

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เทคนิคการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก  
Evaluation Technique of Loss in Magnetic Core



เลขหมู่.....73012  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี..... 27 ส.ย. 2550

b. ๗๖๕๓๒๘  
i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

เทคนิคการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก  
Evaluation Technique of Loss in Magnetic Core



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. พิชิต สำยอง  
อ. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เทคนิคการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

ผู้จัดทำ

1. นาย ธีรยุทธ แซ่แผ้ว
2. นาย สาธิต จงจิตมั่นคง
3. นาย หม่อม ราชวงษ์



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

( รองศาสตราจารย์ พิชิต ล้ายอง )

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

( อาจารย์ เปี่ยมภูมิ สฤกษ์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เทคนิคการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

นาย ธีรยุทธ แซ่แผ้ว

นาย สาธิต จงจิตมั่นคง

นาย หม่อม ราชวงศ์

รศ. พิชิต ล้ายอง

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กโดยใช้ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการทดสอบแกนเหล็กแบบต่างๆได้แก่ แกนเหล็กปกติที่ได้มาจากโรงงาน แกนเหล็กที่ถูกทำให้เสียโดยการขีด ซึ่งการทดสอบจะใช้ตัวแกนเหล็กขนาด 1 แรมม่า สุดท้ายจะนำเสนออุปกรณ์ตรวจหาค่าแรงที่ผิดปกติในแกนเหล็กเพื่อแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของแกนเหล็กทั่วไป สามารถนำปริญญานิพนธ์นี้ไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมไฟฟ้าต่างๆได้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ ถ้าไม่ได้รับความอนุเคราะห์จาก รศ.พิชิต ล้ายอง และ อ.เปี่ยมภูมิ สฤกษ์พฤษ ที่คอยชี้แนะแนวทางทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ ทั้งยังคอยกระตุ้นและเป็นกำลังใจในการทำงาน

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้มาตั้งแต่วัย-  
เยาว์จนประสบความสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและบุคคลอันเป็นที่รักที่คอยให้กำลังใจและ  
คอยห่วงใยเสมอ

ขอขอบคุณพี่ธนาพันธุ์(พี่เทป) พี่ประสิทธิ์ภาพ(พี่ป๊อด) พี่เจตนิพัทธ์(พี่จูน)  
พี่สุทธาศร(พี่ก้อย) ที่คอยให้คำปรึกษาและสอนใช้เครื่องมือต่างๆ รวมถึงเพื่อนๆและบุคคลที่  
ไม่ได้กล่าวถึงที่มีส่วนให้ปริญญาบัตรฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
สารบัญรูป.....	III
สารบัญตาราง.....	IV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า.....	4
2.1.1 สนามแม่เหล็ก.....	4
2.1.2 สนามแม่เหล็กขอบเขตลวดตัวนำ.....	8
2.1.3 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล.....	9
2.1.4 การเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า.....	10
2.1.5 ความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	11
2.1.6 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	11
2.1.7 แรงแเคลื่อนแม่เหล็ก.....	11
2.1.8 ความซึมซาบได้.....	12
2.1.9 ความซึมซาบได้สัมพัทธ์.....	12
2.1.10 วัสดุแม่เหล็ก.....	12
2.1.11 ความต้านทานแม่เหล็ก.....	14
2.1.12 เส้นโค้งแสดงความเป็นแม่เหล็ก.....	14
2.1.13 ฮีสเทอรีซิส.....	18
2.1.14 การสูญเสียเนื่องจากฮีสเทอรีซิส.....	19
2.1.15 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน.....	19
2.1.16 การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า.....	21
2.1.17 กระแสกระตุ้นไฟฟ้ากระแสสลับ.....	22
2.2 วงจรแม่เหล็ก.....	23
2.2.1 วงจรแม่เหล็ก.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2	ค่าความเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้า.....	26
2.2.3	ค่าความเหนี่ยวนำ.....	27
2.2.4	Self - inductance and Mutual inductance.....	27
2.2.5	พลังงานสะสมในสนามแม่เหล็ก.....	28
2.3	การเสื่อมสภาพของฉนวนที่เป็นสารเคลือบผิวในแกนเหล็ก.....	29
บทที่ 3	การออกแบบการทดลอง.....	33
บทที่ 4	ผลการทดลอง.....	40
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง.....	74
กิตติกรรมประกาศ		
เอกสารอ้างอิง		
ประวัติผู้แต่ง		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการทดลองของเออสเดด.....	4
2.2 แสดงการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ.....	5
2.3 แสดงกฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	5
2.4 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า และทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ.....	6
2.5 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวด.....	6
2.6 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้าม ในตัวนำที่วางขนานกัน.....	7
2.7 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียวกัน ในตัวนำที่วางขนานกัน.....	7
2.8 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวด.....	8
2.9 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กรั้วไหล.....	9
2.10 แสดงลักษณะของทอรอยด์.....	15
2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก(B – H Curve)เมื่อ $H < 400$ A/m.....	16
2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก(B – H Curve)เมื่อ $H > 400$ A/m.....	17
2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบได้กับความเข้มสนามแม่เหล็ก( $\mu$ - H Curve).....	17
2.14 แสดงวงของฮีสเทอรีซิสและเส้นโค้งการเกิดสนามแม่เหล็ก.....	19
2.15 แสดงการเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก.....	20
2.16 แสดงความสัมพันธ์ของค่า $B-H$ ของ Ferromagnetic material ชนิดต่างๆ.....	23
2.17 แสดงวงจรมแม่เหล็กประกอบด้วยขดลวดพันรอบแกนเหล็ก.....	24
2.18 แสดงวงจรมแม่เหล็กประกอบด้วยขดลวดพันรอบแกนเหล็กแบบทอรอยด์.....	24
2.19 แสดงวงจรมแม่เหล็กที่มีช่องอากาศ.....	25
2.20 แสดงปรากฏการณ์ Fringing.....	25
2.21 แสดงวงจรมแม่เหล็กที่ขดลวด 2 ชุด.....	27
2.22 แสดงพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็ก.....	29
2.23 การเกิดกระแสไหลวนเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของฉนวน.....	30

2.24 โครงสร้างของแกนสเตเตอร์ที่เกิดการเสียหายจาก Wedge และกระแสไฟไหลวนที่เกิดขึ้น.....	30
2.25 ความเสียหายของแกนสเตเตอร์เนื่องจากไฟไหม้.....	31
3.1 แสดงวงจรการทดสอบแบบ Exciting high current test.....	34
3.2 แกนเหล็กถูกขีด 25%.....	35
3.3 แกนเหล็กถูกขีด 50%.....	35
3.4 แกนเหล็กถูกขีด 75%.....	36
3.5 แกนเหล็กถูกขีด 100%.....	36
3.6 แสดงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	37
3.7 แสดงการวัดของ Clamp Amp.....	38
3.8 แสดงวงจรที่ใช้ทดสอบหาตำแหน่งผิดปกติในแกนเหล็กโดยใช้ Search-Coil.....	39
4.1 กราฟแสดงค่าความสูญเสีย (core loss) เปรียบเทียบแต่ละลักษณะของแกนเหล็ก.....	46
4.2 กราฟแท่งแสดงค่าความสูญเสียแกนเหล็ก(Core loss) ในลักษณะต่างๆที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 1.0 Tesla.....	47
4.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง Single sheet test กับ Exciting high current test.....	49
4.4 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ จุดผิดปกติในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด 3x10x2 มม.....	62
4.5 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ จุดปกติในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด 3x10x2 มม.....	62
4.6 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ สายExcite ในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด 3x10x2 มม.....	63
4.7 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ จุดผิดปกติ ในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด 3x10x3 มม.....	63
4.8 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ จุดปกติ ในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด 3x10x3 มม.....	64
4.9 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ สายExcite ในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด 3x10x3 มม.....	64
4.10 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ จุดผิดปกติ ในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด 3x10x4 มม.....	65
4.11 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ จุดไม่ปกติ ในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด 3x10x4 มม.....	65
4.12 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ สายExcite ในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด 3x10x4 มม.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.13 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ จุดผิดปกติ ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x2 มม.....	66
4.14 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ จุดปกติ ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x2 มม.....	67
4.15 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ สายExcite ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x2 มม.....	67
4.16 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ จุดผิดปกติ ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x3 มม.....	68
4.17 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ จุดปกติ ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x3 มม.....	68
4.18 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ สายExcite ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x3 มม.....	69
4.19 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ จุดผิดปกติ ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x4 มม.....	69
4.20 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ จุดปกติ ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x4 มม.....	70
4.21 แสดงตัวอย่างสัญญาณ $V_{induce}$ ณ สายExcite ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x4 มม.....	70
4.22 กราฟแสดงค่าแรงดันเหนี่ยวนำในแกนเหล็กทดสอบแบบ Simulate โดยใช้ Search-Coil ขนาด 3x10x2 มม.....	71
4.23 กราฟแสดงค่าแรงดันเหนี่ยวนำในแกนเหล็กทดสอบแบบ Simulate โดยใช้ Search-Coil ขนาด 3x10x3 มม.....	71
4.24 กราฟแสดงค่าแรงดันเหนี่ยวนำในแกนเหล็กทดสอบแบบ Simulate โดยใช้ Search-Coil ขนาด 3x10x4 มม.....	72
4.25 กราฟแสดงค่าแรงดันเหนี่ยวนำในแกนเหล็กทดสอบแบบ Welding 50% โดย ใช้Search-Coil ขนาด 10x10x2 มม.....	72
4.26 กราฟแสดงค่าแรงดันเหนี่ยวนำในแกนเหล็กทดสอบแบบ Welding 50% โดย ใช้Search-Coil ขนาด 10x10x3 มม.....	73
4.27 กราฟแสดงค่าแรงดันเหนี่ยวนำในแกนเหล็กทดสอบแบบ Welding 50% โดย ใช้Search-Coil ขนาด 10x10x4 มม.....	73

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าซึมซาบได้ของสารต่างๆ.....	13
4.1 Stacking.....	40
4.2 Welding.....	41
4.3 Short turn 25%.....	42
4.4 Short turn 50%.....	43
4.5 Short turn 75%.....	44
4.6 Short turn 100%.....	45
4.7 ตารางเปรียบเทียบระหว่าง Single sheet test กับ Exciting high current test.....	48
4.8 แสดงผลการทดลองของSearch-Coil ขนาด 3x10x2 ลบ.มม. ของแกน Simulation.....	50
4.9 แสดงผลการทดลองของSearch-Coil ขนาด 3x10x3 ลบ.มม. ของแกน Simulation.....	52
4.10 แสดงผลการทดลองของSearch-Coil ขนาด 3x10x4 ลบ.มม. ของแกน Simulation.....	54
4.11 แสดงผลการทดลองของSearch-Coil ขนาด 10x10x2 ลบ.มม. ของแกน Welding 50%.....	56
4.12 แสดงผลการทดลองของSearch-Coil ขนาด 10x10x3 ลบ.มม. ของแกน Welding 50%.....	58
4.13 แสดงผลการทดลองของSearch-Coil ขนาด 10x10x4 ลบ.มม. ของแกน Welding 50%.....	60

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

จากการพัฒนาในอุตสาหกรรมในปัจจุบัน เครื่องจักรกลไฟฟ้า (Electrical Machines) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม และเพื่อการตอบสนองของมนุษย์ ดังนั้น เครื่องจักรกลไฟฟ้าจึงถือเป็นสิ่งสำคัญในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่สำคัญ ได้แก่ หม้อแปลง, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, มอเตอร์ ฯลฯ โดยในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหล่านี้ มีส่วนประกอบที่สำคัญ เช่น แกนเหล็ก, ขดลวด, โครงสร้าง ฯลฯ ซึ่งแกนเหล็กที่เป็นส่วนประกอบหนึ่งในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้น เป็นปัจจัยสำคัญของการกำหนดประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ดังนั้นถ้าหากเกิดความไม่สมบูรณ์หรือเกิดความผิดปกติเกิดขึ้นในแกนเหล็กหรือเกิดการเสื่อมสภาพของแกนเหล็กย่อมทำให้การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นเกิดค่าความสูญเสีย ทำให้ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในที่ตำแหน่งความเข้มข้นแม่เหล็กต่าง ๆ จึงเป็นเรื่องสำคัญต่อการพัฒนา และออกแบบสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ความไม่สมบูรณ์ของแกนเหล็กเป็นสิ่งที่สามารถเกิดได้โดยทั่วไปในเครื่องจักรไฟฟ้า โดยส่วนมากที่พบคือค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่มากขึ้นเนื่องจากฉนวนเสื่อมสภาพ ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กจะแบ่งเป็นความสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์ซิสและความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนโดยเมื่อเราสามารถหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กเราก็จะสามารถนำมาวิเคราะห์ว่าแกนเหล็กเป็นแกนเหล็กที่มีประสิทธิภาพมากน้อยแค่ไหน

โครงการนี้จะเป็นการศึกษาเทคนิคการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กโดยจะใช้ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการทดสอบแกนเหล็กแบบต่างๆ ได้แก่ แกนเหล็กปกติที่มาจากโรงงาน แกนเหล็กที่ถูกทำให้เสียโดยการช็อต (Inter-laminar Core Fault) ซึ่งการทดสอบดังกล่าวจะช่วยให้สามารถกราฟค่าความสูญเสีย เพื่อแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของแกนเหล็กที่ใช้ทั่วไปและยังสามารถตรวจหาตำแหน่งที่ผิดปกติในแกนเหล็กได้จากการสร้าง "Search-Coil" มาตรฐาน

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาการทดสอบแกนเหล็ก
2. ศึกษาหาค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กเมื่อทำการเรียงแกนเหล็กเป็นแกน Stator
3. ศึกษาหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กเมื่อแกนเหล็กเสื่อมสภาพ
4. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจหาตำแหน่งที่ผิดปกติในแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กและวงจรแม่เหล็ก
2. ออกแบบการทดลองและสร้างอุปกรณ์สำหรับทำการทดสอบแกนเหล็ก
3. ทดสอบการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กปกติที่มาจากโรงงานผลิต
4. ทดสอบการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กผิดปกติด้วยการช็อตระหว่างแผ่น(Inter-laminar Core fault) ในอัตราส่วนต่างๆเพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าความสูญเสีย
5. ทดสอบหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก เพื่อนำไปแสดงกราฟ Core loss Curve
6. ทดสอบหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กเพื่อดูแนวโน้มของแกนเหล็กเมื่อเกิดความผิดปกติ
7. อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบสามารถหาค่าตำแหน่งที่ผิดปกติในแกนเหล็กได้

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

โครงการนี้จะเริ่มด้วยการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่างๆที่เกี่ยวข้องได้แก่ ทฤษฎีเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กและทฤษฎีเกี่ยวกับวงจรแม่เหล็ก โดยจะศึกษาทฤษฎีควบคู่ไปกับวิธีการทดสอบ จากนั้นก็จะนำความรู้ที่ได้ศึกษามาออกแบบการทดสอบ

ก่อนที่จะทำการทดสอบแกนเหล็กในรูปแบบต่างๆ เราได้จัดทำการศึกษาเพื่อที่จะออกแบบการทดลองที่เหมาะสม ซึ่งได้แก่ การทดลองหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กปกติที่มาจากโรงงานผลิตด้วยจำนวนแผ่นที่เท่ากับแกนเหล็กปกติ แกนเหล็กที่ผิดปกติด้วยการช็อตระหว่างแผ่นในอัตราส่วนต่างๆเพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก

เมื่อได้ผลการทดสอบ จะนำค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมาเปรียบเทียบเพื่อดูแนวโน้มค่าความสูญเสียในแกนเหล็กในสภาพที่สมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ รวมถึงผลที่เกิดจากการเชื่อมแผ่นแกนเหล็ก

หลังจากนั้นทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจหาตำแหน่งที่ผิดปกติในแกนเหล็ก(Search-Coil) แล้วนำอุปกรณ์ไปทดสอบพร้อมทั้งบันทึกค่าการทดลองและเปรียบเทียบค่าจากการคำนวณทางทฤษฎี

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

จากการทำวิจัยโครงการเทคนิคการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ทำให้ได้เรียนรู้เรื่องเกี่ยวกับทฤษฎีสนามแม่เหล็ก ทฤษฎีวงจรแม่เหล็กมากขึ้น ทราบถึงส่วนประกอบและการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าและการทำงานของเครื่องมือต่างๆที่ใช้ในการทดลองรวมถึงการทำงานเป็นทีมเวิร์ก จากการทำการวิจัยโครงการนี้ทำให้ได้เรียนรู้ว่าการทำงานวิจัยนั้นมีความละเอียดอ่อน เนื่องจากในการทดลองทุกครั้งย่อมมีผลของปัจจัยอื่นๆ ทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองไม่ตรงตามที่คำนวณจากทฤษฎีที่ได้ศึกษามา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

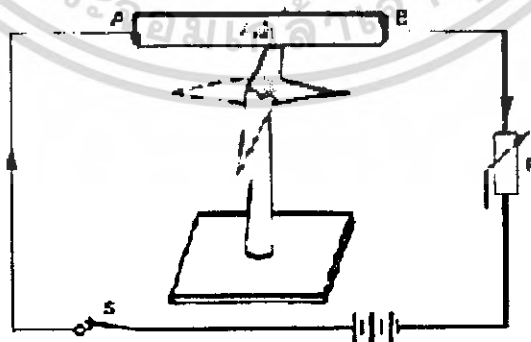
#### 2.1 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า

##### 2.1.1 สนามแม่เหล็ก

ในปี ค.ศ. 1819 แฮนส์ คริสเตียน เอออสเตด (Hans Christian Oersted) นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์กได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้า และพบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในดัดนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นเสมอ

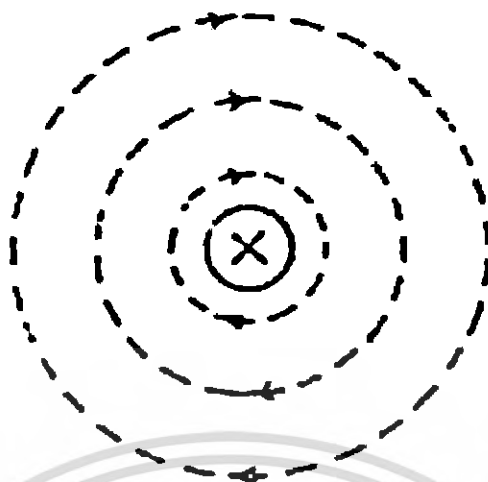
การทดลองของเอออสเตดนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 โดยการนำเอาลวดดัดนำไฟฟ้า AB ต่อเข้ากับเซลล์ไฟฟ้า และให้ดัดนำนั้นวางขนานกับเข็มทิศที่วางอยู่ใต้ดัดนำนั้น เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดดัดนำจะทำให้เข็มทิศเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวขนานเดิม โดยเข็มทิศจะตั้งฉากกับดัดนำ AB แต่เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับทาง เข็มทิศจะเกิดการเบี่ยงเบนกลับทางไปอีกทางหนึ่ง ซึ่งทำมุมกับตำแหน่งเดิม 180 องศา และยังพบอีกว่าถ้าให้ลวดดัดนำทำมุม 90 องศา กับเข็มทิศแล้ว เข็มทิศจะไม่เบี่ยงเบนไปในทิศทางใดๆ เลย

เอออสเตดยังได้ค้นพบอีกว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้านั้นประกอบไปด้วยเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนหนึ่งจัดเรียงเป็นวงรอบๆ ดัดนำที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านนั้น โดยดัดนำจะเป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมเหล่านั้น เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ดัดนำนี้ถ้ายังอยู่ห่างดัดนำมากอำนาจแม่เหล็กก็ยิ่งน้อย การเกิดสนามแม่เหล็กนี้สามารถแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านดัดนำไฟฟ้าที่อยู่ในแนวตั้งทะลุผ่านกระดาษแข็ง แล้วนำเข็มทิศวางไว้บนกระดาษแข็งตามตำแหน่งต่างๆ จะสังเกตเห็นว่าทิศทางจะหันเหเรียงตามกันไปเป็นวงกลมรอบดัดนำ โดยให้สีตำแหน่งด้วยขั้วเหนือ และสีขาวแทนด้วยขั้วใต้ หรืออาจใช้ผงเหล็กโรย โดยจะสังเกตเห็นว่าผงเหล็กเรียงตัวเป็นวงกลม



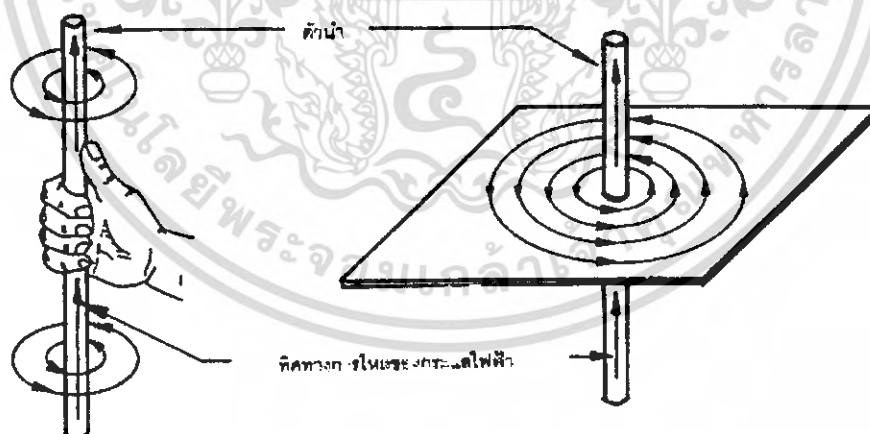
รูปที่ 2.1 แสดงการทดลองของเอออสเตด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ

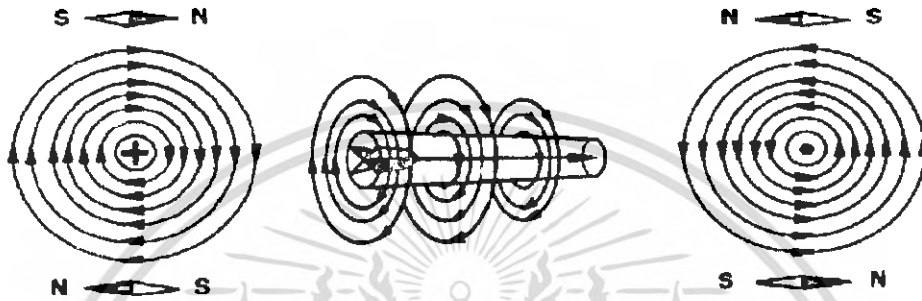
ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำไฟฟ้ากับทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำ สามารถหาได้โดยการใช้กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก คือให้ใช้มือขวากำรอบตัวนำไฟฟ้า โดยให้หัวแม่มือชี้ไปตามความยาวของตัวนำแทนทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้า และให้นิ้วทั้งสี่ที่เหลือกำรอบตัวนำ โดยนิ้วทั้งสี่นั้นจะแทนทิศทางไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำนั้นดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงกฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

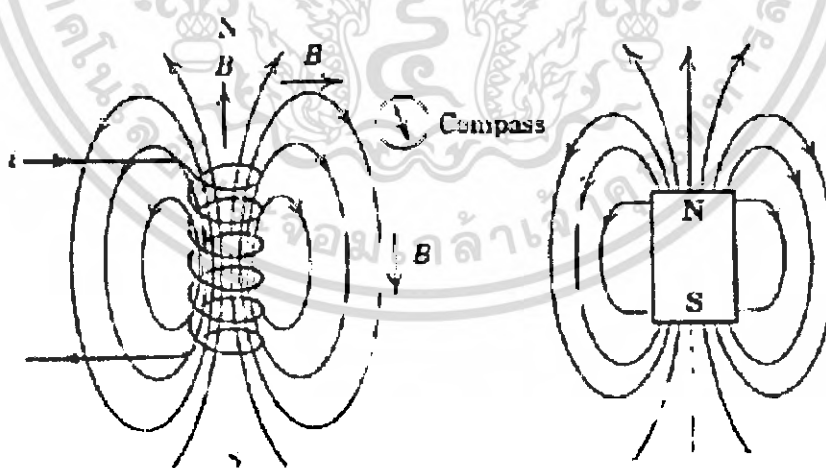
ลูกศรที่ใช้ในวงจรไฟฟ้าจะใช้แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าไปตามความยาวของตัวนำไฟฟ้า โดยจะกำหนดให้ที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้าซึ่งเห็นกันลูกศรนั้นแทนด้วยเครื่องหมายกากบาท (+) ส่วนด้านที่กระแสไฟฟ้าไหลออกซึ่งเห็นเป็นหัวลูกศรแทนด้วยเครื่องหมายจุด ( · ) และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำที่ตั้งแสดงในรูปที่ 2.4 และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดแสดงได้ดังรูป 2.5



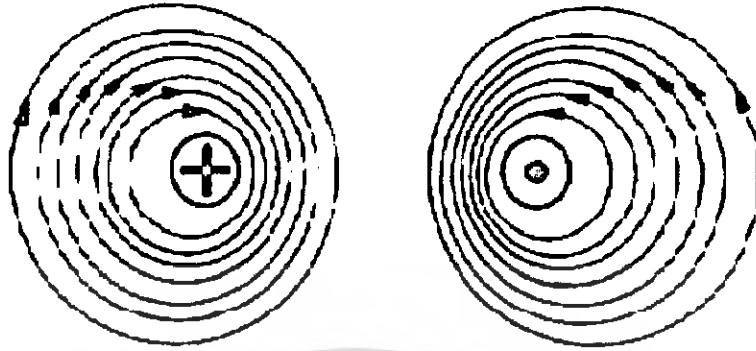
เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา  
กระแสไหลเข้า

เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา  
กระแสไหลออก

รูปที่ 2.4 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าและทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก  
รอบตัวนำ



รูปที่ 2.5 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวด



รูปที่ 2.6 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามในดัดนำที่ขนานกัน



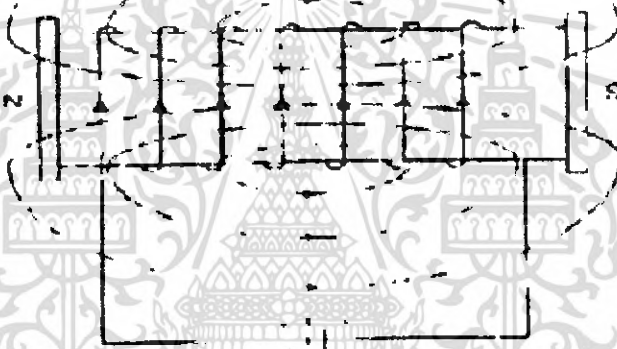
รูปที่ 2.7 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียวกันในดัดนำที่วางขนานกัน

เมื่อนำดัดนำ 2 ดัดนำวางขนานกัน และมีกระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางตรงกันข้ามกัน แสดงในรูปที่ 1.6 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ดัดนำทั้งสองสามารถหาได้จากกฎมือขวา โดยกระแสไฟฟ้าไหลออกแสดงด้วยจุด คือดัดนำด้านซ้ายมือ และดัดนำด้านขวาให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าแสดงด้วยเครื่องหมายกากบาท ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ดัดนำด้านซ้ายมือ จะมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ส่วนดัดนำทางด้านขวาที่กระแสไหลเข้าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังนั้นจะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ดัดนำทั้งสองนั้นมีทิศทางไปในทางเดียวกันทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเหมือนกัน จึงเกิดแรงผลักรันขึ้นระหว่างดัดนำทั้งสองที่วางขนานกันนั้น

แต่ถ้าตัวนำทั้งสองที่วางขนานกันมีกระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางเดียวกัน แสดงในรูป 1.7 โดยสมมุติให้กระแสไหลเข้ามีทิศทางตามเข็มนาฬิกาและเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำทางด้านขวาก็จะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกาเช่นเดียวกันทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กต่างกัน เป็นเหตุให้เกิดแรงดูดกันขึ้น ตัวนำทั้งสองถูกดึงเข้ามาใกล้กัน

### 2.1.2 สนามแม่เหล็กรอบขดลวดตัวนำ (Magnetic field around a coil)

ถ้าเราพันขดลวดรอบแกนเหล็กดังรูป 2.6 และต่อปลายขดลวดเข้ากับขั้วแบตเตอรี่ แกนเหล็กจะกลายเป็นแม่เหล็กและคุณสมบัติคล้ายกับแม่เหล็กถาวร ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นแทนด้วยหัวลูกศร



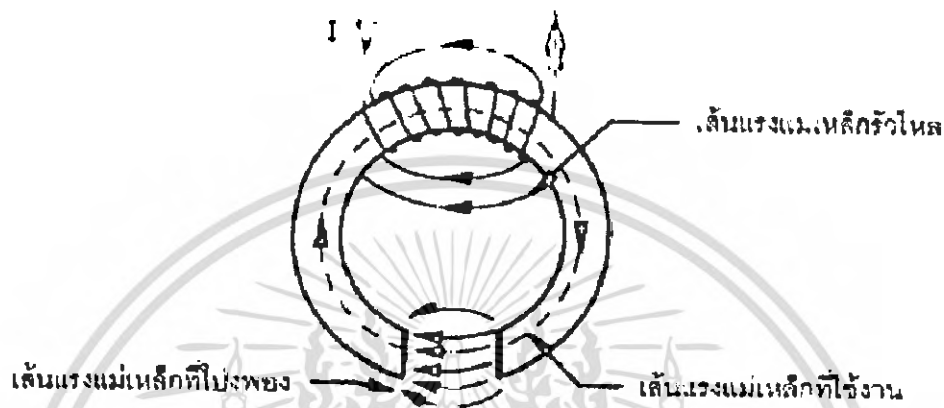
รูปที่ 2.8 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวด

โดยปลายของแกนเหล็กด้านซ้ายจะเป็น ขั้วเหนือและปลายด้านขวาจะเป็นขั้วใต้ ถ้ากลับทิศทางกระแสในขดลวดหรือกลับขั้วแบตเตอรี่ จะทำให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปหรือขั้วแม่เหล็กด้านซ้ายจะเปลี่ยนเป็นขั้วใต้ และด้านขวาจะเปลี่ยนเป็นขั้วเหนือนั่นเอง

เมื่อทิศทางกระแสไหลในขดลวด เราสามารถหาขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้โดยใช้กฎมือขวาของขดลวด (Right hand rule for coil) ซึ่งกล่าวว่า ให้กำขดลวดด้วยมือขวาโดยให้นิ้วทั้งสี่กำขดลวดซึ่งทิศทางกระแสในขดลวด นิ้วหัวแม่มือซึ่งยื่นออกไปขนานกับแกนของขดจะชี้ไปทางขั้วเหนือ (ทิศทางแม่เหล็กภายในขดลวด)

### 2.1.3 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Magnetic Leakage or Leakage Flux)

เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลเป็นเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนหนึ่งที่ไม่ไหลไปตามความต้องการดังแสดงในรูป เส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการและใช้ประโยชน์จริงๆ ได้ก็คือเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านช่องอากาศเท่านั้น



รูปที่ 2.9 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

ส่วนเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลที่ไม่ไหลผ่านช่องว่างตามต้องการเรียกเส้นแรงแม่เหล็กนี้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล ถ้าต้องการให้เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลน้อยที่สุดนั้นต้องให้ขดลวดขุดที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กอยู่ใกล้ช่องว่างหรือจุดที่ต้องการใช้เส้นแรงแม่เหล็กนั้นๆ ซึ่งเราสามารถทราบได้ว่าการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก ได้จากการเอาเข็มทิศไปวางไว้ในบริเวณที่มีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล และก็จะเป็นการยากมากที่จะไม่ให้มีการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก เครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดที่อาศัยอำนาจแม่เหล็ก เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์อย่างดี จะมีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลประมาณ 15 – 20 %

ถ้ากำหนดให้

$\phi_c$  = เส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้น หรือเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั้งหมด

$\phi_w$  = เส้นแรงแม่เหล็กที่สามารถใช้งานได้จริงๆ

จากการทดลองของฮอปคินสัน (Hopkinson) พบว่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลจะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นมา ต่อ เส้นแรงแม่เหล็กที่สามารถใช้งานได้จริงๆ โดยสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วนี้ จะใช้สัญลักษณ์  $\lambda$  และสามารถหาได้จากสมการดังนี้

สัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล = จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลทั้งหมด / จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้งาน

$$\text{Leakage coefficient } (\lambda) = \text{Total flux} / \text{Useful flux}$$

$$\text{Leakage coefficient } (\lambda) = \frac{\phi_l}{\phi}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลนี้เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของฮอปคินสัน ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลมาก นั้นแสดงว่าการออกแบบเครื่องใช้ไฟฟ้านั้นไม่ดี แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลต่ำ แสดงว่าการออกแบบไฟฟ้านั้นดี โดยเครื่องใช้ไฟฟ้าในปัจจุบันจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลประมาณ 1.1 ถึง 1.25

นอกจากจะมีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลแล้ว จากรูปจะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนกระจายออกนอกช่องอากาศ เส้นแรงแม่เหล็กนี้เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการไปงอก (Fringing flux) เส้นแรงแม่เหล็กส่วนนี้ไม่เกิดประโยชน์เช่นเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กได้แพร่กระจายออกไปบนพื้นที่ที่เกี่ยวข้องที่โตกว่า ดังนั้นจึงมีผลทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศมีค่าลดลง

#### 2.1.4 การเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic induction)

ในปี ค.ศ.1831 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ คือ ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ได้ค้นพบหลักฐานสำคัญเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า คือ ถ้ามีขดลวด C ปลายของขดลวดต่อกับกัลวานอมิเตอร์ G (แอมมิเตอร์ที่มีความไวสูง) แล้วนำแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่เข้าไปในขดลวด เข็มของกัลวานอมิเตอร์ จะบ่ายเบนไปทิศทางหนึ่งแสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด C หลังจากการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กถาวรหยุดลง เข็มของกัลวานอมิเตอร์ จะกลับมายังที่ ศูนย์ตามเดิมผลการทดลองพิสูจน์ได้ว่ามีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ เมื่อเทียบกับขดลวด C

ถ้าเจ็บบั้วแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ ออกจากขดลวด C เข็มของกัลวานอมิเตอร์จะบ่ายเบนไปทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรกแสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด C มีทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรกเช่นกัน ถ้าเราจับแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างกัน จะพบว่ายังมีความเร็วมาก เข็มของกัลวานอมิเตอร์ก็ยิ่งบ่ายเบนมาก ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด ก็ต้องมากขึ้นด้วย

ผลที่ได้รับจากการทดลองเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า สรุปได้ดังนี้

ก. เมื่อลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดเส้นแรงแม่เหล็ก หรือ เส้นแรงแม่เหล็ก เคลื่อนที่ตัดลวดตัวนำจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด

ข. ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็ก และขึ้นอยู่กับทิศทางของลวดตัวนำที่เคลื่อนที่สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก

ค.ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราความเร็วที่ลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัด หรือถูกตัดโดยเส้นแรงแม่เหล็ก

### 2.1.5 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity) ใช้สัญลักษณ์ $H$

คือแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวของวงจรมแม่เหล็ก วงจรมแม่เหล็กที่มีเส้นแรงแม่เหล็กสมำเสมอจะมีค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวคงที่ตลอดแนวของเส้นแรงแม่เหล็กนั้น นั่นหมายความว่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าคงที่ตลอดแนวความเข้มสนามแม่เหล็กนั้นด้วย หน่วยของความเข้มสนามแม่เหล็ก คือแอมแปร์/เมตร (A/m) ความเข้มสนามแม่เหล็กเราสามารถวัดได้หรือหาได้จากการนำเอาขั้วเหนือเดี่ยว (N) ที่มีแรงแม่เหล็ก 1 หน่วยขั้วไปวางไว้ ณ จุดใดจุดหนึ่งในสนามแม่เหล็ก ค่าของแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระทำของขั้วเหนือเดี่ยวกับสนามแม่เหล็กก็จะเป็นค่า ความเข้มสนามแม่เหล็กนั้นๆ

ความเข้มสนามแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการคือ

$$H = \frac{I}{l} = \frac{Ni}{l} \quad (\text{A/m})$$

โดย  $H$  = ความเข้มสนามแม่เหล็ก  
 $l$  = ความยาวของวงจรมแม่เหล็ก

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

เพื่อให้ทราบปริมาณที่แน่นอนของเส้นแรงแม่เหล็ก จึงต้องกำหนดพื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่าน ปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลผ่านต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เรียกว่า ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density) ดังนั้นหน่วยความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก คือ เวเบอร์/ตารางเมตร ( $\text{wb/m}^2$ ) หรือเทสลา (Tesla)

ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กหาได้จากสมการ

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (\text{wb/m}^2)$$

$B$  = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก  
 $\phi$  = เส้นแรงแม่เหล็ก  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก

### 2.1.7 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force) ใช้สัญลักษณ์ $\mathfrak{F}$

หมายถึง ความสามารถในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็ก เป็นแหล่งที่ทำหน้าที่ส่งเส้นแรงแม่เหล็ก ให้เคลื่อนที่ผ่านไปในวงจรมแม่เหล็กซึ่งคล้ายกับแรงดันไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ส่งกำลังให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปในโหลด หรือส่วนต่างๆ ของวงจรมแม่เหล็ก โดยแรงดันแม่เหล็ก นั้นเป็นงาน (work done) ที่มีหน่วยวัดเป็นจูล (Joules) ซึ่งได้จากการนำเอาขั้วเหนือเดี่ยวส่งผ่านเข้าไปในสนามแม่เหล็ก หน่วยของงานคิดเป็น จูล แต่หน่วยของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันแม่เหล็ก ใช้ แอมแปร์เทิร์น (A-T) ซึ่งได้จากการเอากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดคูณกับจำนวนรอบของขดลวดที่พันไว้เพื่อให้เกิดสนามเส้นแรงแม่เหล็ก แรงดันแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการคือ

$$\mathcal{F} = m.m.f. \quad (\text{A-T})$$

$$= Ni \quad (\text{A-T})$$

$$\mathcal{F} = \text{แรงดันแม่เหล็ก} \quad \text{แอมแปร์เทิร์น (A-T)}$$

$$i = \text{กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด} \quad \text{แอมแปร์ (A)}$$

$$N = \text{จำนวนรอบขดลวด} \quad \text{รอบ (T)}$$

### 2.1.8 ความซึมซาบได้ (Permeability) ใช้สัญลักษณ์ $\mu$

จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ที่แท้จริงมันจะขึ้นอยู่กับโมเลกุล ของแกนเหล็กว่าจะสามารถวางตัวในแนวเดียวกันได้ง่ายเพียงใด เรียกว่าความซึมซาบได้ ความซึมซาบได้นี้เป็นอัตราส่วนของ ความหนาแน่นแห่งเส้นแรงแม่เหล็กต่อความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจะได้ว่า

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

ความซึมซาบได้ คือ ความยินยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่าน โดยความซึมซาบของสุญญากาศเป็น 1 ซึ่งปกติทั่วไปแล้ว จะกล่าวถึงเฉพาะความซึมซาบได้สัมพัทธ์ ซึ่งหมายถึงตัวกลาง เช่น เหล็ก ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้เป็นกี่เท่าของอากาศ เมื่อมีความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากัน

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

คืออัตราส่วนของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตได้ในวัสดุสารแม่เหล็กต่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตได้ในสุญญากาศ (หรือในแกนที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก) โดยใช้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กค่าเดียวกัน เช่น ในอากาศ = 1 แต่ในโลหะผสม เช่น นิกเกิล - เหล็ก (nickel - iron alloys) มี  $\mu_r$  สูงถึง 100000

### 2.1.10 วัสดุแม่เหล็ก

**2.1.10.1 ไดอแมกเนติก** หมายถึง การที่สารแม่เหล็กมีการต่อต้านกับสนามแม่เหล็กจากภายนอก สารแม่เหล็กแบบนี้เราเรียกว่า สารแม่เหล็กไดอแมกเนติก (Diamagnetic substances) โดยผู้ที่ค้นพบคือ ไมเคิลฟาราเดย์ เมื่อปี ค.ศ.1846

**2.1.10.2 พาราแมกเนติก** หมายถึง การที่สนามแม่เหล็กจากภายนอกทำให้อะตอมเกิดแรงคู่ควบจัดเรียงตัวให้หันไปในทิศทางที่เรียงตัวกันตามสนามแม่เหล็กจากภายนอกนั้น คุณสมบัติที่สำคัญของความเป็นแม่เหล็กแบบนี้คือ ค่าความเป็นแม่เหล็กของสารเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งสารนั้นวางอยู่ และเป็นส่วนกลับกันกับ อุณหภูมิ ผู้ที่ค้นพบคือ ปิแอร์คูรี (Pierre Curie) เมื่อปี ค.ศ.1895

**2.1.10.3 เฟอร์โรแมกเนติก** อะตอมของสารแม่เหล็กเฟอร์โร จะมีการจัดโมเลกุลขั้วคู่เหนี่ยวนำซึ่งกันและกันให้มีทิศทางไปทางเดียวกันภายใต้แรงกระทำซึ่งกันและกัน คุณสมบัติที่สำคัญของสารแม่เหล็กเฟอร์โรคือ ค่าความเป็นแม่เหล็กของสารไม่เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และสารอาจแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กได้ถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามแม่เหล็ก สารแม่เหล็กเฟอร์โรมีอยู่ 5 ชนิด ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล กาโคลิเนียม และดีสโปรเซียม โดยสารทั้ง 5 นี้จะยังคงสภาพเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โร ตามที่อุณหภูมิยังไม่เกินค่าอุณหภูมิของคูรี (Curie temperature) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้จะเปลี่ยนเป็นสารแม่เหล็ก พาราแมกเนติกทันที โดยเหล็กนั้นมีอุณหภูมิของคูรี 1043 K คุณสมบัตินี้จะเกิดได้แม้ว่าจะตอมของธาตุทั้ง 5 นี้จะอยู่ในโครงสร้างของผลึก ซึ่งไม่ใช่มีแต่ธาตุทั้ง 5 นี้อย่างเดียว

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าซึมซาบได้ของสารต่าง ๆ

สาร	$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$
บิสมัท	0.99983
เงิน	0.99998
ทองแดง	0.99999
น้ำ	0.99999
อากาศ	1.0000004
อะลูมิเนียม	1.00002
โคบอลต์	250
นิกเกิล	600
เหล็กหล่อ	2000
เหล็กเส้น	5000
แกนเหล็กหม้อแปลง	7000
ซูเปอร์อัลลอย	1,000,000
48 เฟอร์อัลลอย	6000
78 เฟอร์อัลลอย	7000
โมเฟอร์อัลลอย	9000
สินีแมก	3500
โมนีแมก	3500
มิวเมทอล	9000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.11 ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance) ใช้สัญลักษณ์ $\mathfrak{R}$

ความต้านทานแม่เหล็ก คือความต้านทาน ที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็กซึ่งอาจจะ เป็นอากาศ หรือ วัสดุอะไรก็ได้ที่อยู่บริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กส่งอำนาจไปถึงซึ่งจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นๆ ความต้านทานนี้จะต้านทานการส่งเส้นแรงแม่เหล็กที่ออกจาก แหล่งกำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กให้มีค่าลดลง ความต้านทานแม่เหล็กจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ความยาวของแกนเหล็ก หรือวัตถุคือ  $l$  ที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่าน ไปเพื่อให้ครบวงจรของตัวเอง เป็นส่วนกลับกับพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก คือ  $A$  ความต้านทานแม่เหล็กเป็นการแสดง คุณสมบัติของวัตถุที่มีการต้านต่อการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งคล้ายๆ กับคุณสมบัติของวัตถุ ที่มีการต้านต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า ความต้านทาน โดยความต้านทานแม่เหล็ก มีหน่วยวัดเป็น (A-t/Wb)

ถ้าพิจารณาแกนแม่เหล็กที่มีพื้นที่หน้าตัด  $A$  ตารางเมตร และมีความยาวของ เส้นรอบแกนโดยเฉลี่ย  $l$  เมตร พันด้วยขดลวดจำนวน  $N$  รอบ มีกระแสไหลผ่าน  $I$  แอมแปร์ ดังนั้น

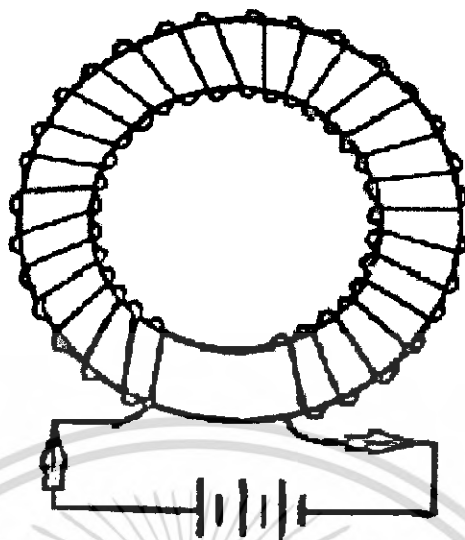
$$\begin{aligned} \phi &= BA & : & \text{เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด} \\ \mathfrak{S} &= Hl & : & \text{แรงเคลื่อนแม่เหล็ก} \\ \frac{\phi}{\mathfrak{S}} &= \frac{BA}{Hl} = \mu_r \mu_0 \frac{A}{l} \\ \phi &= \frac{\mathfrak{S} \mu_r \mu_0 A}{l} \\ \phi &= \frac{\mathfrak{S}}{(l / \mu_r \mu_0 A)} \end{aligned}$$

$\frac{l}{\mu_r \mu_0 A}$  คือ ค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance) มีหน่วยเป็น (A/wb)

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}$$

### 2.1.12 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์แม่เหล็ก ( $B - H$ Curve)

เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับ ความซึมซาบได้ ดียิ่งขึ้น จึงขอยกตัวอย่างของ สนามแม่เหล็กที่เกิดกับขดลวดที่เป็นวงกลมเรียกว่า ทอรอยด์ (toroid)



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของทอรอยด์

การที่ขดลวดโซลีนอยด์ให้เป็นวงกลมนั้นมีความยาวเฉลี่ย 1 หน่วยความยาวสนามแม่เหล็กภายในไม่เปลี่ยนค่า ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก แต่ถ้านำเอาแกนเหล็กมาใส่ภายในขดลวดโซลีนอยด์จะทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก เปลี่ยนไปและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะมีค่าเพิ่มเป็นหลายร้อยเท่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเดิม ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก จะมีค่าเท่ากับ  $\mu_r$  ซึ่งหมายความว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าของ  $\mu_r$  หรือ  $\frac{\mu}{\mu_0}$  ของสารนั้นๆ

เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์แม่เหล็ก เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก ( $H$ ) จากรูปที่ 2.10 ขดลวดทอรอยด์นั้น ถ้าเพิ่มกระแสไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้ค่า ความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นตาม ถ้าเราเริ่มต้นจากกระแสเป็นศูนย์ และมีเครื่องวัดค่า เส้นแรงแม่เหล็กในแกนทอรอยด์ เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก ( $H$ ) จากรูปที่ 2.10 ถ้าเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแกนเหล็ก เช่น ทอรอยด์ เราจะได้เส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 2.11 และรูปที่ 2.12 แต่ความชันขาขึ้นได้จะไม่คงที่เมื่อมีค่า ความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ค่า  $\mu$  จะเพิ่มจนถึงค่าสูงสุดเมื่อค่า  $\mu$  เพิ่มจนถึงค่าสูงสุดแล้ว การเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็ก ก็จะไม่ทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก เพิ่มขึ้นมากนักจนกระทั่งเกิดการอิ่มตัว จะทำให้ค่า  $\mu$  ลดลงเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอีกดังแสดงในรูปที่ 2.13 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) กับ ความ

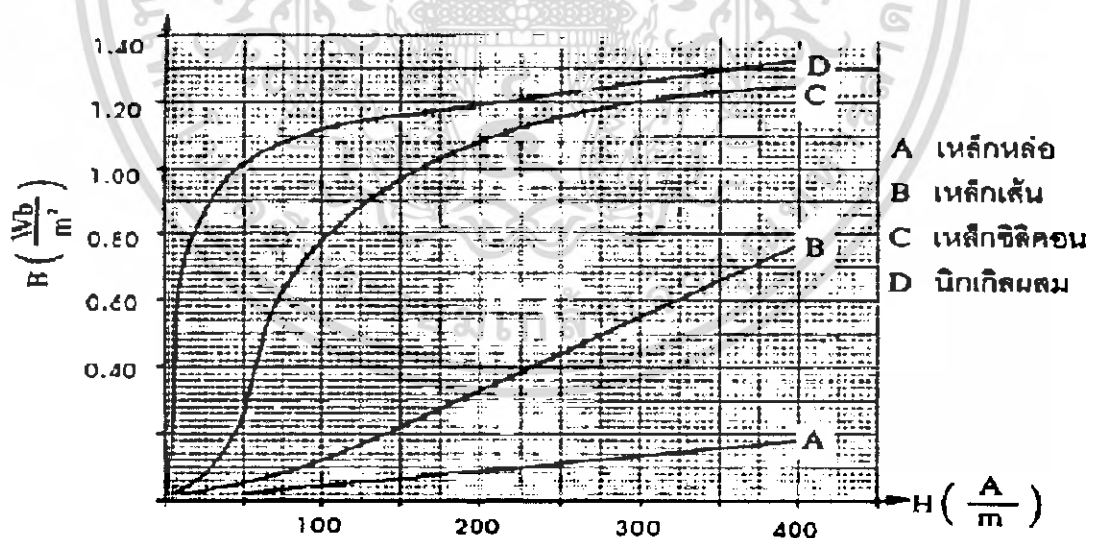
เข้มนามแม่เหล็ก ( $H$ ) บางครั้งเรียกว่า ( $B-H$  curve) หรือเส้นโค้งการอิมตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก หรือเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก

- สารใดมีค่า  $\mu_r$  มากกว่า 1 เล็กน้อยสารนั้นจัดเป็นชนิดพาราแมกเนติก (Paramagnetic) เช่น อากาศ ไม้

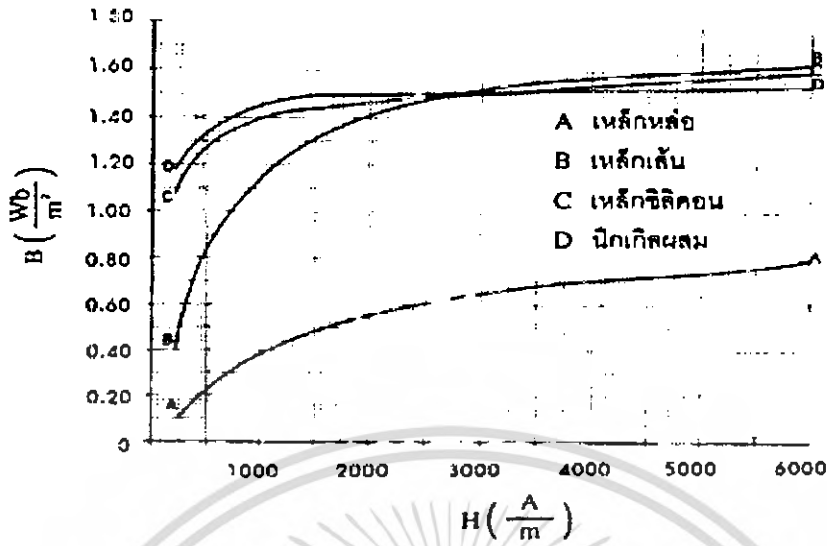
- สารใดมีค่า  $\mu_r$  น้อยกว่า 1 สารนั้นจัดเป็นชนิด ไดอาแมกเนติก (Diamagnetic) เช่น พวกร อลูมิเนียม หรือสารตัวนำสมบูรณ์ซึ่งมี  $\mu_r = 0$

- สารใดมีค่า  $\mu_r$  สูงมาก ๆ จัดเป็นพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) โดยทั่วไปค่า  $\mu_r$  จะอยู่ระหว่าง 1,000 - 1,000,000 โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารแม่เหล็ก และแม้แต่ในสารชนิดเดียวกันที่ค่าของความเข้มนามแม่เหล็กต่างกันค่าของ  $\mu_r$  จะไม่เท่ากัน

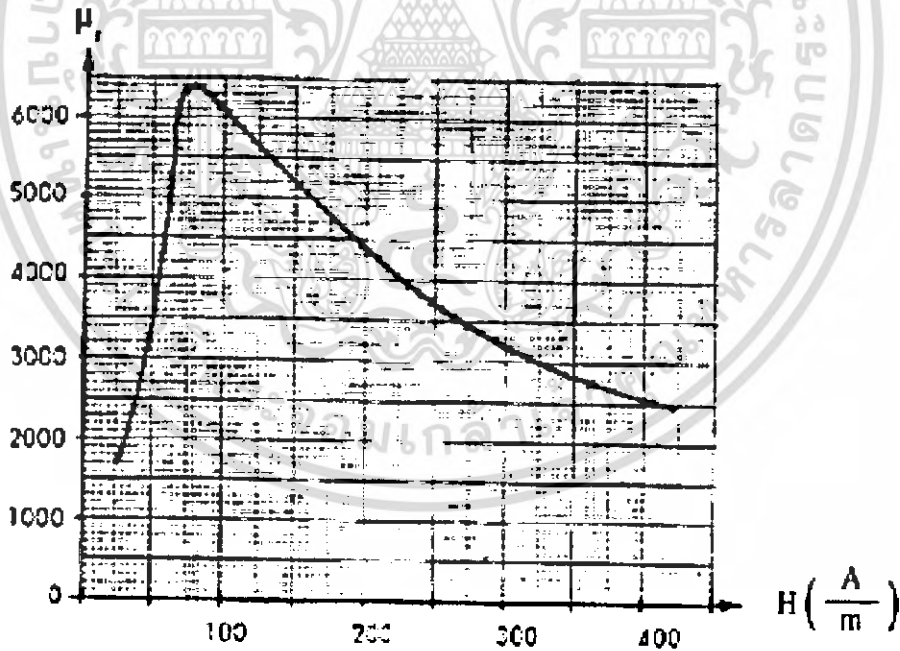
ค่าความสัมพันธ์จะไม่เป็นเส้นตรงและจะมีระดับหนึ่ง ถึงแม้ว่าเราจะเพิ่มความเข้มนามแม่เหล็กให้มากขึ้นไปอีกแต่ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก จะไม่เปลี่ยนแปลงจุดที่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีกนี้เราเรียกว่า จุดอิมตัวของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของสารนั้นและค่าของ  $\mu_r$  ที่มีขนาดสูงที่สุดของสารใดๆ จะสามารถหาจากการลากเส้นตรงไปสัมผัสกับเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $B$  กับ  $H$  นี้ เราเรียกว่าเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก หรือ เส้นโค้งการอิมตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก ณ จุดสัมผัสระหว่างเส้นตรงที่ลากจากจุดเริ่มต้นของเส้นโค้งและเส้นสัมผัสกับเส้นโค้งทำให้อ่านค่า  $B$  กับ  $H$  ได้ และนำค่า  $B$  และ  $H$  ที่อ่านได้ในแต่ละจุดนั้นไปแทนค่าในสมการ



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มนามแม่เหล็ก ( $B-H$  Curve) เมื่อ  $H < 400$  แอมแปร์ต่อเมตร



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ( $B-H$  Curve) เมื่อ  $H > 400$  แอมแปร์ต่อเมตร



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบได้กับความเข้มสนามแม่เหล็ก ( $\mu-H$  Curve)

### 2.1.13 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

ถ้าทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กของวงแหวนทอรอยด์เปลี่ยนแปลง โดยวัดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองแทนด้วยเส้นโค้ง OAC ถ้าลดความเข้มสนามแม่เหล็กลงเป็นศูนย์จะยังมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเหลืออยู่คือ OD มีชื่อเรียกว่า อำนาจแม่เหล็กตกค้าง (Residual magnetism) หรือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กคงเหลือ (Remanent flux density)

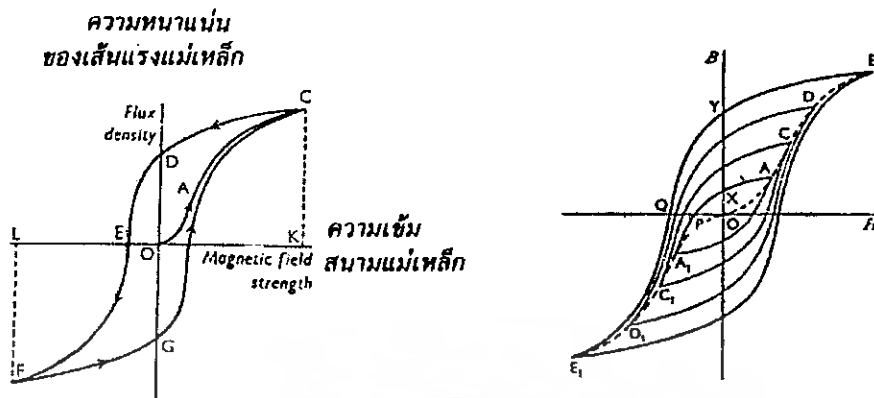
ถ้าต้องการให้อำนาจแม่เหล็กตกค้างเป็นศูนย์ จะต้องเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้าม ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลง จนกระทั่งถึงค่า OE เส้นแรงแม่เหล็กจะลดลงเป็นศูนย์ ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก OE ที่ทำให้อำนาจแม่เหล็กตกค้างเป็นศูนย์มีชื่อเรียกว่า Coercive force

การเพิ่มขึ้นต่อไปของความเข้มสนามแม่เหล็กจะเป็นเหตุให้เกิดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม ดังแทนด้วยเส้นโค้ง EF จะสังเกตเห็นว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กมากที่สุดในทิศทางบวกคือ OK จะมีค่าเท่ากับ OL ในทิศทางลบ และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมากที่สุดในทิศทางบวกคือ KC จะมีค่าเท่ากับ LF ในทิศทางลบ

ถ้าความเข้มสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงค่าจาก OL ไปเป็น OK ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงตามเส้นโค้ง FGC คล้ายกับเส้นโค้ง CDEF และรูปปิดของ CDEFGC มีชื่อเรียกว่า วงของฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop)

การหาของฮิสเทอรีซิสของวงแหวนเหล็กอันหนึ่ง จะสังเกตเห็นว่าค่าสูงสุดของความเข้มสนามแม่เหล็กแต่ละค่าจะอยู่บนเส้นโค้งการเกิดสนามแม่เหล็กเส้นเดียวกัน จุดยอดของฮิสเทอรีซิสแต่ละวงคือ A C D และ E โดยจะวางอยู่บนเส้นโค้ง B-H Curve ที่หาได้โดยการเพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะพบว่าอำนาจแม่เหล็กตกค้างขึ้นอยู่กับค่าสูงสุดของความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังนั้นในวง A อำนาจแม่เหล็กตกค้างคือ OX ส่วนวง E ค่าสูงสุดของความเข้มสนามแม่เหล็กเข้าใกล้จุดอิ่มตัว (Saturation) อำนาจแม่เหล็กตกค้างคือ OY

อำนาจแม่เหล็กตกค้างที่ได้รับเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุดถึงจุดอิ่มตัวของวัสดุ มีชื่อเรียกว่า รีมาเนนซ์ (Remanence) ของวัสดุนั้น



รูปที่ 2.14 แสดงวงของฮิสเตอร์ิซิสและเส้นโค้งการเกิดสนามแม่เหล็ก

2.1.14 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ิซิส

การใช้ไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำวงจรขดลวดที่พันรอบแกนเหล็ก ให้เกิดอำนาจแม่เหล็กในแต่ละรอบ (Cycle) การสูญเสียภายในแกนเหล็ก อันเกิดจากฮิสเตอร์ิซิส จะเท่ากับพื้นที่ภายในวงฮิสเตอร์ิซิสนั้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และชนิดของสารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกน ดังนั้นค่าโดยประมาณของการสูญเสียจากฮิสเตอร์ิซิสของสารแม่เหล็กที่ความถี่  $f$  หาได้จาก

$$P_h = K_h f B_m^n$$

- $P_h$  = การสูญเสียจากฮิสเตอร์ิซิส มีหน่วยเป็น W
- $K_h$  = ค่าคงที่ของวงจรมแม่เหล็กที่ทำการทดลอง
- $f$  = ค่าความถี่ไฟฟ้าของแหล่งจ่าย มีหน่วยเป็น Hz
- $n$  = สไตน์เมทซ์เอกซ์โพเนนท์ (Steinmetz exponent) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 – 2.0 แต่โดยทั่วไปใช้  $n = 1.6$

2.1.15 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss)

กระแสไหลวนจะทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นเนื่องจากกระแสไหลวนอยู่ในสารแม่เหล็ก โดยถ้าทำให้สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านตัวนำ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในตัวนำนั้น แต่ถ้าเราใส่แกนเหล็กเข้าไปในขดลวดที่มีกระแสสลับไหลอยู่ ก็จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะของรูปคลื่นไซน์ด้วย การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในแกนเหล็กและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในแกนเหล็กนี้จะเป็นตัวทำให้เกิดมีกระแสไหลวนภายในแกนเหล็กนั้น ซึ่งเรียกว่ากระแสไฟฟ้านี้ว่ากระแสไหลวน กระแสไหลวนจะเกิดขึ้นในแกนเหล็กทุกๆชนิดของสารที่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

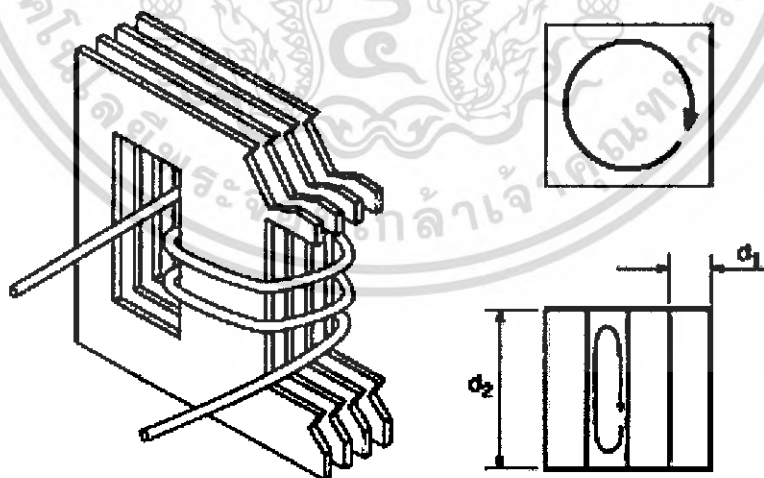
ตัวนำไฟฟ้า กระแสนี้จะไหลผ่านความต้านทานไฟฟ้าของสารแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ความร้อนเกิดขึ้นนี้เกิดจากกำลังสูญเสียซึ่งมีค่า  $I^2 R$  และเนื่องจากความต้านทานของเหล็กมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับสารชนิดอื่นๆ ดังนั้นกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กจึงมีค่าค่อนข้างสูง และขนาดของกระแสไหลวนจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของแกนเหล็ก การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงแบบรูปคลื่นไซน์สามารถหาได้จากสมการข้างล่างดังนี้

$$P_e = K_e f^2 B_m^2$$

$P_e$  = การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

$K_e$  = ค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็ก

ขนาดของกระแสไหลวนขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ความถี่ และค่าความต้านทานไฟฟ้าของแกนเหล็ก การลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนทำได้โดยใช้แกนเหล็กที่เป็นแผ่นเหล็กบางๆ (Laminated sheet steel) อัดซ้อนเข้าด้วยกัน โดยในแต่ละแผ่นจะใช้สารเคลือบผิวที่มีค่าความต้านทานสูง เช่น ฉาบด้วยน้ำมันวานิช ซึ่งจะช่วยให้กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก ที่ใช้แผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนกันมีค่าลดลงอย่างมาก ดังนั้นจึงทำให้การกำลังการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนมีค่าลดลงหรือมีค่าน้อยลงตามไปด้วย กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กที่มีเนื้อเดียวกันตลอด ดังนั้นเราจึงไม่นำเอาแกนเหล็กที่มีเนื้อเดียวกันตลอดหรือแกนเหล็กตันมาใช้กับแรงดันแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับ และในแกนเหล็กที่ใช้แผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนกันแสดงดังรูป 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงการเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสูญเสียเนื่องจากฮีสเทอรีซิส และกระแสไหลวน รวมกันเรียกว่า การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) การสูญเสียในแกนเหล็กของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำงานโดยมีแรงดันและความถี่หรือความเร็วคงที่ เช่น หม้อแปลง มอเตอร์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีค่าโดยประมาณคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามโหลด

### 2.1.16 การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า (AC Excitation)

ในวงจรแม่เหล็กเมื่อเราจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็กที่ไม่มีช่องอากาศโดยความยาวของวงจรแม่เหล็ก ( $l_c$ ) และพื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็กเป็น ( $A_c$ ) จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็ก (m.m.f.) ที่ป้อนให้กับวงจรแม่เหล็ก

ในระบบการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ลักษณะของรูปสัญญาณ (Wave form) ของศักดาไฟฟ้าจะมีรูปสัญญาณตามแบบของ Sinusoidal function ที่แปรเปลี่ยนกับเวลา  $t$  ซึ่งจะมีผลให้เส้นแรงแม่เหล็ก ( $\phi$ ) มีการเปลี่ยนแปลงตาม Sinusoidal function ด้วย ดังนั้นเราสามารถแสดงลักษณะของ Exciting current และแสดงถึงความสูญเสียในสนามแม่เหล็กมาใช้เป็นวงจรแม่เหล็ก เมื่ออยู่ในสภาวะคงตัวของไฟฟ้ากระแสสลับ (Steady state AC operation)

กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก  $\phi(t)$  เป็นแบบ Sinusoidal

$$\begin{aligned}\phi(t) &= \phi_{max} \sin \omega t \\ &= A_c B_{max} \sin \omega t\end{aligned}$$

$\phi_{max}$  = เป็นค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Wb

$B_{max}$  = เป็นค่าสูงสุดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น T

$\omega$  =  $2\pi f$  เป็นความเร็วเชิงมุม (Angular velocity) มีหน่วยเป็น rad/sec

$f$  = เป็นความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ มีหน่วยเป็น Hz

จาก Faraday's Law สามารถหาการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้า (Induced voltage) เมื่อจำนวนรอบขดลวดที่พันอยู่เท่ากับ  $N$  รอบ โดยกำหนดให้ว่า ในวงจรแม่เหล็กเส้นแรงแม่เหล็กที่คล่องขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็ก มีค่าเท่ากันทุกรอบ

$$\begin{aligned}e(t) &= N \frac{d\phi(t)}{dt} \\ &= \omega N A_c B_{max} \cos \omega t \\ &= E_{max} \cos \omega t\end{aligned}$$

เมื่อ

$$E_{max} = 2\pi f N A_c B_{max}$$

ในทางปฏิบัตินิยมใช้ค่า rms เมื่อระบบทำงานอยู่ในสภาวะคงตัว

$$\begin{aligned} E_{rms} &= \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} \\ &= \frac{2\pi f N A_c B_{max}}{\sqrt{2}} \\ E_{rms} &= 4.44 f N A_c B_{max} \end{aligned}$$

ในการทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก จะต้องมีการแสไฟฟ้าป้อนให้กับขดลวด เราเรียกกระแสนี้ว่า กระแสกระตุ้น (Exciting current,  $i_\phi$ ) สำหรับสารแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติเป็นแบบ non-linear เพื่อเส้นแรงแม่เหล็กใน Sinusoidal จะมีผลทำให้กระแสกระตุ้นมีรูปร่างแตกต่างไปจากรูปสัญญาณของเส้นแรงแม่เหล็กตามสภาพความสัมพันธ์ระหว่าง  $B$  กับ  $H$

### 2.1.17 กระแสกระตุ้นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC exciting current)

เมื่อป้อนศักดาไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็ก ที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง  $B$  กับ  $H$  ในลักษณะของ Hysteresis loop ผลที่ออกมาเมื่อเราป้อนศักดาไฟฟ้าเป็น Sinusoidal wave form ผลจะทำให้  $\phi$  หรือ  $B$  ในแกนเหล็กจะมีรูปของสัญญาณเป็นแบบ Sinusoidal กระแสที่จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเป็นแบบ Sinusoidal จะมีรูปร่างความสัมพันธ์ตาม Hysteresis loop คือไม่เป็น Sinusoidal

จากการป้อนกระแสสลับที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก ในแกนเหล็กเปลี่ยนแปลงตาม Sinusoidal function จะได้ค่า  $E_{rms}$  และค่า  $I_\phi$  ซึ่งเป็น rms exciting current จาก

$$\begin{aligned} E_{rms} &= 4.44 f N A_c B_{max} \\ I_{\phi,rms} &= \frac{I_c H_{rms}}{N} \end{aligned}$$

ดังนั้นสามารถหาค่า rms voltage (VA) ที่ต้องการสำหรับกระตุ้นแกนให้ได้เส้นแรงแม่เหล็ก ( $\phi$ ) ตามที่ต้องการ

$$\begin{aligned} E_{rms} I_{rms} &= 4.44 f N A_c B_{max} \frac{I_c H_{rms}}{N} \\ &= 4.44 f B_{max} H_{rms} (A_c I_c) \end{aligned}$$

สำหรับสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น  $\rho_c$  kg/m<sup>3</sup>

เหล็กที่ใช้ทำแกนเหล็กจะหนักเท่ากับ  $\rho_c A_c l_c$  kg

ซึ่งสามารถหาค่า VA/kg ที่ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุด  $B_{max}$  แต่ละค่าหาได้จาก

$$P_o = \frac{E_{rms} I_{rms}}{\rho_c l_c A_c} = \frac{4.44}{\rho_c} f B_{max} H_{rms}$$

เมื่อ  $P_o$  เป็นค่า rms volt ampere per kilogram มีหน่วยเป็น VA/kg

## 2.2 วงจรแม่เหล็ก

### 2.2.1 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuits)

คือ เส้นทางหรือแนวที่เส้นแรงแม่เหล็กส่วนใหญ่ไหลผ่าน ซึ่งได้แก่ส่วนที่เป็นสารแม่เหล็ก และส่วนที่เป็นอากาศ เส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่ไม่ได้ไหลตามทิศทางที่กำหนดไว้ เรียกว่า “ลึคเกจฟลักซ์” (leakage flux)

#### วัสดุแม่เหล็ก

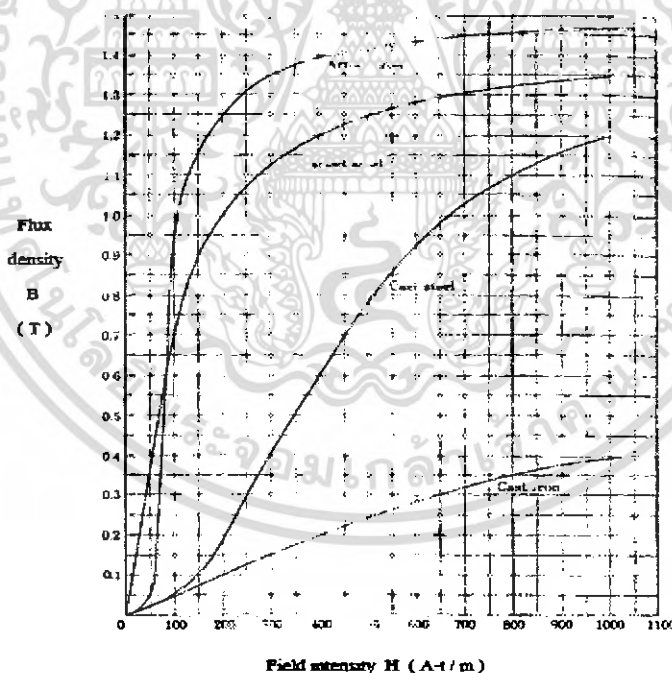
$$\mu = \mu_r \mu_0$$

$\mu$  : Permeability ( $H/m$ )

$\mu_0$  : Free-space Permeability ( $4\pi \times 10^{-7}$ ) ( $H/m$ )

$\mu_r$  : Relative Permeability

- 1) พาราแมกเนติก ( $\mu_r = 1.0$ )
- 2) ไดอาแมกเนติก ( $\mu_r < 1.0$ )
- 3) เฟอร์โรแมกเนติก ( $\mu_r \gg 1.0$ )



รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ของค่า  $B-H$  ของ Ferromagnetic material ชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

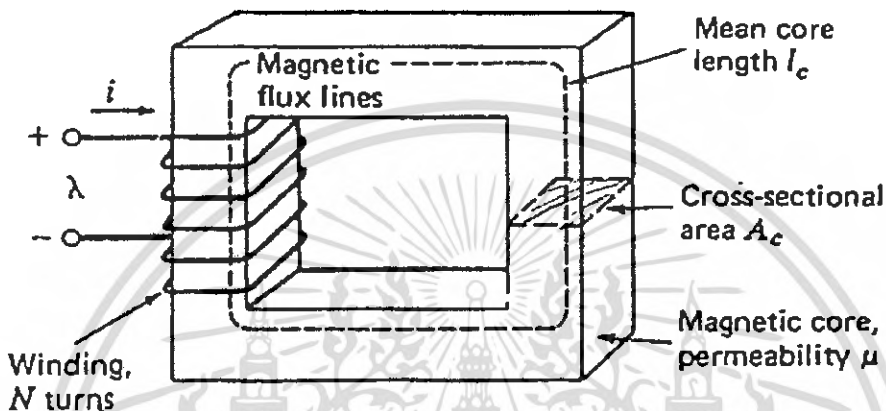
$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H$$

$B$  : Magnetic flux density (Tesla, weber/m<sup>2</sup>)

$H$  : Magnetic field intensity (A-t/m, A/m)

$$\mathfrak{F} = Ni = \oint H \cdot dl$$

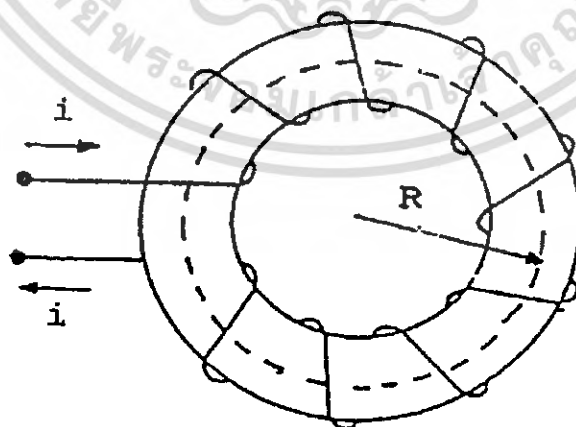
$\mathfrak{F}$  : Magnetomotive force, mmf (A-t)



รูปที่ 2.17 แสดงวงจรแม่เหล็กประกอบด้วยขดลวดพันรอบแกนเหล็ก

จากรูปจะเห็นว่า

$$\mathfrak{F} = Ni = \oint H \cdot dl = H_c l_c$$

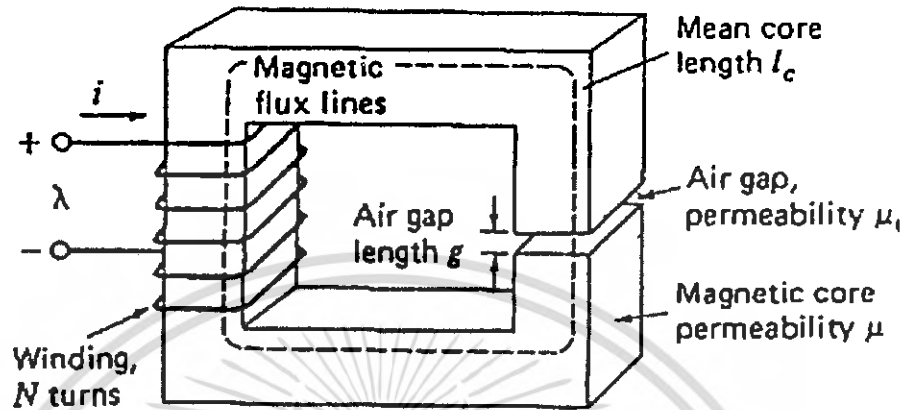


รูปที่ 2.18 แสดงวงจรแม่เหล็กประกอบด้วยขดลวดพันรอบแกนเหล็กแบบทอรอยด์

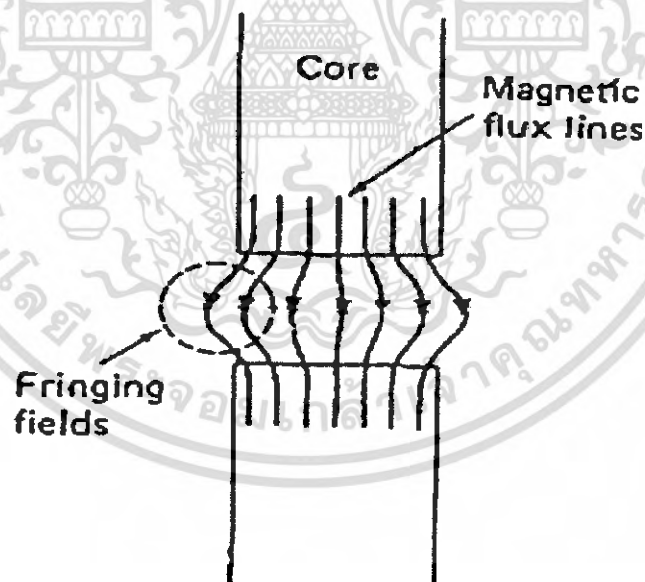
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นว่า

$$\mathfrak{F} = Ni = \oint H \cdot dl = H(2\pi r)$$



รูปที่ 2.19 แสดงวงจรแม่เหล็กที่มีช่องอากาศ



รูปที่ 2.20 แสดงปรากฏการณ์ Fringing

จากรูปจะเห็นว่า

$$\mathfrak{F} = Ni = \oint H \cdot dl = H_c l_c + H_g g$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ Magnetic flux  $\phi$  (weber)

$$\phi = \int B \cdot dA$$

$$\phi_c = B_c A_c$$

$$B_c = \frac{\phi}{A_c} \quad : \text{Core}$$

$$B_g = \frac{\phi}{A_g} \quad : \text{Air gap}$$

ไม่คิดปรากฏการณ์ Fringing

$$B_g = B_c = \frac{\phi}{A_c}$$

$$\mathfrak{I} = Ni = \frac{B_c l_c}{\mu} + \frac{B_g g}{\mu_0}$$

$$\mathfrak{I} = Ni = \phi \frac{l_c}{\mu A_c} + \phi \frac{g}{\mu_0 A_g}$$

กำหนดให้ Reluctance :  $\mathfrak{R}$  (A-t/webers)

$$\mathfrak{R}_c = \frac{l_c}{\mu A_c}$$

$$\mathfrak{R}_g = \frac{g}{\mu_0 A_g}$$

$$\mathfrak{I} = Ni = \phi (\mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_g)$$

ถ้า  $\mu \gg \mu_0$  แล้ว  $\mathfrak{R}_c \ll \mathfrak{R}_g$

$$\phi \approx \frac{Ni}{\mathfrak{R}_g} = \frac{Ni \mu_0 A_g}{g}$$

## 2.2.2 ค่าความเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้า

เมื่อกำหนดให้

$\phi_{\max}$  : เป็นค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก

มีหน่วยเป็น Wb

$B_{\max}$  : เป็นค่าสูงสุดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

มีหน่วยเป็น T

$\omega = 2\pi f$  : เป็นค่าความเร็วเชิงมุม

มีหน่วยเป็น rad/s

$f$  : เป็นความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ

มีหน่วยเป็น Hz

จาก faraday's law สามารถหาการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้า (induced voltage)

$$\begin{aligned} e(t) &= N \frac{d\phi(t)}{dt} \\ &= \omega N A_c B_{\max} \cos \omega t \\ &= E_{\max} \cos \omega t \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $E_{\max} = 2\pi f N A_c B_{\max}$

หาค่า rms induced voltage ( $E_{rms}$ )

$$E_{rms} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}}$$

$$= \frac{2\pi f N A_c B_{\max}}{\sqrt{2}}$$

$$E_{rms} = 4.44 f N A_c B_{\max}$$

### 2.2.3 ค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance)

$\lambda$  : Flux linkage (Wb-t)

$$\lambda = N\phi$$

จากกฎของ Faraday

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt}$$

$$e = L \frac{di}{dt}$$

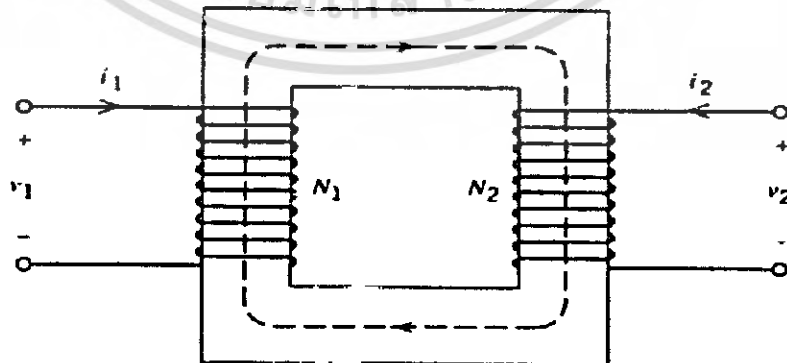
$$L \frac{di}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt}$$

$$L = N \frac{d\phi}{di} = \frac{d\lambda}{di}$$

ในช่วง Linear

$$L = \frac{N\phi}{i} = \frac{\lambda}{i}$$

### 2.2.4 Self - inductance and Mutual inductance



รูปที่ 2.21 แสดงวงจรแม่เหล็กที่ขดลวด 2 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathfrak{I} = Ni = N_1 i_1 + N_2 i_2$$

$$\phi = (N_1 i_1 + N_2 i_2) \frac{\mu_0 A_c}{g}$$

$\phi$  : Resultant flux

Flux linkage with coil 1

$$\lambda_1 = N_1 \phi = N_1^2 \frac{\mu_0 A_c}{g} i_1 + N_1 N_2 \frac{\mu_0 A_c}{g} i_2$$

Flux linkage with coil 2

$$\lambda_2 = N_2 \phi = N_1 N_2 \frac{\mu_0 A_c}{g} i_1 + N_2^2 \frac{\mu_0 A_c}{g} i_2$$

$$\lambda_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2$$

$$\lambda_2 = L_{21} i_1 + L_{22} i_2$$

Self – inductance with coil 1

$$L_{11} = N_1^2 \frac{\mu_0 A_c}{g}$$

Self – inductance with coil 2

$$L_{22} = N_2^2 \frac{\mu_0 A_c}{g}$$

Mutual inductance of coil 1 and 2

$$L_{12} = N_1 N_2 \frac{\mu_0 A_c}{g} = L_{21}$$

## 2.2.5 พลังงานสะสมในสนามแม่เหล็ก (Energy storage in magnetic field)

$$p = ie = i \frac{d\lambda}{dt} \quad \text{joules / sec ( w )}$$

$$W = \int_0^t \left( \frac{d\lambda}{dt} \right) i dt = \int_0^t \left( N \frac{d\phi}{dt} \right) i dt = \int_0^\phi (Ni) d\phi \quad \text{joules}$$

ถ้าความสัมพันธ์เป็นแบบ Linear จะได้ energy storage

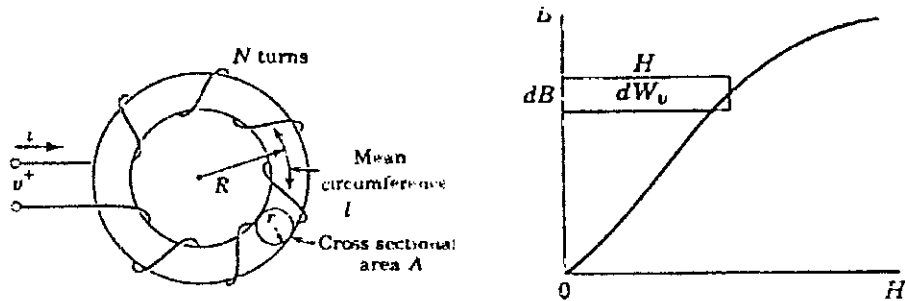
$$W = \int_0^\lambda \frac{\lambda}{L} d\lambda = \frac{1}{2L} \lambda^2 = \frac{1}{2} Li^2$$

$$W = \int_0^t \left( \frac{d\lambda}{dt} \right) i dt = \int_0^t \left( N \frac{d\phi}{dt} \right) i dt = \int_0^\phi (Ni) d\phi$$

จาก  $\mathfrak{I} = Ni = Hl$  และ  $d\phi = AdB$

ดังนั้น  $Nid\phi = (Hl)(AdB) = (LA)(HdB)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็ก

โดยที่  $lA$  เป็นปริมาตรของแกนเหล็ก ฉะนั้นพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรจะเท่ากับ

$$\text{Energy density} \quad W_v = \frac{W}{lA} = \int_0^B (H) dB \quad \text{joules / m}^3$$

ถ้าความสัมพันธ์เป็นแบบ Linear จะได้

$$W_v = \int_0^B (H) dB = \int_0^B \frac{B}{\mu} dB = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu}$$

$$W_v = \int_0^B (H) dB = \int_0^H (\mu H) dH = \frac{1}{2} \mu H^2$$

$$W_v = \frac{1}{2} BH = \frac{1}{2\mu} B^2$$

### 2.3 การเสื่อมสภาพของฉนวนที่เป็นสารเคลือบผิวในแกนเหล็ก

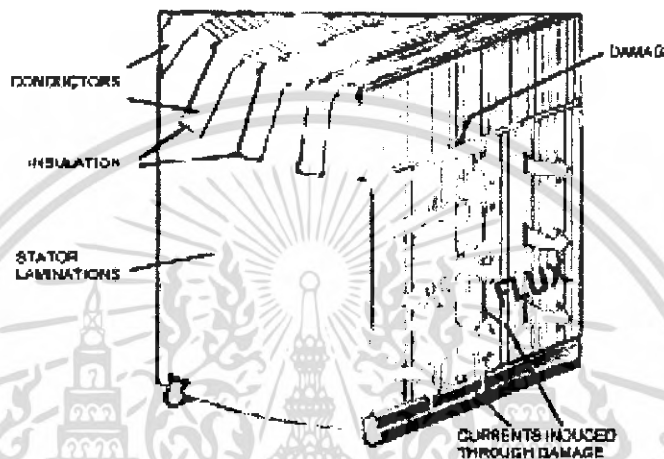
การลดค่าความสูญเสียเนื่องมาจากกระแสไหลวนในวงจรแม่เหล็กนั้นจำเป็นต้องใช้แผ่นเหล็กบางๆ มาเรียงซ้อนกัน ดังนั้นแกนสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับนั้นจึงทำขึ้นจากแผ่นเหล็กบางๆ หลายๆ แผ่นมาเรียงซ้อนกัน โดยแต่ละแผ่นจะใช้สารเคลือบผิวเป็นฉนวน ซึ่งสารนี้มีคุณสมบัติในการต้านทานไฟฟ้าสูง เพื่อป้องกันกระแสไหลถึงกันระหว่างแผ่น ถ้าหากฉนวนถูกทำลาย หรือเกิดเสื่อมสภาพไป ฟลักซ์แม่เหล็กที่ไหลในแกนสเตเตอร์นั้นสามารถทำให้เกิดกระแสไหลวนระหว่างแผ่นเหล็กที่เสียหายนั้นได้ กระแสไหลวนนี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในแกนสเตเตอร์และอาจทำให้เกิดการเบรคดาวน์ได้ สาเหตุที่ทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ของในแกนเหล็กเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของฉนวนที่เป็นสารเคลือบผิวในแกนเหล็ก

#### - ความหลวมของแกนสเตเตอร์

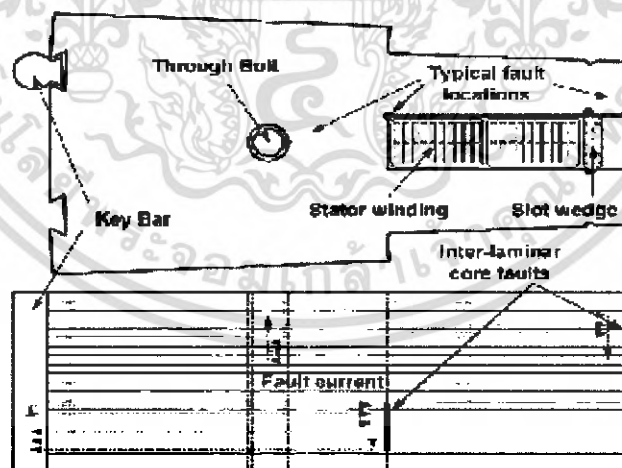
แกนสเตเตอร์ต้องถูกยึดอย่างแน่นหนาและปลอดภัยเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงภายใต้แรงแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็ก เพราะการยึดแกนเหล็กนั้นไม่ใช่เรื่องง่าย เนื่องจากแกนเหล็กและเฟรมนั้นไม่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน แม้ว่าใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการผลิตเริ่มต้นนี้มีระดับของความแน่นหนาของการยึดติดกันตามความต้องการแล้ว แต่ในหลายๆกรณีก็มักมีปัญหาการหย่อนสมรรถภาพลงเมื่ออยู่ในสภาวะการทำงาน เมื่อเกิดการหย่อนสมรรถภาพแผ่นเหล็กที่เรียงซ้อนกันนี้จะได้รับผลจากการสั่นสะเทือนและทำให้ฉนวนหลุดออกจากแผ่นเหล็กได้ หรืออาจเกิดจากตัวจับยึดของซีแกนสเตเตอร์นั้นไปทำให้แผ่นเหล็กที่ติดกันนั้นเกิดการตัดขาด จากสาเหตุอย่างใดอย่างหนึ่งนั้นจะทำให้มีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดการ Short กันระหว่างแผ่นเหล็กที่อยู่ติดกันและทำให้เกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก



รูปที่ 2.23 การเกิดกระแสไหลวนเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของฉนวน



รูปที่ 2.24 โครงสร้างของแกนสเตเตอร์ที่เกิดการเสียหายจาก Wedge และกระแสไฟไหลวนที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### - แกนเหล็กเกิดการเสียหายขณะที่พันขดลวดที่แกนสเตเตอร์

เนื่องจากต้องการรั้งขดลวดในร่องสเตเตอร์ให้แน่นหนาจึงต้องมีลิ้ม (wedge) ดันขดลวดไว้ในร่องสลิต ที่ผิวบริเวณใกล้ๆ ปากร่อง การใส่ลิ้มนี้ต้องใช้ทักษะและประสบการณ์อย่างสูง อย่างไรก็ตามแกนเหล็กเคลือบฉนวนนี้ก็สามารถเกิดการเสียหายจากลิ้มได้ซึ่งอาจทำให้เกิดกระแสไหลวนระหว่างแผ่นเหล็กที่ติดกันได้ ตามรูปที่ 2.24

#### - ฉนวนเคลือบแกนเหล็กเกิดการหลุดล่อนออกเมื่อทำการทดสอบขดลวดสเตเตอร์

ขดลวดที่พันบนแกนสเตเตอร์ในเครื่องกลไฟฟ้าบางชนิดต้องการการทดสอบที่ใช้แรงดันสูง ซึ่งการทดสอบอาจทำให้เกิดความเค้นทางไฟฟ้าที่ทำต่อฉนวนมากเกินไป อาจทำให้ฉนวนเกิดหลุดออก

#### - ความเสียหายของแกนสเตเตอร์เนื่องจากไฟไหม้

ในสถานะที่ขดลวดนั้นพันผิดไป อาจทำให้เกิดไฟไหม้ในร่องสลิต ซึ่งไฟไหม้นั้นเกิดที่ด้านข้างของแผ่นเหล็กย่อมจะทำให้ฉนวนเกิดหลุดออกจากตัวแผ่นเหล็กได้

#### - ความเสียหายเชิงกลโดยเกิดจากการกระแทก

บางครั้งอาจเกิดความเสียหายที่บริเวณผิวของซีแกนเหล็ก ซึ่งอาจเกิดเนื่องมาจากการขนส่ง ขนย้าย ทำให้ส่วนประกอบบางอย่างที่หลวมอยู่แล้วเกิดหล่นหายไป หรืออย่างเช่น เมื่อมีการปลดโรเตอร์ อาจทำให้แกนโรเตอร์ไปกระทบบริเวณที่ติดกับสเตเตอร์ ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งคู่นั้น ผิวของสเตเตอร์ย่อมได้รับแรงกระแทก และทำให้เกิดอันตรายต่อแกนเหล็กได้



รูปที่ 2.25 ความเสียหายของแกนสเตเตอร์เนื่องจากไฟไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### - สาเหตุอื่น ๆ

สาเหตุอื่นๆที่สามารถทำให้เกิดความเสียหายต่อแกนเหล็กเคลือบฉนวนได้นั้น ยังมีอีกหลายสาเหตุ เช่น ฉนวนที่ปั๊มของแกนเหล็กเกิดความเสียหาย ความเสียหายของฉนวน จากท่อหล่อเย็น (water cooling tubes) ที่ติดตั้งบนแกนสเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดความผิดปกติ แต่สาเหตุเหล่านี้โดยทั่วไปนั้นเกิดได้ค่อนข้างยาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การออกแบบการทดลอง

เริ่มจากการเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

1. แกนเหล็ก 160 แผ่น และแกนเหล็กขนาด 1 HP
2. Search-Coil ขนาด กว้าง 3 mm. ยาว 10 mm. สูง 2,3 และ 4 mm.  
ตามลำดับ
3. Search-Coil ขนาด กว้าง 10 mm. ยาว 10 mm. สูง 2,3 และ 4 mm.  
ตามลำดับ
4. Transformer ratio 300/2
5. สายไฟ THW ขนาด 35 mm<sup>2</sup>. 3 เส้น
6. Breaker Mitsubishi Model. NF 250-CW
7. Variac 0-270 V
8. Portable Current Transformer ratio
9. Power Analyzer PZ 4000 Yokogawa
10. Digital Low Resistance Ohm Meter
11. Current Probe
12. Oscilloscope
13. Amp-MeterAC

เมื่อทำการศึกษาคณะวิชา คำนิยาม และความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า วงจรแม่เหล็ก จะสามารถวิเคราะห์สมการที่ใช้ และเกี่ยวข้องในการศึกษาดังนี้

สมการที่ใช้ในการทดสอบ

$$\mathcal{F} = Ni = HI$$

$$E_H = 4.44 f \mu_0 (N_H A_H) H$$

$$\phi_T = \frac{E_B}{4.44 f N_H}$$

#### ขั้นตอนการทดสอบ

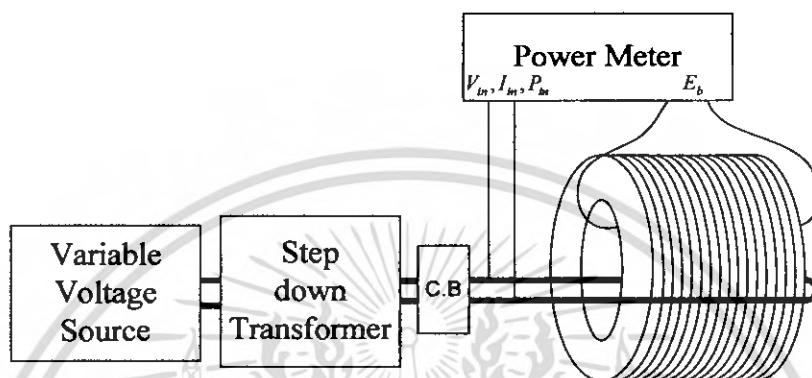
1. เริ่มด้วยจากการใช้กระแสไฟฟ้าแรงสูงคล่องผ่านแกนเหล็กที่เรียงซ้อนกัน โดยไม่ทำการเชื่อม (Stacking) เพราะต้องการให้กระแสไฟฟ้าตัดผ่านแกนเหล็กเพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็กเข้าไปในแกนเหล็ก แกนเหล็กก็จะเกิดสนามแม่เหล็ก เราจะกระตุ้นให้แกนเหล็กมีความหนาแน่นเส้นแรง แม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าตั้งแต่ 0.5 – 2 T โดยเราจะนำสายไฟไปคล้องแกนเหล็กไว้อีกด้านหนึ่ง เพื่อวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำโดยวัดจาก Power Meter จากนั้นเก็บค่ากระแสและแรงดันขา - เข้า เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่วัดได้ใน Power Meter มาจากการคำนวณจากสูตร

$$E_{rms} = 4.44 f N A_c B_{max}$$

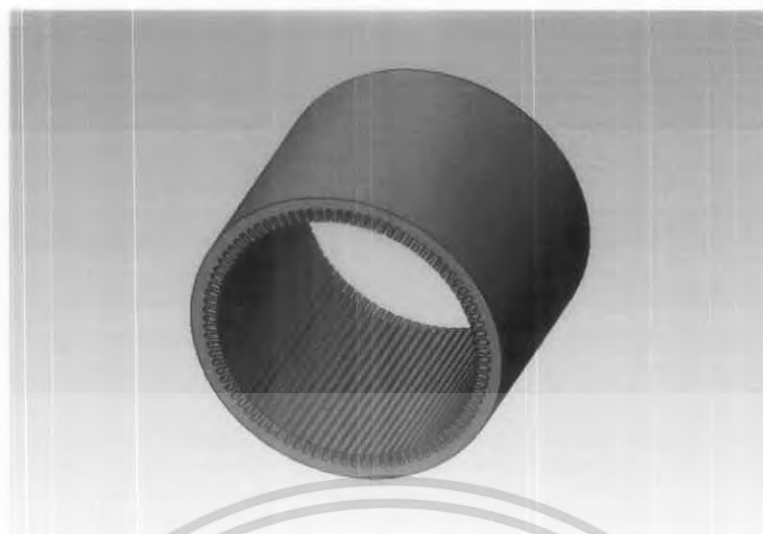
เนื่องจากที่กล่าวมาข้างต้นว่ากระแสมีค่าอาจมีค่ามากกว่า 100 A จึงทำให้เกิด  
พิกัดของ Power Meter ดังนั้นจึงต้องทำให้กระแสลดลงโดยใช้ Current Transformer ที่มี ratio  
100:5



รูปที่ 3.1 แสดงวงจรการทดสอบแบบ Exciting high current test

2. หลังจากนั้นก็จะมาทดสอบแกนเหล็กโดยทำการเชื่อมกันทั้งแกน (Welding) การทดลอง  
และอุปกรณ์ทดสอบเหมือนการทดสอบแกนเหล็กที่เรียงซ้อนกันโดยไม่ทำการเชื่อม (Stacking) หลังจากนั้น  
นำไปวิเคราะห์ต่อไป

3. ทำการขีดแกนเหล็ก (Inter-laminar Core fault) ที่ 25% ของความยาวซี  
โดยใช้เครื่องเชื่อม และวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็ก จากนั้นเก็บ  
ค่ากระแสและแรงดันขาเข้าเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.2 แกนเหล็กถูกขัด 25%

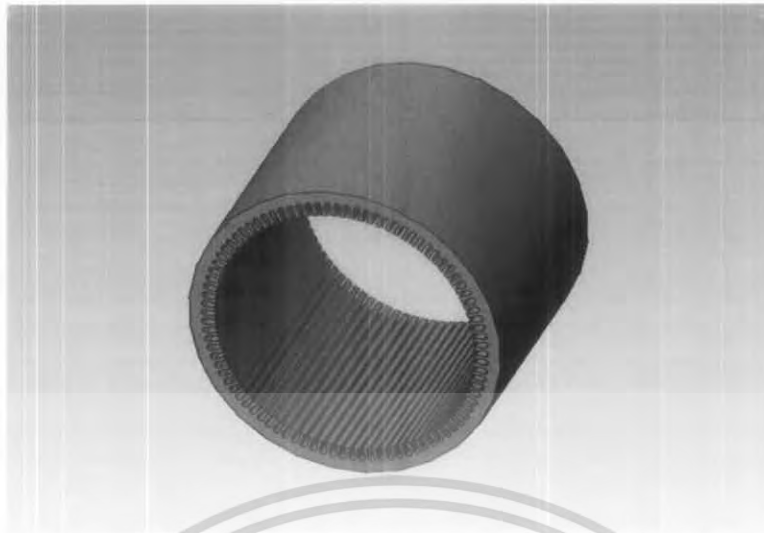
4. ทำการขัดแกนเหล็กที่ 50% ของความยาวซีโดยใช้เครื่องเชื่อม และวัดค่าแรงดันเหนียวนำที่เกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็ก จากนั้นเก็บค่ากระแสและแรงดันขาเข้า เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.3 แกนเหล็กถูกขัด 50%

5. ทำการขัดแกนเหล็กที่ 75% ของความยาวซีโดยใช้เครื่องเชื่อม และวัดค่าแรงดันเหนียวนำที่เกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็ก จากนั้นเก็บค่ากระแสและแรงดันขาเข้า เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แกนเหล็กถูกซัด 75%

6. ทำการซัดแกนเหล็กที่ 100% ของความยาวที่ใช้เครื่องเชื่อม และวัดค่าแรงดันเหนียวน้ำที่เกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็ก จากนั้นเก็บค่ากระแสและแรงดันขาเข้า เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.5 แกนเหล็กถูกซัด 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เป็นขั้นตอนการสร้างและออกแบบ Search-Coil เพื่อนำไปตรวจหาจุดผิดปกติในแกนเหล็ก จากความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้ากับทิศทางของสนามแม่เหล็ก คือเมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวด ก็จะเกิดสนามแม่เหล็กวิ่งรอบตัวนำตามกฎมือขวาของ Ampere's law เช่นเดียวกันกับตำแหน่งบนแกนเหล็กที่ผิดปกติ ก็จะมีกระแสไหลวนและเกิดสนามแม่เหล็กวิ่งรอบตำแหน่งที่ผิดปกติเช่นเดียวกัน และจาก Faraday's law กล่าวว่าเมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวดตัวนำ จะเกิดแรงดันไฟฟ้าในขดลวดตัวนำ โดยเรียกรวมแรงดันไฟฟ้านี้ว่า แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(Induced Voltage)

จากเหตุผลข้างต้นเราสามารถสร้างอุปกรณ์ตรวจหาตำแหน่งที่ผิดปกติในแกนเหล็กได้ โดยสร้างขดลวดตัวนำหรือต่อจากนี้ไปจะเรียกว่า Search-Coil เพื่อให้จะให้สนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งที่ผิดปกติตัดผ่าน จะทำให้สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งที่ผิดปกติได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำ Search-Coil ไปวาง ณ ตำแหน่งที่ไม่ใช่ตำแหน่งผิดปกติก็สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ เนื่องจากมีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage Flux) เกิดขึ้นระหว่างระหว่าง Teeth ทุกๆ ตำแหน่งในแกนเหล็ก เพราะฉะนั้นถ้านำ Search-Coil ไปวาง ณ ตำแหน่งใดแล้วเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมากกว่าตำแหน่งอื่นแสดงว่าตำแหน่งนั้นน่าจะเป็นตำแหน่งที่ผิดปกติ เพื่อที่จะยืนยันยืนยันสมมติฐานดังกล่าว จึงต้องออกแบบการทดลองดังต่อไปนี้

7.1 ทดสอบแกนเหล็กที่ผิดปกติจากการนำสายไฟมา Short Turn โดยนำสายไฟขนาด 2.5 SQ.mm. ร้อยผ่านร่อง slot ของแกนเหล็กขนาด 1 HP จำนวน 1 รอบ เพื่อจำลองว่าแกนเหล็กถูก Short Turn 100% ของความยาว Teeth และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.6 แสดงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองนี้จะทดสอบที่  $B_{max} = 1.8T$  เราสามารถทราบค่าแรงดันที่ไป Excited แกนเหล็กจากสมการ

$$E_{rms} = 4.44 f N A_c B_{max}$$

โดยที่  $f = 50 \text{ Hz}$   $N = 1$  รอบ  $A = 80 \times 9.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$   $B_{max} = 1.8T$

จะได้  $E_{rms} = 0.303 \text{ V}$

จากสมการ

$$m.m.f. = Ni = HI$$

เราต้องการทราบค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในอากาศ ณ ตำแหน่งที่ผิดปกติ โดยเราสามารถวัด  $m.m.f.$  โดยการป้อนแรงดัน  $0.303 \text{ V}$  แล้วนำ Clamp Amp มาคล้องเพื่อที่จะวัดกระแสที่ไหลในสายไฟที่ร้อยผ่านร่อง Slot กระแสที่วัดได้คือ  $29 \text{ A}$  จะได้  $H = 4142.85 \text{ A-T/m}$  ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.7 แสดงการวัดของ Clamp Amp

เมื่อนำค่า  $H$  ที่ได้มาแทนในสมการ

$$B = \mu H$$

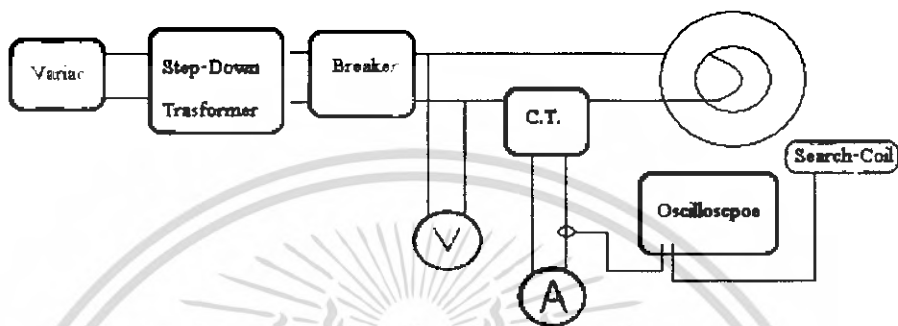
จะได้  $B = 5.2 \times 10^{-3} \text{ T}$

ฉะนั้น  $B_{max} = 7.36 \times 10^{-3} \text{ T}$

ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกน Search-Coil ออกแบบให้มีขนาด กว้าง  $3 \text{ mm}$ . ยาว  $10 \text{ mm}$ . สูง  $2, 3$  และ  $4 \text{ mm}$ . ตามลำดับ 2 ชุด โดยทุกๆขนาดมีจำนวนรอบเท่ากับ 400 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 ทดสอบแกนเหล็กที่ผิดปกติโดยการทำให้ Inter-laminar Core fault ที่ 50% ของความยาว Teeth โดยการทดลองนี้ จะทดสอบเหมือนกับข้อ 7.1 แต่ขนาด Search-Coil มีขนาด กว้าง 10 mm. ยาว 10 mm. สูง 2,3 และ 4 mm. ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 แสดงวงจรที่ใช้ทดสอบหาตำแหน่งผิดปกติในแกนเหล็กโดยใช้ Search-Coil

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ผลการทดลองต่อไปนี้เป็นการศึกษาหาค่า Core loss ของแกนเหล็กด้วยวิธี Exciting-high current test โดยแบ่งเป็นการหา Core loss ของแกนเหล็กที่นำแผ่นเหล็กที่ได้มาจากโรงงานนำมาเรียงซ้อนกันโดยไม่ทำการเชื่อม (Stacking) และแกนเหล็กที่มาจากโรงงานโดยทำการเชื่อมติดกันทั้งแกน (Welding) จากนั้นเป็นการทดสอบหาค่า Core loss โดยการหา Inter-laminar Core fault โดยแบ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ตามความยาว Core length ของแกนเหล็กใน 1 ซี่ ดังนี้คือ 25% 50% 75% และ 100% ที่ค่า B ตั้งแต่ 0.5 – 2.0 Tesla ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 Stacking

$I_{in}$	$P_{in}$	$E_b$	B	$P_{sw}$	$P_s$	$P_s(w/kg)$
27.095	1.72	0.3523	0.501287	0.353121	1.366879	0.842868
29.657	2.28	0.4269	0.607435	0.423058	1.856942	1.145059
31.945	2.88	0.4983	0.70903	0.490852	2.389148	1.473237
34.191	3.49	0.5664	0.80593	0.562301	2.927699	1.805327
36.696	4.17	0.635	0.90354	0.647713	3.522287	2.171972
39.447	4.91	0.7031	1.00044	0.748468	4.161532	2.566154
42.59	5.69	0.7709	1.096912	0.87249	4.81751	2.970654
46.575	6.63	0.8452	1.202634	1.0434	5.5866	3.444904
51.358	7.62	0.9152	1.302236	1.268707	6.351293	3.916441
57.218	8.66	0.9847	1.401128	1.574746	7.085254	4.369029
65.333	10.01	1.0562	1.502865	2.053101	7.956899	4.906517
75.301	11.57	1.125	1.600761	2.727386	8.842614	5.452682
88.834	13.58	1.1951	1.700506	3.795802	9.784198	6.033297
105.442	16.1	1.2644	1.799113	5.347765	10.75223	6.630224
126.567	19.5	1.3338	1.897862	7.705238	11.79476	7.273085
151.791	24.1	1.4083	2.003868	11.08248	13.01752	8.02708

ตารางที่ 4.2 Welding

$I_{in}$	$P_{in}$	$E_b$	B	$P_{cu}$	$P_s$	$P_s(w/kg)$
30.354	1.83	0.3511	0.49958	0.443177	1.386823	0.855166
33.348	2.4	0.4226	0.601317	0.534915	1.865085	1.15008
36.477	3.03	0.493	0.701489	0.640005	2.389995	1.473759
39.804	3.7	0.5613	0.798673	0.762076	2.937924	1.811632
43.646	4.47	0.6313	0.898276	0.916292	3.553708	2.191347
48.725	5.43	0.7092	1.009119	1.141954	4.288046	2.644167
53.484	6.28	0.7724	1.099047	1.375919	4.904081	3.024037
59.956	7.36	0.8431	1.199645	1.729061	5.630939	3.472244
67.822	8.61	0.9154	1.302521	2.212515	6.397485	3.944925
77.125	10.06	0.9844	1.400701	2.861116	7.198884	4.439097
88.905	11.83	1.0531	1.498454	3.801872	8.028128	4.95044
102.802	13.98	1.1224	1.597061	5.083329	8.896671	5.486015
121.102	16.9	1.1964	1.702355	7.054199	9.845801	6.071284
139.309	20.1	1.2625	1.796409	9.334766	10.76523	6.63824
164.649	24.9	1.3352	1.899854	13.03957	11.86043	7.313578
192.327	30.8	1.4072	2.002302	17.79203	13.00797	8.021192

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 Short 25%

$I_n$	$P_n$	$E_b$	B	$P_{cu}$	$P_s$	$P_s(w/kg)$
31.699	1.94	0.3569	0.507832	0.483322	1.456678	0.898242
34.572	2.5	0.422	0.600463	0.574902	1.925098	1.187086
38.353	3.24	0.4991	0.710169	0.707528	2.532472	1.561615
41.559	3.9	0.5611	0.798388	0.830759	3.069241	1.892607
46.034	4.8	0.6354	0.90411	1.019301	3.780699	2.331318
51.287	5.79	0.7083	1.007839	1.265201	4.524799	2.790158
56.58	6.77	0.7736	1.100754	1.539824	5.230176	3.22512
63.04	7.88	0.8404	1.195804	1.911514	5.968486	3.680388
71.551	9.33	0.9155	1.302663	2.462501	6.867499	4.234753
81.354	10.87	0.9842	1.400416	3.183486	7.686514	4.739788
93.223	12.8	1.0508	1.495181	4.180144	8.619856	5.315321
109.829	15.4	1.1253	1.601187	5.802019	9.597981	5.918469
129.174	18.6	1.1994	1.706624	8.025929	10.57407	6.520362
149.442	22.3	1.2641	1.798686	10.74213	11.55787	7.127008
175.551	27.5	1.3367	1.901988	14.82353	12.67647	7.816778
204.6	34	1.4075	2.002729	20.13522	13.86478	8.549536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 Short 50%

$I_{in}$	$P_{in}$	$E_b$	B	$P_{cu}$	$P_s$	$P_s(w/kg)$
32.26	2.05	0.3528	0.501998	0.50058	1.54942	0.955429
35.832	2.75	0.4233	0.602313	0.617571	2.132429	1.314934
39.355	3.51	0.4913	0.69907	0.744981	2.765019	1.705013
43.51	4.48	0.5629	0.800949	0.910591	3.569409	2.201029
48.211	5.39	0.6356	0.904394	1.117989	4.272011	2.63428
53.004	6.4	0.7021	0.999017	1.351333	5.048667	3.113194
58.89	7.62	0.7719	1.098335	1.668123	5.951877	3.670146
66.418	9.12	0.8468	1.20491	2.12186	6.99814	4.315311
73.812	10.56	0.9164	1.303944	2.62059	7.93941	4.895733
83.143	12.25	0.9852	1.401839	3.325037	8.924963	5.503461
96.779	14.62	1.0511	1.495608	4.50513	10.11487	6.237202
116.374	18.13	1.1249	1.600618	6.514139	11.61586	7.162768
136.004	21.94	1.192	1.696095	8.897099	13.0429	8.042733
164.166	27.7	1.2705	1.807792	12.96318	14.73682	9.087267
195.941	34.8	1.3391	1.905403	18.46697	16.33303	10.07155
217.862	40.5	1.408	2.003441	22.83011	17.66989	10.8959

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 Short 75%

$I_{in}$	$P_n$	$E_b$	B	$P_{su}$	$P_s$	$P_s(w/kg)$
33.216	2.2	0.3543	0.504133	0.530689	1.669311	1.029359
37.081	2.95	0.4271	0.60772	0.661375	2.288625	1.41125
40.664	3.7	0.4922	0.700351	0.795363	2.904637	1.791106
45.065	4.67	0.5654	0.804507	0.976841	3.693159	2.277338
49.656	5.68	0.634	0.902117	1.186011	4.493989	2.77116
54.502	6.79	0.7018	0.99859	1.428795	5.361205	3.305917
60.937	8.16	0.773	1.0999	1.786106	6.373894	3.930378
70.112	9.89	0.8472	1.205479	2.364448	7.525552	4.640533
75.356	11.07	0.9144	1.301098	2.731371	8.338629	5.141906
84.954	12.93	0.9821	1.397428	3.471465	9.458535	5.832482
98.579	15.5	1.0579	1.505284	4.674271	10.82573	6.675544
118.862	19.1	1.1217	1.596065	6.795652	12.30435	7.587314
138.669	22.9	1.1976	1.704063	9.249193	13.65081	8.417591
166.312	28.4	1.2668	1.802527	13.30431	15.09569	9.308561
193.624	34.7	1.3319	1.895158	18.03281	16.66719	10.2776
225.234	42.5	1.4044	1.998318	24.4013	18.0987	11.16033

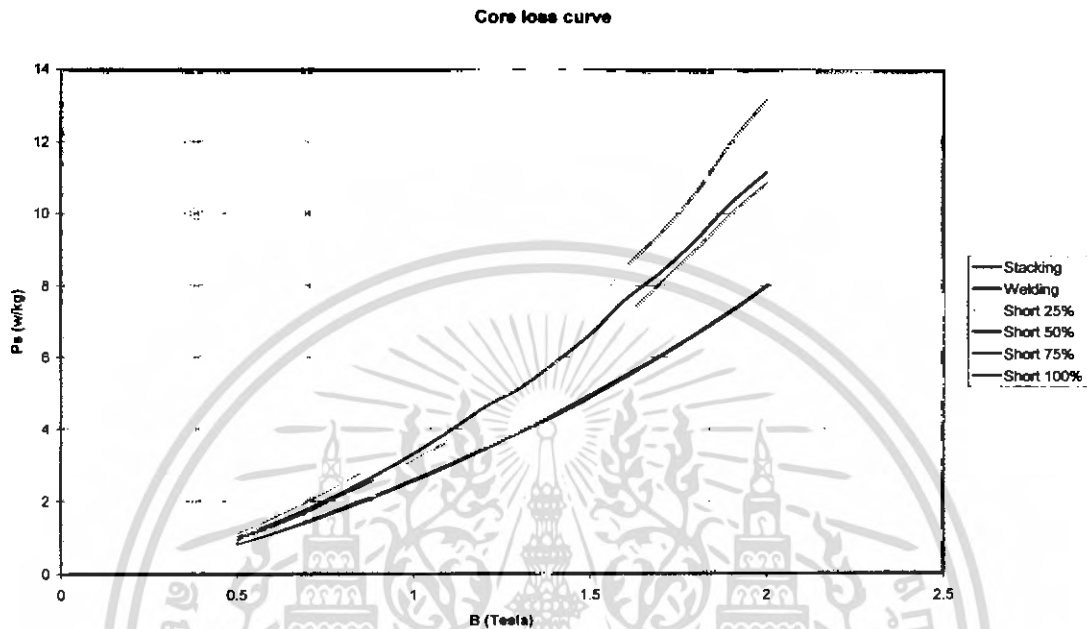
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 Short 100%

$I_n$	$P_n$	$E_b$	B	$P_{\omega}$	$P_s$	$P_s(w/kg)$
34.839	2.43	0.3526	0.501714	0.583817	1.846183	1.138425
38.685	3.22	0.4208	0.598756	0.719831	2.500169	1.541697
42.83	4.14	0.4913	0.69907	0.882351	3.257649	2.008787
47.309	5.19	0.5629	0.800949	1.076546	4.113454	2.536507
52.406	6.43	0.638	0.907809	1.321013	5.108987	3.15039
57.294	7.6	0.7022	0.999159	1.578932	6.021068	3.712813
63.655	9.12	0.7757	1.103742	1.948992	7.171008	4.421908
70.43	10.65	0.844	1.200926	2.385945	8.264055	5.095921
78.604	12.45	0.9142	1.300814	2.971901	9.478099	5.844545
88.783	14.6	0.9837	1.399705	3.791445	10.80856	6.664954
100.839	17.1	1.0512	1.495751	4.89105	12.20895	7.528488
117.201	20.5	1.1267	1.603179	6.607052	13.89295	8.566904
134.808	24.1	1.1948	1.700079	8.741308	15.35869	9.470736
158.864	29.4	1.2667	1.802385	12.13937	17.26063	10.64354
198.346	38.4	1.3346	1.899	18.92309	19.47691	12.01018
224.083	45.6	1.4079	2.003298	24.15254	21.44746	13.22529

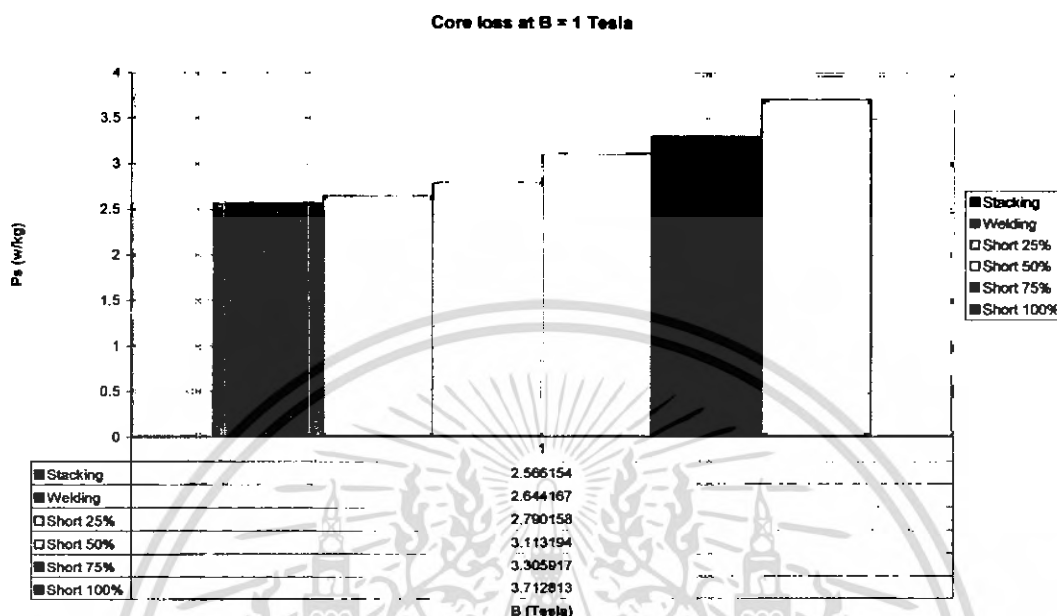
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อนำค่าระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) เทียบกับอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักแกนเหล็ก  $P_s(w/kg)$  แต่ละกรณีนำมาเปรียบเทียบกันจะได้กราฟ Core loss curve ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าความสูญเสีย (core loss) เปรียบเทียบแต่ละลักษณะของแกนเหล็ก

กราฟแท่งแสดงค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) ในลักษณะต่างๆ ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 1.0 T



รูปที่ 4.2 กราฟแท่งแสดงค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) ในลักษณะต่างๆ ที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 1.0 Tesla

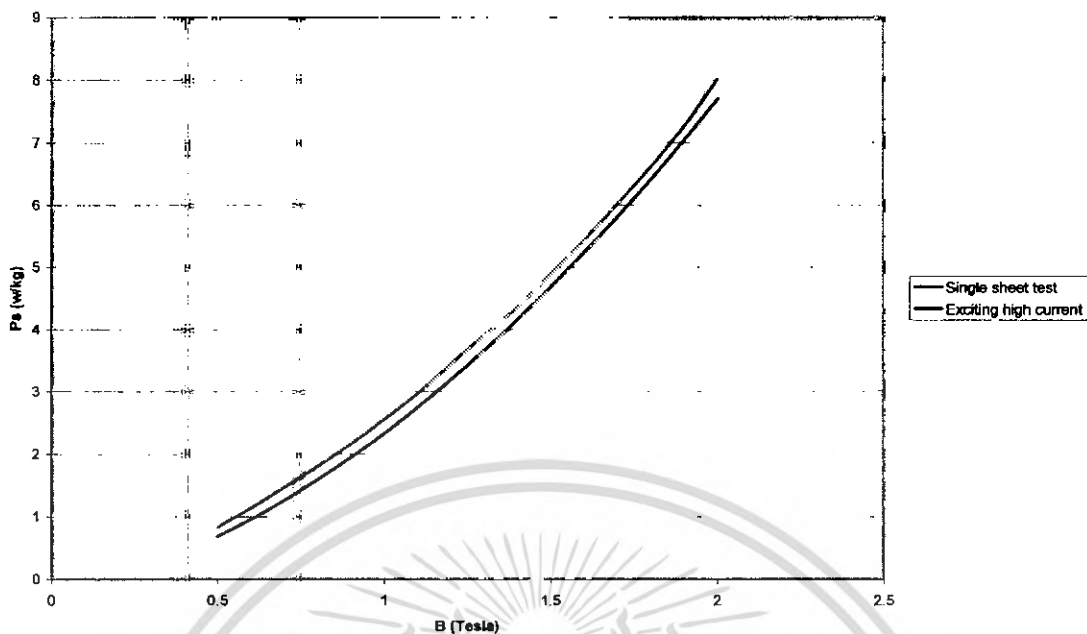
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่า  $P_s(w/kg)$  ที่ได้จากการทดลองแกนเหล็กแบบ stacking ด้วยวิธี Exciting high current มา plot กราฟเปรียบเทียบกับค่า  $P_s(w/kg)$  ที่ได้จากการทดสอบแบบ Single sheet test ตามมาตรฐาน JIS C2556 (โดยวัสดุที่ใช้ในการทดสอบทั้ง 2 วิธีนั้นเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน) ได้กราฟดังรูป

ตารางที่ 4.7 ตารางเปรียบเทียบระหว่าง Single sheet test กับ Exciting high current-test

SST		EHCT	
B	$P_s(w/kg)$	B	$P_s(w/kg)$
0.5	0.69415	0.50129	0.624237
0.6	0.96492	0.60744	0.925016
0.7	1.26454	0.70903	1.272204
0.8	1.59811	0.80593	1.604217
0.9	1.95064	0.90354	2.171997
1	2.33703	1.00044	2.366112
1.1	2.75211	1.09691	2.970106
1.2	3.19556	1.20263	3.262419
1.3	3.66706	1.30224	3.976226
1.4	4.16611	1.40113	4.166113
1.5	4.69217	1.50287	4.906602
1.6	5.2446	1.60076	5.495206
1.7	5.82265	1.70051	6.09322
1.8	6.42549	1.79911	6.821402
1.9	7.05219	1.89786	7.577309
2	7.70175	2.00387	8.362706

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง Single sheet test กับ Exciting high current test

จากกราฟเปรียบเทียบค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนัก (w/kg) ระหว่าง Single sheet test กับ Exciting high current test จะเห็นว่าค่าของทั้ง 2 ข้อมูลมีค่าที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จึงสามารถบอกได้ว่าวิธี Exciting high current เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กได้

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองของSearch-Coil ขนาด 3x10x2 มม. ของแกน Simulation

$\theta$	$V_{rms}$ (mV)																	
	$0^\circ$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
0	10.6	2.8	1.9	1.7	1.7	1.8	2.4	1.8	1.7	1.7	1.5	1.4	1.3	1.3	1.5	2	1.5	1.4
1	13.7	3.3	1.9	1.7	1.7	1.9	2.6	2	1.9	1.9	1.6	1.5	1.4	1.4	1.6	2.2	1.6	1.5
2	14.2	3.5	1.9	1.7	1.7	2	2.7	2	1.9	1.9	1.6	1.5	1.4	1.4	1.6	2.2	1.6	1.5
3	13.9	3.2	1.9	1.7	1.7	2	2.6	2	1.9	1.9	1.6	1.5	1.4	1.4	1.6	2.2	1.6	1.6
4	14.2	3.4	2	1.7	1.7	2	2.7	2	1.9	1.9	1.6	1.5	1.4	1.4	1.6	2.2	1.6	1.6
5	14.2	3.3	2	1.7	1.7	2	2.7	2	1.9	1.8	1.6	1.5	1.4	1.4	1.6	2.3	1.6	1.6
6	14.6	3.4	2.6	1.7	1.7	2	2.7	2	1.9	1.8	1.6	1.5	1.4	1.5	1.6	2.4	1.6	1.6
7	14.2	3	2.4	1.7	1.7	2	2.7	2.1	1.9	1.9	1.7	1.5	1.4	1.5	1.6	2.4	1.6	1.7
8	13.9	3.2	2	1.7	1.7	2	2.6	2	1.9	1.9	1.6	1.5	1.4	1.5	1.6	2.4	1.6	1.7
9	13.8	3.2	2	1.7	1.7	2	2.6	2	1.9	1.9	1.6	1.5	1.4	1.5	1.6	2.3	1.6	1.6
10	10.4	2.9	1.9	1.7	1.6	1.8	2.2	1.9	1.7	1.7	1.6	1.4	1.3	1.4	1.4	2	1.5	1.5

หมายเหตุ

\* คือตำแหน่งขมุกที่ถูกช้อตเทิร์นโดยใช้สายไฟคล้อง

\*\* หมายความว่า cm.

ตารางที่ 4.8(ต่อ) แสดงผลการทดลองของ Search-Coil ขนาด 3x10x2 ซม. มม. ของแกน Simulation

$\theta$	$V_{induce}$ (mV)																	
	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
0	1.3	1.4	1.5	2	1.5	1.3	1.3	1.4	1.5	1.7	1.7	1.8	2.4	1.8	1.7	1.7	1.9	2.8
1	1.5	1.5	1.6	2.2	1.6	1.4	1.4	1.5	1.6	1.9	1.9	2	2.6	1.9	1.7	1.7	1.9	3.3
2	1.5	1.5	1.6	2.2	1.6	1.4	1.4	1.5	1.6	1.9	1.9	2	2.7	2	1.7	1.7	1.9	3.5
3	1.4	1.6	1.6	2.2	1.6	1.4	1.4	1.5	1.6	1.9	1.9	2	2.6	2	1.7	1.7	1.9	3.2
4	1.6	1.6	1.6	2.2	1.6	1.4	1.4	1.5	1.6	1.9	1.9	2	2.7	2	1.7	1.7	2	3.4
5	1.6	1.6	1.6	2.3	1.6	1.4	1.4	1.5	1.6	1.8	1.9	2	2.7	2	1.7	1.7	2	3.3
6	1.6	1.6	1.6	2.4	1.6	1.5	1.4	1.5	1.6	1.8	1.9	2	2.7	2	1.7	1.7	2.6	3.4
7	1.6	1.7	1.6	2.4	1.6	1.5	1.4	1.5	1.7	1.9	1.9	2.1	2.7	2	1.7	1.7	2.4	3
8	1.5	1.7	1.6	2.4	1.6	1.5	1.4	1.5	1.6	1.9	1.9	2	2.6	2	1.7	1.7	2	3.2
9	1.5	1.6	1.6	2.3	1.6	1.5	1.4	1.5	1.6	1.9	1.9	2	2.6	2	1.7	1.7	2	3.2
10	1.3	1.5	1.5	2	1.4	1.4	1.3	1.4	1.6	1.7	1.7	1.9	2.2	1.8	1.6	1.7	1.9	2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองของ Search-Coil ขนาด  $3 \times 10 \times 3$  มม. ของแกน Simulation

$\theta$	V <sub>induce</sub> (mV)																	
	0°	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
0	12.2	4	2.2	1.7	1.8	1.9	2.4	1.8	2	1.9	1.6	1.5	1.3	1.4	1.3	1.8	1.6	1.4
1	14.3	4.1	2	1.9	1.9	2	2.8	2	2.1	1.8	1.6	1.5	1.4	1.4	1.4	1.9	1.6	1.5
2	13.9	4.4	2.2	1.8	2	2	2.8	2	2.1	1.8	1.6	1.6	1.4	1.5	1.5	2.2	1.5	1.5
3	14.2	4.1	2.2	1.9	2	2	2.9	2	2.2	1.8	1.6	1.6	1.4	1.4	1.4	2.3	1.6	1.6
4	14.2	4.2	2.2	1.8	2	2.1	2.9	2.1	2.1	1.9	1.6	1.6	1.5	1.5	1.4	2.1	1.6	1.6
5	14.1	4.5	2.2	1.9	2	2.1	3	2.1	2.1	1.9	1.6	1.6	1.4	1.5	1.4	2.1	1.5	1.6
6	14.1	4.2	2.1	1.9	2	2.1	3.1	2.1	2.2	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.4	2.3	1.6	1.7
7	14.1	4.2	2.1	1.8	1.9	2.1	3	2.1	2.2	1.8	1.7	1.6	1.5	1.6	1.5	2.2	1.5	1.7
8	13.5	4.2	2.1	1.9	2	2	2.9	2.2	2.1	1.8	1.7	1.6	1.5	1.6	1.4	2	1.5	1.7
9	13.9	4.3	2.2	1.9	1.9	1.9	2.8	2.2	2.1	1.8	1.8	1.6	1.5	1.5	1.5	2	1.6	1.7
10	11.8	4.1	2.2	1.8	1.8	1.9	2.6	2	2	1.7	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5	2	1.2	1.4

ตารางที่ 4.9(ต่อ) แสดงผลการทดลองของSearch-Coil ขนาด 3x10x3 ซม. มม. ของแกน Simulation

$\theta$	Vindex (mV)																	
	L**	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340
0	1.4	1.4	1.6	1.8	1.3	1.4	1.3	1.5	1.6	1.9	2	1.8	2.4	1.9	1.8	1.7	2.2	4
1	1.5	1.5	1.6	1.9	1.4	1.4	1.4	1.5	1.6	1.8	2.1	2	2.8	2	1.9	1.9	2	4.1
2	1.5	1.5	1.5	2.2	1.5	1.5	1.4	1.6	1.6	1.8	2.1	2	2.8	2	2	1.8	2.2	4.4
3	1.6	1.6	1.6	2.3	1.4	1.4	1.4	1.6	1.6	1.8	2.2	2	2.9	2	2	1.9	2.2	4.1
4	1.6	1.6	1.6	2.1	1.4	1.5	1.5	1.6	1.6	1.9	2.1	2.1	2.9	2.1	2	1.8	2.2	4.2
5	1.6	1.6	1.5	2.1	1.4	1.5	1.4	1.6	1.6	1.9	2.1	2.1	3	2.1	2	1.9	2.2	4.5
6	1.7	1.7	1.6	2.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	2.2	2.1	3.1	2.1	2	1.9	2.1	4.2
7	1.7	1.7	1.5	2.2	1.5	1.6	1.5	1.6	1.7	1.8	2.2	2.1	3	2.1	1.9	1.8	2.1	4.2
8	1.7	1.7	1.5	2	1.4	1.6	1.5	1.6	1.7	1.8	2.1	2.2	2.9	2	2	1.9	2.1	4.2
9	1.7	1.7	1.6	2	1.5	1.5	1.5	1.6	1.8	1.8	2.1	2.2	2.8	1.9	1.9	1.9	2.2	4.3
10	1.4	1.4	1.2	2	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5	1.7	2	2	2.6	1.9	1.8	1.8	2.2	4.1

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดลองของSearch-Coil ขนาด 3x10x4 มม. ของแกน Simulation

L**	θ	V <sub>induce</sub> (mV)																
		0°	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
0	20.2	6.6	3.5	2.6	2.4	2.5	3.1	2.7	2.6	2.6	2.7	2.1	2.1	2	2.4	3.1	2.8	2.6
1	23.2	7.7	3.5	2.6	2.4	2.6	3.6	3	2.9	3.1	2.7	2.3	2.3	2.1	2.6	3.8	2.9	2.7
2	27.3	7.4	3.3	2.5	2.4	2.7	3.6	3	3.1	2.8	2.8	2.3	2.3	2.2	2.6	3.8	2.8	2.7
3	25.4	7.7	3.5	2.5	2.4	2.7	3.7	3.1	3	2.9	2.8	2.3	2.2	2.3	2.6	3.8	2.8	2.5
4	26.8	7.2	3.3	2.5	2.4	2.8	3.8	3.1	3	3	2.8	2.3	2.4	2.2	2.6	3.8	2.7	2.7
5	24.8	7.3	3.5	2.4	2.5	2.7	3.8	3.1	2.9	3	2.7	2.3	2.3	2.2	2.6	3.8	2.9	2.6
6	25.8	7.5	3.5	2.5	2.5	2.7	3.8	3.1	3	3	2.8	2.3	2.3	2.2	2.6	3.7	2.9	2.6
7	25.7	7.5	3.5	2.5	2.5	2.7	3.8	3.1	2.9	3.1	2.6	2.3	2.3	2.2	2.6	3.6	2.9	2.5
8	25.4	7.7	3.5	2.5	2.5	2.7	3.7	3.1	3	2.9	2.7	2.3	2.4	2.2	2.6	3.7	2.9	2.6
9	25.4	7.5	3.4	2.4	2.4	2.7	3.9	3	2.9	3	2.7	2.3	2.3	2.2	2.6	3.7	2.9	2.7
10	20.6	6.7	3.3	2.5	2.3	2.5	3	2.8	2.7	2.5	2.6	2	2.1	2.1	2.4	3	2.7	2.3

ตารางที่ 4.10(ต่อ) แสดงผลการทดลองของSearch-Coil ขนาด 3x10x4 มม. ของแกน Simulation

$\theta$	V <sub>Induce</sub> (mV)																		
	L**	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
0	2.5	2.6	2.9	3.2	2.4	2	2.2	2.2	2.2	2.7	2.6	2.6	2.7	3.1	2.5	2.4	2.5	3.3	7
1	2.6	2.7	3	3.4	2.7	2.2	2.3	2.4	2.7	3	2.9	3	3.7	2.6	2.4	2.6	3.4	7.5	
2	2.6	2.5	2.9	3.8	2.6	2.3	2.3	2.4	2.8	3.1	3	3.1	3.8	2.7	2.4	2.6	3.1	7.6	
3	2.6	2.6	2.8	3.8	2.5	2.2	2.4	2.5	2.7	2.9	3.1	3	3.6	2.6	2.4	2.7	3	7.7	
4	2.6	2.8	2.8	3.7	2.4	2.2	2.3	2.5	2.6	2.9	3.1	3	3.7	2.7	2.4	2.5	3.2	7.7	
5	2.6	2.7	2.7	3.7	2.6	2	2.2	2.3	2.8	3.1	3	3.1	3.9	2.8	2.5	2.6	3.4	7.8	
6	2.6	2.6	2.9	3.6	2.5	2.4	2.4	2.3	2.8	3	3	3.1	3.8	2.7	2.4	2.6	3.3	7.9	
7	2.6	2.5	2.8	3.5	2.7	2.2	2.3	2.3	2.8	2.9	3	3.2	3.7	2.7	2.5	2.7	3.4	7.8	
8	2.7	2.4	2.7	3.4	2.5	2.1	2.4	2.4	2.7	3.1	2.9	3.1	3.7	2.6	2.5	2.6	3.4	7.7	
9	2.6	2.5	2.6	3.5	2.3	2.2	2.4	2.4	2.6	3	2.9	3	3.6	2.7	2.4	2.5	3.4	7.5	
10	2.3	2.2	2.6	3.2	2.2	2.1	2.3	2.2	2.5	2.7	2.7	2.7	2.9	2.7	2.4	2.5	3.2	6.8	

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดลองของ Search-Coil ขนาด 10x10x2 มม. ของแกน Welding 50%

$\theta$	V <sub>induce</sub> (mV)																	
	0°	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
L**	0	6.3	3.7	1.9	1.6	1.4	1.4	1.4	1.6	1.6	1.6	1.7	1.5	1.3	1.4	1.3	1.4	1.5
	1	11.6	5.2	1.9	1.5	1.3	1.3	1.4	1.5	1.6	1.6	1.8	1.5	1.3	1.3	1.3	1.4	1.5
	2	12.6	6.2	1.9	1.5	1.3	1.3	1.3	1.5	1.5	1.5	1.7	1.4	1.3	1.3	1.3	1.4	1.5
	3	12.6	5.7	1.9	1.4	1.3	1.3	1.3	1.4	1.5	1.5	1.7	1.4	1.3	1.3	1.3	1.4	1.6
	4	9	4.7	2.1	1.4	1.3	1.3	1.4	1.5	1.6	1.6	1.9	1.5	1.4	1.4	1.4	1.5	1.6
	5	7	3.2	2.7	1.5	1.4	1.4	1.5	1.6	1.8	1.8	2.1	1.5	1.4	1.4	1.4	1.8	1.7
	6	2.6	2.7	2.7	1.5	1.3	1.4	1.5	1.8	1.9	1.9	2.3	1.6	1.5	1.4	1.5	1.8	2
	7	1.9	2.4	2.4	1.4	1.4	1.4	1.6	1.8	2	2	2.5	1.7	1.5	1.4	1.5	1.8	2
	8	1.7	2.2	2	1.4	1.3	1.4	1.6	1.9	2	2	2.5	1.7	1.5	1.5	1.5	1.7	2
	9	1.7	2.2	2.1	1.4	1.4	1.4	1.7	1.9	2	2	2.5	1.7	1.5	1.5	1.5	1.7	2
	10	1.5	1.9	1.9	1.4	1.3	1.4	1.6	1.7	1.9	1.9	2.2	1.7	1.5	1.5	1.5	1.7	1.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11(ต่อ) แสดงผลการทดลองของ Search-Coil ขนาด 10x10x2 มม. ของแกน Welding 50%

$\theta$	V <sub>induce</sub> (mV)																		
	L**	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
0	1.5	1.5	1.4	1.3	1.4	1.3	1.5	1.7	1.6	1.6	1.6	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.6	1.9	3.7
1	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	1.3	1.5	1.8	1.6	1.6	1.6	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3	1.5	1.9	5.2
2	1.5	1.5	1.4	1.3	1.3	1.3	1.4	1.7	1.5	1.5	1.5	1.4	1.3	1.3	1.3	1.5	1.9	6.2	
3	1.6	1.6	1.4	1.3	1.3	1.3	1.4	1.7	1.5	1.5	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.9	5.7	
4	1.7	1.6	1.5	1.4	1.4	1.4	1.5	1.9	1.6	1.6	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	1.4	2.1	4.7	
5	1.8	1.7	1.6	1.4	1.4	1.4	1.5	2.1	1.8	1.8	1.8	1.6	1.5	1.4	1.4	1.5	2.7	3.2	
6	1.9	2	1.8	1.5	1.4	1.5	1.6	2.3	1.9	1.9	1.9	1.8	1.5	1.4	1.3	1.5	2.7	2.7	
7	2	2	1.8	1.5	1.4	1.5	1.7	2.5	2	2	2	1.8	1.6	1.4	1.4	1.4	2.4	2.4	
8	2	2	1.7	1.5	1.5	1.5	1.7	2.5	2	2	2	1.9	1.6	1.4	1.3	1.4	2	2.2	
9	2	2	1.7	1.5	1.5	1.5	1.7	2.5	2	2	2	1.9	1.7	1.4	1.4	1.4	2.1	2.2	
10	1.9	1.8	1.7	1.5	1.5	1.5	1.7	2.2	1.9	1.9	2	1.7	1.6	1.4	1.3	1.4	1.9	1.9	

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดลองของ Search-Coil ขนาด 10x10x3 มม. ของแกน Welding 50%

$\theta$	L**	V <sub>Induce</sub> (mV)																				
		0°	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170			
0	8	4.3	2.6	2.1	1.9	1.8	1.5	1.9	1.7	1.8	1.9	1.9	1.7	1.8	1.9	1.9	1.6	1.5	1.4	1.5	1.5	
1	10.1	5.5	2.3	2	1.8	1.8	1.5	1.9	1.7	1.8	1.9	1.9	1.7	1.8	1.9	1.9	1.6	1.4	1.4	1.4	1.5	1.6
2	11.6	5.8	1.9	1.9	1.7	1.4	1.5	1.8	1.7	1.7	1.8	1.8	1.7	1.7	1.8	1.9	1.5	1.4	1.4	1.4	1.5	1.6
3	11.6	4.6	1.9	1.8	1.7	1.8	1.4	1.8	1.6	1.6	1.8	1.8	1.6	1.8	1.8	1.6	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.6
4	5.5	3.4	1.8	1.8	1.7	1.4	1.4	1.8	1.6	1.7	1.9	1.7	1.7	1.9	1.7	1.5	1.5	1.5	1.4	1.6	1.7	1.7
5	5.6	3	2.1	1.9	1.8	1.5	1.5	2	1.8	1.9	2.1	2.1	1.9	2.1	1.7	1.6	1.5	1.5	1.5	1.7	1.8	1.8
6	2.9	2.4	2.3	2	1.9	1.6	1.7	1.9	2.1	2.1	2.3	2.3	2.3	2.3	1.8	1.6	1.6	1.6	1.6	1.8	2	2
7	2.3	2	2.1	2	1.9	1.6	1.8	2	2.2	2.2	2.4	2.4	2.2	2.4	1.8	1.6	1.6	1.6	1.6	1.8	2	2
8	2.1	2	2	2	1.9	1.6	1.8	2	2.2	2.2	2.5	2.4	2.2	2.4	1.8	1.6	1.6	1.6	1.6	1.8	2.1	2.1
9	2.1	2	2	2	1.9	1.6	1.8	2	2.2	2.2	2.5	2.5	2.2	2.5	1.8	1.6	1.6	1.6	1.6	1.8	2.1	2.1
10	1.5	1.8	1.8	1.9	1.8	1.6	1.7	1.9	2	2.2	2.3	2.1	2.2	2.3	1.8	1.6	1.5	1.5	1.5	1.7	1.9	1.9

ตารางที่ 4.12(ต่อ) แสดงผลการทดลองของSearch-Coil ขนาด 10x10x3 มม. ของแกน Welding 50%

$\theta$	V <sub>probe</sub> (mV)																	
	L**	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340
0	1.6	1.5	1.5	1.4	1.4	1.5	1.6	1.9	1.9	1.8	1.7	1.9	1.5	1.8	1.9	2.1	2.6	4.3
1	1.6	1.6	1.5	1.4	1.4	1.4	1.6	1.9	1.9	1.8	1.7	1.9	1.5	1.8	1.8	2	2.3	5.5
2	1.6	1.6	1.5	1.4	1.4	1.4	1.5	1.9	1.8	1.7	1.7	1.8	1.5	1.4	1.7	1.9	1.9	5.8
3	1.6	1.6	1.5	1.4	1.4	1.4	1.6	1.8	1.8	1.6	1.6	1.8	1.4	1.8	1.7	1.8	1.9	4.6
4	1.7	1.7	1.6	1.4	1.5	1.5	1.7	1.9	1.9	1.7	1.6	1.8	1.4	1.4	1.7	1.8	1.8	3.4
5	1.8	1.8	1.7	1.5	1.5	1.6	1.7	2.1	2.1	1.9	1.8	2	1.5	1.5	1.8	1.9	2.1	3
6	1.9	2	1.8	1.6	1.6	1.6	1.8	2.3	2.3	2.1	2.1	1.9	1.7	1.6	1.9	2	2.3	2.4
7	2	2	1.8	1.6	1.6	1.6	1.8	2.4	2.4	2.2	2.2	2	1.8	1.6	1.9	2	2.1	2
8	2	2.1	1.8	1.6	1.6	1.6	1.8	2.4	2.5	2.2	2.2	2	1.8	1.6	1.9	2	2	2
9	2	2.1	1.8	1.6	1.6	1.6	1.8	2.5	2.5	2.2	2.2	2	1.8	1.6	1.9	2	2	2
10	1.4	1.9	1.7	1.5	1.5	1.6	1.8	2.1	2.3	2.2	2	1.9	1.7	1.6	1.8	1.9	1.8	1.8

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดลองของ Search-Coil ขนาด 10x10x4 มม. ของแกน Welding 50%

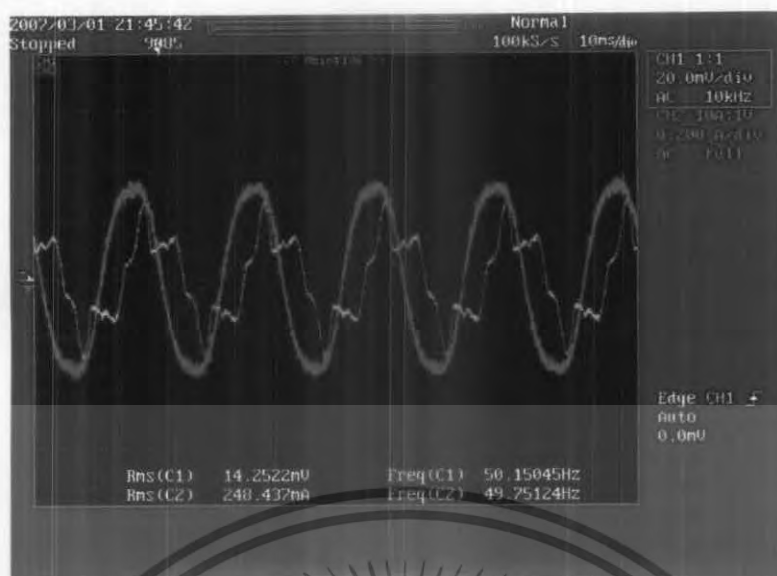
$\theta$	Vinduce (mV)																	
	0*	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
0	8.1	5.3	3	2.1	1.8	1.7	1.7	1.7	1.9	1.9	2.2	2	1.8	1.7	1.7	1.7	1.8	1.9
1	13.4	6.6	2.7	1.9	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	2.3	2	1.8	1.8	1.7	1.7	1.8	2
2	14.7	6.2	2.5	1.9	1.7	1.6	1.7	1.8	1.9	1.9	2.3	2.1	1.8	1.7	1.7	1.7	1.9	2
3	14.3	6	2.5	2	1.7	1.7	1.7	1.8	1.9	2	2.4	2.1	1.8	1.7	1.7	1.7	1.9	2
4	7.9	5.3	2.6	2	1.9	1.8	1.9	1.9	2	2.1	2.4	2.8	2.5	1.9	1.8	1.8	1.9	2
5	4.9	4.5	2.7	2.1	1.8	1.9	2	2.1	2.1	2.4	2.8	2.9	2.1	1.9	1.9	1.9	2.1	2.1
6	3.2	3.9	2.5	2.1	1.9	2	2	2	2.4	2.6	2.9	2.9	2.3	2	2	2	2.1	2.3
7	2.2	3.4	2.5	2	1.8	1.9	2.2	2.5	2.6	2.6	3	2.9	2.1	2	2.1	2	2.2	2.5
8	1.9	2.8	2.5	1.9	1.7	1.9	2.1	2.3	2.6	2.6	3.2	2.1	2.2	2	2.1	2	2.2	2.5
9	1.9	2.7	2.3	1.9	1.7	1.8	2.1	2.1	2.6	2.6	3	2.6	2.2	2	2.1	2	2.2	2.5
10	1.6	2.4	2.1	1.8	1.6	1.7	1.8	2.1	2.4	2.4	2.8	2.6	2.1	2	2	2	2	2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13(ต่อ) แสดงผลการทดสอบของSearch-Coil ขนาด 10x10x4 มม. ของแกน Welding 50%

θ	V <sub>Induce</sub> (mV)																		
	L**	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
0	1.9	1.9	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	2	2.2	1.9	1.9	1.9	1.7	1.7	1.8	2.1	3	5.3
1	2	2	1.8	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	2	2.3	1.9	1.8	1.8	1.7	1.7	1.7	1.9	2.7	6.6
2	2	2	1.9	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	2.1	2.3	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.7	1.9	2.5	6.2
3	2.1	2	1.9	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	2.1	2.4	2	1.9	1.8	1.7	1.7	1.7	2	2.5	6
4	2.3	2	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.9	2.5	2.4	2.1	2	1.9	1.9	1.8	1.9	2	2.6	5.3
5	2.4	2.1	2.1	1.9	1.9	1.9	1.9	2.1	2.9	2.8	2.4	2.1	2.1	2	1.9	1.8	2.1	2.7	4.5
6	2.5	2.3	2.1	2	2	2	2	2.3	2.9	2.9	2.6	2.4	2	2	2	1.9	2.1	2.5	3.9
7	2.5	2.5	2.2	2	2	2	2	2.1	2.9	3	2.6	2.6	2.5	2.2	1.9	1.8	2	2.5	3.4
8	2.5	2.5	2.2	2	2	2	2	2.2	2.1	3.2	2.6	2.6	2.3	2.1	1.9	1.7	1.9	2.5	2.8
9	2.6	2.5	2.2	2	2	2	2	2.2	2.6	3	2.6	2.6	2.1	2.1	1.8	1.7	1.9	2.3	2.7
10	2.6	2.4	2	2	2	2	2	2.1	2.6	2.8	2.4	2.4	2.1	1.8	1.7	1.6	1.8	2.1	2.4





รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ณ จุดผิดปกติ ในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด 3x10x2 มม.



รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ณ จุดปกติ ในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด 3x10x2 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

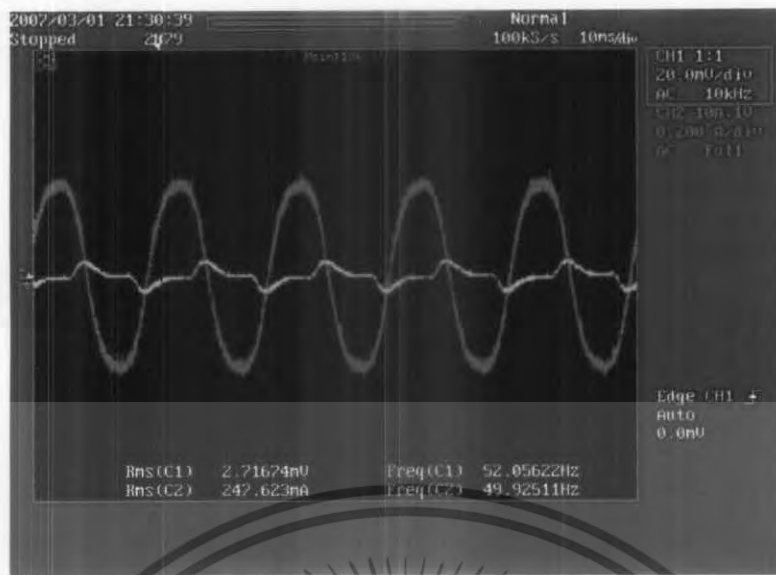


รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ณ สาย Excite ในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด 3x10x2 มม.



รูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ณ จุดผิดปกติ ในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด 3x10x3 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

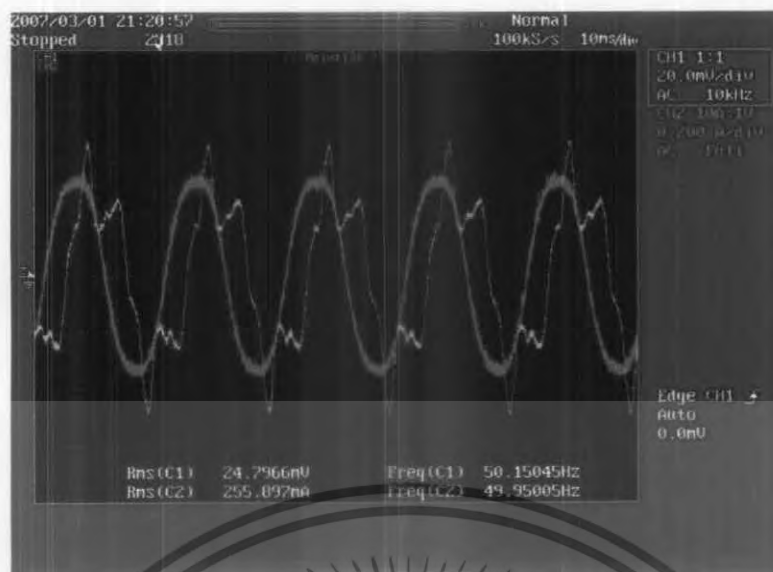


รูปที่ 4.7 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ณ จุดปกติ ในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด 3x10x3 มม.



รูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ณ สาย Excite ในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด 3x10x3 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

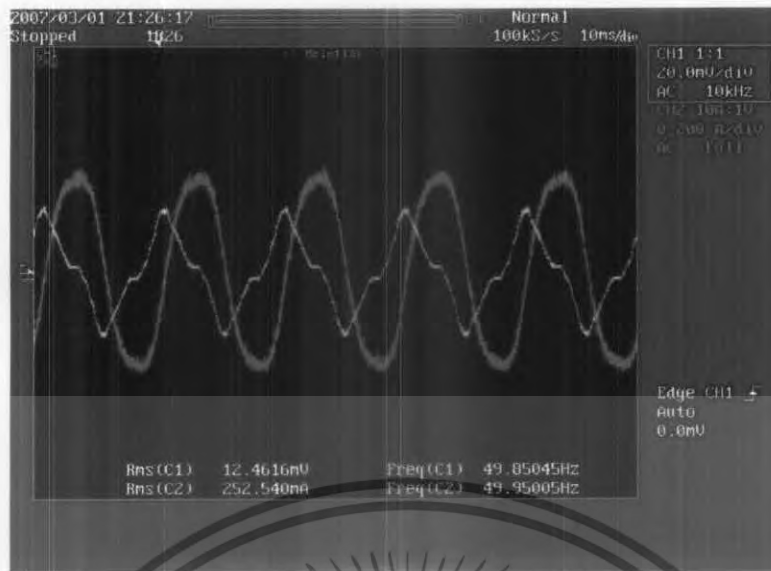


รูปที่ 4.9 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ณ จุดติดปกติ ในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด  $3 \times 10 \times 4$  มม.



รูปที่ 4.10 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ณ จุดไม่ปกติ ในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด  $3 \times 10 \times 4$  มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ณ สาย Excite ในแกนเหล็ก Simulate วัดด้วย Search-Coil ขนาด 3x10x4 มม.



รูปที่ 4.12 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ณ จุดติดปกติ ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x2 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

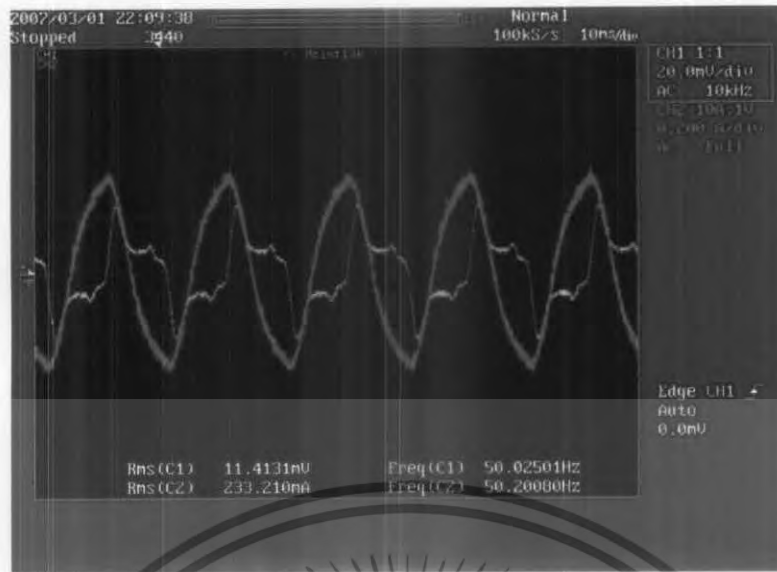


รูปที่ 4.13 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ณ จุดปกติ ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x2 มม.



รูปที่ 4.14 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ณ สาย Excite ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x2 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

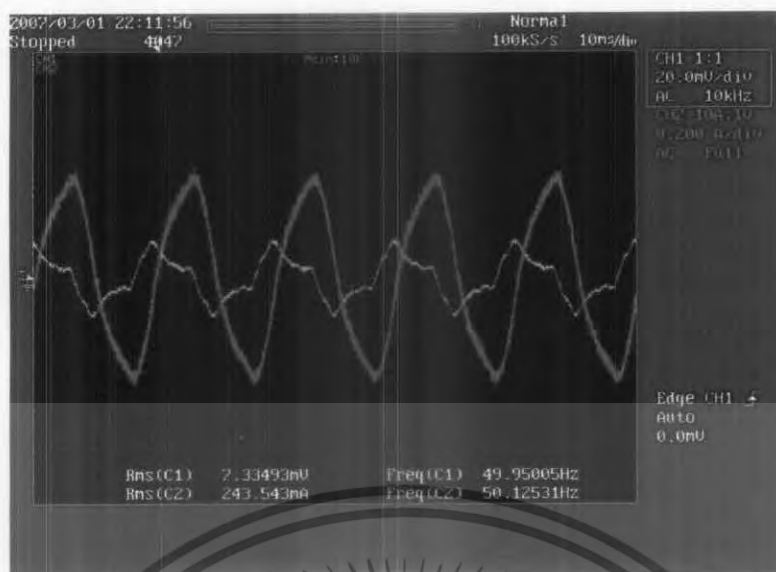


รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ณ จุดผิดปกติ ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x3 มม.



รูปที่ 4.16 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ณ จุดปกติ ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x3 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

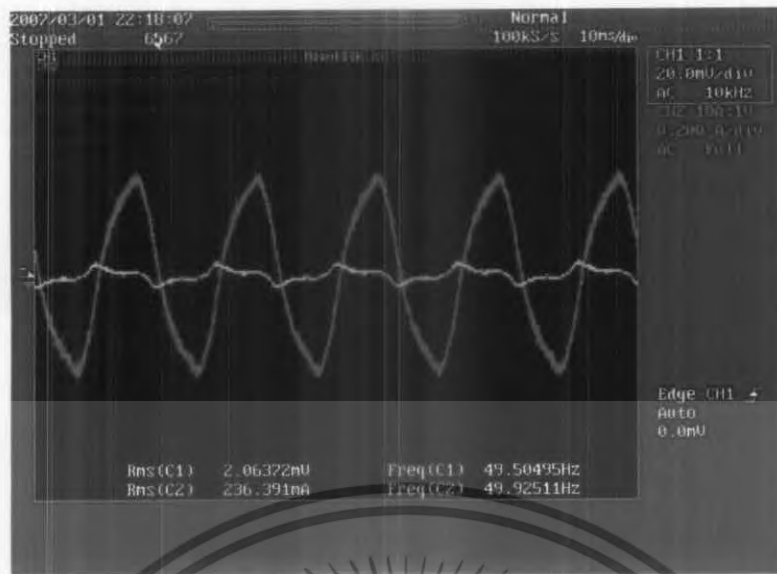


รูปที่ 4.17 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ในสาย Excite ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x3 มม.



รูปที่ 4.18 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ณ จุดผิดปกติ ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x4 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

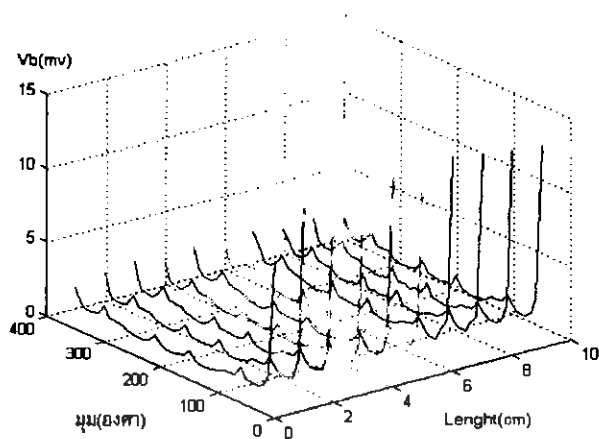


รูปที่ 4.19 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ณ จุดปกติ ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x4 มม.

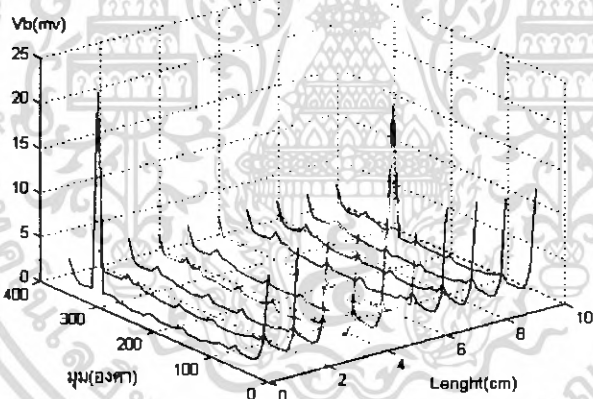


รูปที่ 4.20 แสดงตัวอย่างสัญญาณ  $V_{induce}$  ณ สาย Excite ในแกนเหล็กที่ถูก Welding 50% ของความยาว Teeth วัดด้วย Search-Coil ขนาด 10x10x4 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

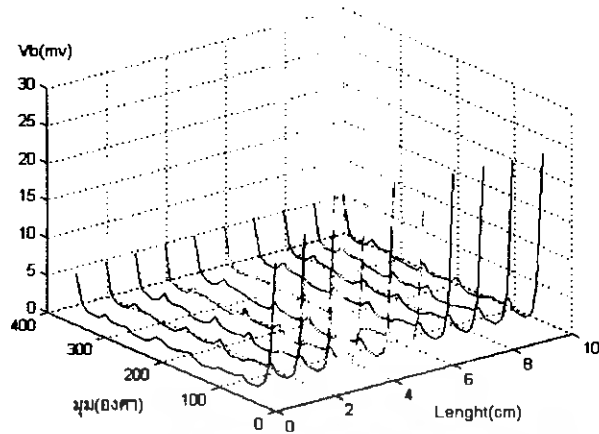


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าแรงดันเหนี่ยวนำในแกนเหล็กทดสอบแบบ Simulate โดยใช้ Search-Coil ขนาด 3x10x2 มม.

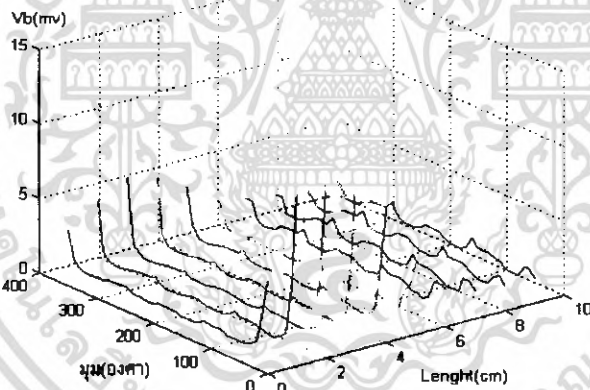


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าแรงดันเหนี่ยวนำในแกนเหล็กทดสอบแบบ Simulate โดยใช้ Search-Coil ขนาด 3x10x3 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

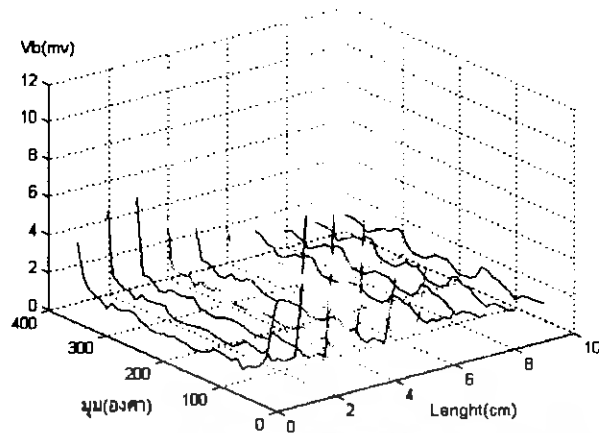


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่าแรงดันเหนี่ยวนำในแกนเหล็กทดสอบแบบ Simulate โดยใช้ Search-Coil ขนาด 3x10x4 มม.

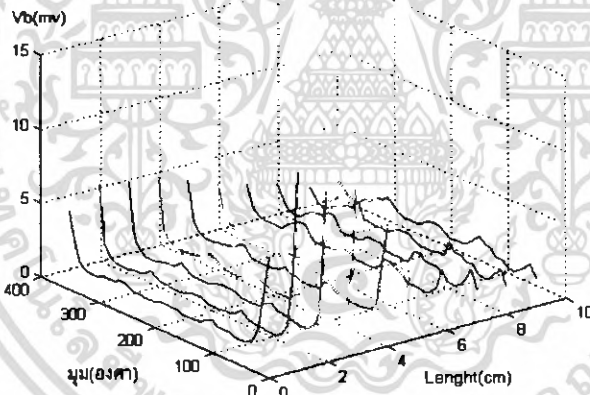


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่าแรงดันเหนี่ยวนำในแกนเหล็กทดสอบแบบ Welding 50% โดยใช้ Search-Coil ขนาด 10x10x2 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าแรงดันเหนี่ยวนำในแกนเหล็กทดสอบแบบ Welding 50% โดย  
ใช้Search-Coil ขนาด 10x10x3 มม.



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่าแรงดันเหนี่ยวนำในแกนเหล็กทดสอบแบบ Welding 50% โดย  
ใช้Search-Coil ขนาด 10x10x4 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากการพัฒนาอุตสาหกรรมในปัจจุบัน เครื่องจักรกลไฟฟ้า (Electrical Machine) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมและเพื่อการตอบสนองความต้องการของมนุษย์ ดังนั้น เครื่องจักรกลไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งสำคัญในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่สำคัญได้แก่ หม้อแปลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ ฯลฯ โดยในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหล่านี้มีส่วนประกอบที่สำคัญ เช่น แกนเหล็ก ขดลวด โครงสร้าง ฯลฯ ซึ่งแกนเหล็กที่เป็นส่วนประกอบหนึ่งในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นเป็นปัจจัยสำคัญของการกำเนิดประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ดังนั้นถ้าหากเกิดความไม่สมบูรณ์หรือเกิดความผิดปกติเกิดขึ้นในแกนเหล็กหรือเกิดการเสื่อมสภาพของแกนเหล็ก ย่อมทำให้การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นเกิดค่าความสูญเสียทำให้ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในตำแหน่งความเข้มข้นแม่เหล็กต่าง ๆ จึงเป็นเรื่องสำคัญต่อการพัฒนาและออกแบบสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ความไม่สมบูรณ์ของแกนเหล็กสามารถเกิดได้โดยทั่วไปในเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยส่วนมากที่พบ คือ ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่มากขึ้นเนื่องจากฉนวนเสื่อมสภาพ ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กจะแบ่งเป็น ความสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ซิสและความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน โดยเมื่อเราสามารถหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก เราก็จะสามารถนำมาวิเคราะห์ว่าแกนเหล็กเป็นแกนเหล็กที่มีประสิทธิภาพมากน้อยแค่ไหน

การศึกษาเทคนิคการหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก โดยจะใช้กฎของแอมแปร์ และกฎของฟาราเดย์มาประยุกต์ใช้ในการทดสอบแกนเหล็กแบบต่างๆ ได้แก่ แกนเหล็กปกติที่มาจากโรงงาน แบ่งเป็น แกนเหล็กที่นำแผ่นเหล็กมาเรียงซ้อนกัน แกนเหล็กที่นำมาเชื่อมและแกนเหล็กที่นำมาเชื่อมระหว่างร่องสลิต โดยใช้วิธีการป้อนกระแสกระตุ้นสูงผ่านแกนเหล็ก เมื่อดูค่าจากกราฟจะเห็นค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่นำแผ่นเหล็กมาเรียงซ้อนกัน จะมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่ำกว่าแกนเหล็กที่นำมาเชื่อม ส่วนค่าความสูญเสียของแกนเหล็กที่นำมาเชื่อมระหว่างร่องสลิต จะพบว่าเมื่อเพิ่มความยาวในการเชื่อมระหว่างร่องสลิต ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่เป็นไปตามทฤษฎีของความสูญเสียในแกนเหล็ก และจากนั้นเมื่อทราบว่ามีค่าความสูญเสียเพิ่มมากขึ้นเมื่อเกิดการเชื่อมระหว่างร่องสลิต จะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าต่ำลง เราสามารถตรวจหาค่าตำแหน่งที่ผิดปกติ ได้โดยนำ Search-coil ไปตรวจสอบรอบแกนเหล็ก ถ้าตำแหน่งใดสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้มากกว่าตำแหน่งอื่น แสดงว่าตำแหน่งเป็นตำแหน่งที่ผิดปกติ ทำให้นำไปสู่การทราบสาเหตุที่แท้จริงและแก้ไขข้อบกพร่องได้ถูกต้อง โดยโครงการนี้จะมีประโยชน์มากในส่วนของการตรวจสอบการผลิตของมอเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] พิเชิต ล้ายอง, “**Electromechanical Energy Conversion and Electrical Machines**”
- [2] อ. อานันท์วัฒน์ คุณากร , “**เครื่องจักรกลไฟฟ้า, การขับเคลื่อน และระบบ**”
- [3] A.E. Fitzgerald, “**Electrical Machinery**”, C.Kinsley & S.D. U mans, 6<sup>th</sup> edition , Mc Graw-Hill, 2003
- [4] G.K. Ridley, “**El Cid Application & Analysis**”



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้แต่ง



นาย ชีรยุทธ แซ่แผ้ว

การศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย สาทิต จงจิตมันคง

การศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย หม่อม ราชวงศ์

การศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้