยวนำ (induced voltage) ไม่ใช่ค่าแรงดันที่ขาน (Impressed voltage) และขึ้นอยู่กับค่าความถี่แต่เนื่องจากค่าแรงดันเหนี่ยวนำและแรงดันที่ขานนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) ที่หาได้จากการทดลอง (open circuit test) อาจคิดได้ว่ามีค่าคงที่ตลอดเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด

$$= \frac{\text{กำลังไฟที่จ่าย}}{\text{กำลังไฟที่จ่าย} + \text{กำลังไฟที่สูญเสียไปเนื่องจากความต้านทานของขดลวด} + \text{กำลังไฟที่สูญเสียไปในแกนเหล็ก}}$$

$$= \frac{\text{output}}{\text{output} + \text{Cu loss} + \text{Core loss (iron loss)}}$$

หรือ  $= \frac{\text{ไฟที่รับ} - \text{ไฟที่เสียทั้งหมด}}{\text{ไฟที่รับ}}$

$$= 1 - \frac{\text{ไฟที่เสียทั้งหมด}}{\text{ไฟที่รับ}}$$

สภาพเมื่อประสิทธิภาพสูงสุด

กรณีเช่นนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ  $\text{cu loss} = \text{core loss}$

นั่นคือ  $I_1^2 R_{01} = I_2^2 R_{02} = w_e = w_h + w_e = w_i$

เมื่อ  $w_e = \text{core loss}$

$w_h = \text{hysteresis loss}$

$w_e = \text{eddy current loss}$

$w_i = \text{iron loss}$

วิธีพิสูจน์ เราพิจารณาทางด้านปฐมภูมิ

ไฟที่ได้รับทางด้านปฐมภูมิ  $= V_1 I_1 \cos \theta_1$

$$\therefore \eta_c = \frac{V_1 I_1 \cos \theta_1 - \text{loss}}{V_1 I_1 \cos \theta_1}$$

$$= \frac{V_1 I_1 \cos \theta_1 - I_1^2 R_{01} - W_i}{V_1 I_1 \cos \theta_1}$$

$$\therefore \eta = \frac{1 - I_1 R_{01}}{V_1 \cos \theta_1} - \frac{W_i}{V_1 I_1^2 \cos \theta_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการ Differentiat ทั้งสองด้านโดยเฉลี่ยกับ  $I_1$  ซึ่งเป็นตัวแปรได้

$$\frac{dy}{dI_1} = 0 - \frac{R_{01}}{V_1 \cos \theta_1} + \frac{W_1}{V_1 I_1^2 \cos \theta_1}$$

$$\eta \text{ จะสูงสุดได้ต่อเมื่อ } \frac{d\eta}{dI_1} = 0$$

$$\therefore \frac{R_{01}}{V_1 \cos \theta_1} = \frac{W_1}{V_1 I_1^2 \cos \theta_1}$$

$$\therefore I_1^2 R_{01} = W_i = I_2^2 R_{02}$$

นั่นคือ Cu loss = Iron loss

กระแสที่จ่ายออกไปให้กับภาระไฟ เมื่อประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่มีค่าสูงคือ  $I_2$

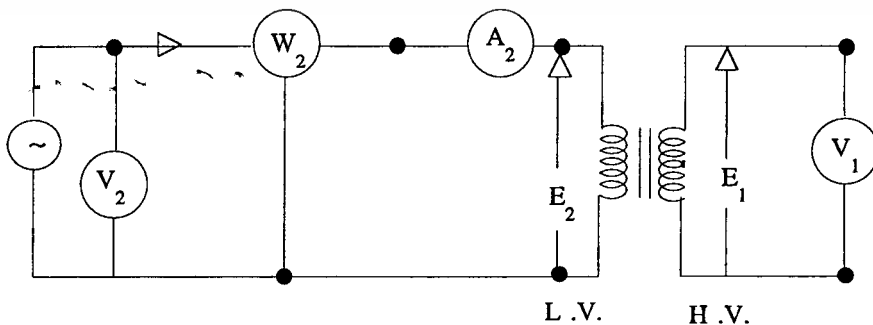
$$\therefore I_2 = \sqrt{\frac{W_1}{R_{02}}} \text{ หรือ } \therefore I_1 = \sqrt{\frac{W_1}{R_{01}}}$$

### การทดสอบหม้อแปลงโดยการเปิดวงจร

#### จุดประสงค์ในการเปิดวงจรหม้อแปลง

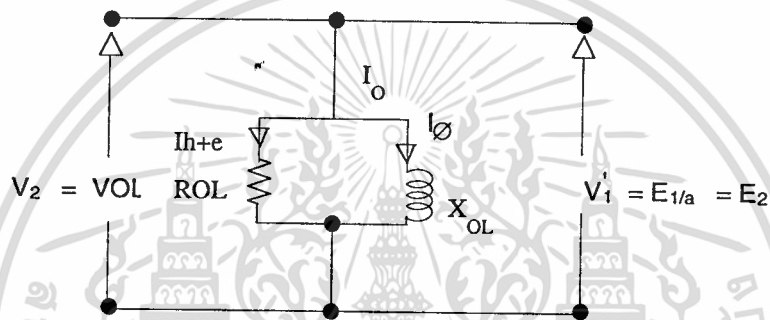
1. เพื่อหาค่าส่วนสูญเสียเมื่อเกิดขึ้นในแกนเหล็ก
2. เพื่อหาค่ากระแสขณะที่ยังไม่จ่ายโหลด  $I_0$  ซึ่งช่วยทำให้หาค่า  $R_0$  และ  $X_0$  ได้

### วงจรทดสอบหม้อแปลงโดยการเปิดวงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรสมมูลโดยประมาณของหม้อแปลงขณะทำการทดสอบโดยการเปิดวงจรทางด้าน H.V



ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต้องปรับให้  $V_2$  สูงเท่ากับพิกัดทางด้านไฟแรงต่ำ
2. แล้วก็อ่านค่าต่าง ๆ ของ  $V_2$ ,  $W_2$ ,  $A_2$  ตามลำดับ

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 I_{oL} &= \text{กระแสขณะไม่มีภาระทางด้าน L.V} \\
 I_{h+e} &= \text{กระแสส่วนที่เป็น hysteresis และ eddy} \\
 I_{\phi} &= \text{กระแสส่วนที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก} \\
 I_{h+e} &= I_{oL} \cos \theta_{OL} \\
 I_{\phi} &= I_{oL} \sin \theta_{OL}
 \end{aligned}$$

เมื่อ

$\theta_{OL}$  คือมุมที่  $I_{oL}$  ทำกับ  $V_2$  โดยที่  $\theta_{OL}$  นี้มีค่าเข้าใกล้  $90^\circ$  และ  $I_{oL}$  นี้มาที่หลัง (lag)  $V_2$  เป็นมุมเท่ากับ  $\theta_{OL}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองที่ได้นี้ทำให้หาค่า  $R_{OL}$ ,  $X_{OL}$ ,  $\theta_{OL}$ ,  $I_{h+e}$  และ  $I_{\phi}$  ได้ดังนี้

$$\cos \theta_{OL} = \frac{W_{OL}}{V_{OL}I_{OL}}$$

$$R_{OL} = \frac{V_{OL}}{I_{h+e}}$$

$$X_{OL} = \frac{V_{OL}}{I_{\phi}}$$

จากผลการทดลอง

$W_2$ (วัตต์)	$A_2$ (แอมป์แปร์)	$V_2$ (โวลต์)
40	1.4	220

$$\begin{aligned} \cos \theta_{OL} &= 0.124 \\ R_{OL} &= 1,267.28 \text{ โอห์ม} \\ X_{OL} &= 158.36 \text{ โอห์ม} \end{aligned}$$

### การทดสอบโดยการลัดวงจรของหม้อแปลง

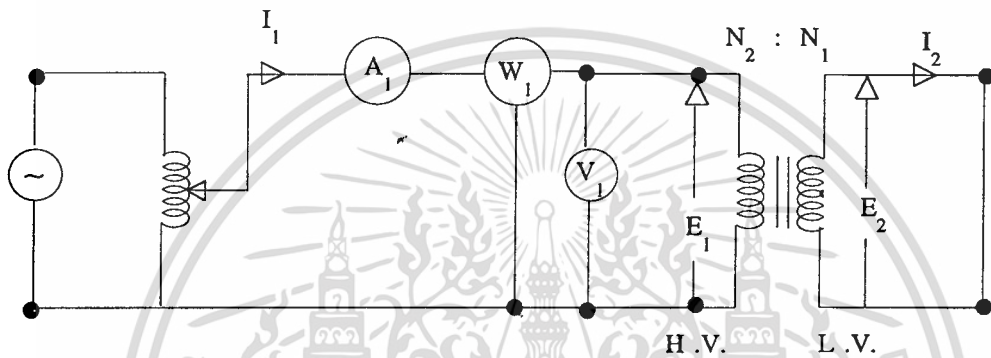
#### จุดประสงค์ในการทำการทดสอบโดยการลัดวงจรของหม้อแปลง

1. เพื่อหาค่าส่วนเสียนี่เกิดขึ้นในขดลวดทองแดง ค่าต่าง ๆ ที่วัดได้จากการทดลอง
  - 1.1 impedance สมมูลย์ ( $Z_{01}$  หรือ  $Z_{02}$ )
  - 1.2 สมมูลย์ leakage reactance ( $Z_{01}$  หรือ  $X_{02}$ )
  - 1.3 ความต้านทานสมมูลย์ ( $R_{01}$  หรือ  $R_{02}$ ) ของหม้อแปลงที่คิดทางด้านที่ใส่มีเตอร์ต่าง ๆ เข้าไป

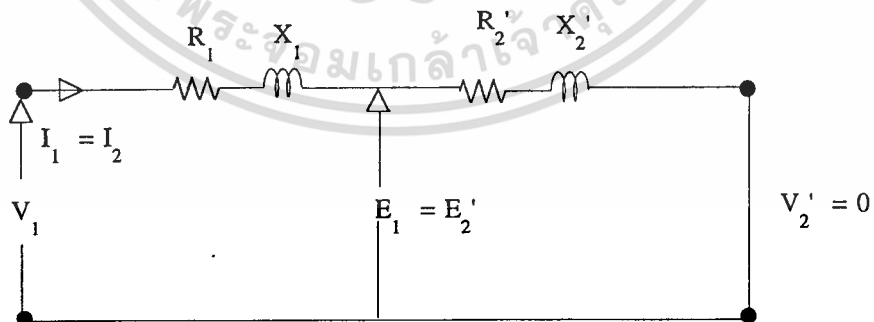
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4 ส่วนสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของขดลวดทองแดง (Cu loss) ที่พิกัดของภาระ  
 1.5 สามารถคำนวณ regulation ของหม้อแปลงได้ เมื่อคิดทางด้านรับไฟหรือจ่ายไฟเป็นค่าเท่าใด

วงจรการทดลองโดยการลัดวงจรของหม้อแปลง

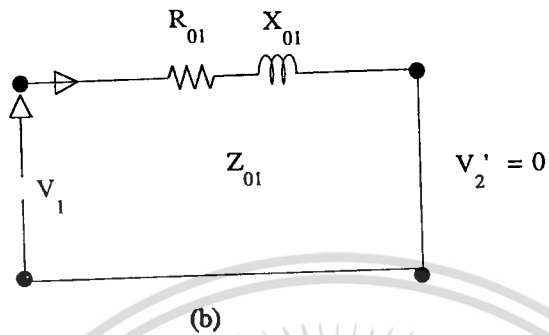


วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงที่คิดทางด้าน H.V. ขณะที่ลัดวงจรทางด้าน L.V.



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 (a) แยกค่า  $R_1$ ,  $R_2'$  และ  $X_1$ ,  $X_2'$  เมื่อ  $R_2'$  และ  $X_2'$  เป็นค่าสมมูลย์ความต้านทานและ reactance ของ  
 หม้อแปลงที่ลัดวงจรทางด้านรับไฟหรือจ่ายไฟเป็นค่าเท่าใด เมื่อคิดทางด้านรับไฟหรือจ่ายไฟเป็นค่าเท่าใด  
 ทาง L.V. ที่นำมาคิดทางด้าน H.V.



(b) รวมค่า  $R_1$  กับ  $R'_2$  เข้าด้วยกันเป็น  $R_{01}$  และรวม  $X_1$  กับ  $X'_2$  เข้าด้วยกันเป็น  $X_{01}$

#### ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำโดยการปรับแรงเคลื่อนไฟ  $V_1$  จาก Variac โดยเริ่มต้นจาก  $V_1 = 0$  โวลต์ จนกระทั่งทำให้  $A_1$  อ่านค่าของกระแสได้ตามพิกัด (rated current) ของทางด้าน H.V.
2. อ่านค่าจากเครื่องวัด  $A_1, W_1, V_1$  จดบันทึกไว้

ค่าที่ได้ก็นำไปคำนวณหาค่า  $R_{01}, X_{01}, Z_{01}$  ได้ดังนี้

$$R_{01} = \frac{W_{se}}{I_{sc}^2}$$

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2}$$

$$Z_{01} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}}$$

$$R_{02} = \frac{R_{01}}{a^2}$$

$$X_{02} = \frac{X_{01}}{a^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลอง

$W_1$ (วัตต์)	$A_1$ (แอมป์แปร์.)	$V_1$ (โวลท์)
30	5.52	5.5

$$R_{01} = 0.984 \text{ โอห์ม}$$

$$X_{01} = 0.154 \text{ โอห์ม}$$

$$Z_{01} = 0.996 \text{ โอห์ม}$$

$$R_1 = 0.152 \text{ k}\Omega$$

$$L_1 = 0.440 \text{ H.}$$

$$R_2 = 0.166 \text{ k}\Omega$$

$$L_2 = 0.470 \text{ H}$$

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ส่วนสูญเสียเนื่องจากทองแดง = 29.98 วัตต์

ประสิทธิภาพเมื่อจ่ายไฟเต็มที่ขณะ P.f. เป็น 1 = 94.55%

แรงเคลื่อนไฟที่หายไปเมื่อ P.f. เป็น 1 = 1.51 โวลต์

การออกแบบหม้อแปลง

การออกแบบหม้อแปลงเป็นงานที่ต้องอาศัยความรู้ทางทฤษฎีหม้อแปลงและความชำนาญในทางปฏิบัติมาประกอบกัน จึงออกแบบได้ในราคาถูกและคุณภาพดี

หลักการออกแบบหม้อแปลงเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

1. ออกแบบแกนเหล็กของหม้อแปลง (Transformer core)
  - 1.1 ชนิดของแผ่นเหล็กที่เลือกใช้
  - 1.2 วิธีหา พ.ท. หน้าตัดแกนเหล็ก (core section area)
  - 1.3 วิธีเรียงแผ่นเหล็กรูปหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในวงกลมให้ได้ พ.ท. หน้าตัดมากที่สุด
  - 1.4 คำนวณหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กหม้อแปลง (core loss)
2. การออกแบบขดลวดหม้อแปลง
  - 2.1 วิธีหาขนาดลวด
  - 2.2 วิธีคำนวณหาจำนวนรอบที่ใช้พัน
  - 2.3 วิธีรองฉนวน
  - 2.4 วิธีคำนวณหาค่าสูญเสียในทองแดง (copper loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

ตัวอย่างการคำนวณหม้อแปลงอย่างละเอียด

ตัวอย่างการคำนวณหม้อแปลงอย่างละเอียด

จุดประสงค์ ในการออกแบบ

- แรงดันทางด้านปฐมภูมิ 220 โวลต์
- แรงดันทางด้านทุติยภูมิ 220 โวลต์
- กระแสทางด้านทุติยภูมิ 5 แอมป์
- ความหนาแน่นกระแส แอมป์ ต่อ 600 เซอร์คูลาร์มิล
- ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก 10,000 เกาส์ หรือ 1 wb/m<sup>2</sup>
- ความถี่ 50 Hz

หาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

$$A = \sqrt{\frac{VA}{5.58}}$$

$$A = \sqrt{\frac{220 \times 5}{5.58}} = 5.94 \text{ ตารางนิ้ว}$$

\* เลือกแกนเหล็ก EI  $\frac{21}{2}$  นิ้ว , ต้องการพื้นที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ก็จะได้  $\frac{21}{2} \times \frac{21}{2}$  นิ้ว จะได้เท่ากับ 6.25 ตารางนิ้ว

\* หาขนาดของหม้อแปลงใหม่

เมื่อ

$$A = 6.25 \text{ ตารางนิ้ว}$$

$$6.25 \times 5.58 = \sqrt{220 \times 5}$$

$$34.87 = \sqrt{220 \times 5}$$

$$\text{ขนาดหม้อแปลง} = 1216.26 \text{ โวลต์-แอมป์}$$

$$\text{กระแส } I = \frac{1216.26}{220} = 5.52 \text{ A}$$

หาพื้นที่หน้าตัดของขดลวด

หม้อแปลงขนาดเล็กใช้ 600 เซอร์คูลาร์มิลต่อแอมป์

$$\therefore 1 \text{ (A)} = 600 \text{ เซอร์คูลาร์มิล}$$

$$\text{ถ้า } 5.52 \text{ (A)} \frac{600 \times 5.52}{1} = 3312 \text{ เซอร์คูลาร์มิล}$$

จะได้พื้นที่หน้าตัดของขดลวดเท่ากับ 3312 เซอร์คูลาร์มิล ทำการเทียบค่าที่ได้กับตารางเบอร์ลวดก็จะได้ลวด S.W.G เบอร์ 16 จะเท่ากับ 2.075 mm<sup>2</sup> หรือ 0.003217 in<sup>2</sup> เส้นผ่าศูนย์กลาง

$$d = \sqrt{\frac{0.0032 \times 4}{\pi}} = 0.0638 \text{ นิ้ว}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาจำนวนรอบที่ใช้พัน

$$N_1 = \frac{V_1}{4.44 fBA}$$

$$= \frac{220}{4.44 \times 50 \times 1 \times 6.25 \times 2.54^2 \times 100^{-2}}$$

$$N_1 = 245.76 \text{ รอบ}$$

$$N_1 = 246 \text{ รอบ}$$

เนื่องจากแรงดันด้านปฐมภูมิกับทุติยภูมิเท่ากัน

∴ จะได้จำนวนรอบ  $N_1 = N_2$

ขั้นตอนในการหาหม้อแปลง

1. กำหนดกระแสทางด้านทุติยภูมิที่ต้องการ
2. ต้องทราบแรงดันทางปฐมภูมิและทุติยภูมิ
3. หาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

จากสูตร

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (A)} = \sqrt{\frac{VA}{5.52}}$$

$$VA : \frac{17.26SP}{fB} \text{ (ดูจากตาราง)}$$

S : ขนาดพิกัดของหม้อแปลง

P : ความหนาแน่นของกระแส

f : ความถี่ (Hz)

B : ความหนาแน่นของแรงแม่เหล็กเป็นเกาส์

W : พื้นที่ Window ของแกนเหล็ก

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (a)} = \frac{17.26SP}{WfB}$$

4. หาพื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่ใช้พันหม้อแปลง จะใช้ 600 เซอร์คูลาร์มิล ต่อแอมป์แล้วนำมาเทียบกับตารางเบอร์ลวด
5. หาจำนวนรอบที่ใช้พัน  $N_1 = \frac{V_1}{4.44 fBA}$ ,  $N_2 = \frac{V_2}{4.44 fBA}$

หรือ

$$\frac{N_1}{V_1} = \frac{3.5 \times 10^6}{faB} \text{ รอบต่อโวลท์}$$

$$\frac{N_2}{V_2} = \frac{3.5 \times 10^6}{faB} \text{ รอบต่อโวลท์}$$

เอกสารหาจำนวนชั้นของขดลวดที่จะพันลงใน bobbin เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
แกนเหล็ก EI ด้าน D มีความยาวเท่ากับ 3.75 นิ้ว ความหนาของ bobbin เท่ากับ 0.188 นิ้ว ความยาว  
ของ bobbin จริง ๆ เท่ากับ 3.75 - (2 × 0.188) เท่ากับ 3.374 นิ้ว ลวดที่ใช้เป็นหม้อแปลงเลือกเบอร์ลวด 16 S.W.G

จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.063 นิ้ว เพราะฉะนั้นที่ความยาว 1 นิ้ว สามารถพันขดลวดเรียงกันได้ 16 รอบ ถ้าหากความยาวของ bobbin เท่ากับ 3.374 นิ้ว ก็สามารถพันขดลวดได้เท่ากับ  $16 \times 3.374$  เท่ากับ 53.98 รอบ ต่อหนึ่งชั้น จำนวนรอบทางด้านปฐมภูมิ 246 รอบ ก็จะสามารถพันขดลวดได้เท่ากับ  $\frac{246}{53.98}$  เท่ากับ 4.55 ชั้น , ที่ใช้พันขดลวดทางด้านทุติยภูมิก็ทำเช่นเดียวกัน

∴ ความยาวโดยเฉลี่ยต่อขดลวด 1 ชุด

$$\begin{aligned} \text{ขดลวดทางด้านปฐมภูมิ} \quad M_1 &= 2(C+D+4B)+6.28 \frac{W_1}{2} \\ &= 2(2.5+2.5+(4 \times 0.118))+6.28 \frac{0.416}{2} \\ &= 12.24 \text{ นิ้ว} \end{aligned}$$

ขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

$$\begin{aligned} M_2 &= 2(C+D+4B)+6.28(W_1 + \frac{W_2}{2}) \\ &= 2(2.5+2.5+(4 \times 0.118))+6.28(0.416 + \frac{0.416}{2}) \\ &= 14.85 \text{ นิ้ว} \end{aligned}$$

ความยาวของขดลวดทองแดงทางด้านปฐมภูมิ (L<sub>1</sub>)

$$\begin{aligned} L_1 &= M_1 \times N_1 \\ &= 12.24 \times 246 \\ &= 3011.04 \text{ นิ้ว} \end{aligned}$$

ความยาวของขดลวดทองแดงทางด้านทุติยภูมิ (L<sub>2</sub>)

$$\begin{aligned} L_2 &= M_2 \times N_2 \\ &= 14.85 \times 246 \\ &= 3653.1 \text{ นิ้ว} \end{aligned}$$

ความต้านทานของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (R<sub>1</sub>)

$$\begin{aligned} \frac{L_1}{10} &= \frac{3011.04}{10} = 301.10 \times 0.002 \\ R_1 &= 0.75 \text{ โอห์ม} \end{aligned}$$

ความต้านทานของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (R<sub>2</sub>)

$$\begin{aligned} \frac{L_2}{10} &= \frac{3653.1}{10} = 365.3 \times 0.002 \\ R_2 &= 0.92 \text{ โอห์ม} \end{aligned}$$

แรงดันตกคร่อมทางด้านปฐมภูมิ

$$\begin{aligned} Vd_1 &= I_1 \times R_1 \\ &= 5 \times 0.75 \\ &= 3.75 \text{ โวลท์} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็น W<sub>1</sub> ส = Vd<sub>1</sub> x I<sub>1</sub> ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
= 3.75 x 5  
= 18.75 วัตต์

แรงดันตกคร่อมทางด้านทุติยภูมิ

$$\begin{aligned} V_{d2} &= I_2 \times R_2 \\ &= 5 \times 0.92 \\ &= 4.6 \text{ โวลต์} \\ W_2 &= V_{d2} \times I_2 \\ &= 4.6 \times 5 \\ &= 23 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

7. ส่วนที่สูญเสียในทองแดง

$$\begin{aligned} &\text{จะได้เท่ากับ } W_1 + W_2 \\ &= 18.75 + 23 \\ &= 41.75 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

8. แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ ( $V_O$ )

$$\begin{aligned} V_O &= N_2 \frac{(V_{in} - V_{d2})}{N_1} - V_{d2} \\ &= 246 \frac{(220 - 3.75)}{246} - 4.6 \\ &= 211.65 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

ข้อสังเกต จะเห็นได้ว่า  $V_O$  ที่เราต้องการนั้น 220 โวลต์ แต่เนื่องจากมี Voltage drop ในขดลวดจึงทำให้แรงดัน  $V_O$  ออกมาเพียง 211.65 โวลต์ เพราะฉะนั้น จึงต้องพันขดลวดทางด้านเพิ่มเข้าไปเพื่อชดเชยเพื่อที่จะให้ได้  $V_O$  เท่ากับ 220 โวลต์ พอดี

$$\begin{aligned} N_2 &= \frac{N_1 (V_O + V_{d2})}{(V_{in} - V_{d1})} \\ &= \frac{246(220 + 4.6)}{(220 - 3.75)} \\ N_2 &= 255 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

9. แรงดันไฟฟ้าพื้นที่จ่ายออกมาขณะ No load

$$\begin{aligned} V_O &= \frac{N_2}{N_1} \left( V_{in} - \frac{W_o R_1}{V_{in}} \right) \\ &= \frac{255}{246} \left( 220 - \frac{3.49 \times 0.75}{220} \right) \\ &= 1.03 \times 219.98 \\ &= 226.58 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

ความยาวเฉลี่ยของแกนเหล็ก

$$\begin{aligned} M_p &= 2D + 2B + 4A \\ &= (2 \times 3 \frac{3}{4}) + (2 \times 1 \frac{1}{4}) + (4 \times 1 \frac{1}{4}) \\ M_p &= 7.5 + 2.5 + 5 \\ &= 15 \text{ นิ้ว} \end{aligned}$$

ปริมาตรของแกนเหล็ก

$$V = M_p \times A$$

$$= 15 \times 6.25$$

$$= 93.75 \text{ ลูกบาศก์นิ้ว}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิใช้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักของแกนเหล็ก ( $W_t$ )

$$\begin{aligned}
 W_t &= V \times 0.27 \\
 &= 93.75 \times 0.27 \\
 &= 25.31 \text{ ปอนด์} \\
 &\text{หรือ ประมาณ } 11.40 \text{ กิโลกรัม}
 \end{aligned}$$

ส่วนที่สูญเสียในแกนเหล็กทั้งหมด

$$\begin{aligned}
 \text{total iron loss} &= 0.27 \times w_t \\
 &= 0.27 \times 25.31 \\
 &= 6.83 \text{ วัตต์}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{พลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียทั้งหมด} &= \text{ส่วนที่สูญเสียในทองแดง} + \text{ส่วนที่สูญเสียที่แกนเหล็ก} \\
 &= 6.83 + 41.75 \\
 &= 48.58 \text{ วัตต์}
 \end{aligned}$$

$$\text{ประสิทธิภาพของหม้อแปลง} = \frac{1100}{1100 + 48.58} \times 100 = 95\%$$

$$\begin{aligned}
 \text{เปอร์เซ็นต์ Regulation} &= \frac{100(226.58 - 220)}{220} \\
 &= 2.99\%
 \end{aligned}$$

10. ทดสอบว่าสามารถที่จะพันขดลวดลงใน window ของแกนเหล็กได้หมดหรือเปล่า
11. ทำการพันหม้อแปลง
12. ลงแกนเหล็กแล้วอัดให้แน่น
13. ทดสอบว่าลวดกราวด์หรือเปล่า
14. ทำการจ่ายไฟแล้ววัดค่าแรงดันได้ตามต้องการหรือไม่
15. ทำการอบหม้อแปลงเพื่อไล่ความชื้น
16. อาบน้ำยาวานิช
17. นำไปอบอีกครั้ง
18. นำมาทดสอบแบบเปิดวงจร และปิดวงจรเพื่อหาคุณสมบัติของหม้อแปลง
19. นำค่าที่คำนวณได้บันทึกลงใน Trasformer design sheet.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### TRANSFORMER DESIGN SHEET

Input volts	220	Hertz	50	Est. Efficiency	95 %	Turns/volt		
Lamination or core No.							B	10,000
Window dimensions	G	3/8	F	2 1/2	W	1 1/4 x 3 3/4	M	15
C.S.A. dimensions	E	2 1/2	D	2 1/2	e	6.25	v	93.75
	W1	25.31	Watts/lb		Iron loss	6.83		
<b>Windings</b>	W1	W2						
Coil	PMW	SEC						
Volts	220	220						
Amperes	5	5						
Turns	246	255						
Gauge	16	16						
Turns/inch	16	16						
Margins	-	-						
Winding length (L)	3.38	3.38						
Turns/layer	53.98	53.98						
Number of layers	5	5						
<b>Build</b>								Total
Copper								
Paper								
Cover								
Total								
Bulge Percent								
Total (R)								
Bobbin _____ clearance _____								Total bobbin (R) Total depth
<b>Losses</b>								
Length mean turn (M)								
Total wire length (Inches)								
Ohms/ft								
Resistance (hot)								
Voltage drop								
Copper loss (I <sup>2</sup> R)								
								Iron loss Total loss Efficiency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### วงจรเรียงกระแส

#### การออกแบบสำหรับ Rectifier ( Designing for Rectifier )

จนบัดนี้ เราได้สมมุติว่าหม้อแปลงต้องจ่ายไฟให้กับโหลดโดยตรงโดยวงจร rectifier ซึ่งถือว่าเป็นหนึ่งในชนิดของ load ที่ธรรมดาที่สุดของหม้อแปลง

ปัญหาพื้นฐานของวงจรเหล่านี้ก็คือ ในการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า ac ไปเป็น dc นั้น มันได้ทำให้เกิดการบิดเพี้ยนขึ้นอย่างมากกับกระแสที่ไหลในขดลวด ซึ่งทำให้เกิดความร้อนเป็นจำนวนมากกว่า เมื่อกระแสเป็นรูป sine บริสุทธิ์. และจะส่งผลถึงด้านอื่นด้วย นั่นก็หมายความว่า การออกแบบหม้อแปลงสำหรับ Rectifier ต้องมีพิคัด VA สูงกว่าสำหรับโหลดโดยตรง

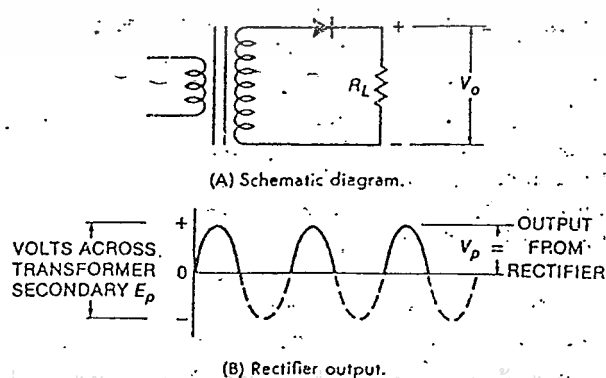
คุณลักษณะเฉพาะของวงจร Rectifier ชนิดต่าง ๆ ที่ถูกพิจารณาในการออกแบบหม้อแปลงจะเหมือนกัน ยิ่งไปกว่านั้น ก็มักจะมีการใช้ smoothing filter รูปแบบใดรูปแบบหนึ่งระหว่าง rectifier กับ load ซึ่งแต่ละแบบก็จะส่งผลถึงสภาวะที่แตกต่างกันไปบนหม้อแปลง

#### วงจรครึ่งคลื่น ( Half - wave circuit )

รูปที่ 2.1 A แสดงวงจรที่ง่ายที่สุดของ rectifier แรงดันไฟสลับที่ตกคร่อม ทางด้าน secondary จะเปลี่ยนชั่วด้วยความถี่ของแหล่งจ่าย ไดโอดจะนำกระแสเมื่อปลายบนของขดลวดเป็นบวก และจะหยุดนำกระแสเมื่อเป็นลบ นั่นคือ จะตัดเอาครึ่งลบของรูปคลื่นออก ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อม  $R_L$  จะมีเฉพาะคลื่นบวก ดังรูป 2.1 B ซึ่งก็จะเป็นแรงดัน d.c. ถึงแม้ว่าจะมีขนาดเปลี่ยนแปลงจากศูนย์ถึงค่าสูงสุด. เพราะมันอยู่ในทิศทางเดียวกันตลอด

เพื่อหลีกเลี่ยงความสับสน ของการใช้สัญลักษณ์ต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ จึงได้กำหนดสัญลักษณ์ต่าง ๆ ดังนี้

$E_p$	คือ	แรงดันยอดของไฟสลับด้าน Secondary
$E_{av}$	คือ	ค่าเฉลี่ยไฟสลับด้าน Secondary
$E_{rms}$	คือ	ค่ายังผลของไฟสลับด้าน Secondary
$V_p$	คือ	แรงดันยอดของแรงดัน d.c. output
$V_{av}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของแรงดัน d.c. output



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1

Half - wave rectifier circuit

วงจรนี้จะใช้แรงดันทางด้าน Secondary เพียงครึ่งเดียวโดยได้ละเลยค่าความต้านทานใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นในวงจร ค่าแรงดัน  $V_p$  จะเหมือนกับแรงดันยอด a.c.  $E_p$  ที่คร่อมขดลวด Secondary โดยมีค่าเฉลี่ยของแรงดัน Sine wave ครึ่งคลื่น คือ  $E_{av} = E_p / \pi$  ดังนั้น  $V_{av} = V_p / \pi$  หรือ  $V_p = V_{av} \cdot \pi$  จะเห็นได้ชัดเจนว่า ค่าแรงดันยอดไฟตรง  $V_p$  จะเท่ากับค่ายอดของแรงดันเต็มคลื่น  $E_p$  ที่ตกคร่อมขด Secondary นั่นคือ  $E_p = V_{av} \cdot \pi$  ด้วย

ค่า rms ของแรงดัน Secondary เต็มคลื่น  $E_{rms}$  คือ

$$\text{หรือเพราะว่า } E_p = V_p = V_{av} \cdot \pi$$

จะเห็นว่าแรงดันไฟตรงเอาท์พุทเฉลี่ยของวงจรจะมีค่าเพียง 0.45 ของแรงดัน rms ของไฟสลับทางด้าน Secondary หรืออาจจะกล่าวได้ว่า สำหรับค่าเฉลี่ย d.c.  $V_{av}$  ที่ให้มาจะต้องมีค่าแรงดันไฟสลับ rms,  $E_{rms}$  มากเป็น 2.22 เท่า

ค่าประสิทธิภาพ ซึ่งก็คือ dc power output หารด้วย ac power input มีค่าประมาณ 0.4 สามารถเขียนในรูปพีชคณิตได้ดังนี้

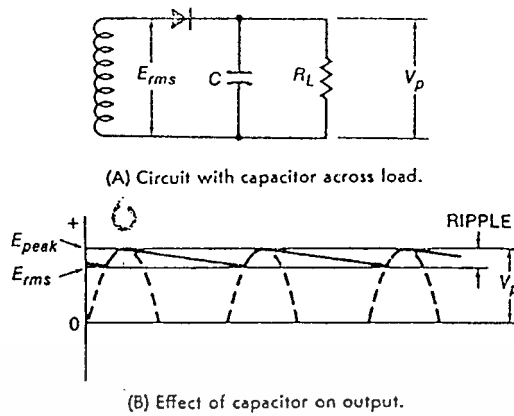
$$\frac{\text{dc power output}}{\text{ac power input}} = 0.4$$

หรือ

ตามสมการนี้ยังไม่คำนึงถึงการสูญเสียในขดลวดและแกนเหล็ก ซึ่งจะลดประสิทธิภาพของวงจรลงไปอีก ยิ่งไปกว่านั้น เนื่องจากกระแสไหลทางเดียวจะทำให้เกิดการอิมิตัวทางแม่เหล็กในแกนเหล็กได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาท์พุท วงจรในลักษณะนี้จะมีใช้งานน้อย โดยทั่วไปเราต้องการเอาท์พุทที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และจะทำได้โดยการใช่วงจร filter คือ การต่อ Capacitor คร่อม load ดังรูป 2.2 A

ผลของ Capacitor จะทำให้เกิดความเรียบขึ้นดังรูป 2.2 B โดยมันจะ charge ในระหว่าง Conducting period ของ rectifier และ discharge ผ่าน load ในระหว่าง cut-off period ที่สำคัญไปกว่านั้น แรงดัน dc ที่เรียบจะมีค่าสูงเกินกว่าค่าแรงดัน rms ทางด้าน Secondary โดยจะมีค่าขึ้นอยู่กับ ค่าของ c และ โหลด RL รวมทั้งค่า impedance ของหม้อแปลง และความต้านทานต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ในวงจร โดยจะปรากฏเป็นการขยายแรงดัน เพราะ c จะ charge จนกระทั่งถึงค่า peak ของแรงดัน a.c. ที่จ่ายเข้ามา ซึ่งจะมีค่า 1.414 เท่าของค่า rms.

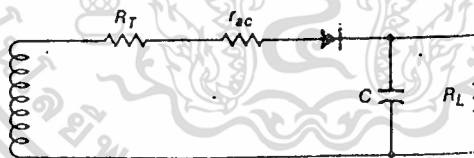
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 Rectifier circuit with filter

สมมุติว่าในรูป 2.2 A แรงดัน Secondary มีค่า 7 Vrms ถ้าไม่ได้ต่อ load  $R_L$  ไว้ Capacitor จะ charge ไปสู่ค่ายอดของแรงดัน ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ  $1.414 \times 7.0 = 9.89$  โวลท์ เมื่อต่อโหลดเข้าไป กระแสจะถูกจ่ายจาก Capacitor และแรงดันจะตกลง แต่ถ้ากระแสมีค่าไม่มากนัก แรงดัน d.c. ก็ยังมีค่าสูงกว่าแรงดัน rms ของ Secondary อยู่ ในการออกแบบหม้อแปลงสำหรับวงจรนี้ จำเป็นต้องคำนึงถึงผลอันนี้ด้วย

ในรูป 2.3  $R_T$  จะแทนความต้านทานทั้งหมดของหม้อแปลงที่มองโดย load ในทิศทางเข้าไปสู่ขด Secondary ค่าความต้านทานที่ต่ออยู่ในอีกด้านหนึ่งของหม้อแปลงด้วย โดยจะรวมทั้งค่าความต้านทานที่ต่ออยู่กับขดลวด และความต้านทานของขดลวดเอง นั่นคือ รูป 2.3  $R_T$  คือ ผลรวมของความต้านทานของขด Primary ที่ย้ายไปยังขดลวด Secondary ดังนี้



รูปที่ 2.3 What load  $R_L$  " sees " looking back into the secondary

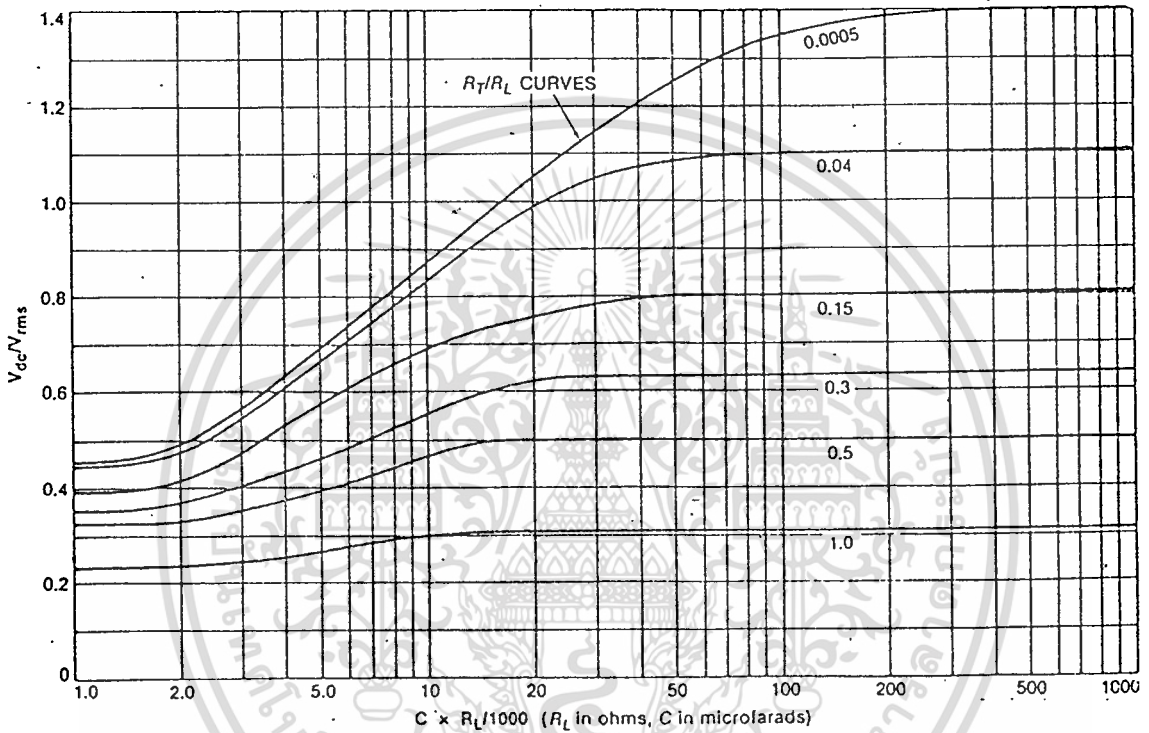
ค่าความต้านทาน a.c. ของวงจร rectifier แสดงได้ด้วย  $R_{ac}$  โดยปกติในวงจรที่ใช้อุปกรณ์ Solid - State จะละเลยไม่ได้ เพราะ  $R_{ac}$  จะแปรค่าไปกับ Forward current และอุณหภูมิ และเขียนเป็นสมการของ  $r_{ac}$  ได้ คือ

$$\text{เมื่อ } T = \text{อุณหภูมิ ( } ^\circ\text{C )}$$

$$I = \text{กระแส (mA)}$$

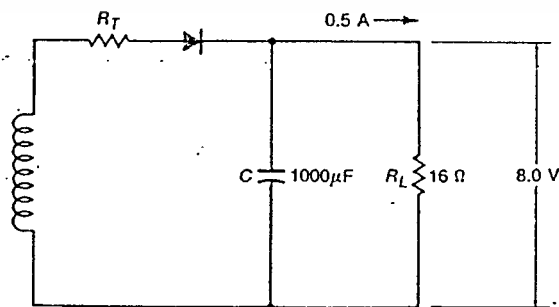
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟในรูป 2.4 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดัน rms ของขด Secondary และแรงดัน dc ที่ตกคร่อมโหลด กับค่า C , RT และ RL ค่า CXRL ที่มีค่าสูง และ RT / RL จะส่งผลให้ได้ค่าอัตราส่วน Vdc/Vrms สูง ซึ่งจะหมายความว่า แรงดันไฟตรงเอาท์พุท จะมีค่าสูงและแน่นอนกว่า อัตราส่วนนี้จะไม่สูงกว่า 1.414 (แรงดัน DC สูงสุด คือ 1.414 x Vrms ) จำไว้ว่า ข้อจำกัดนี้จะส่งผลถึงขีดจำกัดบนแกนตั้งของกราฟ ซึ่งการใช้กราฟจะเป็นไป ดังนี้



รูปที่ 2.4 Curve relate dc output to rms volts across the secondary for the half - wave case

ตัวอย่างที่ 1 หม้อแปลงที่ใช้ในวงจร ดังรูป 2.5 ต้องการแรงดัน dc output คือ 0.8 โวลต์ โดยโหลด RL มีความต้านทาน 16 โอห์ม มีกระแส 0.5 แอมป์ Capacitor มีค่า 1000  $\mu F$  จงหาว่าแรงดัน ac ที่ขดลวด Secondary จะมีค่าเท่าไรที่ Full-load.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.5 Circuit for the first example

ณ จุดนี้เราไม่รู้ค่า Impedance ของหม้อแปลง ซึ่งจริง ๆ แล้ว จำเป็นต้องรู้แต่เราต้องเดาโดนอยู่บนพื้นฐานของความจริง แต่ในการออกแบบนี้ ไม่ต้องการความแน่นอนขนาดนั้น เราจึงเลือกอัตราส่วน  $R_T/R_L$  โดยให้มีค่าต่ำไว้ก่อน ซึ่งก็จะทำให้ Copper loss ต่ำด้วย อีกทั้งจะมี regulation ดี ฉะนั้นสมมุติว่าอัตราส่วน  $R_T/R_L = 0.04$  จนได้  $R_T = 0.04 \times 16 = 0.64 \Omega$

ผลคูณของ  $C_X \times R_L/1000$  จะเป็น  $1000 \times 16/1000 = 16$  เลือกค่านี้บนแกนนอนด้านล่าง แล้วดูที่แกนตั้ง จะอยู่ที่ Curve 0.04 จากนั้นก็เลื่อนไปตามแนวนอนไปที่แกน  $V_{dc}/V_{rms}$  และจะอ่านค่าได้ 0.925 ดังนั้นค่า terminal Voltage ของหม้อแปลง ขณะ Full load ที่ต้องการคือ

$$V_o = \frac{V_{dc} + I R_T}{0.925} = \frac{8 + (0.5 \times 0.64)}{0.925} = 8.99 \text{ โวลท์}$$

โดยที่  $I$  และ  $R_T$  จะมีค่าดังรูปที่ 2.5

ตัวอย่างที่ 2 การศึกษา curve จะแสดงให้เห็นถึงผลการใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีค่าต่าง ๆ กันไป ถ้ากระแสไหลลด มีค่า 4.0 แอมป์ แบะ  $R_T$  มีค่า 0.2 โอห์ม แล้ว  $R_T$  คือ  $8/4 = 2$  โอห์ม และ  $R_T/R_L$  จะเป็น  $0.2/2 = 0.1$  ผลคูณ  $C_X \times R_L/1000$  จะเป็น  $1000 \times 2/1000 = 2$  ซึ่งจะได้ค่า  $V_{dc}/V_{rms}$  ประมาณ 0.42 จะได้

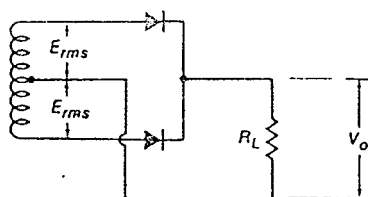
$$V_o = \frac{8 + (4 \times 0.2)}{0.42} = 20.95 \text{ โวลท์}$$

และอีกลักษณะหนึ่ง ถ้าทำให้กระแสไหลลดมีค่าลดลงเป็น 0.1 แอมป์ และเพิ่ม  $R_T$  เป็น 1.2 โอห์ม ซึ่งจะทำให้ค่าเป็น  $1000 \times 8/1000 = 80$  จะทำให้ได้  $V_{dc}/V_{rms}$  ประมาณ 1.13 นั่นคือ

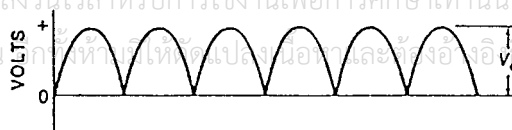
$$V_o = \frac{8 + (0.1 \times 1.2)}{1.13} = 7.19 \text{ โวลท์}$$

ซึ่งจะเป็นค่าแรงดัน Secondary ของหม้อแปลงขณะ Full load จากจุดนี้การออกแบบก็ทำไปตามวิธีปกติ โดยการเลือก wire gauges พ.ท.แกนเหล็ก จำนวนรอบและอื่น ๆ ต่อมาความต้านทานจริงของขดลวดก็จะต้องหาโดย  $R_T$  จะถูกคำนวณและเปรียบเทียบกับค่าเลือกใช้ในตอนเริ่มต้น จากนั้นก็จะทำการปรับแต่งให้เหมาะสมโดยยึดค่า  $R_T$  ใหม่ และกระทำซ้ำอีกครั้งหรืออาจอีกหลายครั้งถ้าจำเป็น

#### วงจร Full - wave แบบ Center - tapped



(A) With center-tapped secondary.



(B) Output voltage across  $R_L$ .

จากรูป 2.6 A เป็นวงจรที่นิยมใช้กัน โดยการใช้วงจร Half-wave 2 วงจรรวมกันเพื่อจะได้นำเอาแต่ละครึ่งไซเคิลของแรงดันทางด้าน Secondary มาใช้งานอันที่จริงการรวมแบบนี้จะมีคุณสมบัติของ Two - phase half wave circuit มากกว่าวงจร full - wave แม้ว่าผลที่ออกมาจะเป็นแบบ full-wave ก็ตาม

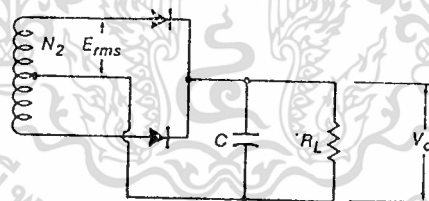
จากรูปคลื่นในรูป 2.6 B ครึ่งไซเคิลทั้งสองจะปรากฏที่ output แต่มีทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจะเกิดขบวนการของ ripple ณ ความถี่ 2 เท่า ของวงจร half-wave

$$E_{rms} = \frac{V_{av} \pi}{2\sqrt{2}} = 1.11 V_{av}$$

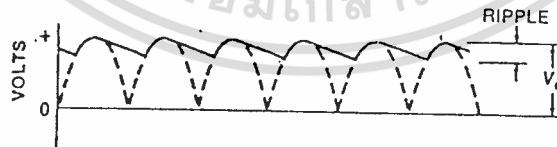
$$\text{หรือ } V_{av} = \frac{E_{rms}}{1.11} = 0.9 E_{rms}$$

โดย  $V_{av}$  คือ แรงดันไฟตรงเอาท์พุทเฉลี่ย  
 $E_{rms}$  คือ ค่า rms ของไฟ a.c ด้าน Secondary

เมื่อใช้วงจร fitter ดังรูป 2.7 A เพื่อทำให้แรงดัน output เรียบโดยเลือกวิธีการใช้ Capacitor ซึ่งจะได้รูปคลื่นดังรูป 2.7 B และคุณลักษณะของกระแสในขดลวดด้าน Secondary ที่แสดงในรูป 2.8



(A) Schematic diagram.

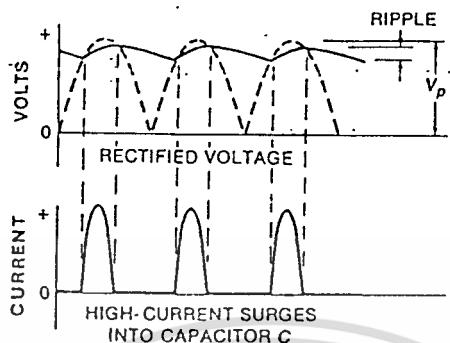


(B) Smoothed output waveform.

รูปที่ 2.7

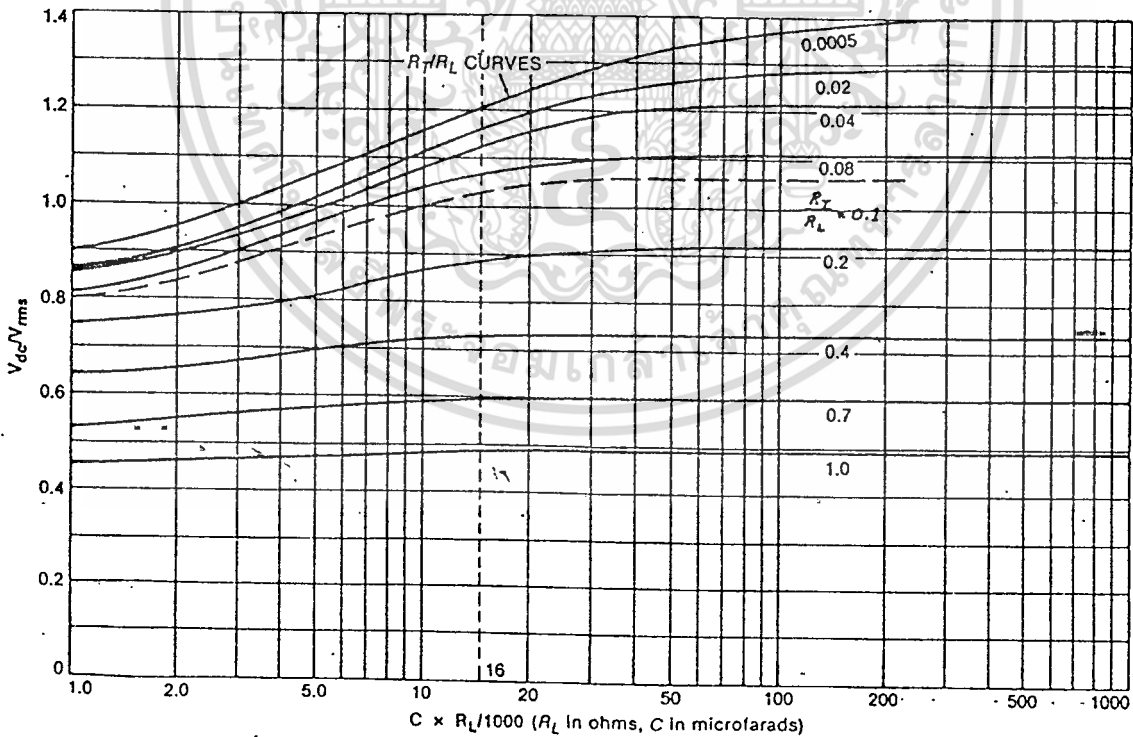
Full - wave rectifier with smoothing capacitor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

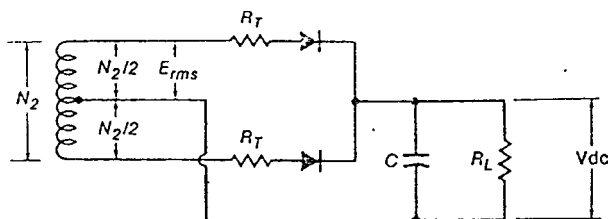


รูปที่ 2.8 waveform of full - wave rectifier

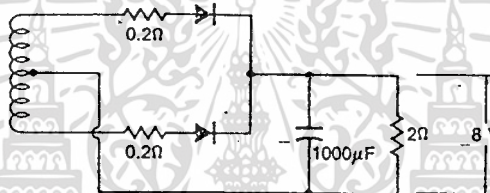
สำหรับรูปที่ 2.9 แสดงถึง curve ที่ใช้ในการออกแบบซึ่งจะเหมือนกันในกรณี half wave และปริมาณต่าง ๆ ที่จะพิจารณาได้แสดงไว้ในรูป 2.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 2.9 Curve relate dc volts output to rms volts on transformer secondary for full - wave case  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่นและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 Quantities related to curves in Fig. 2.9



รูปที่ 2.11 Valves for Example 3

RT ในกรณีนี้จะเป็นค่าความต้านทานที่ถูกมองเข้าไปยังครึ่งของขดลวด Secondary ดังนั้น turn ratio ที่จะใช้เพื่อคำนวณ RT จะเป็นครึ่งหนึ่งของ Secondary to primary turn ratio ทั้งหมด โดยค่าที่เหมือนกันของ Vrms ที่ถูกใช้ใน Voltage ratio Vdc/Vrms จะเป็นเพียงครึ่งของแรงดันทั้งหมดด้าน Secondary สำหรับค่าความต้านทาน ac ตัดทิ้งได้

ตัวอย่าง วงจรในรูป 2.11 จะใช้ค่าในตัวอย่างที่ 2 เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กัน โดย out put คือ 8 Vdc ที่กระแส 4 แอมป์ และ RL มีค่า 2 โอห์ม RT แต่ละตัวมีค่า 0.2 โอห์ม ดังนั้น RT/RL = 0.1 Capacitor C มีค่า 1000  $\mu$ F ดังนั้น CxRL/1000 จะมีค่าเท่ากับ 1000 x 2/1000 = 2 จะได้ RT/RL = 0.1 แสดงด้วยเส้นปะ และให้ Vdc/Vrms ratio ประมาณ 0.84

ฉะนั้นจะได้ Voltage ที่ terminal a จากสมการ

$$V_o = \frac{V_{dc} + (I_{dc} \cdot R_I)}{V_{dc}/V_{rms}}$$

$$= \frac{8 + (4 \times 0.2)}{0.84}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งนี้ อีกหนึ่งข้อสังเกตคือต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแรงดันทั้งหมด =  $10.47 \times 2 = 20.94$  หรือ = 21 โวลต์ (โดยประมาณ)

ในทางปฏิบัติ ค่า C จะใหญ่กว่านี้คือจาก 1000 ถึง 2000  $\mu\text{F}$  ต่อแอมป์ ถ้าใช้ 2000  $\mu\text{F}$ /แอมป์  
ฉะนั้นค่า C =  $4 \times 2000 = 8000 \mu\text{F}$  และ  $C \times RL/1000$  จะเป็น 16 และให้ RT/RL เท่ากับ 0.1 ได้ Vdc/Vrms 1.04

$$V_o = \frac{8 + (4 \times 0.2)}{1.04} = 8.46 \text{ โวลต์}$$

หรือ 16.9 โวลต์คร่อมขดลวดทั้งหมด

### Volt-Amperes และกระแส

ดังที่ทราบ ว่า ผลของความร้อนเนื่องจากการสูญเสีย  $I^2R$  ในขดลวดจะเป็นตัวกำหนด Volt-ampere capability ของหม้อแปลง ในทางปฏิบัติแน่นอนว่า rectifier transformer จะถูกออกแบบให้มี Volt-ampere capability มากกว่า Load watt ของมัน ดังนั้นเราจึงต้องออกแบบราวกับว่าเป็น resistive load แต่ต้องมีกำลังสูงกว่า

ค่า Power capability ของ rectifier transformer จะถูกกำหนดด้วยการเพิ่มของอุณหภูมิและค่าแรงดันตกที่ยอมรับได้ แต่โดยทั่วไปแล้วจะใช้ความหนาแน่นของกระแสเป็น 1000-1200  $\text{cm/A}$  สำหรับใช้ในการเลือกขนาดสาย เพื่อความปลอดภัย จะต้องทำการทดสอบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโดยวิธี soak test ด้วยความระมัดระวัง โดยมักจะใช้มือและจุ่มตรวจสอบความรู้สึกถึงความร้อนและกลิ่นเนื่องมาจากความร้อนที่สูงขึ้นก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Internationally accepted standards

## Equivalent Standards for Grain-oriented Electrical Steel Sheets

Thickness, mm	Japanese		U.S.A.		British		German	
	Nippon Steel	JIS C 2553 (1975)	AISI (1975)	BS 601: Part 2 (1973)	DIN 46400: Blatt 3 (1973)	W/kg	W/kg	
0.30	Z7H	1.13						
	Z8H	1.22						
	Z9	1.33	G09	1.33				
	Z10	1.47	G10	1.47	M-5 (0.97)	30M5 (0.97)	VM97-30 1.50	
			G11	1.62		30M6 (1.07)	(0.97)	
0.35	Z8H	1.26						
	Z9H	1.37						
	Z10	1.51	G10	1.51				
	Z11	1.66	G11	1.66	M-6 (1.11)	35M6 (1.11)	VM111-35 1.65	
			G12	1.83		35M7 (1.23)	(1.11)	

Core loss values shown are the guaranteed maximums in watts per kilogram at 1.7 tesla and 50 Hz. Values in parentheses are those at 1.5 tesla and 50 Hz.

## Equivalent Standards for Non-oriented Electrical Steel Sheets

Thickness, mm	Japanese		U.S.A.		British		German	
	Nippon Steel	JIS C 2552, C 2554 (1978)	AISI (1975)	BS 601: Part 1 (1973)	DIN 46400: Blatt 1 (1973)	W/kg	W/kg	
0.35	H 9	2.40	S09	2.40	M-15	2.53	Grade 250	2.50
	H10	2.65	S10	2.65	M-19	2.75	Grade 265	2.65
	H12	3.10	S12	3.10	M-27	3.13	Grade 315	3.15
	H14	3.60	S14	3.60	M-36	3.31	Grade 335	3.35
	H18	4.40	S18	4.40				
	H20	5.00	S20	5.00				
	H23	5.50	S23	5.50				
0.50	H 9	2.90	S09	2.90	M-15	2.93		
	H10	3.10	S10	3.10	M-19	3.03	V135-50A	3.30
	H12	3.60	S12	3.60	M-36	3.57	Grade 355	3.55
	H14	4.00	S14	4.00	M-43	4.01	Grade 400	4.00
	H18	4.70	S18	4.70			Grade 450	4.50
	H20	5.40	S20	5.40	M-45	5.31	V200-50A	4.70
	H23	6.20	S23	6.20			V230-50A	5.30
	H30	8.00	S30	8.00	M-47	8.01	V280-50A	6.00
H40	10.50	S40	10.50			V360-50A	8.10	
H50	13.00	S50	13.00					
H60	15.50	S60	15.50					

Core loss values shown are the guaranteed maximums in watts per kilogram at 1.5 tesla and 50 Hz.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	Mil	mm.	Cir. Mil	in <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	lb/1,000 ft	kg/km
-	-	8	-	160	4.064	25,600	.02011	12.97	77.50	115.30
-	-	-	4.0	157.5	4.000	24,806	.01948	12.57	75.08	111.80
9	-	-	-	148	3.759	21,900	.01720	11.10	66.29	98.68
-	7	-	-	144.3	3.665	20,822	.01635	10.55	63.01	93.79
-	-	9	-	144	3.658	20,736	.01629	10.52	62.78	93.52
-	-	-	3.5	137.8	3.500	18,989	.01491	9.621	57.46	85.53
10	-	-	-	134	3.404	17,960	.01410	9.098	54.34	80.88
-	8	-	-	128.5	3.264	16,512	.01297	8.368	49.99	74.39
-	-	10	-	128	3.251	16,384	.01287	8.302	49.60	73.81
-	-	-	3.2	126	3.200	15,876	.01247	8.042	48.06	71.49
11	-	-	-	120	3.048	14,400	.01131	7.297	43.59	64.87
-	-	11	-	116	2.946	13,456	.01057	6.818	40.74	60.61
-	9	-	-	114.4	2.906	13,087	.01028	6.632	39.62	58.96
-	-	-	2.9	114.2	2.900	13,042	.01024	6.605	39.47	58.72
12	-	-	-	109	2.769	11,880	.009331	6.020	35.96	53.52
-	-	12	-	104	2.642	10,816	.008495	5.481	32.74	48.73
-	-	-	2.6	102.4	2.600	10,486	.008246	5.309	31.78	47.29
-	10	-	-	101.9	2.588	10,384	.008156	5.262	31.43	46.78
13	-	-	-	95	2.413	9,025	.007088	4.573	27.32	40.65
-	-	13	-	92	2.337	8,464	.006648	4.289	25.62	38.13
-	11	-	-	90.74	2.305	8,234	.006467	4.172	24.92	37.09
-	-	2.3	-	90.55	2.300	8,199	.006439	4.155	24.82	36.94
14	-	-	-	83	2.108	6,889	.005411	3.491	20.85	31.04
-	12	-	-	80.81	2.053	6,530	.005129	3.309	19.77	29.42
-	-	14	-	80	2.032	6,400	.005027	3.243	19.37	28.83
-	-	-	2.0	78.74	2.000	6,200	.004869	3.142	18.77	27.93
15	-	15	-	72	1.829	5,184	.004072	2.637	18.46	27.36
-	13	-	-	71.96	1.828	5,178	.004067	2.624	15.67	23.33
-	-	-	1.8	70.87	1.800	5,023	.003945	2.545	15.20	22.63
16	-	-	-	65	1.651	4,225	.003318	2.141	12.79	19.03
-	14	-	-	64.08	1.628	4,106	.003225	2.081	12.43	18.50
-	-	16	-	64	1.626	4,096	.003217	2.075	12.40	18.45
-	-	-	1.6	62.99	1.600	3,968	.003116	2.011	12.01	17.88
17	-	-	-	58	1.473	3,364	.002642	1.705	10.18	15.16
-	15	-	-	57.07	1.450	3,257	.002558	1.650	9.859	14.67
-	-	17	-	56	1.422	3,136	.002463	1.589	9.493	14.13
-	-	-	1.4	55.12	1.400	3,038	.002386	1.539	9.196	13.68
-	16	-	-	50.82	1.291	2,583	.002029	1.309	7.820	11.64
18	-	-	-	49	1.245	2,401	.001886	1.217	7.269	10.82
-	-	18	-	48	1.219	2,304	.001810	1.167	6.976	10.38
-	-	-	1.2	47.24	1.200	2,232	.001753	1.131	6.756	10.06
-	17	-	-	45.26	1.150	2,048	.001608	1.037	6.197	9.219
19	-	-	-	42	1.067	1,764	.001385	0.8938	5.388	7.946
-	18	-	-	40.30	1.024	1,624	.001275	0.8226	4.914	7.313
-	-	19	-	40	1.016	1,600	.001257	0.8107	4.845	7.207

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gaugo				Diamotor		Sectional area			Weight	
B.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	Mil	mm.	Cl. Mil	ln <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	Hr/1,000 ft	kg/km
--	--	--	1.0	.39.37	1.000	1,550	.001217	0.7854	4.690	6.982
--	--	20	--	.36	0.9144	1,296	.001018	0.6576	3.923	5.838
--	19	--	--	.35.89	0.9116	1,288	.001012	0.6529	3.900	5.804
--	--	--	.90	.35.43	0.9000	1,255	.0009857	0.6362	3.799	5.656
20	--	--	--	.35	0.8890	1,225	.0009621	0.6207	3.708	5.518
21	--	21	--	.32	0.8128	1,024	.0008042	0.5189	3.099	4.613
--	20	--	--	.31.96	0.8118	1,021	.0008019	0.5174	3.091	4.600
--	--	--	.80	.31.50	0.8000	992.3	.0007794	0.5027	3.004	4.469
--	21	--	--	.28.46	0.7229	810	.0006362	0.4105	2.452	3.649
22	--	22	--	.28	0.7112	784	.0006158	0.3973	2.373	3.532
--	--	--	.70	.27.56	0.7000	759.6	.0005966	0.3848	2.299	3.421
--	--	--	.65	.25.59	0.6500	654.8	.0005143	0.3318	1.982	2.950
--	22	--	--	.25.35	0.6438	642.6	.0005047	0.3256	1.945	2.895
23	--	--	--	.25	0.6350	625	.0004909	0.3167	1.892	2.816
--	--	23	--	.24	0.6096	576	.0004524	0.2919	1.744	2.595
--	--	--	.60	.23.62	0.6000	557.9	.0004382	0.2827	1.689	2.513
--	23	--	--	.22.57	0.5733	509.4	.0004001	0.2581	1.542	2.295
24	--	24	--	.22	0.5583	484	.0003801	0.2452	1.465	2.180
--	--	--	.55	.21.65	0.5500	468.7	.0003681	0.2376	1.419	2.112
--	24	--	--	.20.10	0.5106	404	.0003173	0.2047	1.223	1.820
25	--	25	--	.20	0.5080	400	.0003142	0.2027	1.211	1.802
--	--	--	.50	.19.69	0.5000	387.7	.0003045	0.1963	1.174	1.745
26	--	26	--	.18	0.4572	324	.0002545	0.1642	0.9809	1.460
--	25	--	--	.17.90	0.4547	320.4	.0002516	0.1623	0.9697	1.443
--	--	--	.45	.17.72	0.4500	314	.0002466	0.1590	0.9504	1.414
--	--	27	--	.16.4	0.4166	269	.0002113	0.1363	0.8444	1.212
27	--	--	--	.16	0.4064	256	.0002011	0.1297	0.7750	1.153
--	26	--	--	.15.94	0.4049	254.1	.0001996	0.1288	0.7693	1.145
--	--	--	.40	.15.75	0.4000	248.1	.0001949	0.1257	0.7512	1.118
--	--	28	--	.14.8	0.3759	219	.0001720	0.1110	0.6629	0.9868
--	27	--	--	.14.20	0.3606	201.6	.0001583	0.1021	0.6101	0.9077
28	--	--	--	.14	0.3556	196	.0001539	0.09932	0.5931	0.8330
--	--	--	.35	.13.78	0.3500	189.9	.0001491	0.09621	0.5746	0.8553
--	--	29	--	.13.6	0.3454	185	.0001453	0.09372	0.5600	0.8332
29	--	--	--	.13	0.3302	169	.0001327	0.08563	0.5114	0.7613
--	28	--	--	.12.64	0.3211	159.8	.0001255	0.08097	0.4837	0.7198
--	--	--	.30	.12.60	0.3200	158.8	.0001246	0.08042	0.7806	0.7149
--	--	30	--	.12.4	0.3150	153.8	.0001208	0.07791	0.4656	0.6926
30	--	--	--	.12	0.3048	144	.0001131	0.07297	0.4359	0.6487
--	--	31	--	.11.6	0.2946	134.6	.0001057	0.06818	0.4074	0.6061
--	--	--	.29	.11.42	0.2900	130.4	.0001024	0.06605	0.3947	0.5872
--	29	--	--	.11.26	0.2859	126.8	.00009959	0.06425	0.3838	0.5712
--	--	32	--	.10.8	0.2743	116.6	.00009158	0.05913	0.3530	0.5257
--	--	--	.26	.10.24	0.2600	104.9	.00008239	0.05309	0.3175	0.4720
--	30	--	--	.10.03	0.2546	100.6	.00007901	0.05097	0.3045	0.4531

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	Mil	mm.	Cir. Mil	in <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	lb/1,000 ft	kg/km
31	-	33	-	10	0.2540	100	.00007954	0.05067	0.3027	0.4505
-	-	34	-	9.2	0.2337	84.64	.00006648	0.04289	0.2562	0.3813
-	-	-	.23	9.055	0.2300	81.99	.00006440	0.04155	0.2482	0.3694
32	-	-	-	9	0.2286	81.102	.00006362	0.04104	0.2452	0.3649
-	31	-	-	8.928	0.2238	79.71	.00006260	0.04039	0.2413	0.3591
-	-	35	-	8.4	0.2134	70.56	.00005542	0.03575	0.2136	0.3178
33	-	-	-	8	0.2032	64	.00005027	0.03243	0.1937	0.2883
-	32	-	-	7.950	0.2019	65.20	.00004964	0.03203	0.1913	0.2847
-	-	-	.20	7.874	0.2000	62	.00004869	0.03142	0.1877	0.2793
-	-	36	-	7.6	0.1930	57.76	.00004536	0.02927	0.1748	0.2602
-	-	-	.18	7.087	0.1800	50.23	.00003945	0.02545	0.1520	0.2263
-	33	-	-	7.080	0.1798	50.13	.00003937	0.02540	0.1517	0.2258
34	-	-	-	7	0.1778	49	.00003848	0.02483	0.1483	0.2207
-	-	37	-	6.8	0.1727	46.24	.00003632	0.02343	0.1400	0.2083
-	34	-	-	6.305	0.1601	39.75	.00003122	0.02014	0.1203	0.1790
-	-	-	.16	6.299	0.1600	39.68	.00003116	0.02011	0.1201	0.1788
-	-	38	-	6	0.1524	36	.00002827	0.01824	0.1090	0.1622
-	35	-	-	5.615	0.1426	31.53	.00002476	0.01597	0.09543	0.1420
-	-	-	.14	5.512	0.1400	30.38	.00002386	0.01539	0.09196	0.1368
-	-	39	-	5.2	0.1321	27.04	.00002124	0.01370	0.08186	0.1218
35	36	-	-	5.000	0.1270	25	.00001963	0.01267	0.07565	0.1126
-	-	40	-	4.8	0.1219	23.04	.00001810	0.01167	0.06976	0.1037
-	-	-	.12	4.724	0.1200	22.32	.00001753	0.01131	0.06756	0.1006
-	37	-	-	4.453	0.1131	19.83	.00001557	0.01005	0.06001	0.08934
-	-	41	-	4.4	0.1118	19.36	.00001521	0.009810	0.05812	0.08721
36	-	42	-	4	0.1016	16.00	.00001257	0.008107	0.04845	0.07207
-	38	-	-	3.965	0.1007	15.72	.00001235	0.007968	0.04760	0.07084
-	-	-	.10	3.937	0.1000	15.50	.00001217	0.007854	0.04690	0.06982
-	-	43	-	3.6	0.09114	12.96	.00001018	0.006567	0.03923	0.05838
-	39	-	-	3.531	0.08969	12.47	.000009794	0.006319	0.03775	0.05618
-	-	44	-	3.2	0.08138	10.24	.000008042	0.005819	0.03099	0.04613
-	40	-	-	3.145	0.07987	9.891	.000007768	0.005042	0.02994	0.04456
-	41	45	-	3.800	0.07113	7.842	.000006159	0.003973	0.02374	0.03532
-	42	-	-	2.494	0.06334	6.219	.000004884	0.003151	0.01882	0.02801
-	-	46	-	2.4	0.06096	5.760	.000004528	0.002929	0.01744	0.02595
-	43	-	-	2.221	0.05641	4.932	.000003873	0.002495	0.01498	0.02222
-	-	47	-	2	0.05080	4.000	.000003442	0.002027	0.01211	0.01802
-	44	-	-	1.987	0.05023	3.911	.000003072	0.001982	0.01184	0.01762
-	-	48	.05	1.969	0.05000	3.877	.000003045	0.001963	0.01174	0.01745
-	45	-	-	1.761	0.04473	3.102	.000002436	0.001572	0.009383	0.01398
-	-	48	-	1.6	0.04064	2.560	.000002041	0.001297	0.007750	0.01153
-	46	-	-	1.568	0.03984	2.460	.000001931	0.001246	0.007446	0.01108
-	47	-	-	1.397	0.03547	1.951	.000001532	0.0009884	0.005904	0.00878
-	48	-	-	1.241	0.03159	1.547	.000001215	0.0007833	0.004683	0.00696
-	-	49	-	1.2	0.03048	1.440	.000001131	0.0007297	0.004359	0.00648

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
D.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	Mil	mm.	Cir. Mil	in <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	lb/1,000 ft	kg/km
-	49	-	-	0.108	0.02813	1.277	.0000009635	0.0006216	0.003713	0.005526
-	-	50	-	1	0.02540	1.000	.0000007854	0.0005067	0.003027	0.004505
-	50	-	-	0.986	0.02505	0.9728	.0000007641	0.0004929	0.002945	0.004382

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่วนวิศวกรรมเพื่อการศึกษานาน นอนภายใต้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ควรแก้ไข ทุกสิ่งทุกอย่างให้สอดคล้องกับเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gaugo				Diamotor		Sectional area			Weight	
B.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	mm.G.	MH	mm.	Clr. MH	ln <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	lb/1,000 ft	kg/km
5/0	--	7/0	--	500	12.700	250,000	.1964	126.7	756.9	1,126
--	--	--	12	472.4	12.000	223,162	.1753	113.1	675.6	1,005
--	--	6/0	--	461	11.786	215,296	.1691	109.1	651.7	969.9
--	4/0	--	--	460	11.684	211,600	.1662	107.2	640.5	953
4/0	--	--	--	454	11.532	206,100	.1619	104.4	624	928.1
--	--	5/0	--	432	10.973	186,624	.1466	94.56	565	840.6
3/0	--	--	--	425	10.795	180,600	.1419	91.52	546.9	813.6
--	3/0	--	--	409.6	10.404	167,772	.1318	85.03	508	755.9
--	--	4/0	--	400	10.160	160,000	.1257	81.07	484.5	720.7
--	--	--	10	393.7	10.000	155,000	.1217	78.54	468	698.2
2/0	--	--	--	380	9.652	144,400	.1134	73.17	437.1	650.5
--	--	3/0	--	372	9.440	138,384	.1087	70.12	418.9	623.4
--	2/0	--	--	364.8	9.266	133,079	.1045	67.42	402.7	599.4
--	--	--	9	354.3	9.000	125,528	.09859	63.62	380	565.6
--	--	2/0	--	348	8.839	121,104	.09512	61.36	366.6	545.5
0	--	--	--	340	8.636	115,600	.09079	58.58	349.9	520.8
--	0	--	--	324.9	8.250	105,560	.08291	53.49	319.5	475.5
--	--	0	--	324	8.230	104,976	.08245	53.19	317.8	472.8
--	--	--	8	315	8.000	99,225	.07793	50.27	300.3	446.9
1	--	1	--	300	7.629	90,000	.07069	45.60	272.4	405.4
--	1	--	--	289.3	7.348	83,694	.06573	42.41	253.3	377
2	--	--	--	284	7.214	80,660	.06335	40.87	244.2	363.3
--	--	2	--	276	7.010	76,176	.05983	39.60	230.6	343.2
--	--	--	7	275.6	7.000	75,955	.05966	38.48	229.9	342.1
3	--	--	--	259	6.579	67,080	.05269	33.99	203.1	302.2
--	2	--	--	257.6	6.544	66,358	.05212	33.63	200.9	299.0
--	--	--	6.5	255.9	6.500	65,485	.05143	22.18	189.2	295
--	--	3	--	252	6.401	63,504	.04988	32.18	192.2	286.1
4	--	--	--	238	6.045	56,640	.04449	28.70	171.5	255.1
--	--	--	6.0	236.2	6.000	55,790	.04382	28.27	168.9	251.1
--	--	4	--	232	5.893	53,824	.04227	27.27	162.9	242.4
--	3	--	--	229.4	5.827	52,624	.04133	26.66	159.3	237
5	--	--	--	220	5.588	48,400	.03801	24.52	146.5	218
--	--	--	5.5	216.5	5.500	46,872	.03681	23.72	141.9	210.9
--	--	5	--	212	5.385	44,944	.03530	22.77	136	202.4
--	4	--	--	204.3	5.189	41,738	.03278	21.15	126.3	188
6	--	--	--	203	5.156	41,210	.03237	20.88	124.8	185.6
--	--	--	5.0	196.9	5.000	38,770	.03045	19.63	117.4	174.5
--	--	6	--	192	4.877	36,864	.02895	18.68	111.6	166.3
--	5	--	--	181.9	4.621	33,088	.02599	16.77	100.2	149.1
7	--	--	--	180	4.572	32,400	.02545	16.42	98.08	146
--	--	--	4.5	177.2	4.500	31,400	.02466	15.90	95.04	141.4
--	--	7	--	176	4.470	30,976	.02433	15.70	93.77	139.6
8	--	--	--	165	4.191	27,220	.02138	13.80	82.40	122.7
--	6	--	--	162	4.115	26,244	.02061	13.30	79.43	118.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Properties of Important Soft Magnetic Materials

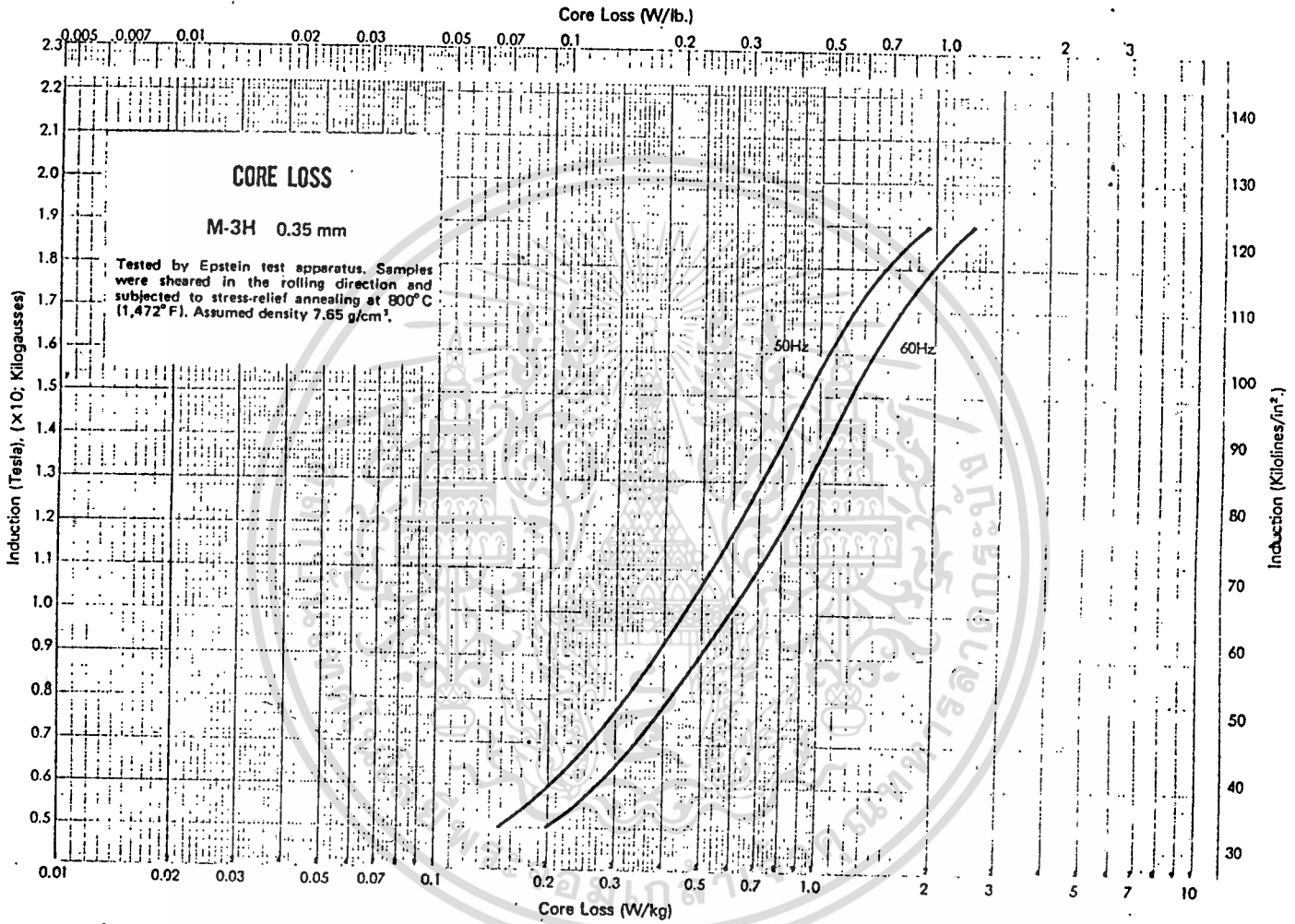
Properties								
Material	Approximate Composition, %	$B_p$ , kG	$B_R$ , kG	$H_c$ , Oe	Core Loss, W/lb	Permeability		Application Notes
						Initial	Maximum	
<i>Silicon Steels</i>								
0.014 in thick AISI M-6	Fe 97 Si 3	19	14	0.1	0.66 at 15 kG 60 Hz	350	50,000	Widely used for laminations and I bars at power and audio frequencies. Most effective when flux path is in direction of rolling.
0.012 in thick AISI M-5	Fe 97 Si 3	19	14	0.1	0.58 at 15 kG 60 Hz	350	50,000	Used in wound C cores mostly for operation at 50/60 Hz. Has low core losses at high flux densities.
0.0185 in thick AISI M-19	Fe 97 Si 3	19	—	0.5	0.80 at 10 kG 60 Hz	300	10,000	Used for laminations when higher core loss is acceptable. Less costly.
0.025 in thick AISI M-22	Fe 97 Si 3	19	—	0.6	0.9 at 10 kG 60 Hz	300	10,000	Higher losses and less costly than M-19.
0.004 in thick Grain-oriented	Fe 97 Si 3	19	14	0.4	10.0 at 15 kG 400 Hz	350	50,000	Widely used in wound cores cut and uncut at 400 Hz and higher frequencies.
0.002 in thick Grain-oriented	Fe 97 Si 3	19	14	0.5	14.0 at 10 kG 1.0 kHz	350	50,000	Used in wound cores cut and uncut for high-frequency and pulse use.
<i>Properties</i>								
Material	Approximate Composition, %	$B_p$ , kG	$B_R$ , kG	$H_c$ , Oe	Core Loss, W/lb	Permeability		Application Notes
						Initial	Maximum	
<i>Nickel-Iron Alloys</i>								
0.014 in thick 50% Ni	Fe 50 Ni 50	13	11	0.15	3.0 at 10 kG 400 Hz	5,000	40,000	Used in laminations to provide high permeability at high flux densities at audio frequencies.
0.006 in thick 50% Ni	Fe 50 Ni 50	13	11	0.15	2.0 at 10 kG 400 Hz	5,000	100,000	Applications similar to 0.014-in-thick material but lower losses at high frequencies. Labor cost of stacking laminations very high.
0.014 in thick 80% Ni	Fe 20 Ni 80	7.5	6	0.05	0.8 at 6 kG 400 Hz	30,000	100,000	Used in laminations to provide very high initial permeability. Losses high at high frequencies. Saturates at low flux density.
0.006 in thick 80% Ni	Fe 20 Ni 80	7.5	6	0.05	0.4 at 6 kG 400 Hz	30,000	60,000	Applications similar to 0.014-in-thick material with lower losses at high frequencies. Labor cost of stacking laminations very high.
0.004 in thick 80% Ni	Fe 20 Ni 80	7.5	6	0.05	8.0 at 6 kG 5 kHz	30,000	60,000	Used in wound cores cut and uncut to provide high permeability and low losses at high frequencies.
0.004 in thick Square loop Ni-Fe	Fe 50 Ni 50	15	14.5	0.11	1.3 at 10 kG 400 Hz	—	—	Used in saturating and switching devices. Square hysteresis loop suitable only in toroidal cores.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

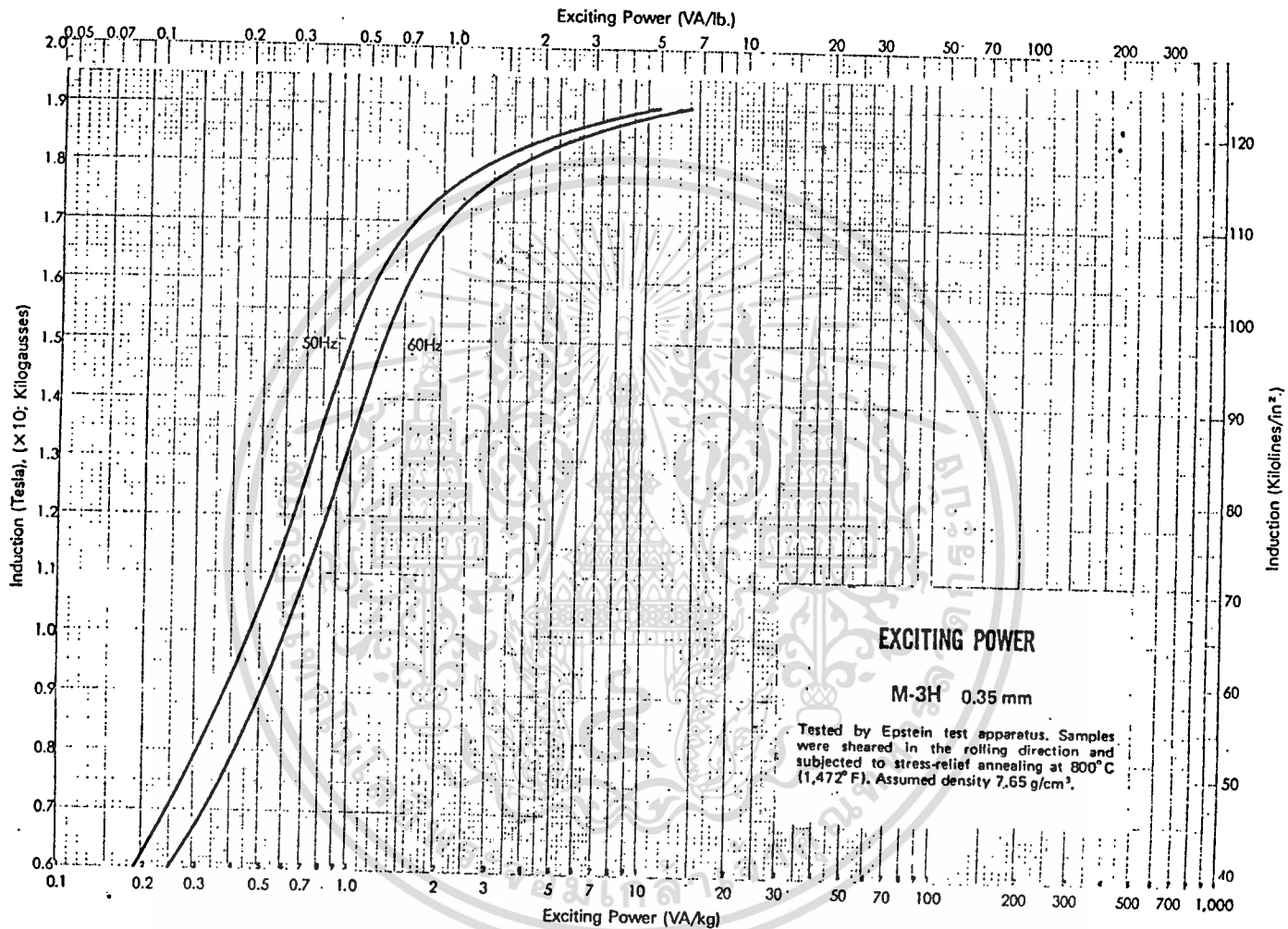
<i>Supermendur*</i>								
0.004 in thick	Fe 51 Co 49	22	21	0.2	14.0 at 20 kG 400 Hz	800	27,000	Used in wound cores providing highest saturation flux density. Very costly.
<i>Metallic Glass</i>								
0.001 in thick	Fe 81 B 13 Si 3.5	16	11	0.06	10.0 at 6 kG 10 kHz	2,500	100,000	Has low losses at high frequencies and high flux densities. Available in cut cores and toroids. Very costly. Under development.
<i>Powdered Alloys</i>								
	Variable Fe Ni Mo	8	—	—	9.0 at 1 kG 20 kHz	200	210	Used in high-frequency high-Q applications. Available in toroids and slugs.
<i>Ferrites</i>								
Mn-Zn	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·MnO Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·ZnO	4.5	1.0	0.2	0.05 W/cm <sup>3</sup>	2,700	4,800	Used in high-frequency and relatively high flux density applications. Available in pot cores and proprietary shapes.
Ni	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·NiO	3.2	2.6	4.0	—	120	150	Available in pot cores for use at frequencies into the megahertz range.

\*Registered trade name of Arnold Engineering Co.

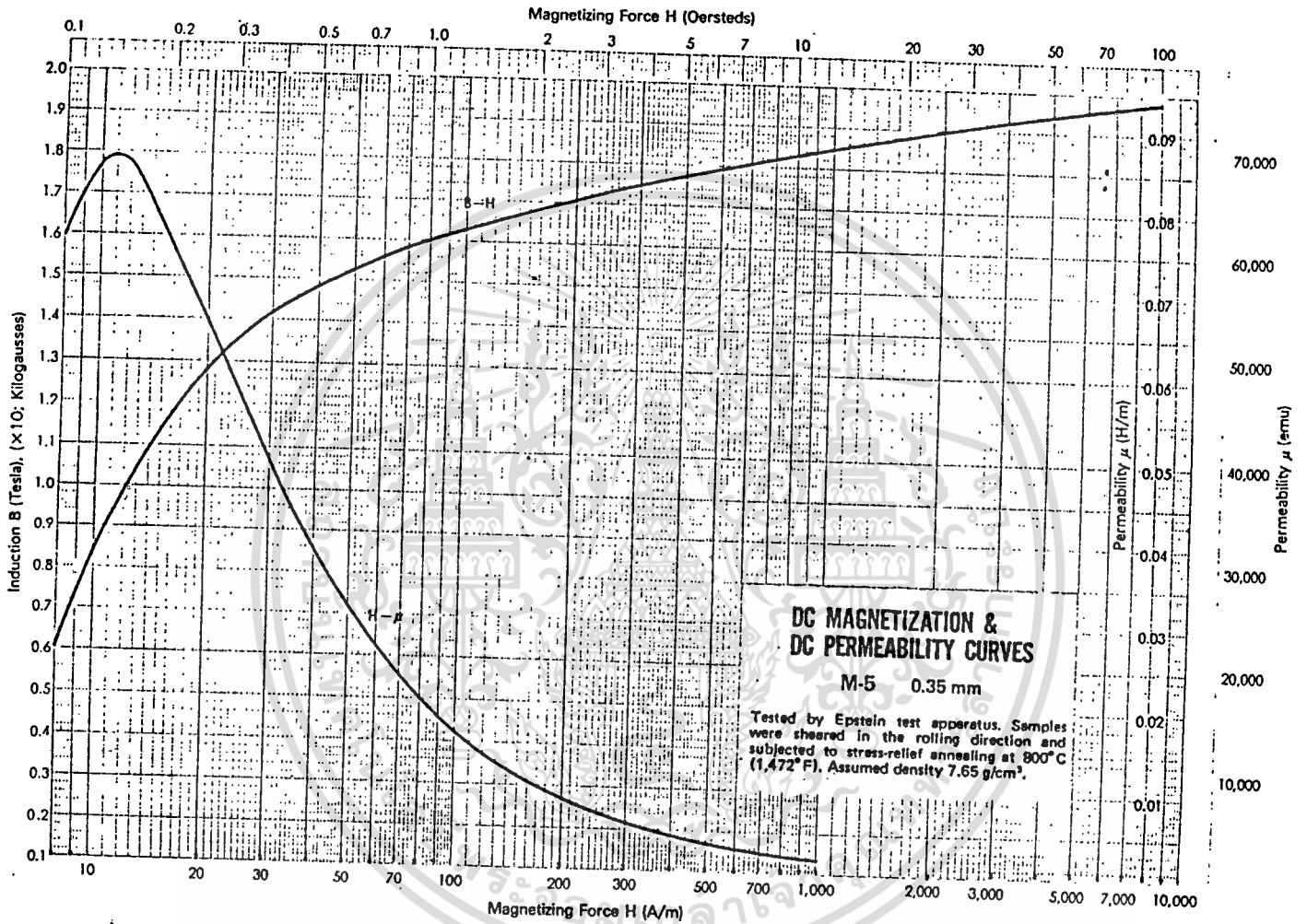
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



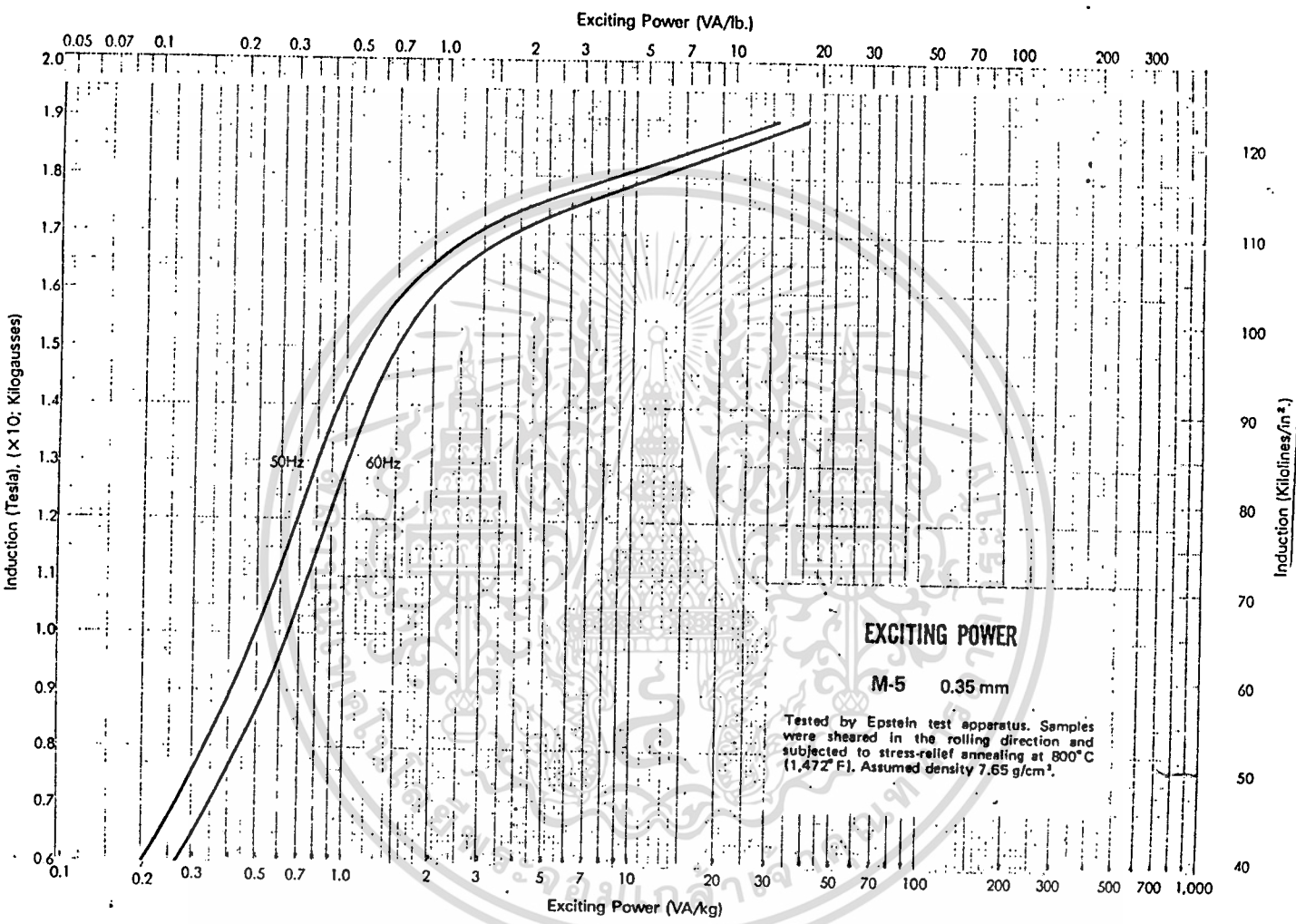
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



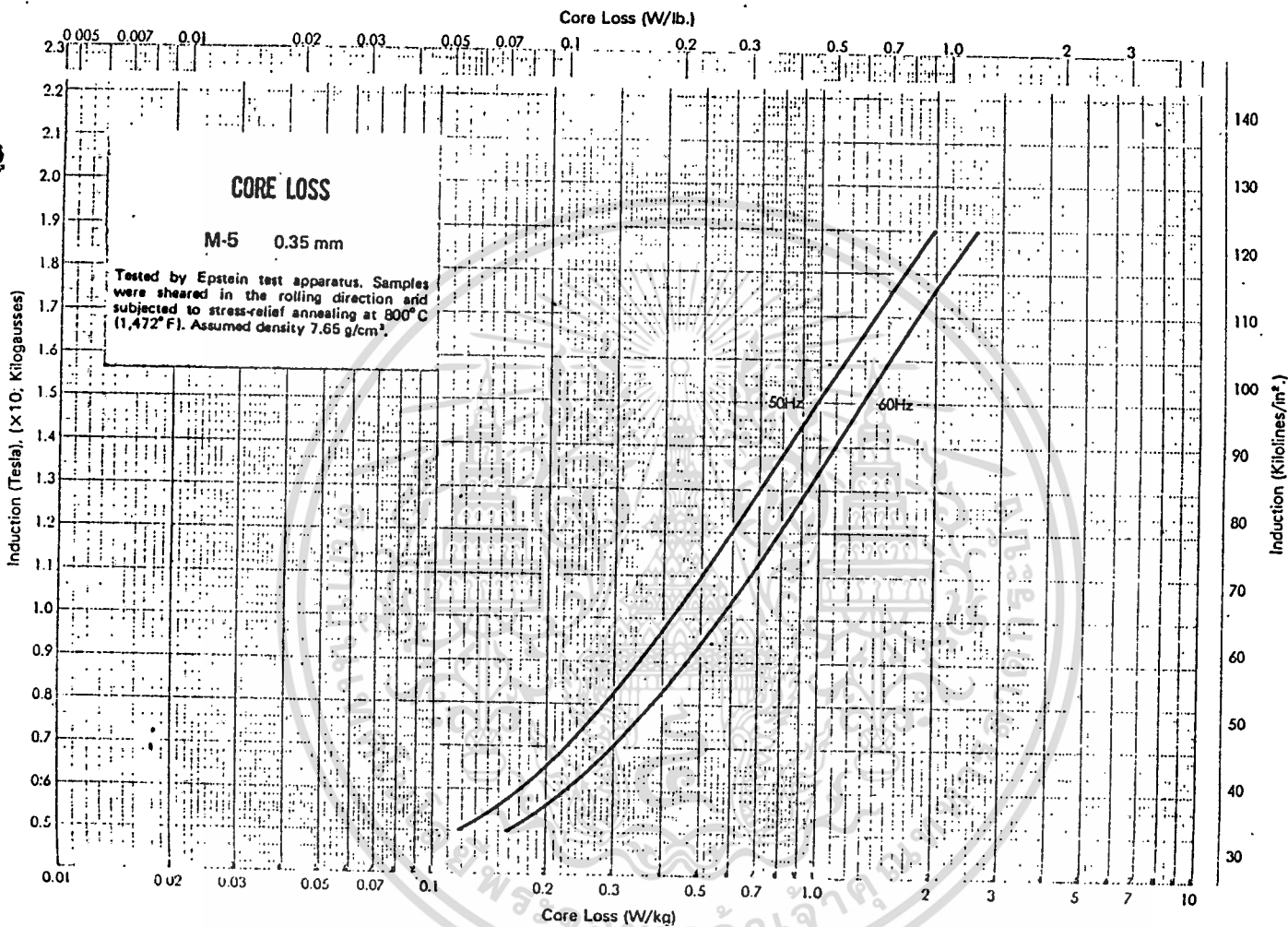
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



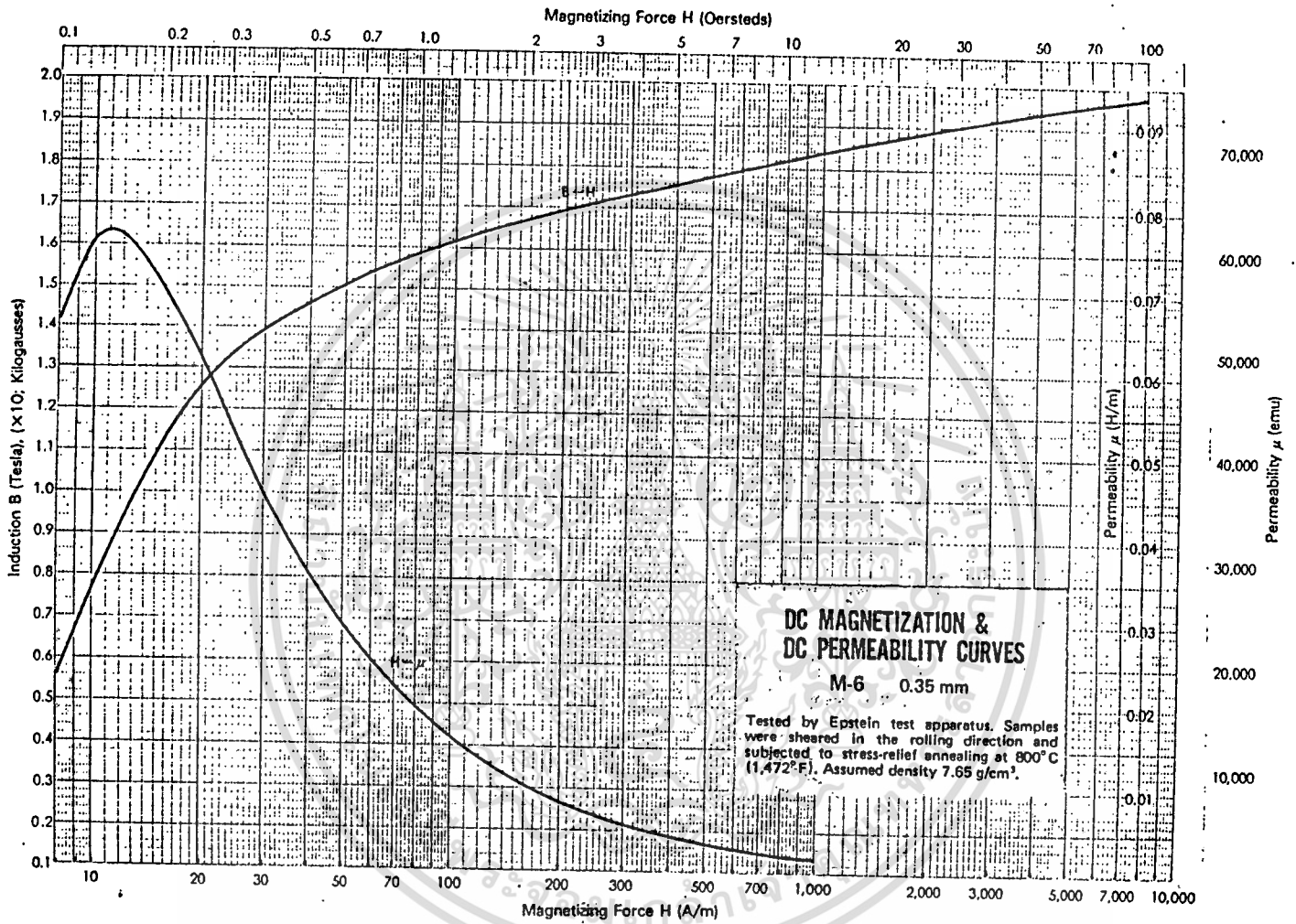
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



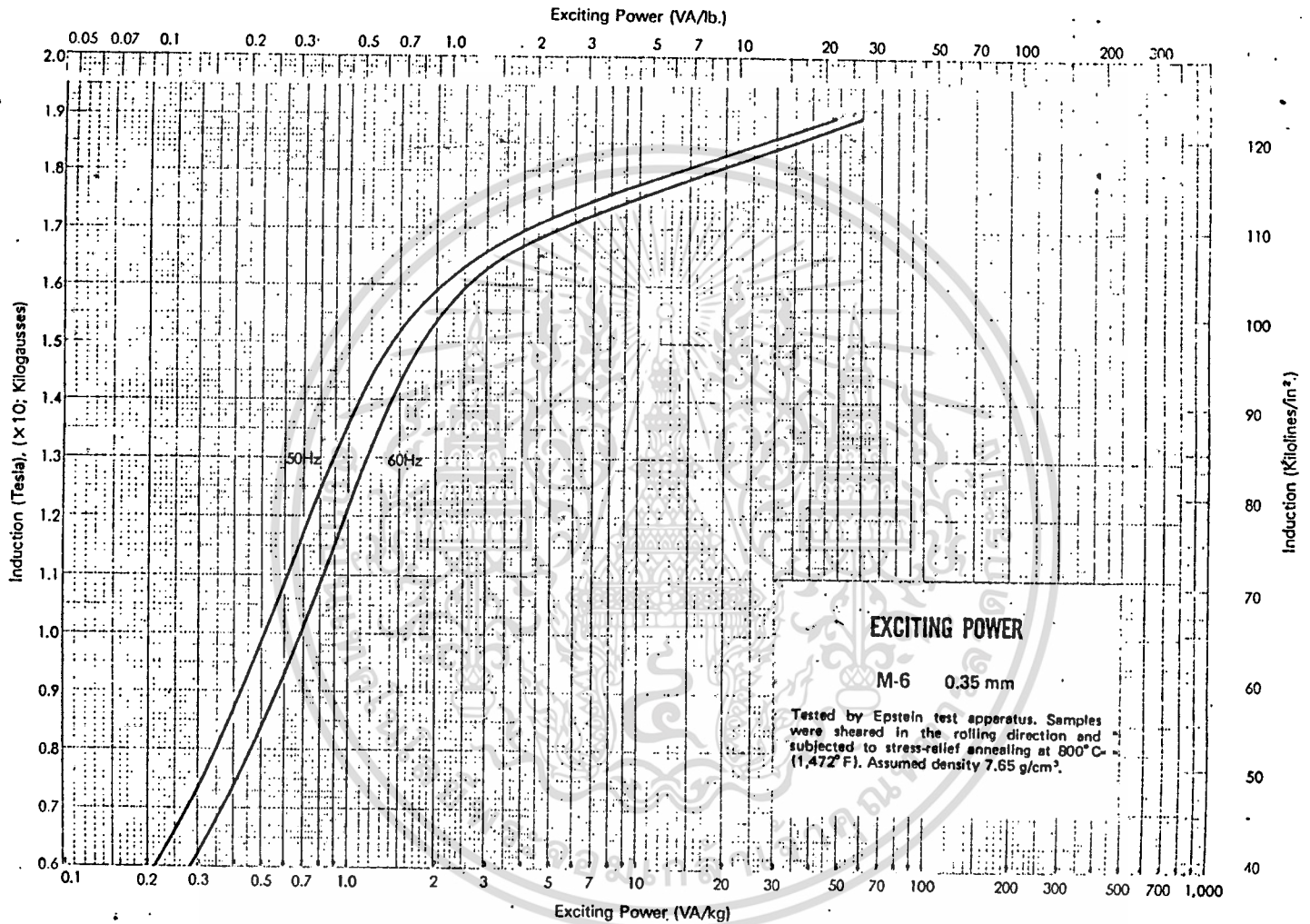
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



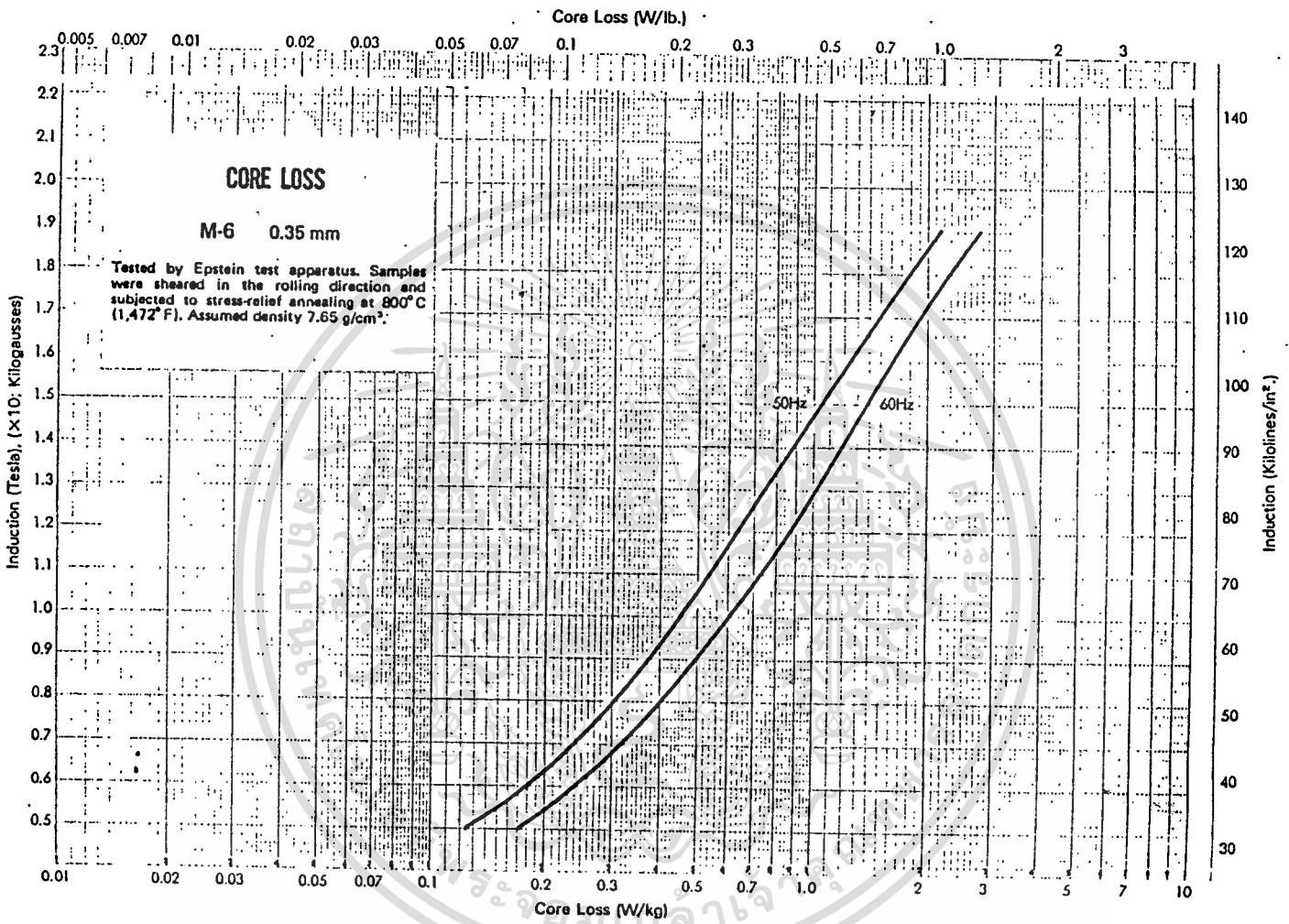
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



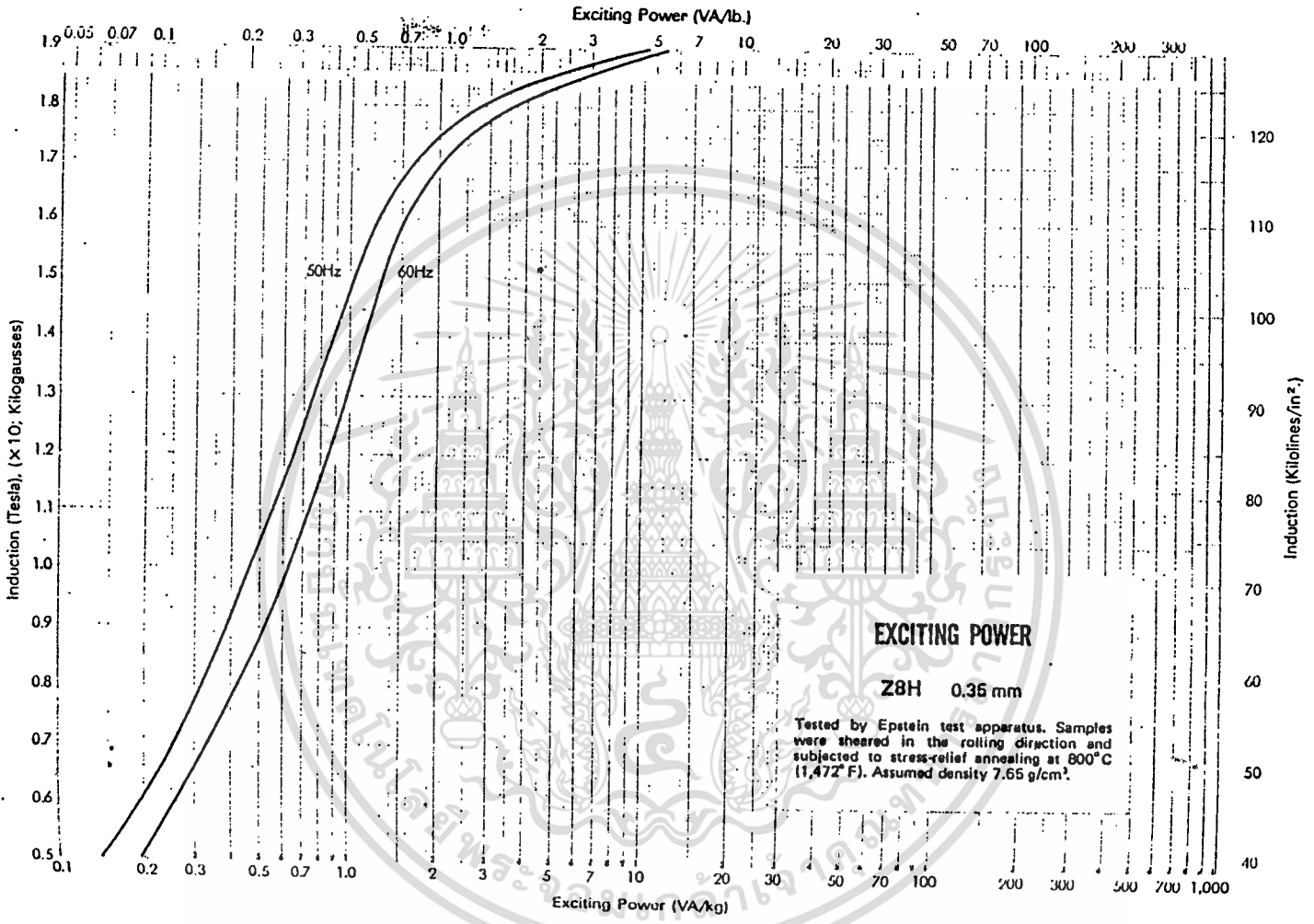
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



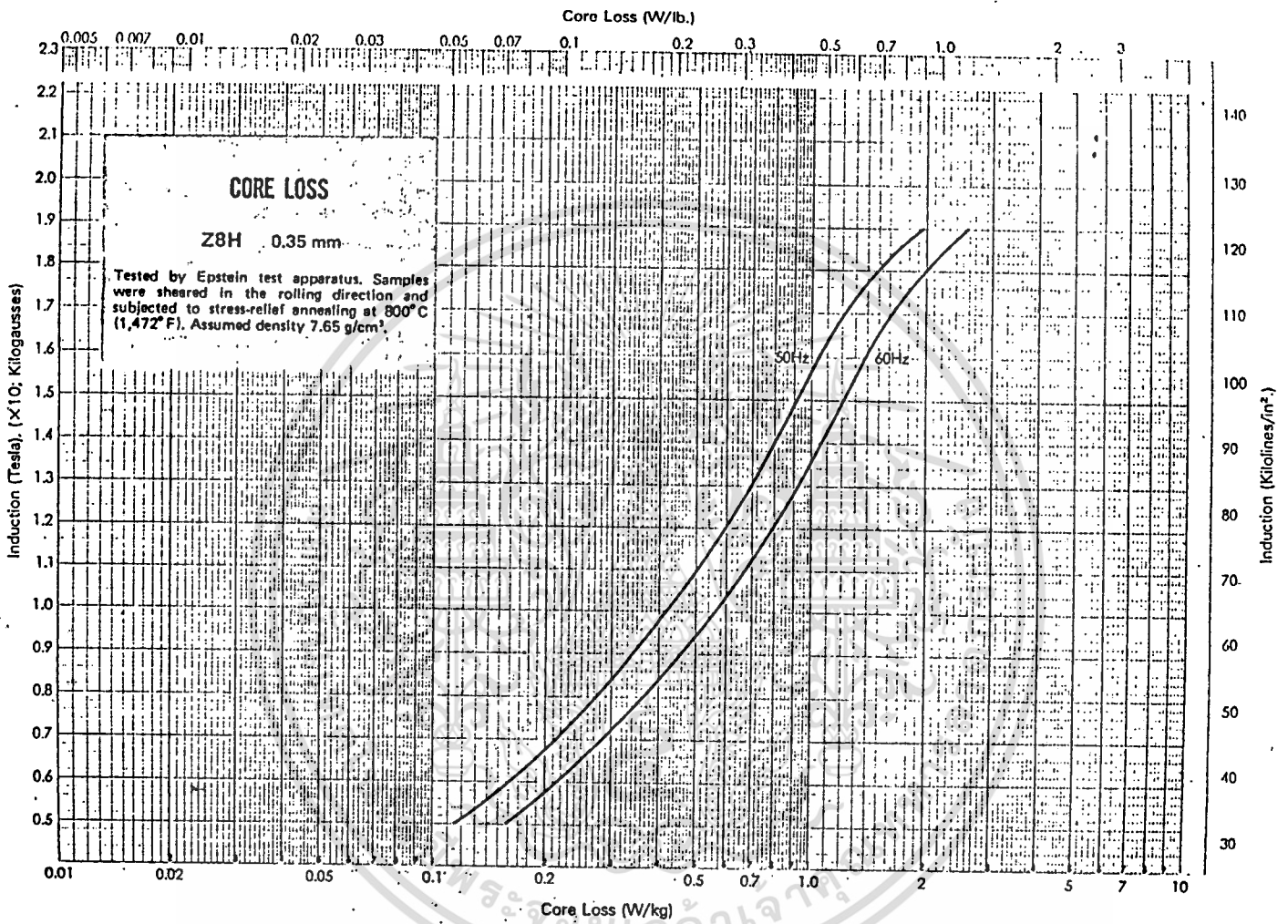
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



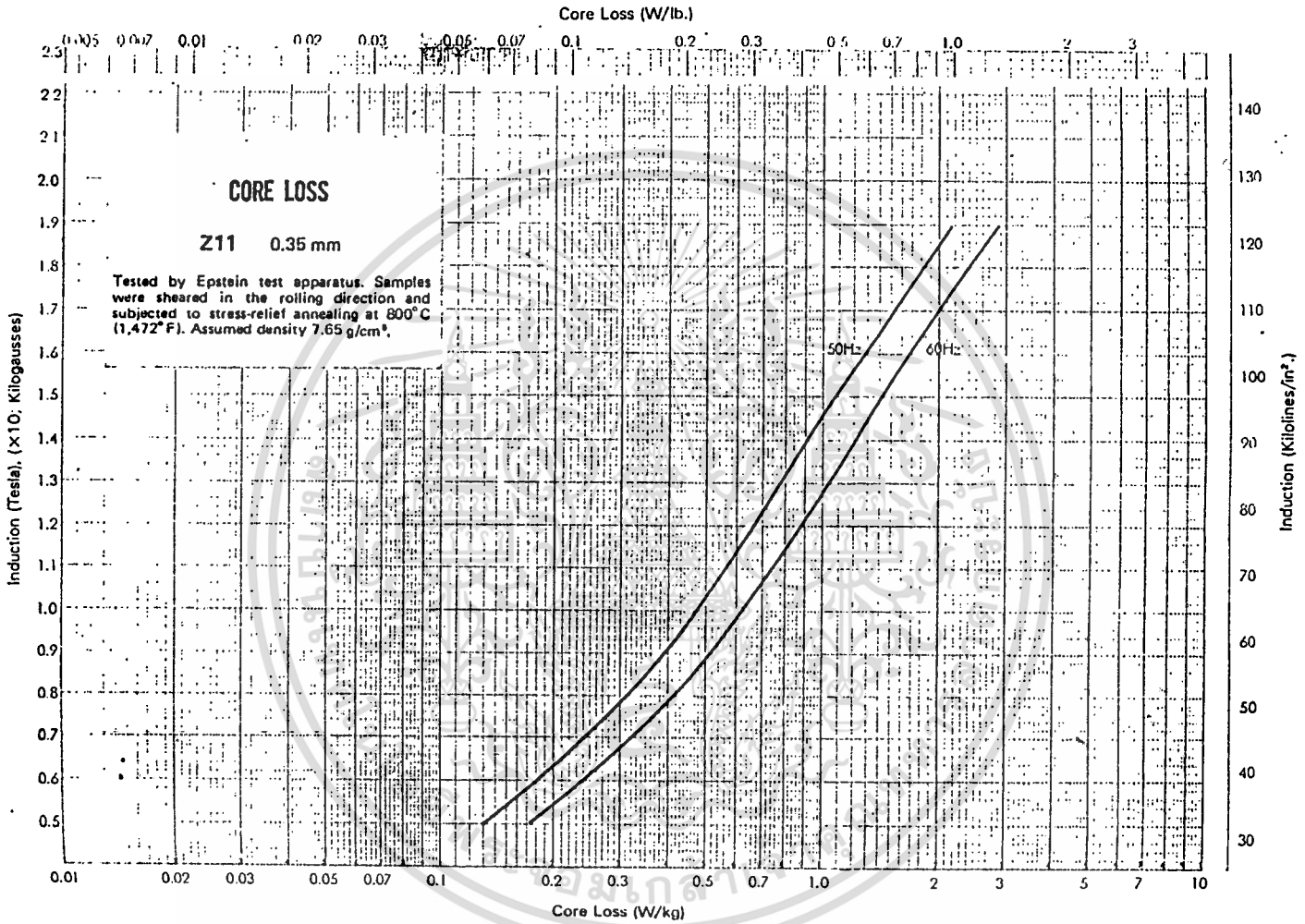
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



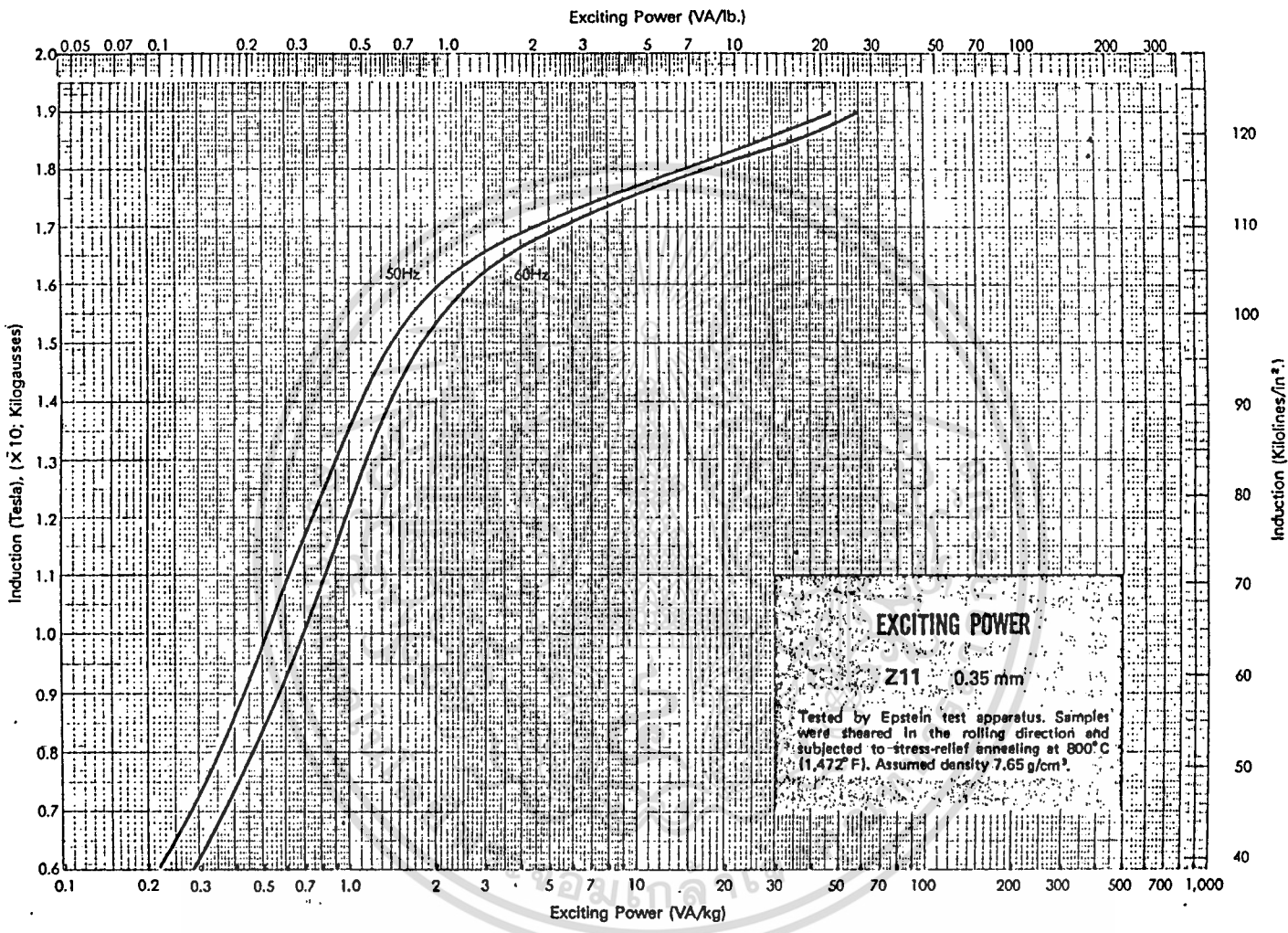
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



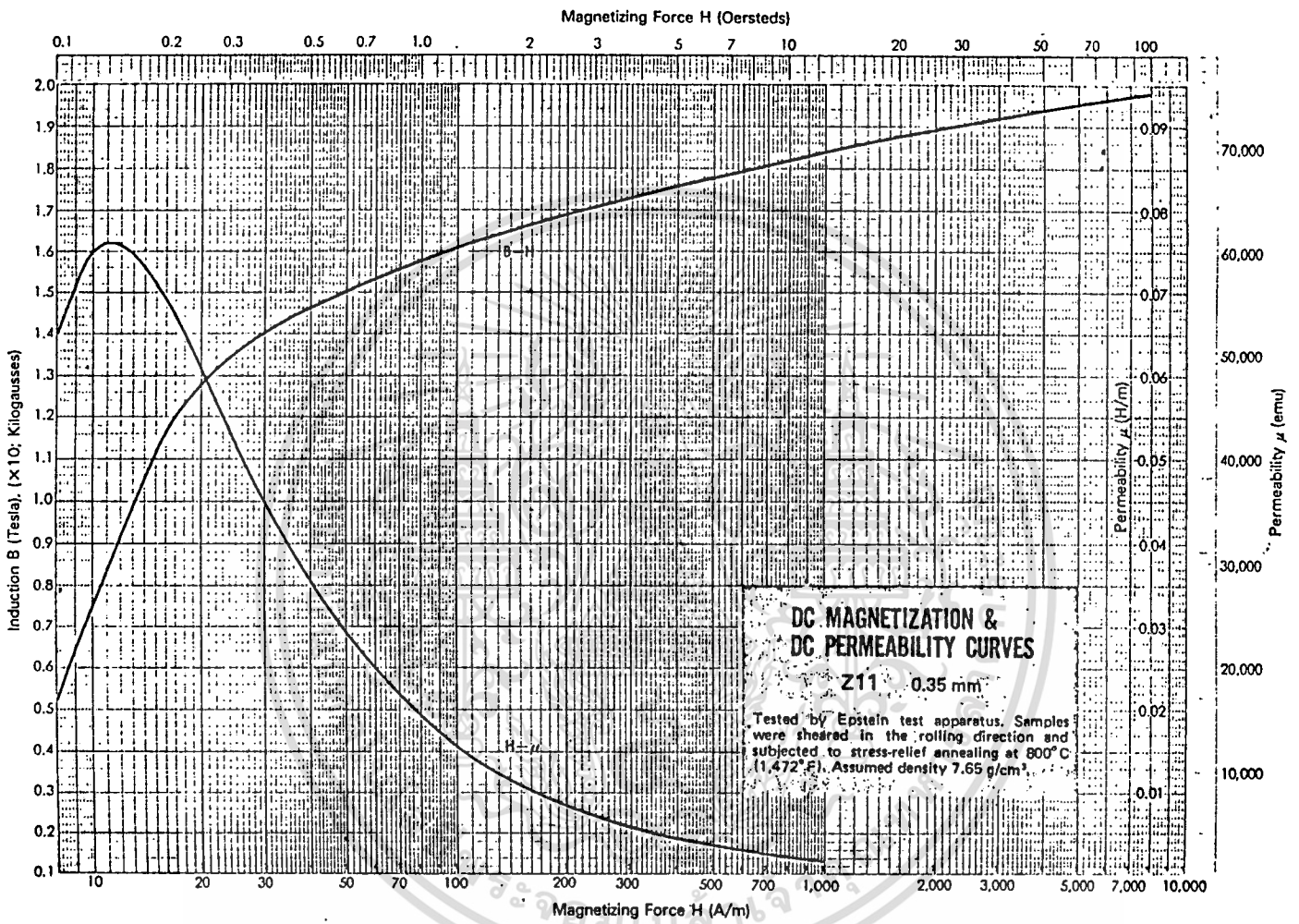
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



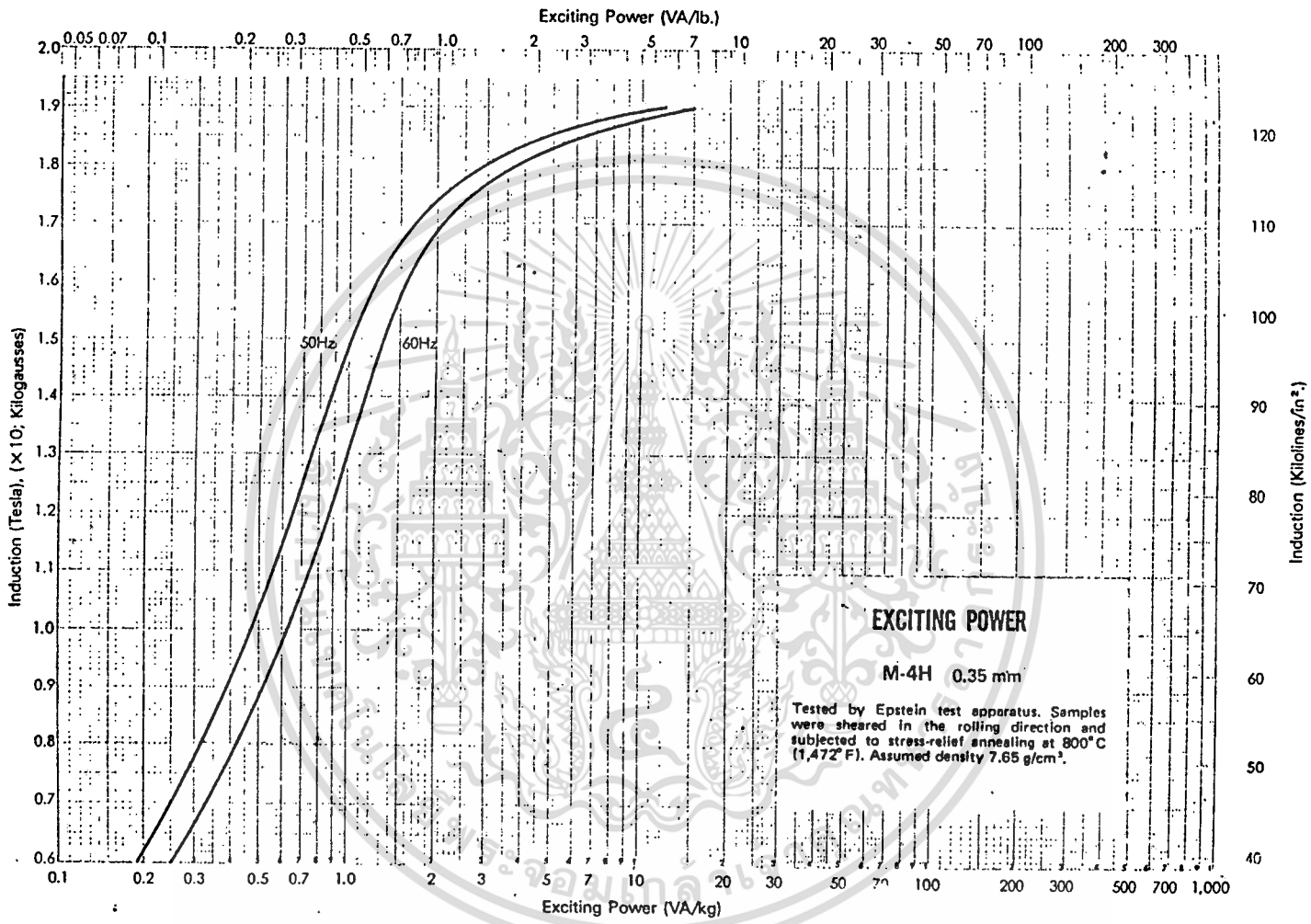
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



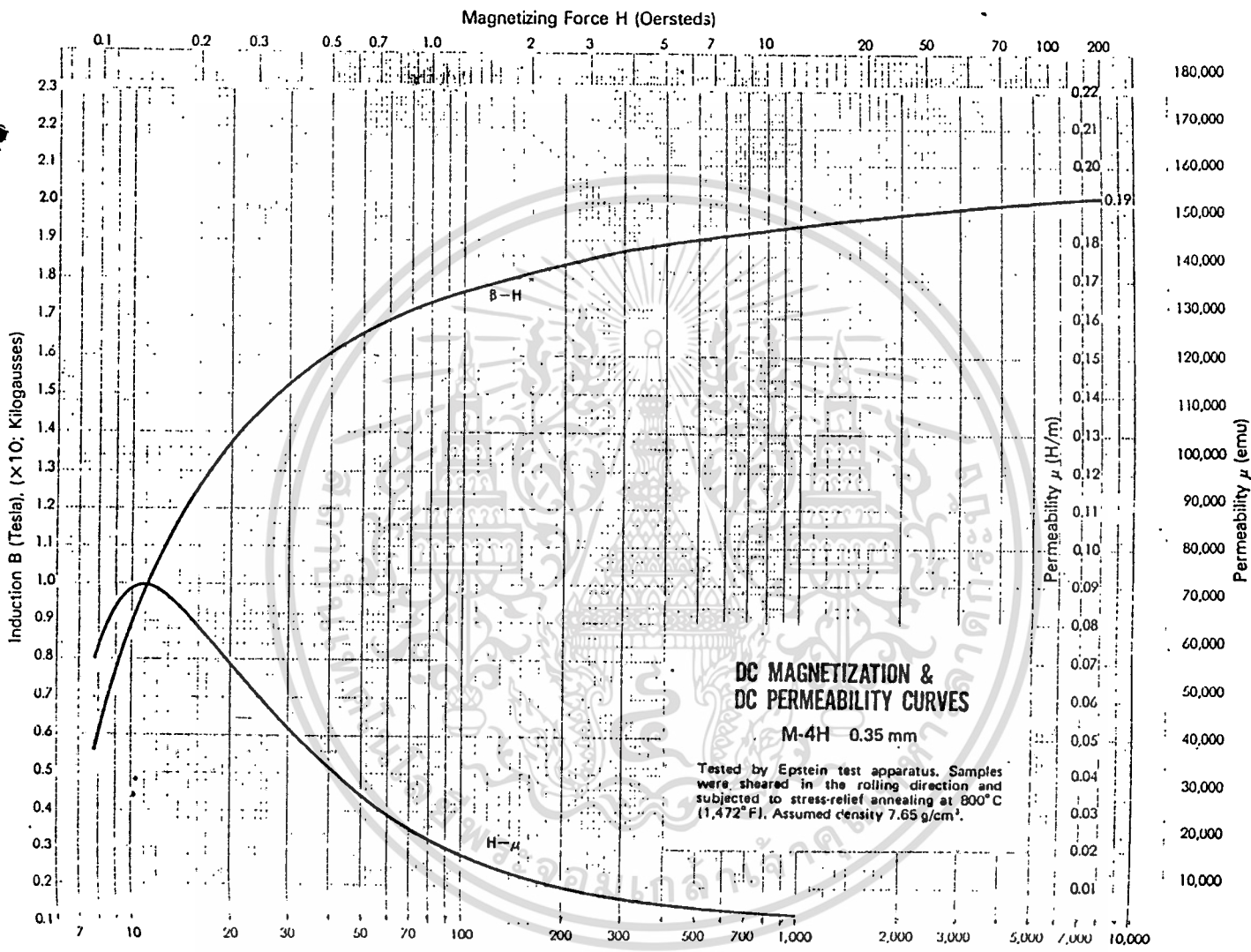
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



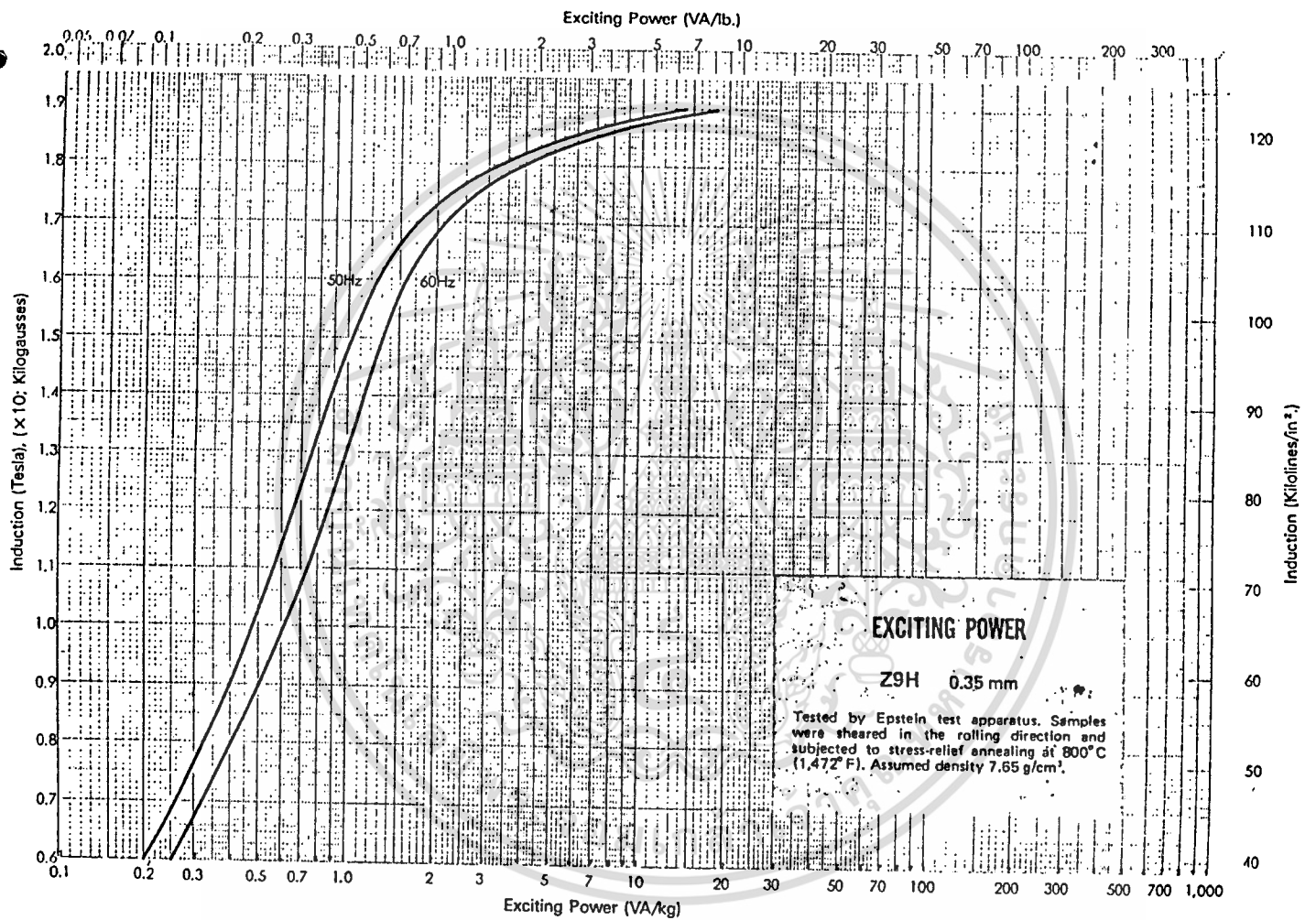
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



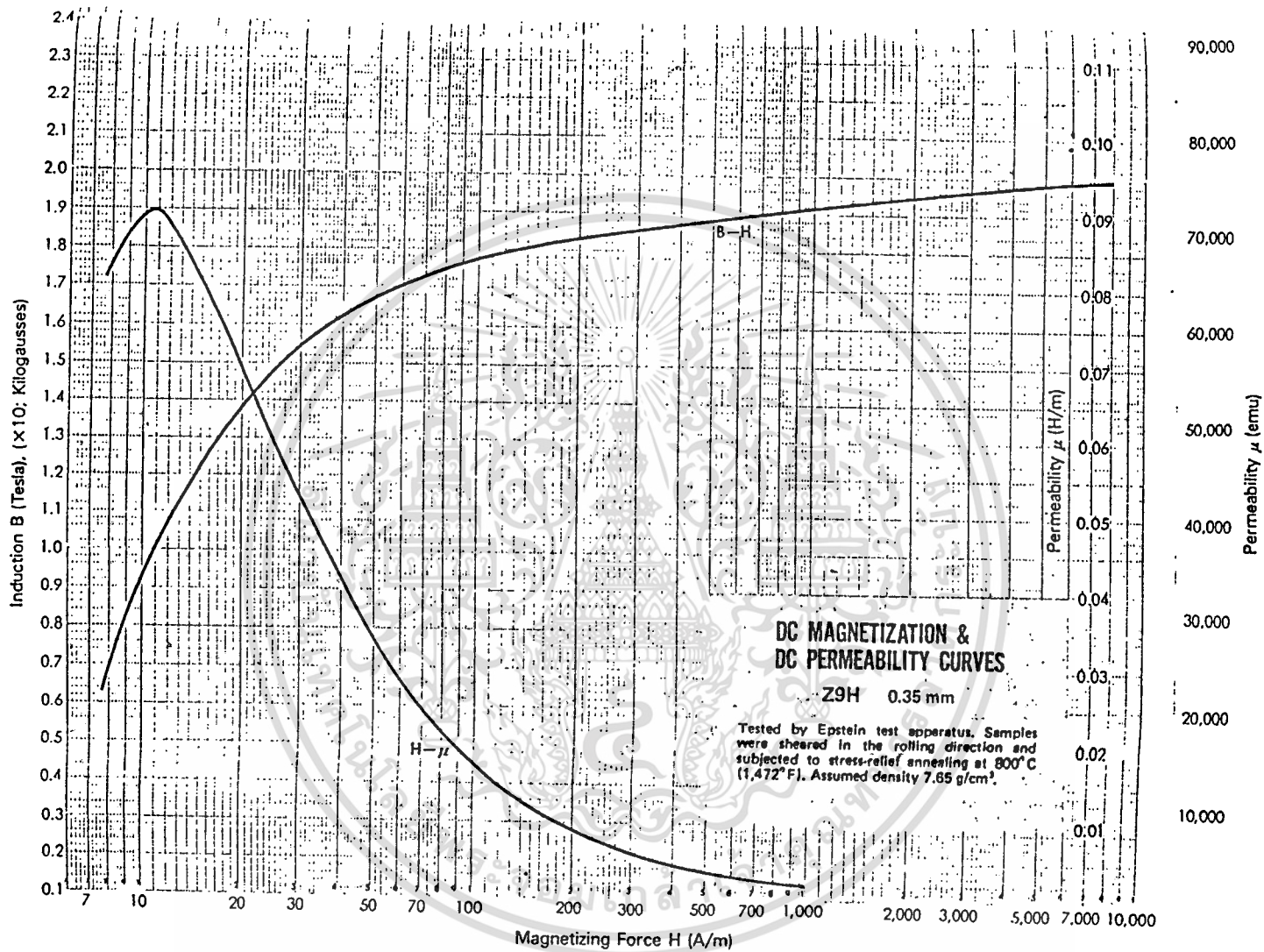
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



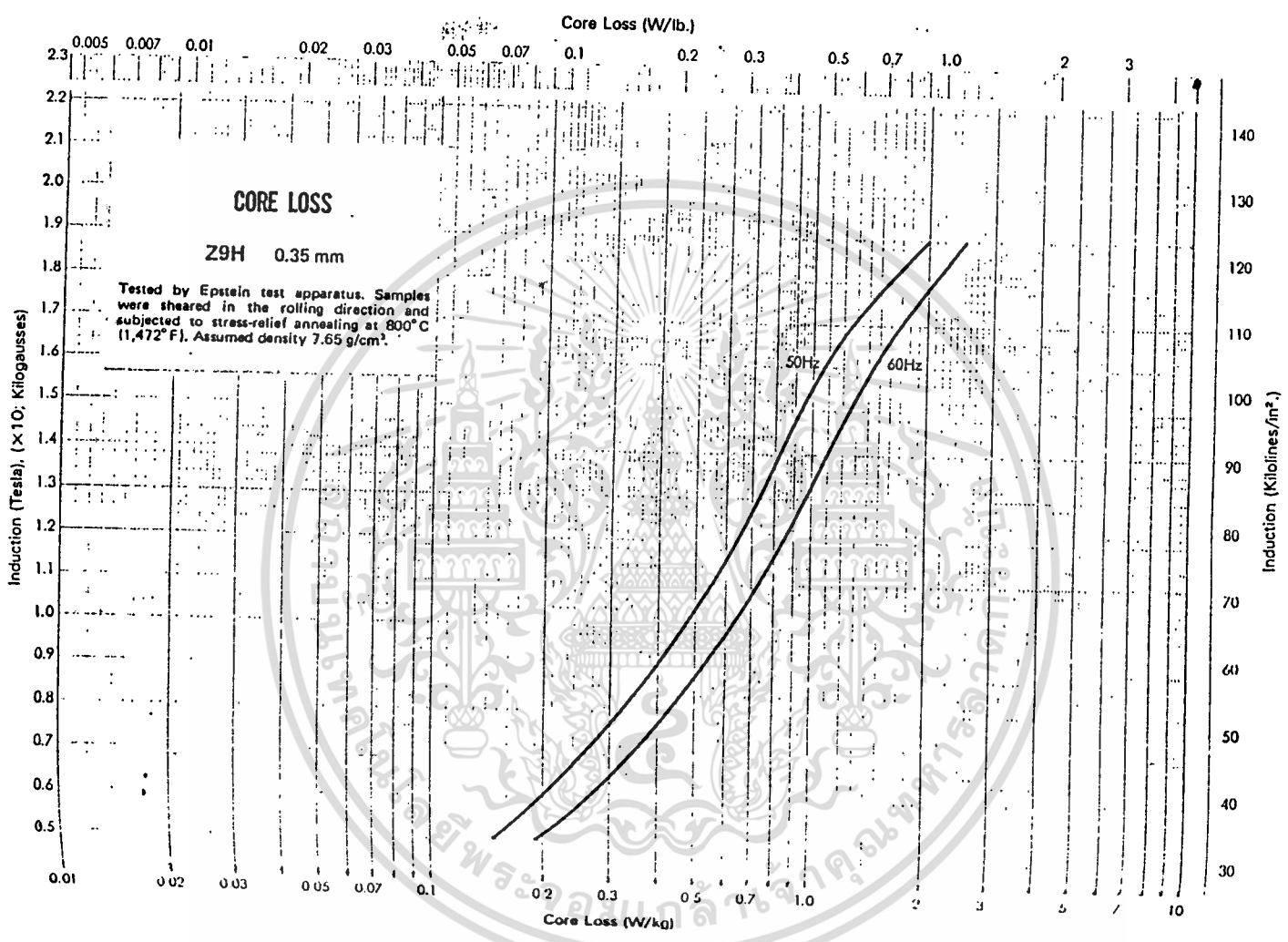
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



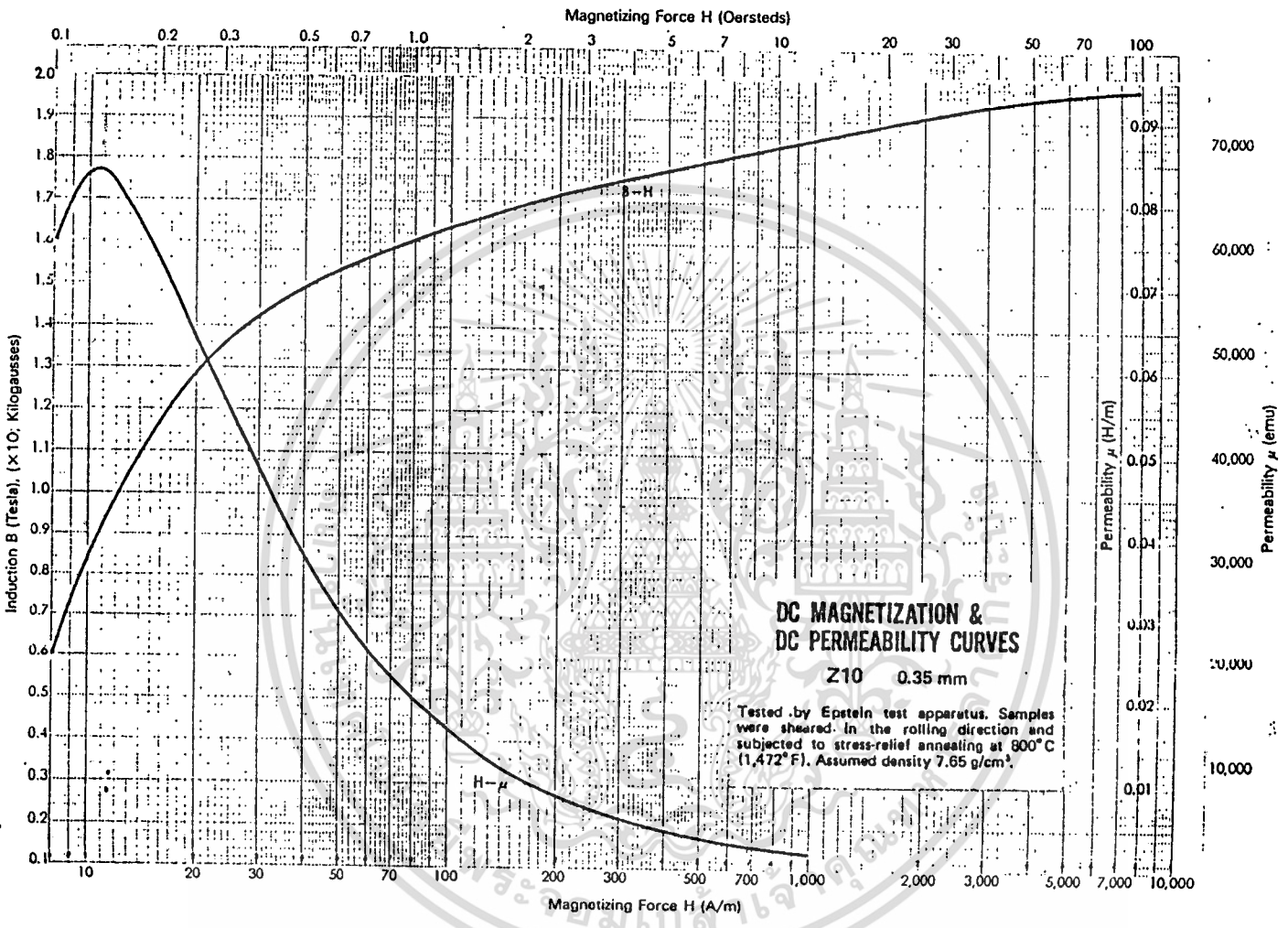
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



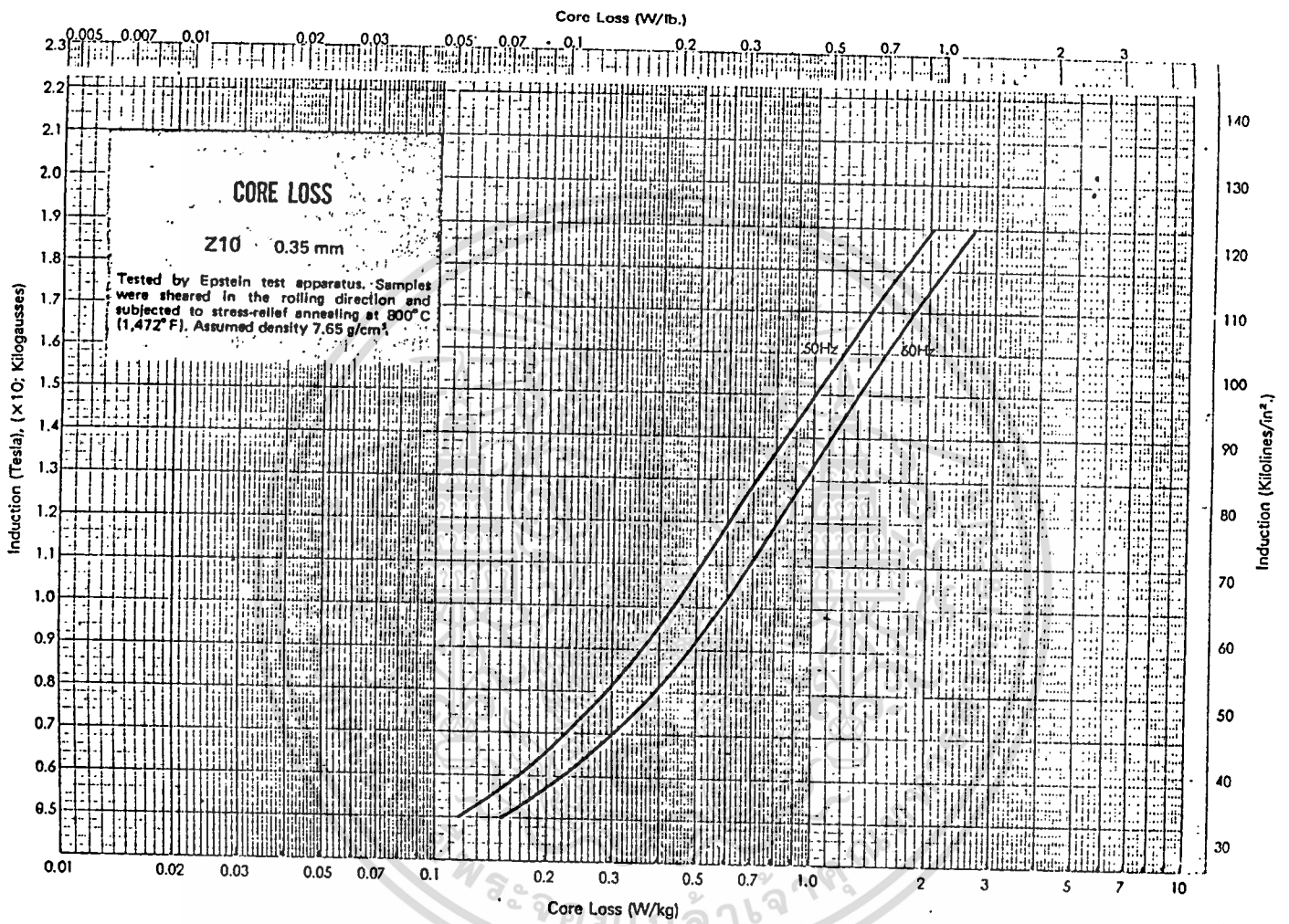
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



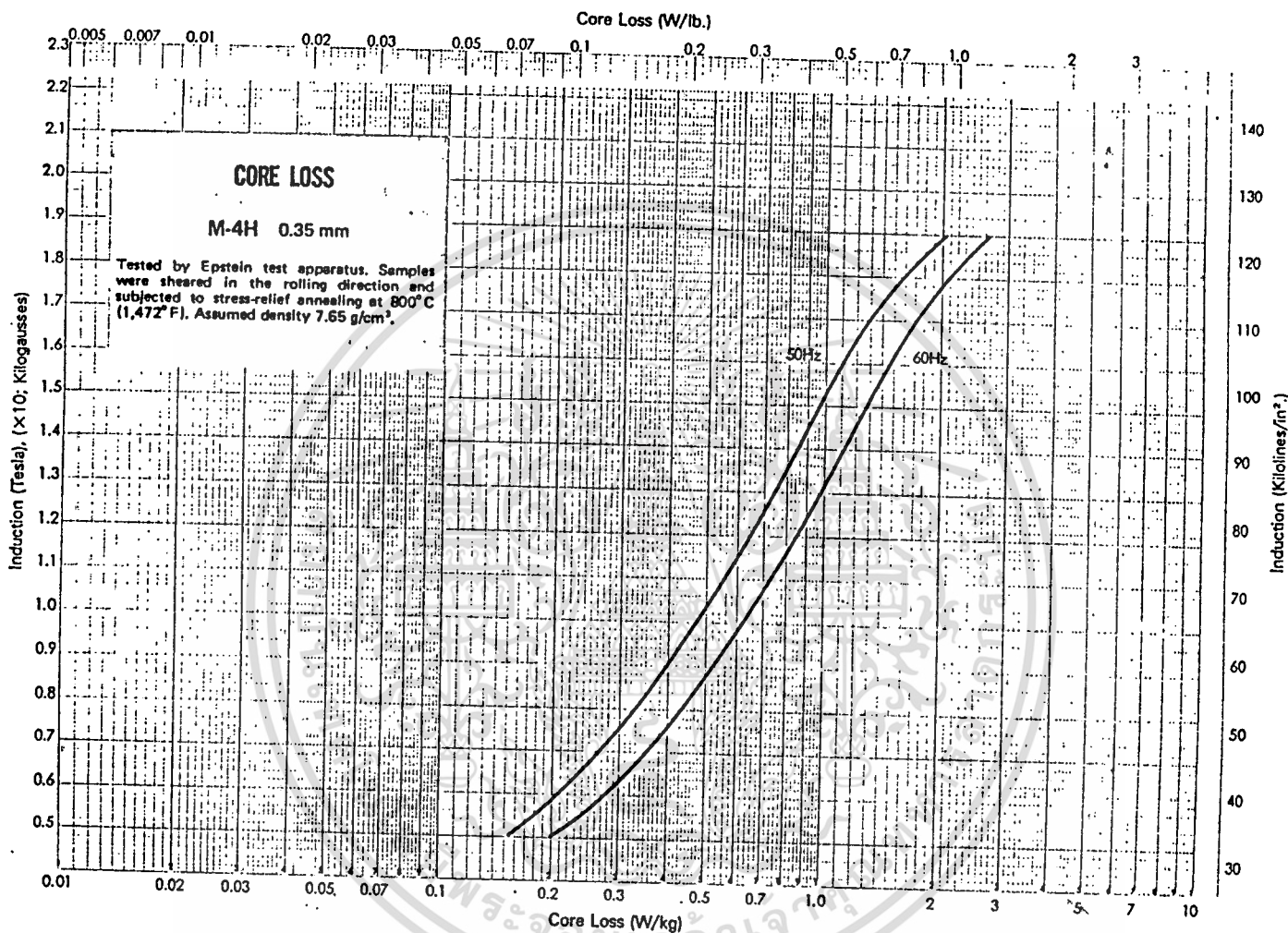
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



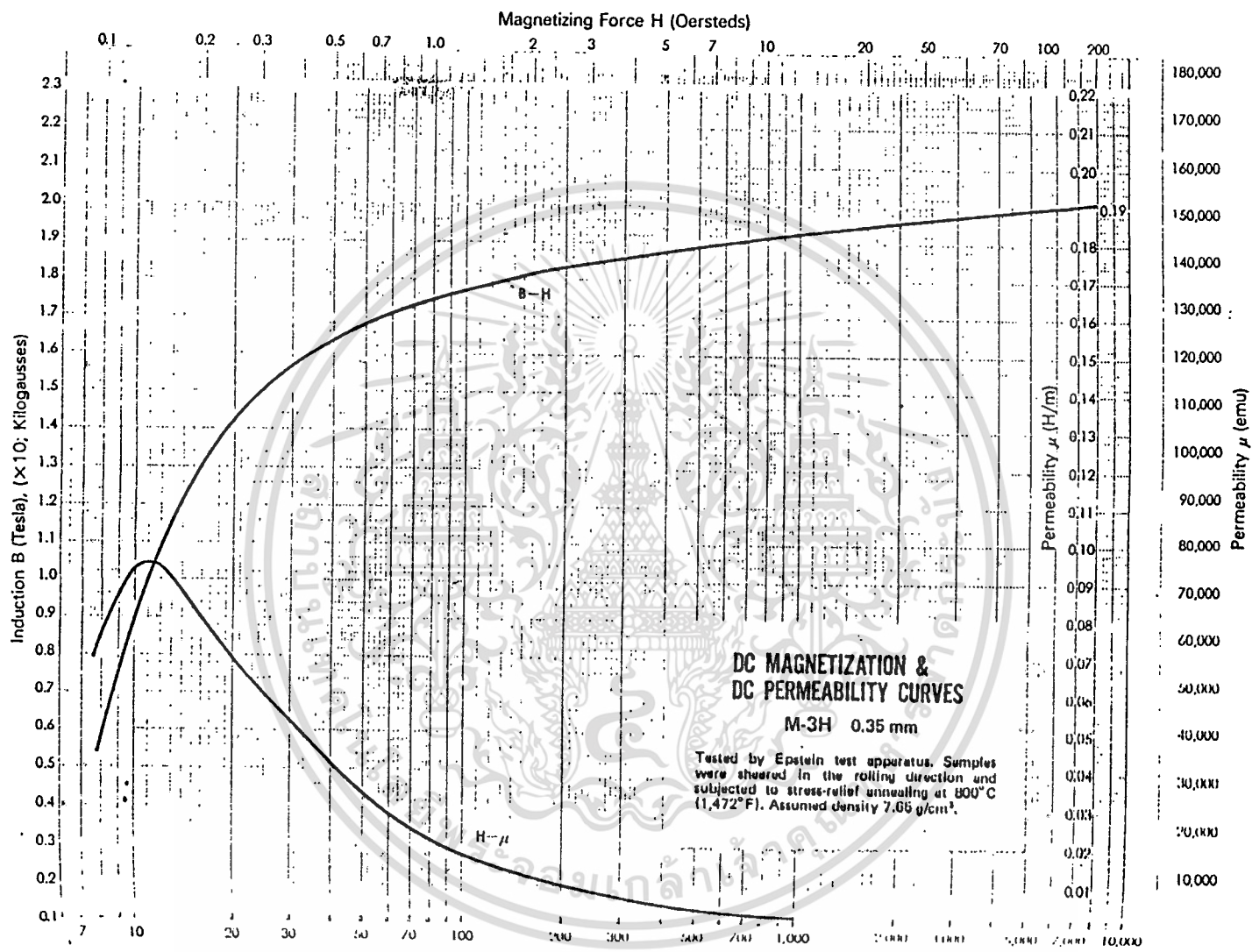
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



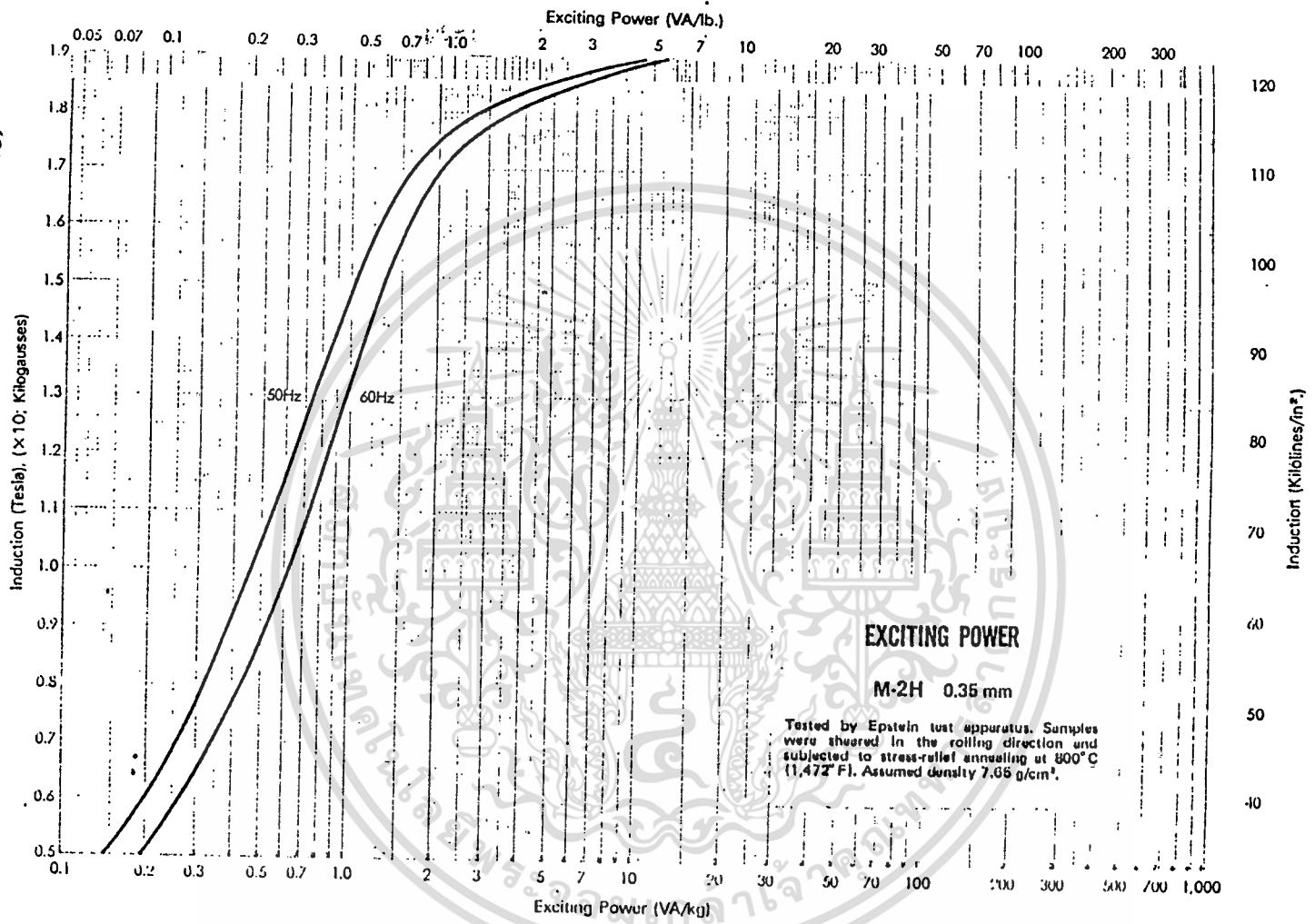
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



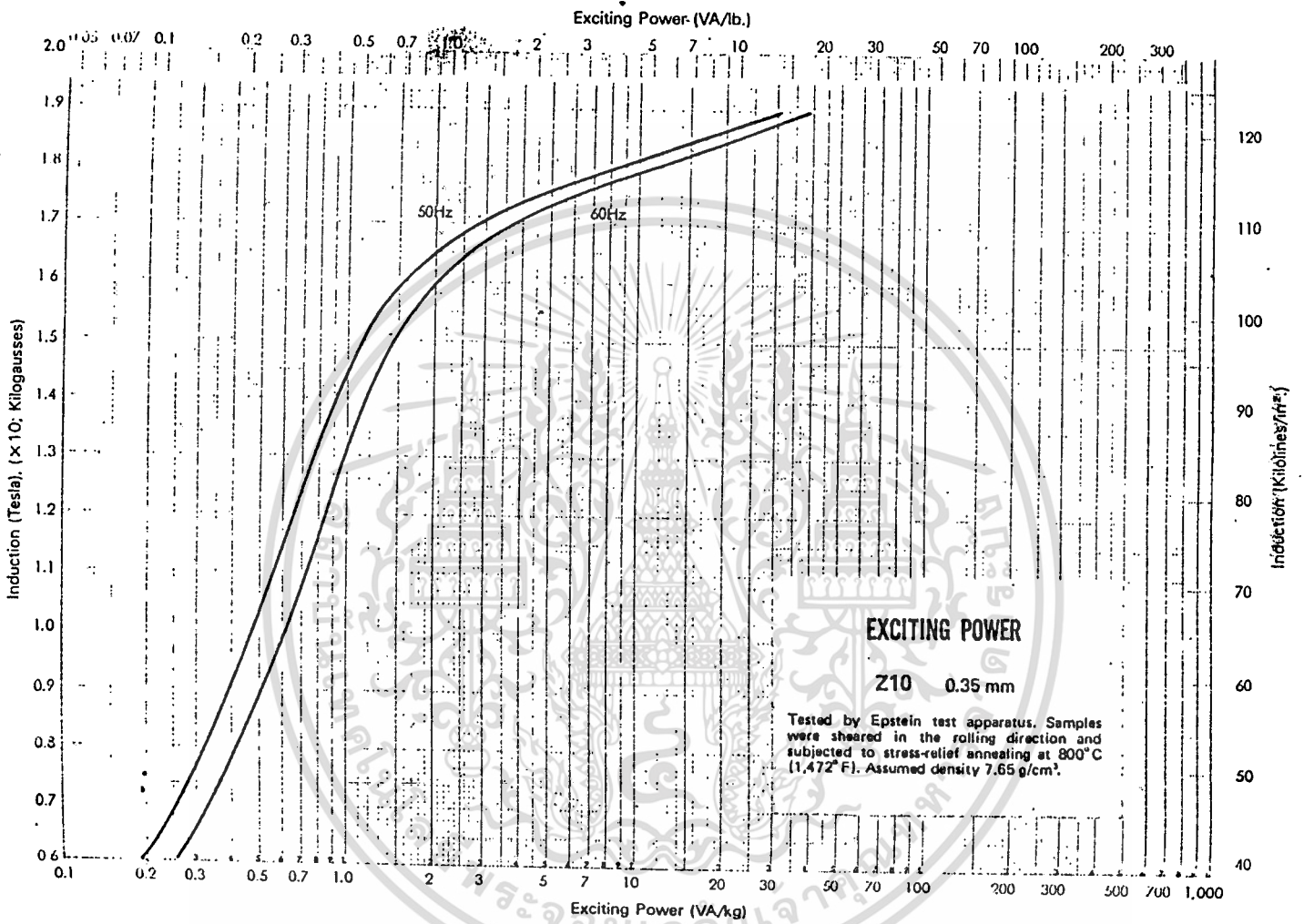
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 . ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

THE PERFORMANI AND DESIGN OF AITERNATING CURRENT MACHINES

BY "M.G.SAY PH.P. MSC. ACG I,D.I.C,I.I.E E, F.R.S.E"

ALTEBANTING CURRENT MACHINES "BY M.G. SAY. PH.P,MSC,A.C.C.,D I.C,F.I.E.E.,F.R.S.E"

HANDBOOK OF TRANSFORMER APPLICATIONS "WILLIAM MELANAGAN"

PRATICAL TRANSFORMER DESIGN HANDBOOK "BY ERICLOWDON"

ELECTRICAL MACHING ESDIGN "BY BALBIR SINGHP"

คู่มืออบรมพลังงานหม้อแปลง ฝ่ายวิศวกรรมการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

วัสดุ ตัวเลข ตัวนำ ตารางสำหรับช่างไฟฟ้า โดย ซิลโล เอ

เครื่องจักรไฟฟ้า 1 วงจรแม่เหล็กและเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสดตรง "ดร.พีรศักดิ์ วรสุนทรโรต"



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้