

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นแม่เหล็ก
โดยวิธีการทดสอบแบบแผ่นเดียว

A STUDY OF MAGNETIC PROPERTIES OF MAGNETIC STEEL SHEET
USING SINGLE SHEET TESTER



ธนาพันธุ์ แสนสุข
THANAPAN SANSOOK

QW.
ธ 2467
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 61612
วัน,เดือน,ปี 19 ก.ค. 2549

b..... 11600263
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2437-4

**A STUDY OF MAGNETIC PROPERTIES OF MAGNETIC STEEL SHEET
USING SINGLE SHEET TESTER**

THANAPAN SANSOOK

**A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATES STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-15-2437-4

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นแม่เหล็ก โดยวิธีการทดสอบแบบแผ่นเดี่ยว
นักศึกษา	นายธนาพันธุ์ แสนสุข
รหัสประจำตัว	47060209
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. พิชิต ถ้ายอง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ การทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นแม่เหล็กโดยวิธีการทดสอบแบบแผ่นเดี่ยว โดยได้ทำการศึกษาและสร้างชุดทดสอบตามมาตรฐาน JIS C 2556 เป็นโครงสร้างหลัก และได้นำเสนอการประยุกต์วิธีคำนวณ เพื่อใช้ในการหาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นแม่เหล็ก ได้แก่ กราฟB-H กราฟค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก กราฟกำลังไฟฟ้าปรากฏ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบแผ่นแกนเหล็ก 5 ชนิด ชนิดละ 3 แผ่น โดยแต่ละชนิดจะนำผลที่ได้จากการทดสอบแผ่นเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของผู้ผลิต เพื่อยืนยันว่าทั้งสองวิธีมีผลที่สอดคล้องในทิศทางเดียวกัน

Thesis Title	A Study of Magnetic Properties Of Magnetic Steel Sheet Using Single Sheet Tester
Student	Mr. Thanapan Sansook
Student ID.	47060209
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2005
Thesis Advisor	Assoc. Pichit Lumyong

ABSTRACT

This thesis presents the testing of magnetic properties of magnetic steel sheets and using a single sheet tester. The testing set, is studied and built in accordance JIS C2556 standard. The application of the calculation method to find out the magnetic characteristics of the electrical steel is presented results include B-H curves, core loss curves, apparent power curves. Finally, five types of single sheet steels are tested. The testing results of each will be, later, compared with those made by the manufacturers to confirm that the testing results of both methods are correlated.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจาก รศ. พิชิต ถ้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นผู้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในทุกๆด้าน ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้สอนวิชาความรู้ ทั้งในระดับปริญญาตรี และปริญญาโท

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม สำหรับเครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์ต่างๆ

ขอขอบคุณ อ.เปี่ยมภูมิ สฤกษ์พฤษ์ สำหรับการแนะนำในการใช้เครื่องมือต่างๆ และเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้องในห้อง LAB EMRL ทุกคน ที่ช่วยในการสร้างเครื่องมือต่างๆ

สุดท้ายขอขอบคุณ คุณปู่ คุณย่า พ่อ แม่ อา พี่ๆ น้องๆ ในครอบครัวทุกคน ที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจที่ดีเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของปัญหา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า.....	4
2.1 สนามแม่เหล็ก.....	4
2.2 กฎการเหนี่ยวนำฟาราเดย์ (Faraday Laws).....	6
2.3 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Magnetic Leakage or Leakage Flux).....	8
2.4 กฎของแอมแปร์ (Ampere's Law).....	9
2.5 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity ; H).....	10
2.6 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density ; B).....	10
2.7 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force ; \mathcal{F}).....	11
2.8 ความซึมซาบได้ (Permeability ; μ).....	11
2.9 ความต้านทานวงจรแม่เหล็ก (Reluctance; \mathcal{R}).....	11
2.10 สนามแม่เหล็กในขดลวด โซลินอยด์.....	13
2.11 วัสดุแม่เหล็ก.....	13
2.11.1 ไดอแมกเนติก.....	13
2.11.2 พาราแมกเนติก.....	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11.3 เฟอร์โรแมกเนติก.....	14
2.12 เส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก (<i>B-H</i> Curve).....	14
2.13 การสูญเสียในแกนเหล็ก.....	17
2.13.1 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss).....	17
2.13.2 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss).....	19
2.14 การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า (AC Excitation).....	20
2.15 ชนิดของแกนเหล็ก.....	22
บทที่ 3 การทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยว.....	24
3.1 นิยามและสัญลักษณ์.....	24
3.2 โครงสร้างชุดทดสอบ.....	24
3.2.1 Yoke.....	25
3.2.2 Bobbin.....	28
3.2.3 H coil.....	29
3.2.4 B coil.....	30
3.2.5 Exciting coil.....	30
3.3 การคำนวณค่าคุณสมบัติของแกนเหล็ก.....	32
3.3.1 การคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	32
3.3.2 การคำนวณค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก.....	33
3.3.3 การคำนวณค่าความสูญเสียของแกนเหล็กแผ่นเดี่ยว.....	33
3.3.4 การหาค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ.....	34
3.4 วิธีการคู่สัญลักษณ์ของแผ่นแกนเหล็ก.....	35
3.5 การทดสอบ.....	35
3.5.1 เงื่อนไขการทดสอบ.....	35
3.5.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ.....	36
3.5.3 การทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียต่างๆ.....	36
3.5.4 การทดสอบเพื่อหาค่าความสม่ำเสมอของแกนเหล็ก.....	40
3.5.5 การทดสอบหาค่า Area-turn ของ H coil.....	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.6 วิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียว.....	42
บทที่ 4 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็ก.....	44
4.1 วงจรการทดสอบ.....	44
4.2 ผลการทดสอบ.....	44
4.2.1 ผลการทดสอบแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110.....	48
4.2.2 ผลการทดสอบแผ่นเหล็กชนิด 27ZH100.....	54
4.2.3 ผลการทดสอบแผ่นเหล็กชนิด 27ZH110.....	60
4.2.4 ผลการทดสอบแผ่นเหล็กชนิด 35JGH135.....	66
4.2.5 ผลการทดสอบแผ่นเหล็กชนิด 35JGH155.....	72
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ.....	78
5.1 สรุปผลวิจัย.....	78
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	79
เอกสารอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก ก.....	81
ภาคผนวก ข.....	113
ภาคผนวก ค.....	114
ภาคผนวก ง.....	117
ภาคผนวก จ.....	118
ประวัติผู้เขียน.....	124

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบค่าวงจรไฟฟ้ากับวงจรแม่เหล็ก.....	12
3.1 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียของแผ่นแกนเหล็กที่ใช้ประกอบทำเป็น Yoke.....	37
3.2 ตารางแสดงค่าความสูญเสียในแกน Yoke (ตัวอย่างเป็นแผ่นทดสอบขนาด 0.23mm).....	38
3.3 ตารางแสดงค่าความสูญเสียในแกน Yoke (ตัวอย่างเป็นแผ่นทดสอบขนาด 0.27mm).....	39
3.4 ตารางแสดงค่าความสูญเสียในแกน Yoke (ตัวอย่างเป็นแผ่นทดสอบขนาด 0.35mm).....	40
4.1 แสดงขนาดของแผ่นแกนเหล็กที่นำมาทดสอบ.....	45

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การทดลองของเออสเตด.....	4
2.2 การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ.....	5
2.3 กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	5
2.4 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าและทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ.....	6
2.5 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวด.....	6
2.6 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล.....	8
2.7 อธิบายกฎของแอมแปร์.....	9
2.8 แสดงการหาค่าความต้านทานวงจรแม่เหล็ก.....	12
2.9 ภาพตัดของขดลวด โซลินอยด์.....	13
2.10 ลักษณะของทอรอยด์.....	14
2.11 กราฟเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก และค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของสารแม่เหล็ก.....	16
2.12 เส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก (B-H Curves) ของสารแม่เหล็กชนิดต่างๆ.....	17
2.13 วงฮิสเตอร์ซิสของสาร ferromagnetic.....	18
2.14 วงฮิสเตอร์ซิสของสาร ferromagnetic ชนิดอ่อน (Soft) และชนิดแข็ง (Hard).....	18
2.15 การเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก.....	20
2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) กับกระแสกระตุ้น (I_ϕ).....	22
3.1 แผ่นแกนเหล็กที่นำมาเรียงเป็นแกน Yoke.....	26
3.2 การเรียงแผ่นเป็น Yoke.....	26
3.3 ฐานฉนวนรองชุดทดสอบ.....	27
3.4 การออกแบบฐานชุดทดสอบ.....	27
3.5 การออกแบบ Bobbin.....	28
3.6 Bobbin ที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.7 H coil ที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.8 B coil ที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.9 Exciting coil ที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.10 การประกอบรวมชุดทดสอบ.....	31
3.11 ภาพตัดขวางของ coil (A-A').....	31
3.12 ภาพตัดตามแนวยาวของ coil (B-B').....	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 วงจรแม่เหล็กที่มีสารอนุกรม 2 ชนิด.....	33
3.14 กราฟค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กที่นำมาทำเป็น Yoke.....	37
3.15 กราฟแสดงความสม่ำเสมอของการพัน Exciting coil.....	41
3.16 แกนขดลวด โซลีนอยด์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	42
3.17 แผนผังขั้นตอนการทดสอบ.....	43
4.1 วงจรการทดสอบ.....	44
4.2 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	46
4.3 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	46
4.4 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	47
4.5 กราฟผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 โดยวิธีการ ทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ.....	48
4.6 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	48
4.7 กราฟผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 โดยวิธีการทดสอบ แกนเหล็กแบบแผ่นเดียวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ.....	49
4.8 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	49
4.9 กราฟผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 โดยวิธีการทดสอบ แกนเหล็กแบบแผ่นเดียวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ.....	50
4.10 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	50
4.11 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด B coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.45 T.....	51
4.12 กระแสกระตุ้นผ่านขดลวด Exciting coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.45 T.....	51
4.13 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด H coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ต่างๆ ของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 กราฟผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH100 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ.....	54
4.15 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH100 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	54
4.16 กราฟผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH100 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ.....	55
4.17 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH100 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	55
4.18 กราฟผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH100 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ.....	56
4.19 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH100 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	56
4.20 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด B coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.48 T.....	57
4.21 กระแสกระตุ้นผ่านขดลวด Exciting coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.48 T.....	57
4.22 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด H coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ต่างๆ ของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH100.....	58
4.23 กราฟผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH110 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ.....	60
4.24 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	60
4.25 กราฟผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH110 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ.....	61
4.26 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	61
4.27 กราฟผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH110 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ.....	62
4.28 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด B coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.49 T.....	63
4.30 กระแสกระตุ้นผ่านขดลวด Exciting coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.49 T.....	63
4.31 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด H coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ต่างๆ ของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH110.....	64
4.32 กราฟผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH135 โดยวิธีการ ทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ.....	66
4.33 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH135 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	66
4.34 กราฟผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH135 โดยวิธีการทดสอบ แกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ.....	67
4.35 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH135 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	67
4.36 กราฟผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH135 โดยวิธีการทดสอบ แกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ.....	68
4.37 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH135 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	68
4.38 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด B coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.48 T.....	69
4.39 กระแสกระตุ้นผ่านขดลวด Exciting coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.48 T.....	69
4.40 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด H coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ต่างๆ ของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH135.....	70
4.41 กราฟผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH155 โดยวิธีการ ทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ.....	72
4.42 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH155 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	72
4.43 กราฟผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH155 โดยวิธีการทดสอบ แกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ.....	73
4.44 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH155 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.45 กราฟผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH155 โดยวิธีการทดสอบ แกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ.....	74
4.46 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH155 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต.....	74
4.47 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด B coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.47 T.....	75
4.48 กระแสกระตุ้นผ่านขดลวด Exciting coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.47 T.....	75
4.49 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด H coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ต่างๆ ของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH155.....	76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ เครื่องจักรกลไฟฟ้า ได้ถือว่ามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆมากมาย เพื่อการตอบสนองของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็น หม้อแปลง, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, มอเตอร์ เป็นต้น โดยในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหล่านี้ มีส่วนประกอบที่สำคัญ เช่น แกนเหล็ก, ขดลวด, โครงสร้าง ฯลฯ ซึ่งแกนเหล็กที่เป็นส่วนประกอบหนึ่ง ในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้น เป็นปัจจัยสำคัญของการกำหนดประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ดังนั้นการแสดงคุณสมบัติของแกนเหล็กต่างๆไม่ว่าจะเป็นกราฟแสดงความเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก, กราฟค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้น ในที่ตำแหน่งความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆ และกราฟกำลังไฟฟ้าปรากฏ จึงเป็นเรื่องสำคัญต่อการพัฒนา และออกแบบสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งการที่จะรู้ว่าแผ่นแกนเหล็กที่จะนำมาใช้นั้น มีคุณลักษณะและคุณสมบัติอย่างไร ก็ต้องมีการทดสอบก่อน

การทดสอบคุณสมบัติของแกนเหล็กนี้สามารถทำได้หลายวิธี ที่เป็นที่นิยมได้แก่ วิธีเอปสไตน์เฟรม (Epstein Flame Method), วิธีการทดสอบแผ่นแกนเหล็กแบบวงแหวน (Toroid Method) และวิธีการทดสอบแผ่นแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยว (Single Sheet Method) ซึ่งทั้งแบบวิธีเอปสไตน์เฟรม และวิธีการทดสอบแผ่นแกนเหล็กแบบวงแหวน มีข้อเสียที่การสร้าง และเตรียมอุปกรณ์การทดลองที่นานเกินไป ดังนั้นปัจจุบันวิธี การทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยว จึงได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากมีความสะดวก ง่ายต่อการเตรียมการทดลอง มีความประหยัด และไม่ซับซ้อน

วิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นการนำเสนอรายละเอียด และวิธีการทดสอบคุณลักษณะต่างๆของแผ่นเหล็กโดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยว ซึ่งประกอบไปด้วยการสร้างชุดทดสอบตามมาตรฐาน JIS C2556 และการเตรียมการทดสอบ ซึ่งโครงการนี้จะเน้นถึงการแมกนีไทซ์เซชันด้วยไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งจะทำให้ได้ กราฟ B-H, เทคนิคการวัดค่าความสูญเสียโดยการแยกค่าความสูญเสียของกำลังไฟฟ้าเพื่อหา กราฟค่าความสูญเสีย และการหา กราฟกำลังไฟฟ้าปรากฏ ซึ่งจะนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับของผู้ผลิตว่ามีความผิดพลาดมากน้อยเพียงใด

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาวิธีการทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเหล็กด้วยวิธี การทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยว
2. สร้างชุดทดสอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS C 2556

3. นำเสนอวิธีในการคำนวณหาค่าคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นเหล็ก
4. ทำการทดสอบและแนวทางในการยืนยันผลการทดสอบ ในวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียว

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

ในการศึกษาการทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นเหล็กนั้น จะทำการออกแบบและสร้างชุดทดสอบ เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นเหล็ก โดยใช้ตัวอย่างทดสอบเพียงแผ่นเดียว ซึ่งการทดสอบนั้นจะทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำผ่านขดลวดต่างๆของชุดทดสอบ รวมถึงวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ชุดทดสอบ เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก และค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้า แล้วนำค่าที่ได้มาหักลบกับค่าองค์ประกอบอื่นๆ จนเหลือแต่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าของแผ่นเหล็กเท่านั้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแนวคิด ในการสร้างชุดทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นเหล็ก โดยใช้โครงสร้างอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS C 2556 (โดยวิธีการใช้ H coil) แล้วทำการปรับเปลี่ยนชุดทดสอบบางส่วนเพื่อให้ง่ายต่อการสร้างและการคำนวณ รวมถึงประยุกต์วิธีการคำนวณเพื่อหาค่าต่างๆ โดยใช้แนวคิดทฤษฎีการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กของฟาราเดย์ คือเมื่อมีการจ่ายแรงดันกระตุ้นผ่านขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็กแล้ว จะมีการเหนี่ยวนำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กไหลในวงจรมแม่เหล็ก ซึ่งจากทฤษฎีนี้ทำให้สามารถนำมาคำนวณหาค่าต่างๆต่อไป

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตในการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้คือ การนำเสนอวิธีการสร้างและการทดสอบชุดทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นเหล็กแบบแผ่นเดียว ซึ่งประกอบด้วย

- 1.5.1 สร้างชุดทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS C 2556
- 1.5.2 ทำการทดสอบหาค่าส่วนประกอบต่างๆที่นำมาใช้ในการเป็นชุดทดสอบ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบ และคำนวณ
- 1.5.3 ทำการทดสอบหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแผ่นเหล็ก เพื่อนำไปแสดงกราฟ $B-H$ Curve
- 1.5.4 ทำการทดสอบหาค่าความสูญเสียในแผ่นเหล็ก เพื่อนำไปแสดงกราฟ
- 1.5.5 ทำการทดสอบหาค่ากำลังๆไฟฟ้าปรากฏในแผ่นเหล็ก เพื่อนำไปแสดงกราฟ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้จะเริ่มต้นด้วยการศึกษามาตรฐาน JIS C 2556 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่เกี่ยวกับวิธีการทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นเหล็ก จากนั้นจะทำการสร้างชุดทดสอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐานและทำการปรับเปลี่ยนบางส่วนเพื่อความสะดวกในการสร้างและการทดสอบ

เมื่อทำการสร้างชุดทดสอบแล้ว ก่อนทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นเหล็กนั้น ต้องทำการทดสอบส่วนประกอบโครงสร้างชุดทดสอบก่อนเพื่อความถูกต้องและแม่นยำในการทดสอบจริงซึ่งการทดสอบส่วนประกอบโครงสร้างนั้นมีดังต่อไปนี้

1.6.1 การทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กที่นำมาทำเป็น Yoke ซึ่งค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กนั้นต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานได้กำหนดไว้

1.6.2 การทดสอบหาค่า Area-turn ของขด H coil เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการวัดมากที่สุด

1.6.3 การทดสอบหาความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กภายในแกนว่ามีความสม่ำเสมอหรือไม่

เมื่อทำการทดสอบส่วนประกอบโครงสร้างแล้วจึงทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นเหล็กโดยการคำนวณแยกค่าความสูญเสียต่างๆออก ซึ่ง ในการทดสอบจะใช้แผ่นเหล็กทั้งหมด 5 ชนิดด้วยกันได้แก่ 27ZH100, 27ZH110 27JGH110, 35JGH135, 35JG155 ชนิดละ 3 แผ่น หลังจากทำการทดสอบแล้ว ก็จะนำผลการทดสอบที่ได้ไปเทียบกับโรงงานผู้ผลิต ว่าให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่

บทที่ 2

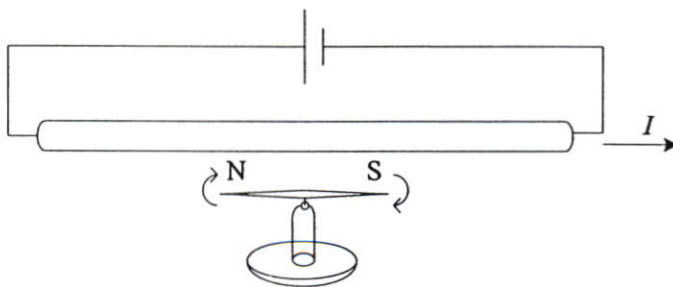
ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1 สนามแม่เหล็ก

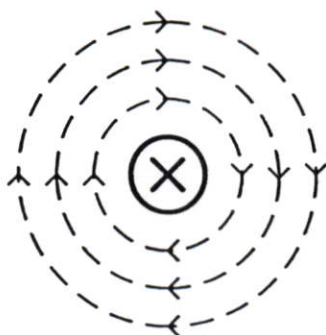
ในปี ค.ศ. 1819 แฮนส์ คริสเตียน เออสเตด (Hans Christian Oersted) นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์ก ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้า และพบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในดัดนำ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นเสมอ

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

เออสเตดยังได้ค้นพบอีกว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น เนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้านั้น ประกอบไปด้วยเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนหนึ่งจัดเรียงเป็นวงรอบๆ ดัดนำที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านนั้น โดยดัดนำจะเป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมเหล่านั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆดัดนำนี้ถ้ายังอยู่ห่างดัดนำมากอำนาจแม่เหล็กก็ยิ่งน้อย การเกิดสนามแม่เหล็กนี้สามารถแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านดัดนำไฟฟ้าที่อยู่ในแนวตั้งทะลุผ่านกระดาษแข็ง แล้วนำเข็มทิศวางไว้บนกระดาษแข็งตามตำแหน่งต่างๆ จะสังเกตเห็นว่าทิศทางจะหันเหเรียงตามกันไปเป็นวงกลมรอบดัดนำ โดยให้สีดำแทนด้วยขั้วเหนือ และสีขาวแทนด้วยขั้วใต้ หรืออาจใช้ผงเหล็กโรย โดยจะสังเกตเห็นว่าผงเหล็กเรียงตัวเป็นวงกลม



รูปที่ 2.1 การทดลองของเออสเตด

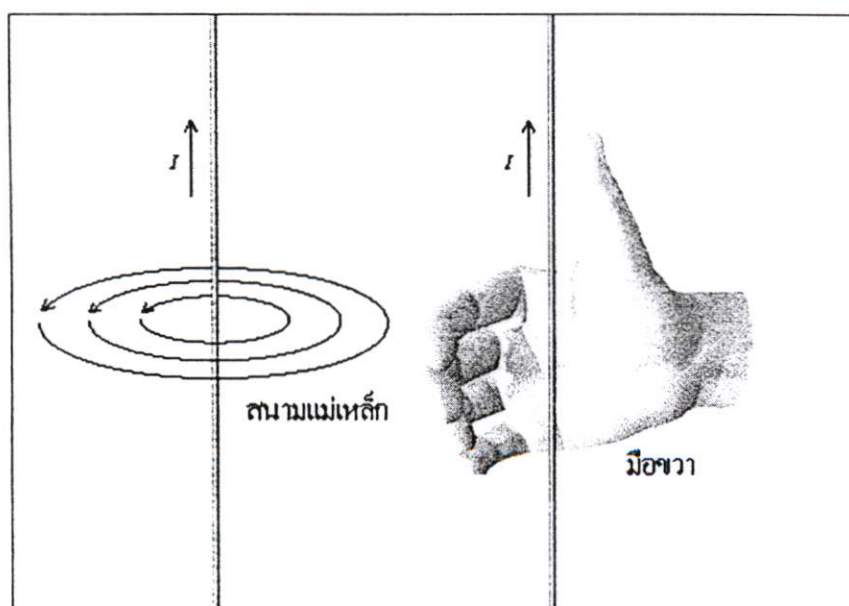


รูปที่ 2.2 การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ

การค้นพบของเออร์สเตด สามารถสรุปได้ดังนี้

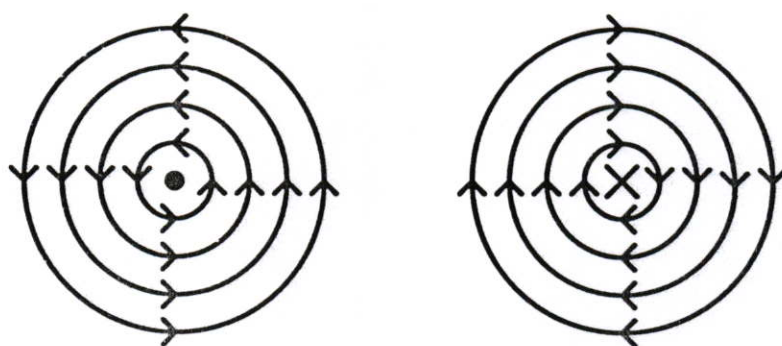
- ประจุที่เคลื่อนที่ หรือกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก เมื่อวางแม่เหล็กไว้ใกล้ๆ เส้นลวดที่มีกระแสไหล จะเกิดแรงกระทำต่อแม่เหล็ก
- สนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงกระทำต่อประจุที่เคลื่อนที่ นั่นคือประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่จะมีทั้งสร้างสนามแม่เหล็ก และมีแรงมากระทำเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก
- กระแสในที่แห่งหนึ่งจะก่อให้เกิดแรงกระทำที่จุดที่มีกระแสไหลอีกแห่งหนึ่ง

ความสัมพันธ์ระหว่าง ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำไฟฟ้า กับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำ สามารถหาได้โดยการใช้กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก คือให้ใช้มือขวากำรอบตัวนำไฟฟ้า โดยให้หัวแม่มือชี้ไปตามความยาวของตัวนำ แทนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า และให้นิ้วทั้งสี่ที่เหลือกำรอบตัวนำ โดยนิ้วทั้งสี่นั้นจะแทนทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำนั้นดังแสดงในรูปที่ 2.3

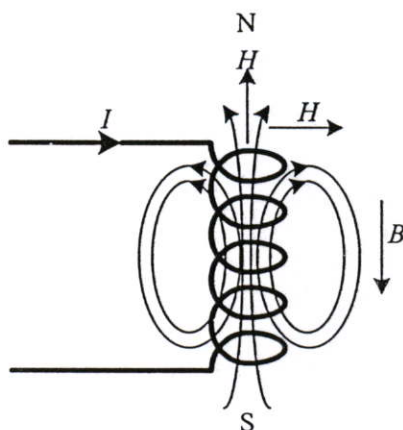


รูปที่ 2.3 กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก

ลูกศรที่ใช้ในวงจรไฟฟ้าจะใช้แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าไปตามความยาวของตัวนำไฟฟ้า โดยจะกำหนดให้ที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้าซึ่งเห็นกันลูกศรนั้นแทนด้วยเครื่องหมายกากบาท (\times) ส่วนด้านที่กระแสไฟฟ้าไหลออกซึ่งเห็นเป็นหัวลูกศรแทนด้วยเครื่องหมายจุด (\cdot) และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.4 และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าและทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ



รูปที่ 2.5 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวด

2.2 กฎการเหนี่ยวนำฟาราเดย์ (Faraday Laws)

ในปี ค.ศ. 1831 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ คือ ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ได้ค้นพบหลักฐานสำคัญเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า คือ ถ้ามีขดลวด C ปลายของขดลวดต่อกับ กัลวานอมิเตอร์ G (แอมมิเตอร์ที่มีความไวสูง) แล้วนำแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่เข้าไปในขดลวด เข็มของกัลวานอมิเตอร์ จะบ่ายเบนไปทิศทางหนึ่งแสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด C หลังจากการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กถาวรหยุดลง เข็มของกัลวานอมิเตอร์ จะ

กลับมาชี้ที่ ศูนย์ตามเดิมผลการทดลองพิสูจน์ได้ว่ามีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ เมื่อเทียบกับขดลวด C

ถ้าจับขั้วแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ ออกจากขดลวด C เข็มของกัลวานอมิเตอร์จะบ่ายเบนไปทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรกแสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด C มีทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรกเช่นกัน ถ้าเราจับแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างกัน จะพบว่ายังมีความเร็วมากเข็มของกัลวานอมิเตอร์ก็ยังบ่ายเบนมาก ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวดก็ต่อมากขึ้นด้วย ผลที่ได้รับจากการทดลองเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า สรุปได้ดังนี้

- เมื่อลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดเส้นแรงแม่เหล็ก หรือ เส้นแรงแม่เหล็ก เคลื่อนที่ตัดลวดตัวนำ จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด
- ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็ก และขึ้นอยู่กับทิศทางของลวดตัวนำที่เคลื่อนที่สัมผัสกับสนามแม่เหล็ก
- ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราความเร็วที่ลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัด หรือถูกตัด โดยเส้นแรงแม่เหล็ก

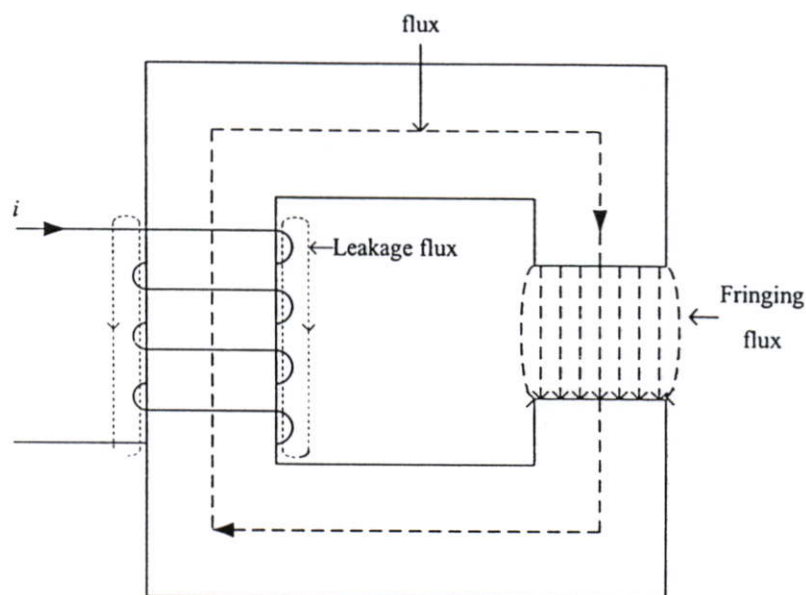
กฎของฟาราเดย์จึงนำมาสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

“แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรมีค่าเป็นอัตราส่วนกับการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรมานั้น”

2.3 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Magnetic Leakage or Leakage Flux)

เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลเป็นเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนหนึ่งที่ไม่ไหลไปตามความต้องการดังแสดงในรูปที่ 2.9 เส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการและใช้ประโยชน์จริงๆ ได้ก็คือเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านช่องอากาศเท่านั้น



รูปที่ 2.6 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

ส่วนเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลที่ไม่ไหลผ่านช่องว่างตามต้องการเรียกเส้นแรงแม่เหล็กนี้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (leakage flux) ถ้าต้องการให้เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลน้อยที่สุดนั้นต้องให้ขดลวดขุดที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กอยู่ใกล้ช่องว่างหรือจุดที่ต้องการใช้เส้นแรงแม่เหล็กนั้นๆ ซึ่งเราจะสามารถทราบได้ว่ามีการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก ได้จากการเอาเข็มทิศไปวางไว้ในบริเวณที่มีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล และก็จะเป็นการยากมากที่จะไม่ให้มีการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก เครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดที่อาศัยอำนาจแม่เหล็ก เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์อย่างดี จะมีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลประมาณ 15 – 20 %

ถ้ากำหนดให้

- ϕ_1 : เส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้น หรือเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั้งหมด
- ϕ : เส้นแรงแม่เหล็กที่สามารถใช้งานได้จริงๆ

จากการทดลองของฮอปคินสัน (Hopkinson) พบว่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลจะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นมา ต่อ เส้นแรงแม่เหล็กที่สามารถใช้งานได้

จริงๆ โดยสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วนี้ จะใช้สัญลักษณ์ λ และสามารถหาได้จากสมการดังนี้

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

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

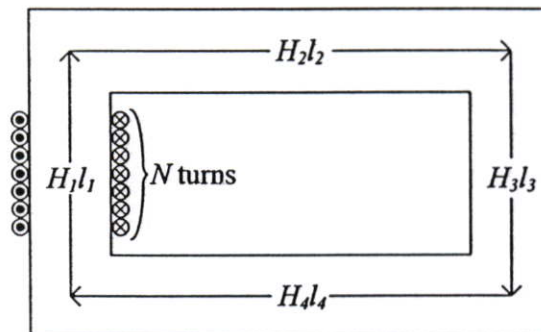
ค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลนี้เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของฮอปคินสัน ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลมาก นั่นแสดงว่าการออกแบบเครื่องใช้ไฟฟ้านั้นไม่ดี แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลต่ำ แสดงว่าการออกแบบไฟฟ้านั้นดี โดยเครื่องใช้ไฟฟ้าในปัจจุบันจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลประมาณ 1.1 ถึง 1.25

นอกจากจะมีเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลแล้ว จากรูปจะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนกระจายออกนอกช่องอากาศ เส้นแรงแม่เหล็กนี้เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการโป่งออก (Fringing flux) เส้นแรงแม่เหล็กส่วนนี้ไม่เกิดประโยชน์เช่นเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหล เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กได้แพร่กระจายออกไปบนพื้นที่ที่เกี่ยวข้องที่โตกว่า ดังนั้นจึงมีผลทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศมีค่าลดลง

2.4 กฎของแอมแปร์ (Ampere's Law)

กฎที่กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) และค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำ ซึ่งอธิบายได้โดยสมการ (2.2)

$$\oint H \cdot dl = NI = mmf \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.7 อธิบายกฎของแอมแปร์

จากรูปที่... สมมติให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าสม่ำเสมอ สามารถหาค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าได้จาก

$$\oint H \cdot dl = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 = NI = mmf \quad (2.3)$$

2.5 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity ; H)

คือแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวของวงจรมแม่เหล็ก วงจรมแม่เหล็กที่มีเส้นแรงแม่เหล็กสม่ำเสมอจะมีค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวคงที่ ตลอดแนวของเส้นแรงแม่เหล็กนั้น นั่นหมายความว่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าคงที่ตลอดแนวความเข้มสนามแม่เหล็กนั้นด้วย หน่วยของความเข้มสนามแม่เหล็ก คือ แอมแปร์/เมตร (A/m) ความเข้มสนามแม่เหล็กเราสามารถวัดได้หรือหาได้จากการนำเอาขั้วเหนือเดียว (N) ที่มีแรงแม่เหล็ก 1 หน่วยขั้วไปวางไว้ ณ จุดใดจุดหนึ่งในสนามแม่เหล็ก ค่าของแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระทำของขั้วเหนือเดียวกับสนามแม่เหล็กก็จะเป็นค่า ความเข้มสนามแม่เหล็กนั้นๆ

ความเข้มสนามแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการคือ

$$H = \frac{\mathfrak{I}}{l} = \frac{Ni}{l} \quad (2.4)$$

โดย H : ความเข้มสนามแม่เหล็ก

l : ความยาวของวงจรมแม่เหล็ก

2.6 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density ; B)

เพื่อให้ทราบปริมาณที่แน่นอนของเส้นแรงแม่เหล็ก จึงต้องกำหนดพื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่าน ปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลผ่านต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เรียกว่า ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density) ดังนั้นหน่วยความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก คือ เวเบอร์ / ตารางเมตร (wb/m^2) หรือเทสลา (Tesla) โดยความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กหาได้จากสมการ

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (2.5)$$

โดย B : ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

ϕ : เส้นแรงแม่เหล็ก

A : พื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก

2.7 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force ; \mathfrak{I})

ความสามารถในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็ก เป็นแหล่งที่ทำหน้าที่ส่งเส้นแรงแม่เหล็ก ให้เคลื่อนที่ผ่านไปในวงจรมแม่เหล็กซึ่งคล้ายกับแรงดันไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ส่งกำลังให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปในโหลด หรือส่วนต่างๆ ของวงจรม โดยแรงดันแม่เหล็ก นั้นเป็นงานมีหน่วยวัดเป็นจูล (Joules) ซึ่งได้จากการนำเอาขั้วเหนือเดียวส่งผ่านเข้าไปใน

สนามแม่เหล็ก หน่วยของงานคิดเป็น จูล แต่หน่วยของแรงดันแม่เหล็ก ใช้ แอมแปร์เทิร์น (A-T) ซึ่งได้จากการเอากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดคูณกับจำนวนรอบของขดลวดที่พันไว้เพื่อให้เกิดสนามเส้นแรงแม่เหล็ก แรงดันแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการ (2.6) คือ

$$\mathfrak{F} = \text{m.m.f.} = NI \quad (2.6)$$

โดย \mathfrak{F} : แรงดันแม่เหล็ก
 I : กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด
 N : จำนวนรอบขดลวด

2.8 ความซึมซาบได้ (Permeability ; μ)

จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ที่แท้จริงมันจะขึ้นอยู่กับ โมเลกุล ของแกนเหล็กว่าจะสามารถวางตัวในแนวเดียวกันได้ง่ายเพียงใด เรียกว่าความซึมซาบได้ ความซึมซาบได้นี้เป็นอัตราส่วนของ ความหนาแน่นแห่งเส้นแรงแม่เหล็กต่อความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mu = \frac{B}{H} = \mu_0 \mu_r \quad (2.7)$$

ความซึมซาบได้ คือ ความยินยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่าน โดยความซึมซาบของสุญญากาศ เป็น 1 ซึ่งปกติทั่วไปแล้ว จะกล่าวถึงเฉพาะความซึมซาบได้สัมพัทธ์ ซึ่งหมายถึงตัวกลาง เช่น เหล็ก ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้เป็นที่เท่าของอากาศ เมื่อมีความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากัน

μ_r คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตได้ในวัสดุสารแม่เหล็กต่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตได้ในสุญญากาศ (หรือในแกนที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก) โดยใช้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กค่าเดียวกัน เช่น ในอากาศ $\mu_r = 1$ แต่ในโลหะผสม เช่น นิกเกิล - เหล็ก (nickel - iron alloys) มี μ_r สูงถึง 100,000

2.9 ความต้านทานวงจรแม่เหล็ก (Reluctance; \mathfrak{R})

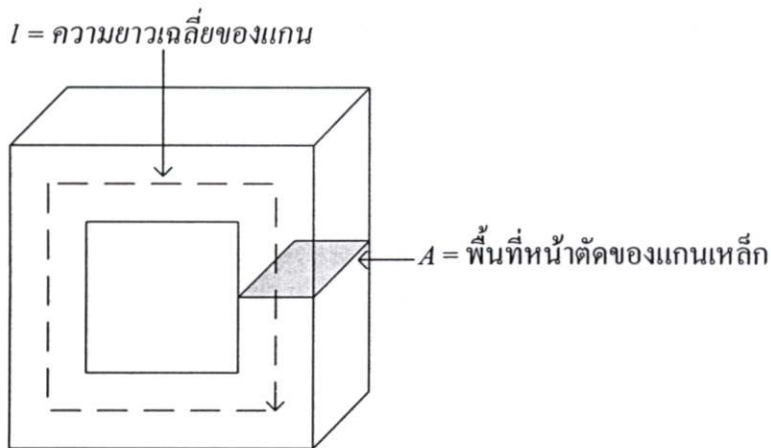
ความต้านทานแม่เหล็ก คือความต้านทาน ที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็กซึ่งอาจจะเป็นอากาศ หรือ วัสดุอะไรก็ได้ที่อยู่บริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กส่งอำนาจ ไปถึงซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นๆ ความต้านทานนี้จะต้านทานการส่งเส้นแรงแม่เหล็กที่ออกจากแหล่งกำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กให้มีค่าลดลง ความต้านทานแม่เหล็กจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของแกนเหล็ก หรือวัตถุคือ l ที่ เส้นแรงแม่เหล็กผ่าน ไปเพื่อให้ครบวงจรของตัวเอง เป็นส่วนกลับกับ

พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก คือ A ความต้านทานแม่เหล็กเป็นการแสดงคุณสมบัติของวัสดุที่มีการต้านต่อการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งคล้าย ๆ กับคุณสมบัติของวัสดุที่มีการต้านต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า ความต้านทาน โดยความต้านทานแม่เหล็ก มีหน่วยวัดเป็น (A-t / wb)

ถ้าพิจารณาแกนแม่เหล็กที่มีพื้นที่หน้าตัด A ตารางเมตร และมีความยาวของเส้นรอบแกนโดยเฉลี่ย l เมตร พันด้วยขดลวดจำนวน N รอบ มีกระแสไหลผ่าน I แอมแปร์ ดังนั้น

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (2.8)$$

โดย \mathcal{R} : ค่าความต้านทานวงจรแม่เหล็ก
 A : พื้นที่หน้าตัดบริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่าน
 μ : ค่าความซึมซาบ
 l : ความยาวโดยเฉลี่ยที่เส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่าน



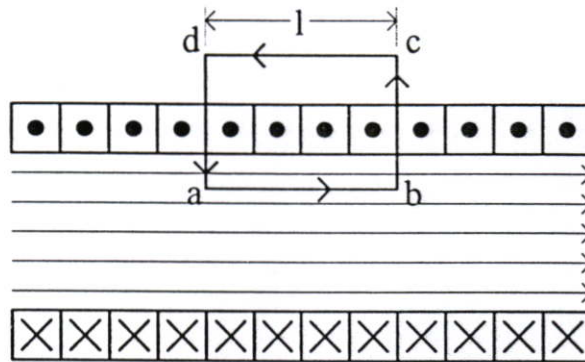
รูปที่ 2.8 แสดงการหาค่าความต้านทานวงจรแม่เหล็ก

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบค่าวงจรไฟฟ้ากับวงจรแม่เหล็ก

วงจรไฟฟ้า	หน่วย	วงจรแม่เหล็ก	หน่วย
แรงเคลื่อนไฟฟ้า (V)	V	แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (\mathcal{F})	At
กระแสไฟฟ้า (I)	A	เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ)	Wb
ความต้านทานไฟฟ้า \mathcal{R}	Ω	ความต้านทานแม่เหล็ก	1/H
ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)	$\Omega \cdot m$	ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ)	H/m
ความหนาแน่นกระแส (J)	A/m ²	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B)	T

2.10 สนามแม่เหล็กในขดลวดโซลินอยด์

เมื่อทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์ จะเกิดสนามแม่เหล็กภายในขดลวด ซึ่งการหาสนามแม่เหล็กภายในขดลวดสามารถทำได้โดยใช้กฎของแอมแปร์ ซึ่งสามารถหาสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นโดยอินทิเกรต $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow a$



รูปที่ 2.9 ภาพตัดของขดลวดโซลินอยด์

$$\oint H \cdot dl = \int_a^b H dl + \int_b^c H dl + \int_c^d H dl + \int_d^a H dl$$

$$= Hl \Big|_a^b + 0 + 0 + 0$$

$$\int_b^c H dl = \int_d^a H dl = 0 \text{ เนื่องจาก } \int_b^c H dl \cos 90 = 0$$

$$\int_c^d H dl = 0 \text{ เนื่องจาก สนามแม่เหล็กภายนอกนั้นเป็นศูนย์}$$

ดังนั้น เฉพาะ $\int_a^b H \cdot dl = NI$ เท่านั้น ที่มีผลต่อสนามแม่เหล็กภายในขดลวดโซลินอยด์ จึงสามารถหาสมการค่าความหนาแน่นได้จาก

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l} \quad (2.9)$$

2.11 วัสดุแม่เหล็ก

2.11.1 ไดอแมกเนติก เป็นสารประเภทหนึ่ง ซึ่งประกอบไปด้วย อะตอมที่ไม่มีโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็กถาวร สารไดอแมกเนติก เช่น ทอง เงิน เพชร และตะกั่ว เมื่อสารไดอแมกเนติก อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอก จะเกิด โมเมนต์แม่เหล็กอ่อนขึ้นในทิศทางต้านต่อสนามแม่เหล็กภายนอกนั้น โดยผู้ที่ค้นพบคือ ไมเคิลฟาราเดย์ เมื่อปี ค.ศ.1846

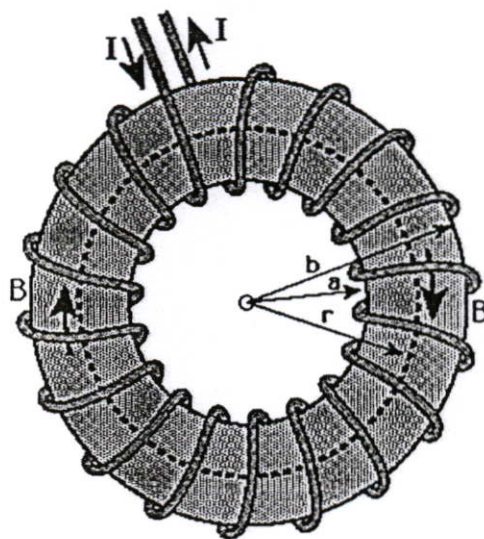
2.11.2 พาราแมกเนติก หมายถึง การที่สนามแม่เหล็กจากภายนอกทำให้อะตอมเกิดแรงคู่ควบจัดเรียงขั้วคู่ให้หันไปในทิศทางที่เรียงตัวกันตามสนามแม่เหล็กจากภายนอกนั้น คุณสมบัติที่

สำคัญของความเป็นแม่เหล็กแบบนี้คือ ค่าความเป็นแม่เหล็กของสารเป็นสัดส่วนโดยตรง กับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งสารนั้นวางอยู่ และเป็นสัดส่วนกลับกันกับ อุณหภูมิ ผู้ที่ค้นพบคือ ปิแอร์คูรี (Pierre Curie) เมื่อปี ค.ศ. 1895

2.11.3 เฟอร์โรแมกเนติก อะตอมของสารแม่เหล็กเฟอร์โร จะมีการจัดโมเลกุลขั้วคู่เหนี่ยวนำซึ่งกันและกันให้มีทิศทางไปทางเดียวกันภายใต้แรงกระทำซึ่งกันและกัน คุณสมบัติที่สำคัญของสารแม่เหล็กเฟอร์โรคือ ค่าความเป็นแม่เหล็กของสารไม่เป็นปฏิภาคโดยตรง กับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และสารอาจแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กได้ถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามแม่เหล็ก สารแม่เหล็กเฟอร์โรมีอยู่ 5 ธาตุ ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล กาโดลิเนียม และดีสโพรเซียม โดยสารทั้ง 5 นี้จะยังคงสภาพเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โร ตามที่อุณหภูมิยังไม่เกินค่าอุณหภูมิของคูรี (Curie temperature) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้จะเปลี่ยนเป็นสารแม่เหล็ก พาราแมกเนติกทันที โดยเหล็กนั้นมีอุณหภูมิของคูรี 1043 K คุณสมบัตินี้จะเกิดได้แม้ว่าอะตอมของธาตุทั้ง 5 นี้จะอยู่ในโครงสร้างของผลึก ซึ่งไม่ใช่มีแต่ธาตุทั้ง 5 นี้อย่างเดียว

2.12 เส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก ($B-H$ Curve)

เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับ ความซึมซาบได้ ดียิ่งขึ้น จึงขอยกตัวอย่างของสนามแม่เหล็กที่เกิดกับขดลวดที่เป็นวงกลมเรียกว่า ทอรอยด์ (toroid)



รูปที่ 2.10 ลักษณะของทอรอยด์

การที่ขดลวดโซลินอยด์ให้เป็นวงกลมนั้นมีความยาวเฉลี่ย l หน่วยความยาว สนามแม่เหล็กภายในไม่เปลี่ยนค่า ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก แต่ได้นำเอาแกนเหล็กมาใส่ภายใน

ขดลวดโซลินอยด์จะทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก เปลี่ยนไปและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะมีค่าเพิ่มเป็นหลายร้อยเท่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเดิม ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก จะมีค่าเท่ากับ μ , ซึ่งหมายความว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าของ μ , หรือ $\frac{\mu}{\mu_0}$ ของสารนั้นๆ

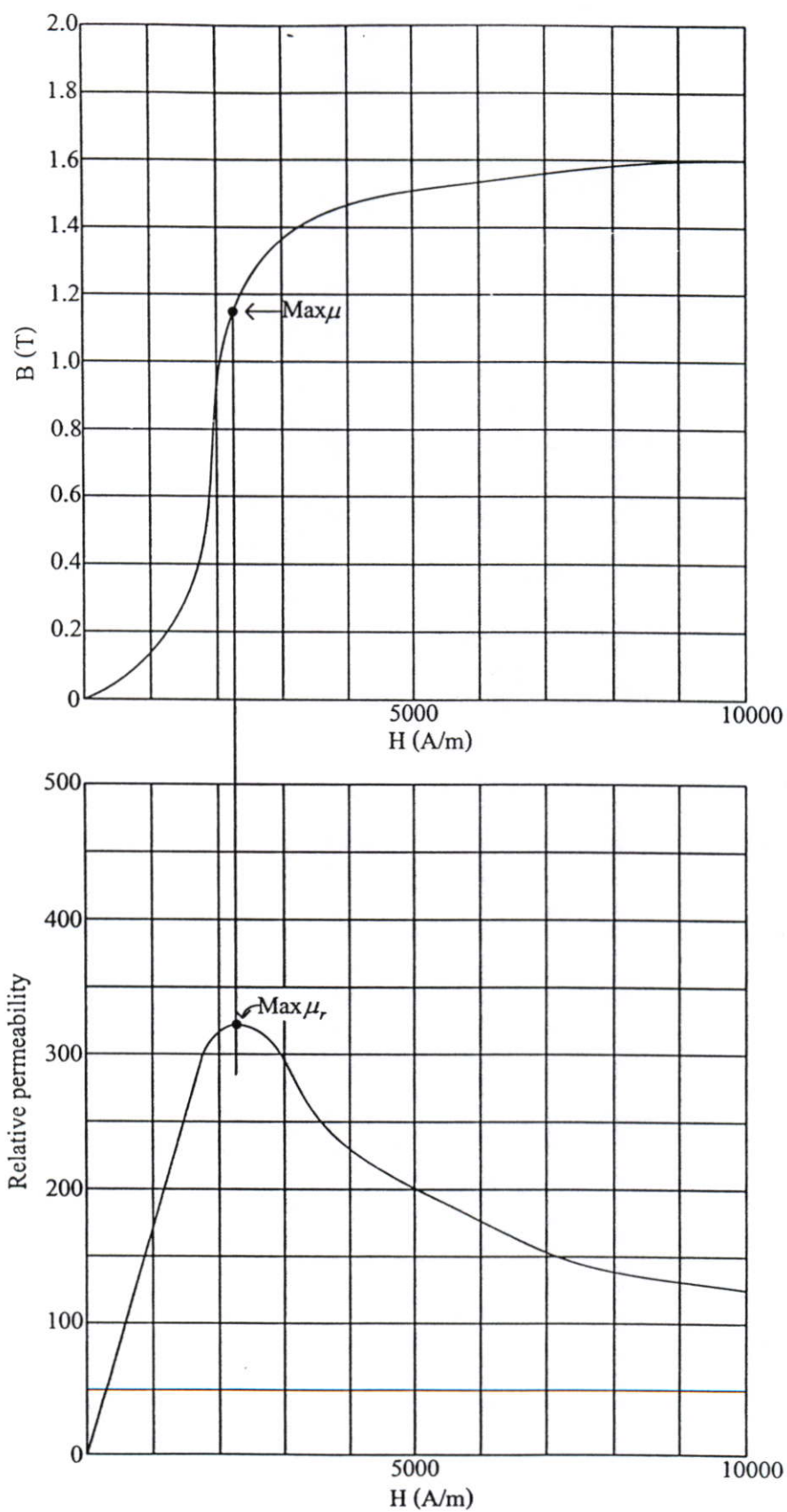
เส้นโค้งแสดงความเป็นแม่เหล็ก เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) จากรูปที่ 2.11 ขดลวดทอโรอยด์นั้น ถ้าเพิ่มกระแสไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้ค่า ความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก เพิ่มขึ้นตาม ถ้าเราเริ่มต้นจากกระแสเป็นศูนย์ และมีเครื่องมือวัดค่า เส้นแรงแม่เหล็กในแกนทอโรอยด์ เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก จากรูปที่ 2.11 ถ้าเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแกนเหล็ก เช่น ทอโรอยด์ เราจะได้เส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 2.11 แต่ความชันชันได้ จะไม่คงที่เมื่อมีค่า ความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ค่า μ จะเพิ่มจนถึงค่าสูงสุด เมื่อค่า μ เพิ่มจนถึงค่าสูงสุดแล้ว การเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็ก ก็จะไม่ทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก เพิ่มขึ้นมากนักจน กระทั่งเกิดการอิ่มตัว จะทำให้ค่า μ ลดลงเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอีกดังแสดงในรูปที่ 2.11 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก บางครั้งเรียกว่า ($B-H$ Curve) หรือเส้นโค้งการอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก หรือเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก

- สารใดมีค่า μ_r มากกว่า 1 เล็กน้อยสารนั้นจัดเป็นชนิดพาราแมกเนติก (Paramagnetic) เช่น อากาศ, ไม้

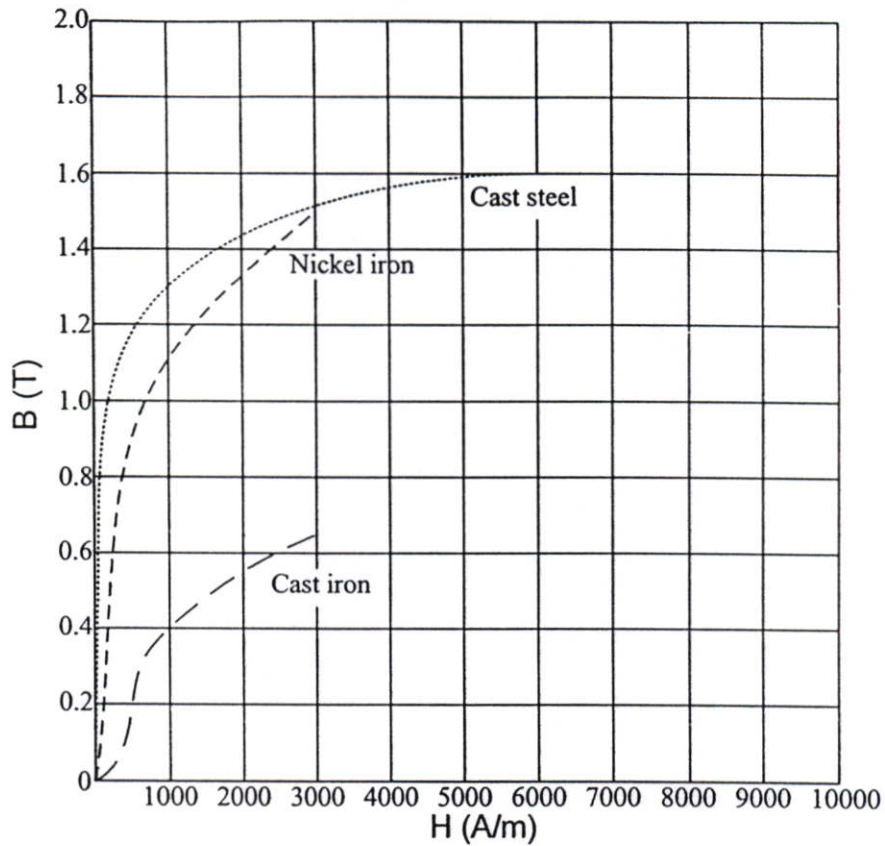
- สารใดมีค่า μ_r น้อยกว่า 1 สารนั้นจัดเป็นชนิด ไดอาแมกเนติก (Diamagnetic) เช่น พวกอะลูมิเนียม หรือสารตัวนำสมบูรณ์ ซึ่งมี $\mu_r = 0$

- สารใดมีค่า μ_r สูงมากๆ จัดเป็นพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) โดยทั่วไปค่า μ_r จะอยู่ระหว่าง 1,000-1,000,000 โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารแม่เหล็ก และแม้แต่ในสารชนิดเดียวกันที่ค่าของความเข้มสนามแม่เหล็กต่างกัน ค่าของ μ_r จะไม่เท่ากัน

ค่าความสัมพันธ์จะไม่เป็นเส้นตรงและจะมีระดับหนึ่ง ถึงแม้ว่าเราจะเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กให้มากขึ้นไปอีกแต่ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก จะไม่เปลี่ยนแปลงจุดที่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีกนี้ เราเรียกว่า จุดอิ่มตัวของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของสารนั้นและค่าของ μ_r ที่มีขนาดสูงที่สุดของสารใดๆ จะสามารถหาจากการลากเส้นตรงไปสัมผัสกับเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H



รูปที่ 2.11 กราฟเส้นโค้งค่าเหนี่ยวนำแม่เหล็ก และค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของสารแม่เหล็ก



รูปที่ 2.12 เส้นโค้งก้านแม่เหล็ก (B-H Curves) ของสารแม่เหล็กชนิดต่างๆ

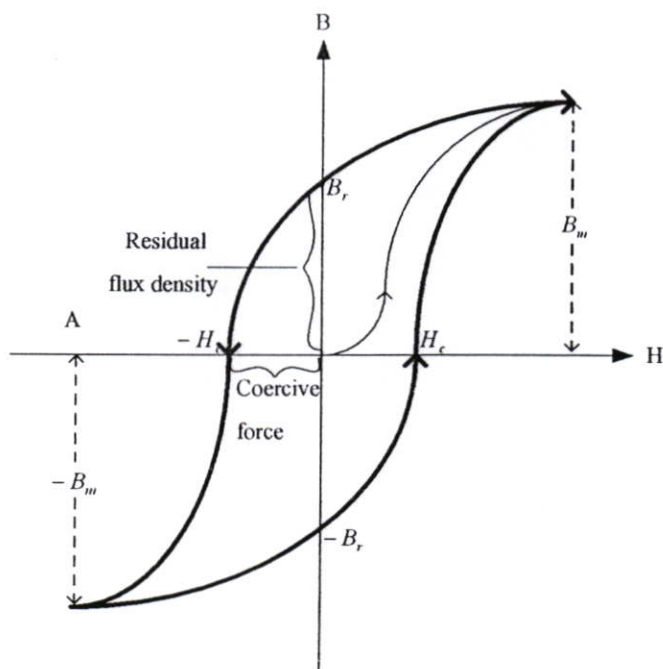
2.13 การสูญเสียในแกนเหล็ก

การสูญเสียในแกนเหล็กของวงจรแม่เหล็กทุกชนิดจะถูกจ่ายทิ้งออกมาเป็นรูปพลังงานความร้อนซึ่งเป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กภายในเวลาแต่ละรอบประกอบไปด้วยการสูญเสียจากฮิสเตอรีซิส และการสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก การสูญเสียนี้นั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารแม่เหล็กที่ใช้ต่างๆ เช่น ความถี่ของระบบไฟฟ้า ส่วนผสมอัตราส่วนของซิลิกอน ความหนาของแผ่นเหล็ก เป็นต้น

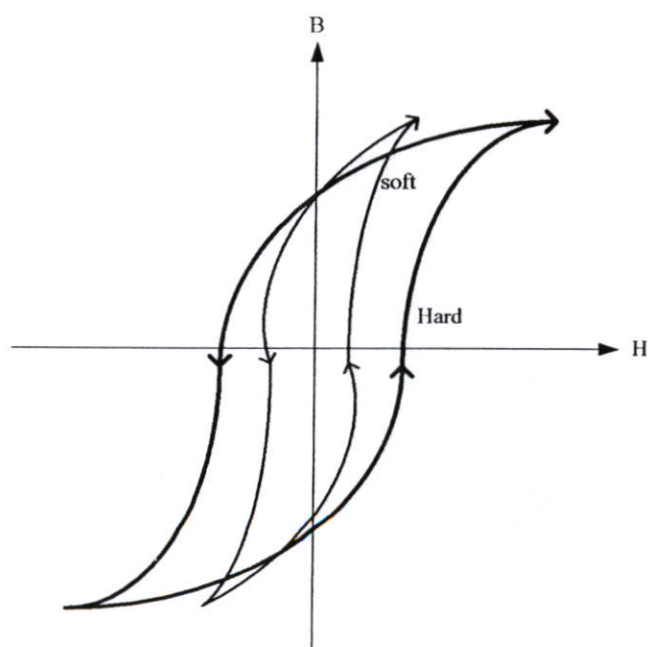
2.13.1 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิส (Hysteresis Loss)

ถ้าป้อนค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ให้กับสารแม่เหล็กจนถึงช่วงที่เกิดการอิ่มตัวนั้น เมื่อทำการลดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กลง จะทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กลดลงแต่จะไม่เท่ากับตอนที่เพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังนั้นเมื่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กลดลงจนเหลือศูนย์จะมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเหลืออยู่ซึ่งเรียกว่าค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง (residual flux density B_r) ดังรูปที่ 2.13 ถ้าต้องการลดค่า B_r ลงให้เป็นศูนย์จะต้องป้อนค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามให้กับสารแม่เหล็กนั้น ค่า H_c นั้นเรียกว่าค่า coercive force ขณะที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กยังคงเพิ่มต่อไปในทิศทางลบ สารแม่เหล็กจะเกิดสนามแม่เหล็กที่ชั่วตรงข้ามจากเดิม และเมื่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กลดลงจนเป็นศูนย์อีกครั้งหนึ่งจะทำให้เกิดค่า

$-B_r$ ซึ่งต้องใช้ค่า $+H$ เพื่อลดค่า $-B_r$ ให้เป็นศูนย์ และเกิดลักษณะเช่นนี้ต่อไปเรื่อยๆ จนเกิดวงที่เรียกว่าวงฮิสเทอรีซิส จากรูปที่ 2.14 แสดงถึงสภาพการเป็นแม่เหล็กของสารแม่เหล็กแบบอ่อน (Soft magnetic material) การเป็นแม่เหล็กจะเกิดวงฮิสเทอรีซิสที่เล็กและแคบ ในขณะที่สารแม่เหล็กที่แข็งหรือยาก (Hard magnetic material) การเป็นแม่เหล็กจะเกิดวงฮิสเทอรีซิสที่ใหญ่กว่า



รูปที่ 2.13 วงฮิสเทอรีซิสของสาร ferromagnetic



รูปที่ 2.14 วงฮิสเทอรีซิสของสาร ferromagnetic ชนิดอ่อน (Soft) และชนิดแข็ง (Hard)

การใช้ไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำวงจรถลวดที่พันรอบแกนเหล็ก ให้เกิดอำนาจแม่เหล็กในแต่ละรอบ (Cycle) การสูญเสียภายในแกนเหล็ก อันเกิดจากฮิสเตอรีซิส จะเท่ากับพื้นที่ภายในวงฮิสเตอรีซิสนั้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และ ชนิดของสารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกน ดังนั้นค่าโดยประมาณของการสูญเสียจากฮิสเตอรีซิสของสารแม่เหล็กที่ความถี่ f หาได้จาก

$$P_h = K_h f B_m^n \quad (2.10)$$

โดยที่	P_h	: การสูญเสียจากฮิสเตอรีซิส
	K_h	: ค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็กที่ทำการทดลอง
	f	: ค่าความถี่ไฟฟ้าของแหล่งจ่าย
	n	: สไตน์เมทซ์เอกซ์โพเนนต (Steinmetz exponent) ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 – 2.0 แต่โดยทั่วไปใช้ $n = 1.6$

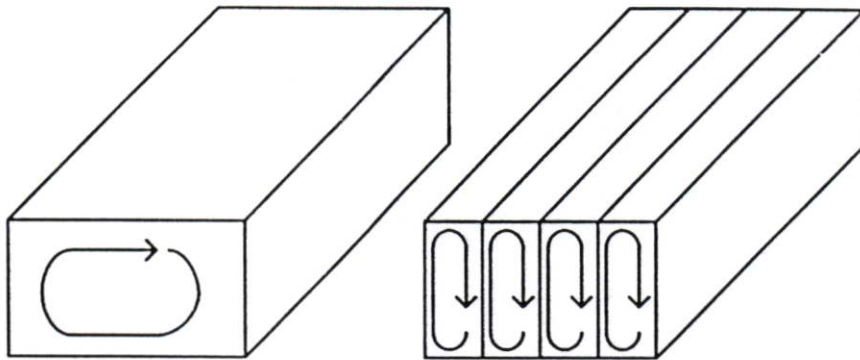
2.13.2 การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss)

กระแสไหลวนจะทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy current) อยู่ในสารแม่เหล็ก โดยถ้าทำให้สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านตัวนำ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในตัวนำนั้น แต่ถ้าเราใส่แกนเหล็กเข้าไปในขดลวดที่มีกระแสสลับไหลอยู่ ก็จะทำให้เกิด เส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะของรูปคลื่นไซน์ด้วย การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในแกนเหล็ก และ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในแกนเหล็กนี้จะเป็นตัวทำให้เกิดมีกระแสไหลวนภายในแกนเหล็กนั้น ซึ่งเรียกว่ากระแสไฟฟ้านี้ว่ากระแสไหลวน กระแสไหลวนจะเกิดขึ้นในแกนเหล็กทุกๆชนิดของสารที่เป็นตัวนำไฟฟ้า กระแสนี้จะไหลผ่านความต้านทานไฟฟ้าของสารแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ความร้อนเกิดขึ้นนี้เกิดจากกำลังสูญเสียซึ่งมีค่า I^2R และเนื่องจากความต้านทานของเหล็กมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับสารชนิดอื่นๆ ดังนั้นกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กจึงมีค่าค่อนข้างสูง และขนาดของกระแสไหลวนจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของแกนเหล็ก การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงแบบรูปคลื่นไซน์สามารถหาได้จากสมการข้างล่างดังนี้

$$P_e = K_e f^2 B_m^2 \quad (2.11)$$

โดยที่	P_e	: การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน
	K_e	: ค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็ก

ขนาดของกระแสไหลวนขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ความถี่ และค่าความต้านทานไฟฟ้าของแกนเหล็ก การลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนทำได้โดยใช้แกนเหล็กที่เป็นแผ่นเหล็กบางๆ (Laminated sheet steel) อัดซ้อนเข้าด้วยกัน โดยในแต่ละแผ่นจะใช้สารฉนวนเคลือบผิวที่มีค่าความต้านทานสูง เช่น ฉาบด้วยน้ำมันวานิช ซึ่งจะทำให้กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก ที่ใช้แผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนกันมีค่าลดลงอย่างมาก ดังนั้นจึงทำให้การกำลังการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนมีค่าลดลงหรือมีค่าน้อยลงตามไปด้วยกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กที่มีเนื้อเดียวกันตลอด ดังนั้นเราจึงไม่นำเอาแกนเหล็กที่มีเนื้อเดียวกันตลอดหรือแกนเหล็กตันมาใช้กับ แรงดันแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับ และในแกนเหล็กที่ใช้แผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนกันแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิส และกระแสไหลวน รวมกัน เรียกว่า การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) P_c ซึ่งเป็นข้อมูลที่บริษัทผู้ผลิตแกนเหล็กเป็นผู้ทดสอบ

การสูญเสียในแกนเหล็กของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำงาน โดยมีแรงดันและความถี่หรือความเร็วคงที่ เช่น หม้อแปลง, มอเตอร์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีค่าโดยประมาณคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามโหลด แต่จะเปลี่ยนตามค่า B_{max} ที่ใช้งานหรือออกแบบ

2.14 การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า (AC Excitation)

ในวงจรแม่เหล็กเมื่อเราจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็กที่ไม่มีช่องอากาศ โดยความยาวของวงจรแม่เหล็ก (l_c) และพื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็กเป็น (A_c) จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็ก (mmf) ที่ป้อนให้กับวงจรแม่เหล็ก

ในระบบการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ลักษณะของรูปสัญญาณ (Wave form) ของศักดาไฟฟ้าจะมีรูปสัญญาณตามแบบของ Sinusoidal function ที่แปรเปลี่ยนกับเวลา t ซึ่งจะมีผลให้เส้นแรงแม่เหล็ก

(ϕ) มีการเปลี่ยนแปลงตาม Sinusoidal function ด้วย ดังนั้นเราจะสามารถแสดงลักษณะของ Exciting current และแสดงถึงความสูญเสียในสนามแม่เหล็กมาใช้เป็นวงจรมแม่เหล็ก เมื่ออยู่ในสถานะคงตัวของไฟฟ้ากระแสสลับ (Steady state AC operation)

กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก $\phi(t)$ เป็นแบบ Sinusoidal

$$\phi(t) = \phi_{\max} \sin \omega t = B_{\max} A_c \sin \omega t \quad (2.12)$$

เมื่อกำหนดให้

- ϕ_{\max} : ค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น wb
 B_{\max} : ค่าสูงสุดของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น T
 ω : ความเร็วเชิงมุม (Angular velocity) มีหน่วยเป็น rad/sec
 f : ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ มีหน่วยเป็น Hz

จาก Faraday's Law สามารถหาการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้า (Induced voltage) เมื่อจำนวนรอบขดลวดที่พันอยู่เท่ากับ N รอบ โดยกำหนดให้ว่า ในวงจรมแม่เหล็กเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็ก 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

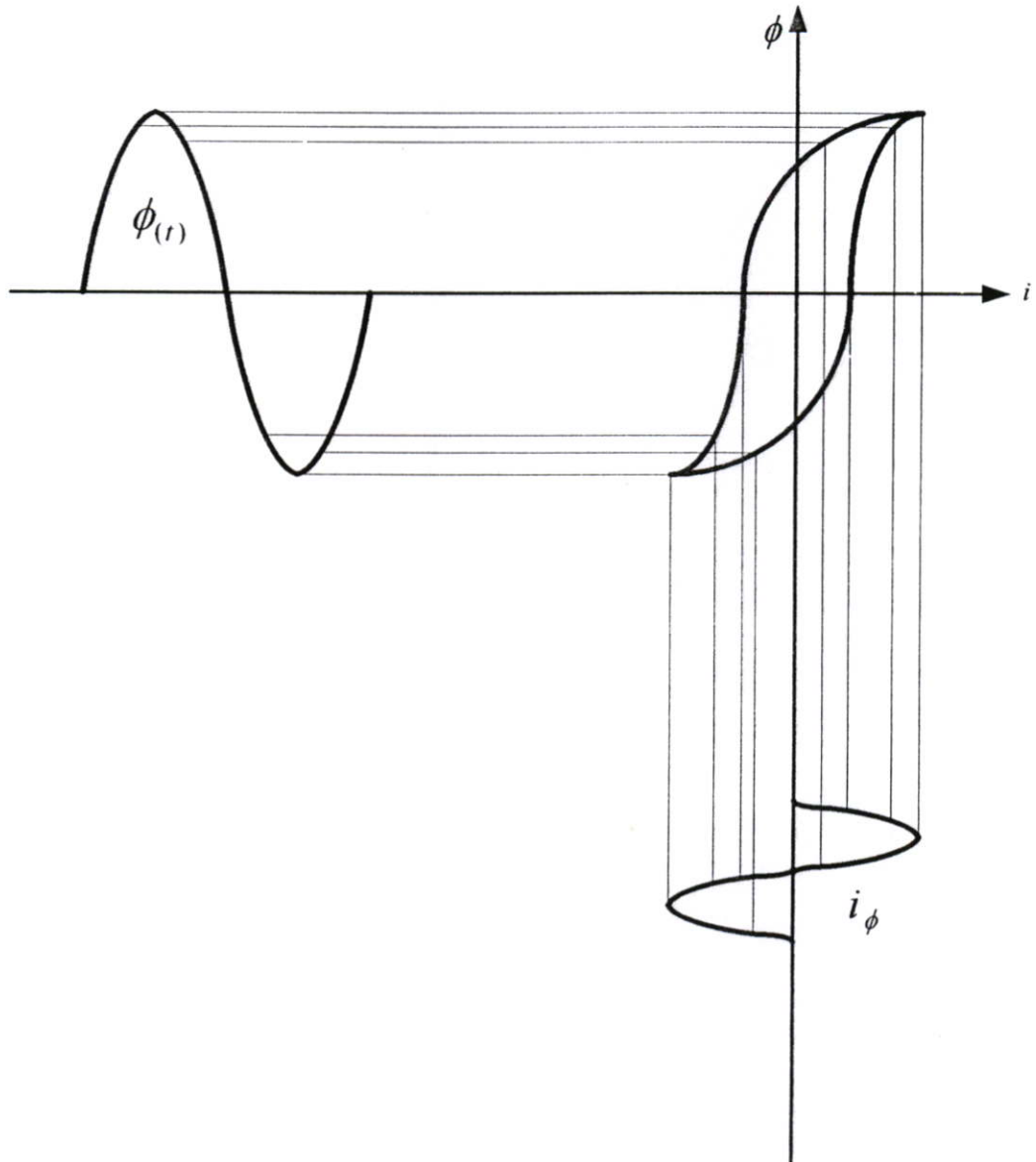
$$E_{\max} = 2\pi f N A_c B_{\max} \quad (2.13)$$

ในทางปฏิบัตินิยมใช้ค่า rms เมื่อระบบทำงานอยู่ในสถานะคงตัว

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

$$E_{rms} = 4.44 f N A_c B_{\max} \quad (2.14)$$

ในการทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก จะต้องมีการเสไฟฟ้าป้อนให้กับขดลวด เราเรียกกระแสนี้ว่า กระแสกระตุ้น (Exciting current, i_ϕ) สำหรับสารแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติเป็นแบบ non-linear เพื่อเส้นแรงแม่เหล็กใน Sinusoidal จะมีผลทำให้กระแสกระตุ้นมีรูปร่างแตกต่างไปจากรูปสัญญาณของเส้นแรงแม่เหล็กตามสภาพความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ดังแสดงในรูปที่ (2.16)



รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) กับกระแสกระตุ้น (I_ϕ)

2.15 ชนิดของแกนเหล็ก

โดยทั่วไปแผ่นเหล็กมีกรรมวิธีผลิตอยู่ 2 ลักษณะ คือชนิดไม่เรียงแนวรีด (non-oriented) และชนิดเรียงแนวรีด (grain oriented)

แผ่นเหล็กชนิดไม่เรียงแนวรีดจะมีค่าซึมซาบแม่เหล็กไม่ต่างกันมากนักตลอดทุกแนวของแผ่นแม่เหล็กไม่ว่าจะเป็นทางขวาง ทางเฉียงหรือทางตรงของแนวรีด แผ่นเหล็กชนิดนี้จะมีค่าซึมซาบแม่เหล็กไม่สูง เหมาะสำหรับการใช้งานวงจรแม่เหล็กทั่วไป ที่แนวสนามแม่เหล็กไม่จำเป็นต้องอยู่ในแนวรีด และต้องการค่าใช้จ่ายที่ต่ำ

แผ่นเหล็กชนิดเรียงแนวรีดจะมีค่าซึมซาบแม่เหล็กสูงกว่าชนิดไม่เรียงแนวรีด (ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง) และมีค่าการสูญเสียในแกนเหล็กต่ำ แผ่นเหล็กชนิดนี้ถ้านำมาใช้งานที่มีแนวสนามแม่เหล็กไม่อยู่ในแนวรีด ค่าซึมซาบแม่เหล็กจะลดลงอย่างมาก และค่าความสูญเสียในแกนเหล็กจะสูงขึ้นมาก

ดังนั้นในการเลือกแกนเหล็กสำหรับวงจรแม่เหล็ก การออกแบบจึงต้องคำนึงถึงคุณสมบัติต่างๆ ของสารแม่เหล็กที่นำมาใช้งาน ทั้งนี้เนื่องมาจากถ้าเลือกสารแม่เหล็กที่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง (ค่าการสูญเสียในแกนเหล็กต่ำ) ทำให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กลดลง ซึ่งหมายถึงการประหยัดสารแม่เหล็ก ขดลวดและ โครงสร้าง ทำให้ลดน้ำหนัก ลดค่าใช้จ่าย และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรแม่เหล็ก

บทที่ 3

การทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียว

3.1 นิยามและสัญลักษณ์

H (Magnetic field strength) - ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของแผ่นแกนเหล็กทดสอบ มีหน่วยเป็น แอมแปร์ต่อเมตร (A / m) สามารถตรวจจับและวัดสัญญาณได้ผ่านทางขดลวดที่ติดตั้งอยู่ใกล้กับผิวของแผ่นแกนเหล็กทดสอบ ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า ขดลวด H (H coil)

B (Magnetic flux density) - ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแผ่นแกนเหล็กทดสอบ มีหน่วยเป็นเทสลา (Tesla) สามารถตรวจจับและวัดสัญญาณได้ผ่านทางขดลวดที่พันอยู่รอบแกนทดสอบ ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า ขดลวด B (B coil)

P (Core loss) - ค่าความสูญเสียในแผ่นแกนเหล็กทดสอบในขณะที่แผ่นแกนเหล็กทดสอบได้รับการแมกนีไทซ์ซึ่ง ด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ

P_s (Core loss / kg) - ค่าความสูญเสียต่อ 1 กิโลกรัม ของแผ่นแกนเหล็กทดสอบ สามารถเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (f) และค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (B_m)

เช่น $W_{15/50}$ หมายถึง ค่าความสูญเสียในแผ่นแกนเหล็กทดสอบที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.5 T และความถี่ 50 Hz

S (Apparent power) - ผลคูณของค่าเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้า....และค่ากระแสกระตุ้น... ในขณะที่แผ่นแกนเหล็กทดสอบได้รับการแมกนีไทซ์ซึ่ง ด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ

S_s (Apparent power / kg) - ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏต่อ 1 กิโลกรัมของแผ่นแกนเหล็กทดสอบสามารถเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (f) และค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (B_m)

เช่น $S_{15/50}$ หมายถึง ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในแผ่นแกนเหล็กทดสอบที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.5 T และความถี่ 50 Hz

3.2 โครงสร้างชุดทดสอบ

ในการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของเหล็กนั้น จะใช้โครงสร้างชุดทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS C 2556 ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

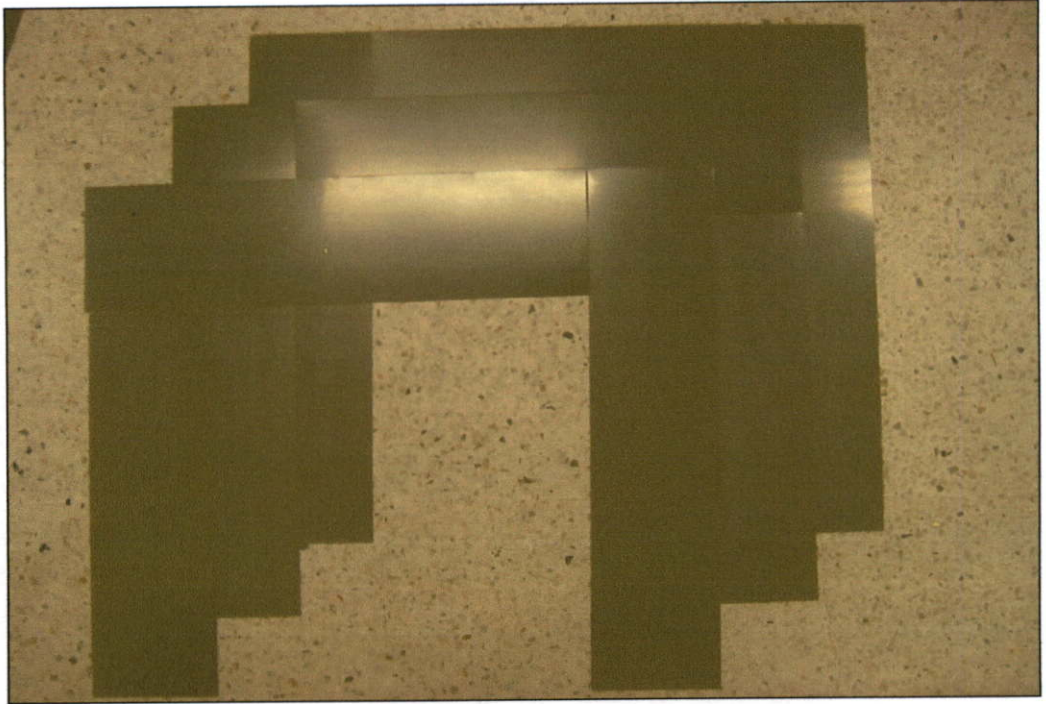
3.2.1 Yoke

Yoke ทำจากแผ่นแกนเหล็ก Grain oriented หรือ Nickel iron alloy วางเรียงอัดซ้อนกัน โดยตรงมุมจะวางให้เหลื่อมกันสลับกันไปมา เพื่อทำหน้าที่ให้ความเป็นวงจรมแม่เหล็กสมบูรณ์ และเป็นเนื้อเดียวกับแผ่นแม่เหล็กทดสอบ โดยข้อกำหนดต่างๆ ของแผ่นเหล็กที่จะนำมาวางเรียงเป็น Yoke มีข้อกำหนดดังนี้

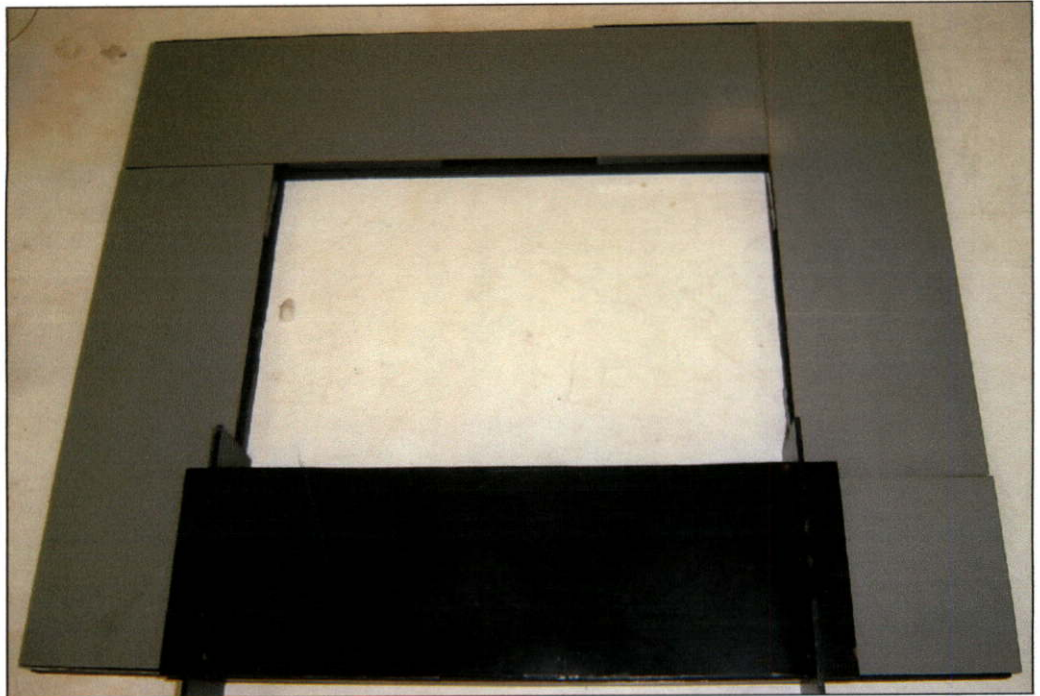
- ควรทำจาก Laminate sheets โดยเป็น Grain oriented หรือ Nickel iron alloy
- Staggered butt joint เพื่อลด leakage flux
- Core loss ของ Yoke ไม่เกิน 1.0 W/kg ที่ 1.5 T, 50 Hz
- ขนาดที่ถูกต้องของความกว้าง yoke ได้ในช่วง ± 0.2 mm และความยาว Yoke ได้ในช่วง ± 0.5 mm
- ระบาย 2 ด้านมีขนาดไม่เกิน 0.5 mm
- ความสูงของ Yoke ไม่ควรน้อยกว่า 7 mm
- ตัว Support ควรทำด้วยฉนวนและเป็นวัสดุ Non-magnetic เพื่อป้องกันการเกิดความสูญเสียในตัว Support

โดยแผ่นแกนเหล็กที่ใช้ทำเป็นตัว Yoke ในการทดสอบนี้ เป็น Steel Sheet Grade 23ZDKH90 (Grain-oriented Magnetic Steel Sheet and Strip) ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

- ความหนา	0.23	mm (0.009 inches)
- ความหนาแน่น	7.65	kg / dm ³
- Core loss สูงสุด ที่ 1.7 T 50 Hz	0.90	W/ kg (0.41 W/pound)
60 Hz	1.19	W/ kg (0.54 W/pound)
- ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด	1.88	T ที่ 800 A / m
- ค่า lamination factor ต่ำสุด	94.5	%



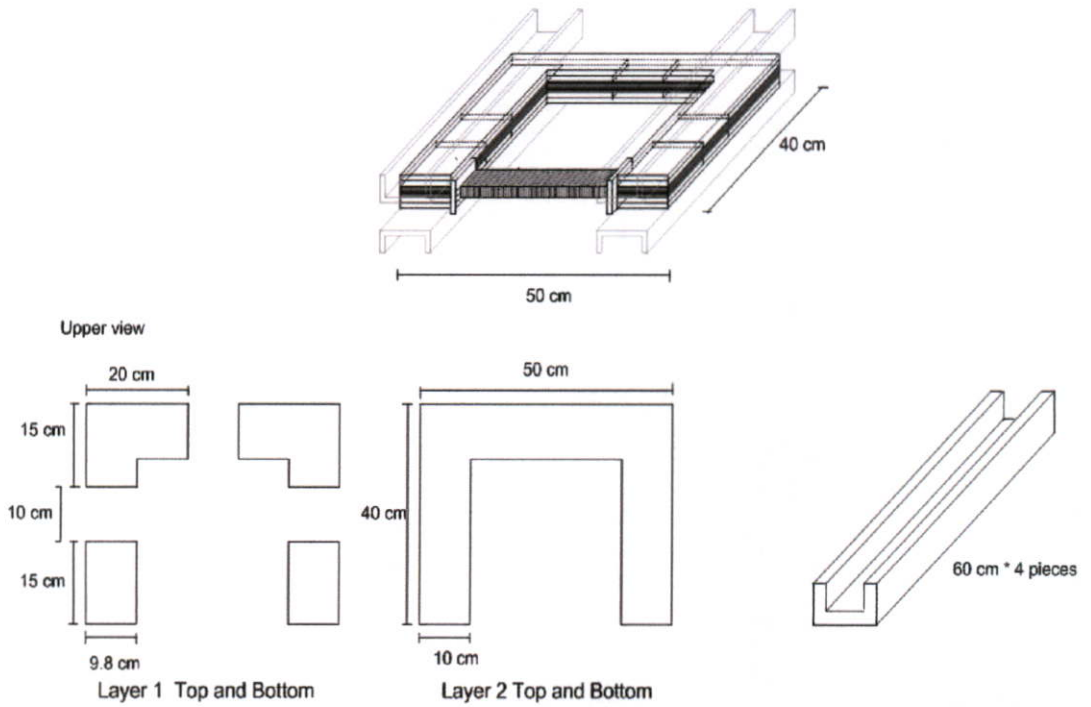
รูปที่3.1 แผ่นแกนเหล็กที่นำมาเรียงเป็นแกน Yoke



รูปที่3.2 การเรียงแผ่นเป็น Yoke



รูปที่ 3.3 ฐานฉนวนรองชุดทดสอบ

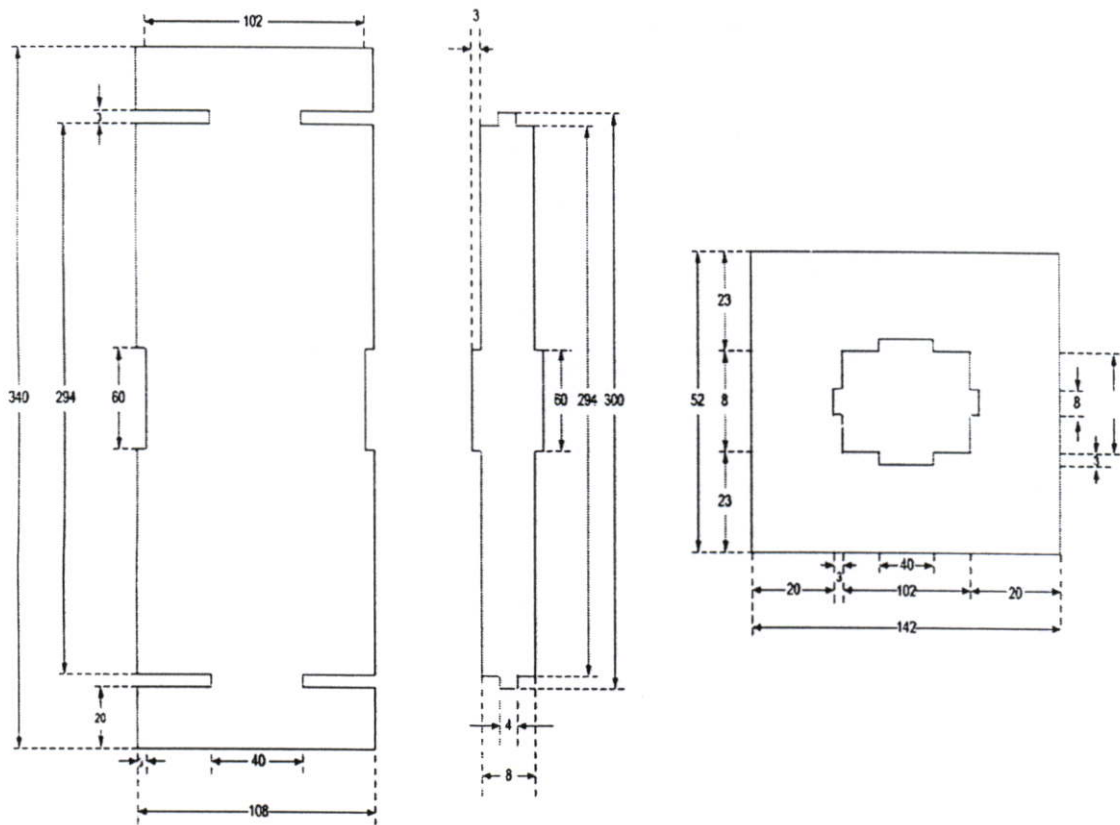


รูปที่ 3.4 การออกแบบฐานชุดทดสอบ

3.2.2 Bobbin

Bobbin ทำหน้าที่เพื่อสำหรับพัน ขดลวด B coil และขดลวด Exciting coil ซึ่งต้องมีขนาดตามมาตรฐาน ดังนี้

ความยาวด้านนอก	$300 \pm 0.5 \text{ mm}$
ความยาวด้านใน	$294 \pm 0.5 \text{ mm}$
ความกว้างด้านนอก	$112 \pm 0.5 \text{ mm}$
ความกว้างด้านใน	$102 \pm 0.5 \text{ mm}$
ความสูงด้านนอก	$14.5 \pm 0.5 \text{ mm}$
ความสูงด้านใน	$8.5 \pm 0.5 \text{ mm}$



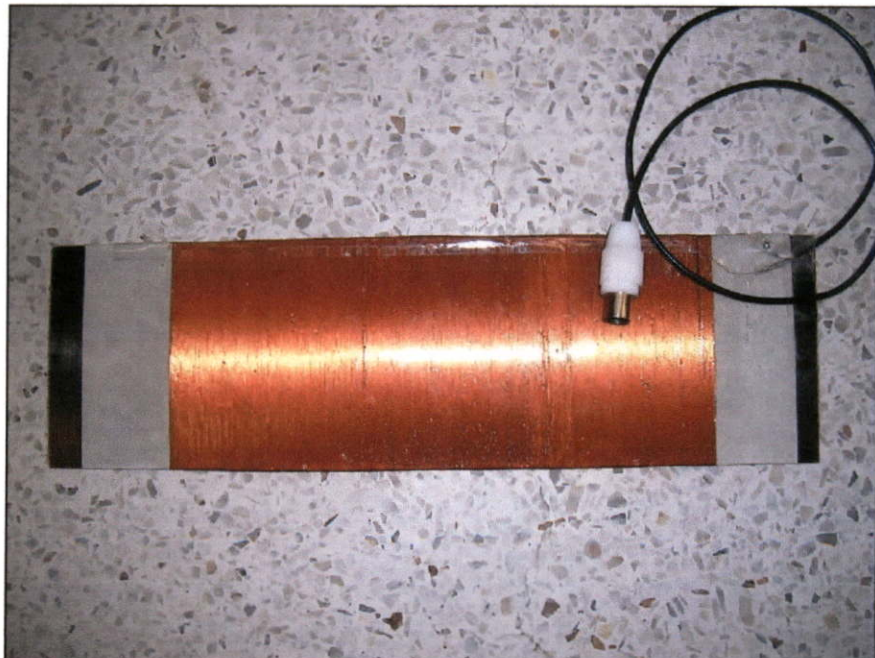
รูปที่ 3.5 การออกแบบ Bobbin



รูปที่3.6 Bobbin ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.3 H coil

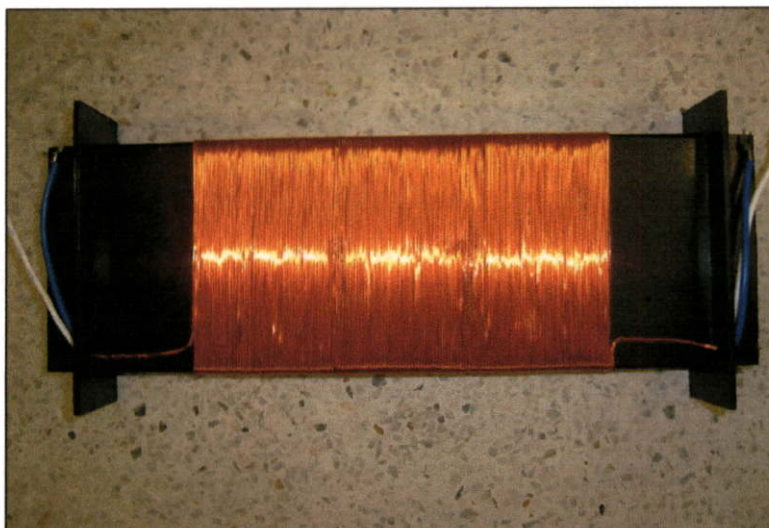
H coil ทำหน้าที่สำหรับวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก โดยใช้ขดลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 mm พันอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาว 200 ± 0.2 mm บนแผ่นฉนวนที่ไม่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งมีความหนา 1 ± 0.1 mm, ความกว้าง 85 ± 0.2 mm, ความยาว 250 ± 1 mm



รูปที่3.7 H coil ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.4 B coil

B coil ทำหน้าที่วัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก โดยใช้เส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm พันแบบสม่ำเสมอ 1 ชั้น บน Bobbin ตามความยาว 200 ± 0.5 mm จำนวน 140 รอบ



รูปที่ 3.8 B coil ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.5 Exciting coil

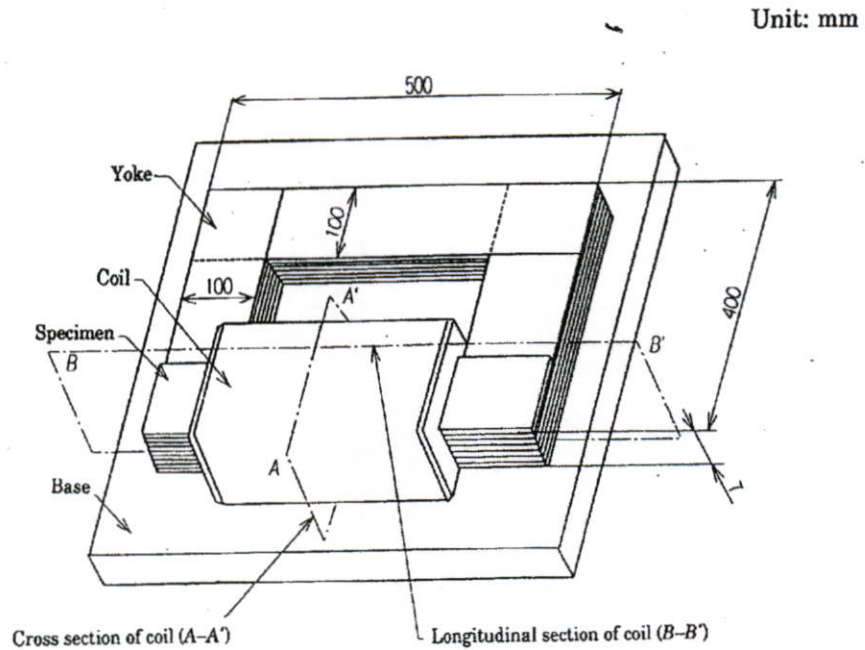
Exciting coil ทำหน้าที่สำหรับจ่ายไฟฟ้ากระตุ้นเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก โดยใช้เส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm พันอย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงความยาวของ Bobbin เป็นจำนวน 240 รอบ 3 ชั้น จากนั้นนำมาขมวดกัน แต่ในโครงการนี้ได้รับเปลี่ยนเป็น 2 ชั้น แล้วนำมาขมวดกัน



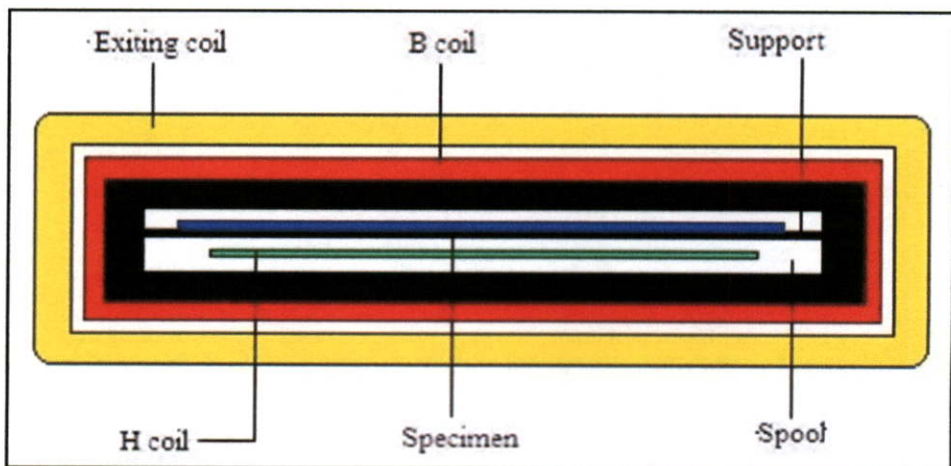
รูปที่ 3.9 Exciting coil ที่ใช้ในการทดลอง

นำส่วนประกอบแต่ละส่วนมาประกอบกันโดยสอดแผ่น H coil และแผ่นเหล็กที่จะนำมาทดสอบ (Specimen) ไว้ภายใน Bobbin โดยวาง H coil ซิดกับแผ่นเหล็กที่นำมาทดสอบ แล้วนำไปวางบน Yoke

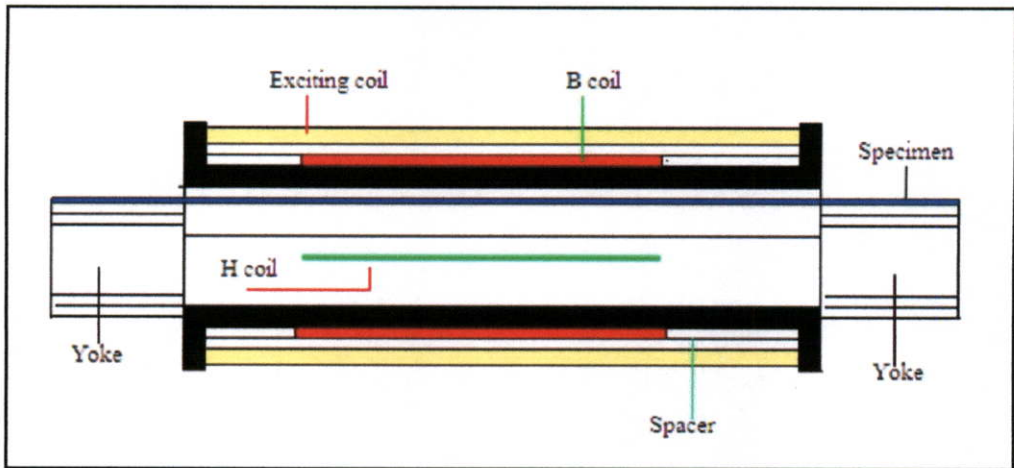
* H coil, B coil และ Exciting coil ต้องพันไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 3.10 การประกอบรวมชุดทดสอบ



รูปที่ 3.11 ภาพตัดขวางของ coil (A-A')



รูปที่ 3.12 ภาพตัดตามแนวยาวของ coil (B-B')

3.3 การคำนวณค่าคุณสมบัติของแกนเหล็ก

3.3.1 การคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

เนื่องจาก H coil นั้นวางชิดกับแผ่นแกนเหล็กที่ทดสอบเมื่อเกิดการกระตุ้นที่แผ่นเหล็กที่ทดสอบ จึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่ H coil ซึ่งจากหลักการ การเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ เมื่อทราบแรงดันที่เกิดขึ้นใน H coil ทำให้สามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจาก H coil ได้ ดังสมการที่ (3.1) ซึ่งค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่คำนวณได้นั้นจะเป็นค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในอากาศที่เกิดภายใน bobbin และ นำค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในอากาศมาคำนวณหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กดังสมการที่ (3.2) ซึ่งค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในอากาศนั้นจะเท่ากับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่แผ่นแกนเหล็กทดสอบ

$$B_H = \frac{E_H}{4.44 N_H f A_H} \quad (3.1)$$

$$H = \frac{B_H}{\mu_0} \quad (3.2)$$

เมื่อ

- E_H : ค่า Voltage ที่วัดได้ ณ H coil
- A_H : พื้นที่หน้าตัดของแกน H coil
- N_H : จำนวนรอบของ H coil
- B_H : ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในอากาศที่คำนวณจาก H coil
- H : ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก
- μ_0 : ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กของอากาศ

3.3.2 การคำนวณค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

แรงดันที่ได้จาก B coil นั้น เมื่อนำมาคำนวณค่าที่ได้จะเป็นค่าของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากสองส่วนรวมกัน คือส่วนของแกนเหล็กและของอากาศ ดังนั้นเมื่อต้องการเฉพาะค่าเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กจึงต้องนำค่าเส้นแรงแม่เหล็กของอากาศมาหักออก ดังสมการที่ (3.5)

$$\phi_t = \frac{E_B}{4.44 f N_B} \quad (3.3)$$

$$\phi_{air} = B_H (A_t - A_s) \quad (3.4)$$

$$\phi_s = \phi_t - \phi_{air} \quad (3.5)$$

จากสมการข้างต้น สามารถคำนวณหา B_s (ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็ก) ได้จาก สมการที่ (3.6)

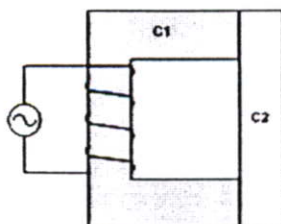
$$B_s = \frac{\phi_s}{A_s} \quad (3.6)$$

เมื่อ

- A_s : พื้นที่หน้าตัดของแผ่นแกนเหล็กทดสอบ
- A_t : พื้นที่หน้าตัดภายใน bobbin
- N_B : จำนวนรอบของ B coil
- ϕ_s : เส้นแรงแม่เหล็กของแกนที่ทดสอบ
- ϕ_{air} : เส้นแรงแม่เหล็กในอากาศ
- ϕ_t : เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด

3.3.3 การคำนวณค่าความสูญเสียของแกนเหล็กแผ่นเดี่ยว

จากหลักการ วงจรแม่เหล็กที่มีสารอนุกรม 2 ชนิด จะทำให้เกิดค่าความต้านทานวงจรแม่เหล็ก 2 ส่วน ดังแสดงตามรูปที่ 3.13 ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความต้านทานวงจรแม่เหล็กดังสมการที่ (3.7)



รูปที่3.13 วงจรแม่เหล็กที่มีสารอนุกรม 2 ชนิด

$$\mathfrak{R}_l = \mathfrak{R}_{c_1} + \mathfrak{R}_{c_2} \quad (3.7)$$

ดังนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นคังสมการ

$$NI = \phi \mathfrak{R}_l$$

ค่าความสูญเสียในวงจรแม่เหล็กจึงเกิดจาก 3 ส่วนซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3.8) ดังต่อไปนี้

$$P_{in} = P_{cu} + P_{c1} + P_{c2} \quad (3.8)$$

เมื่อ

- \mathfrak{R} : ความต้านทานวงจรแม่เหล็ก,
- N : จำนวนรอบ
- I : กระแสไฟฟ้า
- ϕ : เส้นแรงแม่เหล็ก
- P_{in} : กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า
- P_{cu} : กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขดลวด
- P_{c1} : กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแกนเหล็กชนิดที่ 1
- P_{c2} : กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแกนเหล็กชนิดที่ 2

ซึ่งในการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวนั้น เมื่อป้อนกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวด Exciting coil (P_{in}) สามารถแบ่งแยกค่าสูญเสียได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

- ค่าสูญเสียของขดลวด Exciting coil (P_{cu})
- ค่าสูญเสียของ Yoke (P_{Yoke})
- ค่าสูญเสียของแกนเหล็กแผ่นเดี่ยว (P_s)

ดังนั้นสามารถหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กได้จากสมการ

$$P_s = P_{in} - P_{cu} - P_{Yoke} \quad (3.9)$$

เมื่อทราบค่า P_s แล้วจึงนำน้ำหนักของแผ่นเหล็กทดสอบมาหาร เพื่อให้เป็นหน่วย W/kg

3.3.4 การหาค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ

ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏสามารถหาได้จาก แรงดันกระตุ้น และกระแสกระตุ้นที่ ป้อนเข้า Exciting coil จากสมการที่ (3.10)

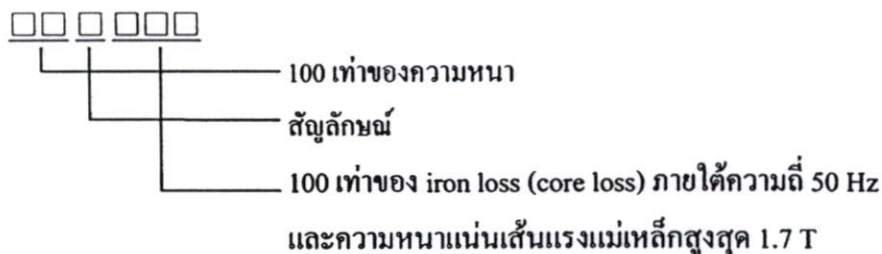
$$S_s = \frac{V \times I}{\rho_m \cdot Vol.} \quad (3.10)$$

เมื่อ

- V : แรงดันไฟฟ้ากระแสค้ำ (rms)
- I : กระแสไฟฟ้ากระแสค้ำ (rms)
- ρ_m : ความหนาแน่นของแผ่นแกนเหล็กทดสอบ
- $Vol.$: ปริมาตรของแผ่นแกนเหล็กทดสอบ
- S_s : ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏต่อ 1 kg

3.4 วิธีการดูสัญลักษณ์ของแผ่นแกนเหล็ก

- P_s : Core loss per 1 kg
- $W_{15/50}$: The core loss per 1 kg ที่ $B_{max} = 1.5$ T และ ความถี่ 50 Hz
- B_{50} : ค่า B ที่ $H = 5000$ A/m
- S_s : Apparent power per 1 kg
- $S_{15/50}$: The apparent power per 1 kg ที่ $B_{max} = 1.5$ T และ ความถี่ 50 Hz



3.5 การทดสอบ

3.5.1 เงื่อนไขการทดสอบ

3.5.1.1 Power Supply

- ควรมีเสถียรภาพที่ดีในด้านของแรงค้ำและความถี่
 - ช่วงการเปลี่ยนแปลงของแรงค้ำและความถี่ไม่ควรเกิน ± 0.2 % ระหว่างการวัด
- เพื่อให้การเหนี่ยวนำให้เกิดแรงค้ำใน B coil เป็นสัญญาณ Sinusoidal มากที่สุด จำเป็นที่ต้องทำให้ ค่าความต้านทานภายในของ power supply มีค่าต่ำ

3.5.1.2 อุณหภูมิโดยรอบ (Ambient Temperature) มีค่า 23 ± 5 เซลเซียส

3.5.1.3 แผ่นแกนเหล็กทดสอบ

- ขนาดทางด้านความยาวต่ำสุดต้องไม่น้อยกว่าความยาวด้านนอกของ Yoke ความกว้างควรจะทำให้กว้างที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยที่ความกว้างสูงสุดไม่เกินความกว้างภายในของแกนทดสอบ

- ในระหว่างการวัดค่าต่างๆ แผ่นแกนเหล็กทดสอบควรจะต้องอยู่ตรงกลางของแกนทดสอบตามแนวความกว้าง

- แผ่นแกนเหล็กทดสอบควรมีค่าความเครียดทางกลน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ สำหรับมุมระหว่างแนวแกนยาวกับแนวด้านข้างเป็นดังนี้

Grain oriented magnetic steel sheet : $\pm 1^\circ$

Non - oriented magnetic steel sheet : $\pm 5^\circ$

- ในส่วนของแผ่นแกนเหล็กทดสอบที่อยู่ภายนอกสนามแม่เหล็กที่ทำการวัด แม้จะไม่ได้วัดแต่ก็ไม่ควรจะทำให้ยาวเกินไป ควรจะสามารถใส่เข้าและเคลื่อนย้ายได้สะดวก ควรจะยาวเท่ากับความยาวด้านนอกของ Yoke ความกว้างต่ำสุดของแผ่นแกนเหล็กทดสอบไม่ควรจะน้อยกว่าความกว้างของ H coil

3.5.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

3.5.2.1 ชุดทดสอบ ประกอบด้วย

- Yoke
- Exciting coil
- B coil
- H coil

3.5.2.2 แผ่นแกนเหล็กที่นำมาทดสอบ

3.5.2.3 Digital Oscilloscope (DL1640 YOKOGAWA)

3.5.2.4 Power Analyzer (PZ4000 YOKOGAWA)

3.5.2.5 หม้อแปลงปรับค่าได้

3.5.2.6 หม้อแปลงไฟฟ้า (ratio 1 : 30)

3.5.2.7 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

3.5.2.8 Digital Low Resistance Ohmmeter

3.5.2.9 เครื่องชั่งน้ำหนัก ละเอียด

3.5.3 การทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียต่างๆ

จากสมการที่ (3.9) ในการหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กนั้นต้องทราบ ค่าความสูญเสียของขดลวด Exciting coil (P_{cu}) และค่าความสูญเสียของ Yoke (P_{Yoke}) เพื่อนำมาหักออกจากกำลังไฟฟ้าป้อนเข้า (P_{in})

3.5.3.1 การหาค่าความสูญเสียใน Exciting coil (P_{cu})

การวัดค่าความสูญเสียใน Exciting coil ทำได้โดยวัดกระแสกระตุ้นที่ป้อนเข้า (I) และค่าความต้านทานของ Exciting coil (R) แล้วคำนวณตามสมการที่ (3.11)

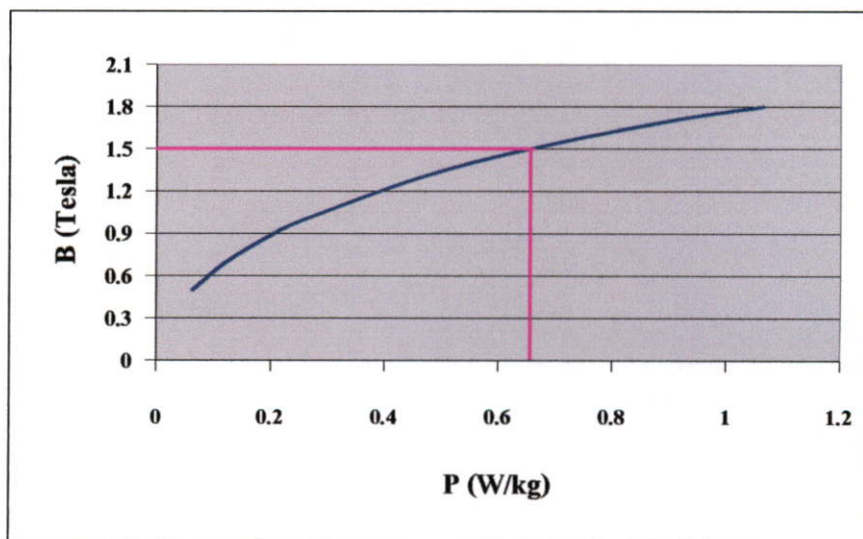
$$P_{cu} = I^2 R \quad (3.11)$$

3.5.3.2 การหาค่าความสูญเสียใน Yoke (P_{Yoke})

ก่อนอื่นนั้นต้องทำการตรวจสอบว่าแผ่นเหล็กที่นำมาทำเป็น Yoke นั้นเป็นไปตามที่มาตรฐาน JIS C2556 กำหนด คือ ที่ B 1.5 T ความถี่ที่ 50 Hz มีค่าความสูญเสียต่ำกว่า 1 W/kg ซึ่งทดลองโดยการนำแผ่นเหล็กที่จะทำเป็น Yoke ซึ่งเป็นชนิด Steel Sheet Grade 23ZDKH90 มาวางเรียงทั้ง 4 ด้าน แล้วทำการปรับแรงดันกระตุ้นป้อนเข้าเพื่อคำนวณค่าความสูญเสียที่ B ต่างๆ

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียของแผ่นแกนเหล็กที่ใช้ประกอบทำเป็น Yoke

B	V	I	P_{in}	P_{yoke}	$\frac{P_{yoke}}{kg}$
0.5	16.42	0.0426	0.45	0.448	0.063
0.7	23.03	0.0565	0.88	0.877	0.123
0.9	29.61	0.0776	1.48	1.475	0.207
1.0	23.92	0.1089	1.87	1.860	0.261
1.3	42.76	0.4792	3.52	3.319	0.466
1.5	49.36	0.8486	5.31	4.679	0.657
1.7	55.91	1.2740	7.84	6.418	0.901
1.8	59.25	1.5582	9.71	7.583	1.064



รูปที่ 3.14 กราฟค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กที่นำมาทำเป็น Yoke

จากการทดสอบปรากฏว่าค่าความสูญเสียของแกน Yoke เป็นไปตามมาตรฐานจริง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวได้

เมื่อทำการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวนั้นจะวางเรียง Yoke 3 ด้านโดยอีกด้านหนึ่งเป็นแผ่นเหล็กที่จะนำมาทดสอบ ดังนั้นเมื่อทำการป้อนแรงดันกระตุ้นเข้าไป จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กไหลในวงจรมแม่เหล็ก ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่าเท่ากันทั้งวงจร ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่า B_{Yoke} ได้จากสมการที่ (3.13)

$$\phi_s = \phi_{Yoke} \quad (3.12)$$

$$B_s A_s = B_{Yoke} A_{Yoke} \quad (3.13)$$

เมื่อทราบค่า B_{Yoke} จากการคำนวณ จึงไปทดสอบเพื่อหาค่า P_{Yoke} ซึ่งการทดสอบหาค่า P_{Yoke} นั้นทำได้โดยวิธีเดียวกับการหาค่าความสูญเสียของแกน Yoke

โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบแผ่นเหล็กซึ่งมีขนาดความหนา 3 ขนาด ซึ่งได้แก่ 0.23, 0.27, และ 0.35 มม. ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบหาค่าความสูญเสียของ Yoke ที่ใช้ทดสอบกับขนาดแผ่นทดสอบที่ต่างกัน

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงค่าความสูญเสียในแกน Yoke (ตัวอย่างเป็นแผ่นทดสอบขนาด 0.23mm)

B	B_{Yoke}	I_i	P_i	P_{cu}	$P_{Yoke\ 4sides}$	$P_{Yoke\ 3sides}$
0.5	0.016044	0.00129	0.0006	4.65948E-06	0.000595341	0.000467721
0.6	0.019252	0.00149	0.0008	6.21628E-06	0.000793784	0.000623625
0.7	0.022461	0.00168	0.0011	7.90272E-06	0.001092097	0.000857991
0.8	0.025670	0.00188	0.0015	9.89632E-06	0.001490104	0.001170679
0.9	0.028879	0.00206	0.0018	1.18821E-05	0.001788118	0.001404810
1.0	0.032087	0.00225	0.0022	1.41700E-05	0.002185825	0.001717263
1.1	0.035296	0.00242	0.0026	1.63979E-05	0.002583602	0.002029771
1.2	0.038505	0.00259	0.0031	1.87827E-05	0.003081217	0.002420716
1.3	0.041714	0.00276	0.0036	2.13293E-05	0.003578671	0.002811533
1.4	0.044922	0.00293	0.0041	2.40377E-05	0.004075962	0.003202223
1.5	0.048131	0.00309	0.0047	2.67347E-05	0.004673265	0.003671486
1.6	0.051340	0.00326	0.0054	2.97573E-05	0.005370243	0.004219056
1.7	0.054549	0.00343	0.0060	3.29417E-05	0.005967058	0.004687936
1.8	0.057757	0.00358	0.0067	3.58859E-05	0.006664114	0.005235569

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงค่าความสูญเสียในแกน Yoke (ตัวอย่างเป็นแผ่นทดสอบขนาด 0.27mm)

B	B_{Yoke}	I_i	P_i	P_{cu}	$P_{Yoke\ 4sides}$	$P_{Yoke\ 3sides}$
0.5	0.019034	0.00147	0.0008	6.0505E-06	0.000793949	0.000623755
0.6	0.022841	0.00170	0.0012	8.0920E-06	0.001191908	0.000936406
0.7	0.026648	0.00192	0.0015	1.0322E-05	0.001489678	0.001170345
0.8	0.030455	0.00214	0.0020	1.2823E-05	0.001987177	0.001561198
0.9	0.034262	0.00235	0.0025	1.5463E-05	0.002484537	0.001951942
1.0	0.038069	0.00257	0.0030	1.8494E-05	0.002981506	0.002342379
1.1	0.041875	0.00277	0.0036	2.1484E-05	0.003578516	0.002811411
1.2	0.045682	0.00298	0.0043	2.4865E-05	0.004275135	0.003358700
1.3	0.049489	0.00317	0.0050	2.8137E-05	0.004971863	0.003906075
1.4	0.053296	0.00337	0.0057	3.1799E-05	0.005668201	0.004453143
1.5	0.057103	0.00356	0.0066	3.5486E-05	0.006564514	0.005157319
1.6	0.060910	0.00375	0.0075	3.9375E-05	0.007460625	0.005861336
1.7	0.064716	0.00392	0.0084	4.3026E-05	0.008356974	0.006565540
1.8	0.068523	0.00412	0.0094	4.7528E-05	0.009352472	0.007347639

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงค่าความสูญเสียในแกน Yoke (ตัวอย่างเป็นแผ่นทดสอบขนาด 0.35mm)

B	B_{Yoke}	I_i	P_i	P_{cu}	$P_{Yoke\ 4sides}$	$P_{Yoke\ 3sides}$
0.5	0.024934	0.00183	0.0014	9.37692E-06	0.001390623	0.001092524
0.6	0.029921	0.00211	0.0019	1.24659E-05	0.001887534	0.001482915
0.7	0.034907	0.00240	0.0026	1.61280E-05	0.002583872	0.002029983
0.8	0.039894	0.00266	0.0033	1.98117E-05	0.003280188	0.002577034
0.9	0.044881	0.00293	0.0041	2.40377E-05	0.004075962	0.003202223
1.0	0.049868	0.00320	0.0051	2.86720E-05	0.005071328	0.003984218
1.1	0.054854	0.00344	0.0061	3.31341E-05	0.006066866	0.004766349
1.2	0.059841	0.00369	0.0072	3.81251E-05	0.007161875	0.005626627
1.3	0.064828	0.00394	0.0084	4.34661E-05	0.008356534	0.006565195
1.4	0.069815	0.00419	0.0098	4.91571E-05	0.009750843	0.007660614
1.5	0.074801	0.00443	0.0112	5.49497E-05	0.011145050	0.008755954
1.6	0.079788	0.00466	0.0126	6.08037E-05	0.012539196	0.009851245
1.7	0.084775	0.00490	0.0143	6.72280E-05	0.014232772	0.011181779
1.8	0.089762	0.00513	0.0160	7.36873E-05	0.015926313	0.012512286

จากตารางที่ 3.2 ถึงตารางที่ 3.4 แสดงค่าความสูญเสียของ Yoke ที่ค่าความหนาแน่นต่างๆ เมื่อทำการทดสอบโดยวางเรียงแผ่นเหล็กทั้ง 4 ด้าน เมื่อวัดกำลังไฟฟ้าทางด้านเข้าแล้วต้องนำมาหักออกด้วยค่าความสูญเสียของขดลวดก่อน ค่าที่ได้จึงเป็นค่าความสูญเสียของ Yoke แต่ในการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวนั้นจะวางเรียง Yoke เพียง 3 ด้าน โดยอีกด้านเป็นแผ่นเหล็กที่นำมาทดสอบ ดังนั้นค่าความสูญเสียจึงต้องนำมาคำนวณเป็นอัตราส่วนให้เหลือค่าความสูญเสียแค่ 3 ด้าน

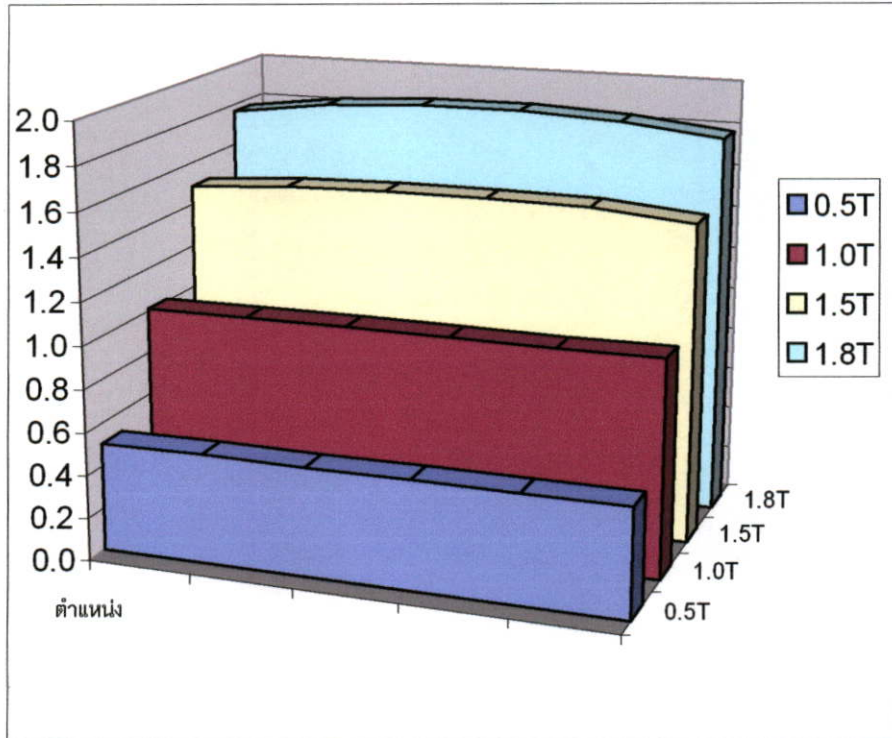
เมื่อทราบค่าความสูญเสียของ Yoke ได้นำมาเปรียบเทียบกับค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กทดสอบที่ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเดียวกัน

3.5.4 การทดสอบเพื่อหาค่าความสม่ำเสมอของแกนเหล็ก

ทำการทดสอบโดยการทำ Search coil โดยขดลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.21mm พันบนแผ่นฉนวนหนา 1mm จำนวน 190 รอบ กว้าง 5 cm เพื่อเอาไว้ใส่วัดค่าที่ตำแหน่งต่างๆของ Bobbin และพันขดลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 mm เป็น coil รอบ Exciting coil จำนวน 77

รอบทับความกว้าง 5 cm เพื่อหาค่าความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กในแต่ละส่วนของ Bobbin โดยแบ่ง Bobbin ออกเป็น 6 ส่วน เพื่อวัดค่าในแต่ละส่วน

ปรากฏว่าผลการทดลองที่ได้ออกมา Exciting coil ที่ใช้มีความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็ก ยกเว้นเวลาหนึ่งช่วงที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก สูงๆจะมีค่าหนาแน่นสนามแม่เหล็กบริเวณตรงกลางสูงกว่าด้านข้างเล็กน้อย เพราะฉะนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการพัน Exciting coil มีความเป็นสม่ำเสมอ สามารถนำไปใช้งานได้



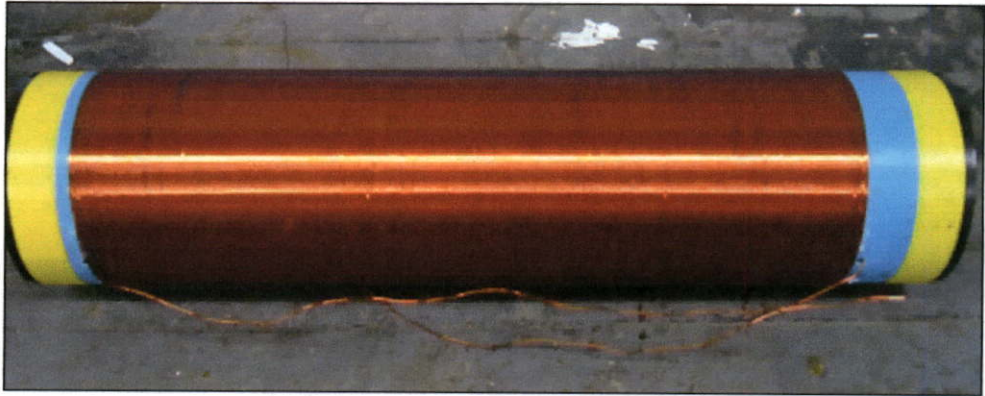
รูปที่3.15 กราฟแสดงความสม่ำเสมอของการพัน Exciting coil

3.5.5 การทดสอบหาค่า Area-turn ของ H coil

ในการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียนั้นค่า Area-turn ของ H coil มีความสำคัญ เนื่องจากต้องนำค่าไปคำนวณหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทดสอบหาค่า Area-turn ของ H coil โดยนำ H coil ที่จะใช้ในการทดสอบวางในแกนขดลวดโซลินอยด์ จากนั้นทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดโซลินอยด์ แล้วคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากสมการ (3.14) ทำการวัดแรงดันที่ออกจาก H coil แล้วจึงคำนวณหา Area-turn จากสมการ (3.15)

$$NI = HI \quad (3.14)$$

$$N_H A_H = \frac{V}{4.44 f \mu_0 H} \quad (3.15)$$



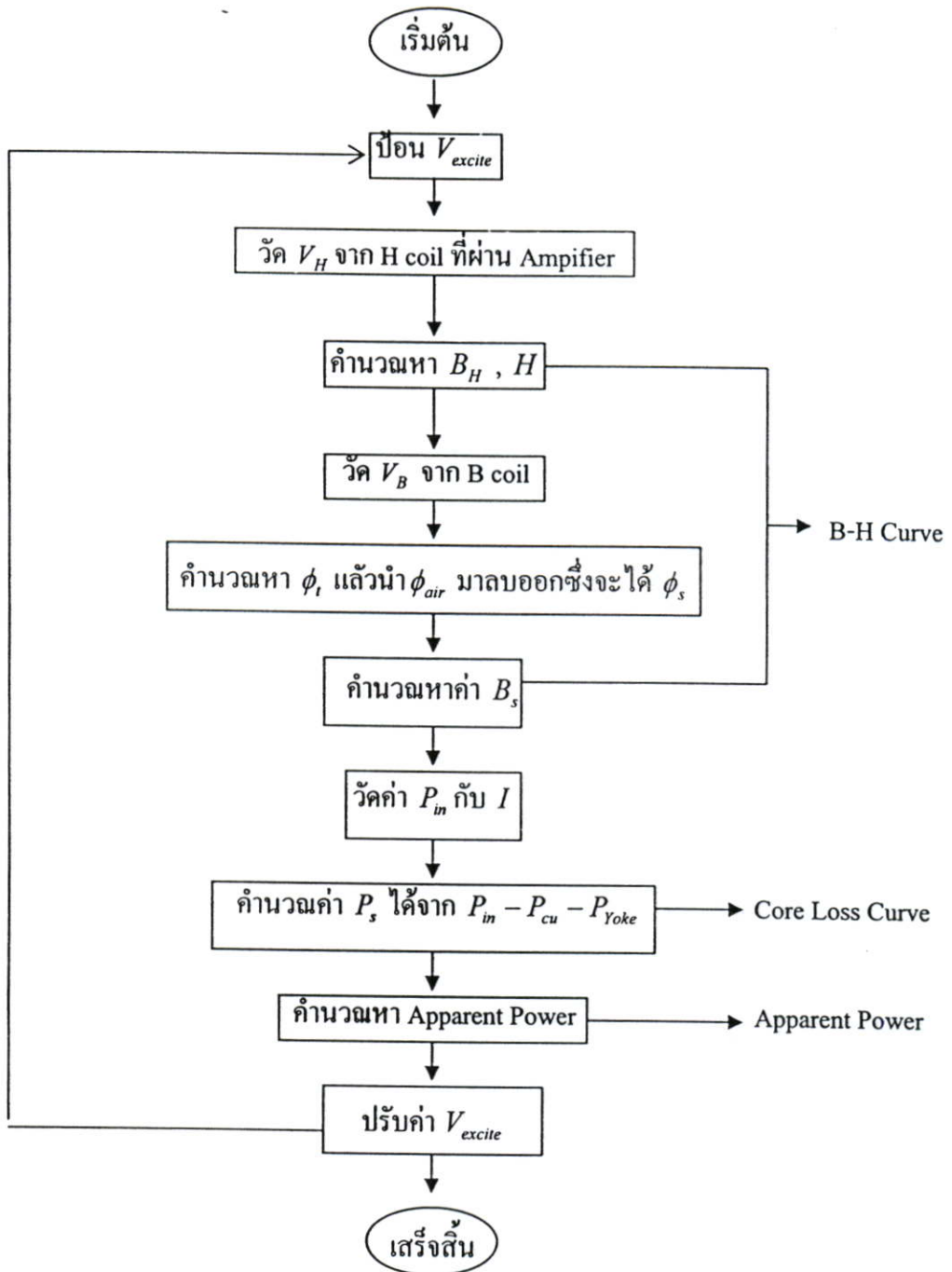
รูปที่3.16 แกนขดลวดโซลินอยด์ที่ใช้ในการทดสอบ

3.5.6 วิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียว

การทดสอบในแต่ละตัวอย่างแผ่นแกนเหล็กทดสอบจะทำได้โดยป้อนค่าแรงดัน ที่ค่าต่างๆเข้าไปที่ Exciting coil โดยผ่านอุปกรณ์การวัดต่างๆ แล้วทำการวัดค่าแรงดันที่ B coil ว่าที่ค่าเป็นเท่าไรเพื่อจะนำไปหาเป็นค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ตามสมการ และ μ ที่ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก เดียวกันนี้ก็อ่านค่าแรงดัน จาก H coil แล้วทำการหาค่าที่แท้จริงเพื่อหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กออกมา ทำให้ได้กราฟ B-H Curves เพื่อแสดงคุณลักษณะของแผ่นแกนเหล็กชนิดนั้นๆออกมา

ส่วนกราฟค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก สามารถหาได้โดยการอ่านค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าที่อ่านได้ แล้วอ่านค่ากระแส จากนั้นก็นำเอาค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าหักลบ ค่าความสูญเสียจากขดลวด แล้วนำค่าที่เหลือนั้นไปหักกับค่าความสูญเสียที่ตกคร่อมบริเวณ Yoke ทั้ง 3 ด้านที่ได้ทำการทดสอบไว้อยู่ก่อนหน้าแล้ว เพื่อเป็นค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ออกมาหลังจากนั้นก็นำไปอ่านด้วยน้ำหนักรแล้วแล้วพล็อตกับค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ออกมาเป็นกราฟ ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

ส่วนกราฟสุดท้ายคือกราฟกำลังไฟฟ้าปรากฏ การหาได้โดยการวัดค่า I_{RMS} และค่า V_{RMS} ออกมา μ ที่ตำแหน่งค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ต่างๆเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏออกมาแล้วนำไปหารด้วยค่าน้ำหนักแล้วพล็อตกับค่า B ออกมาเป็นกราฟ ซึ่งสรุปขั้นตอนการทดลองได้ดังนี้

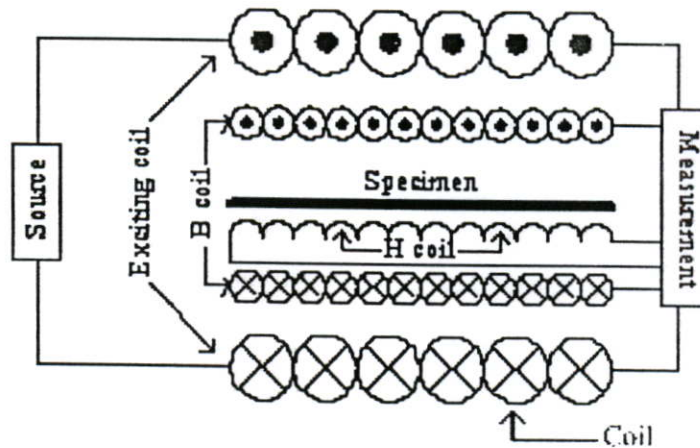


รูปที่ 3.17 แผนผังขั้นตอนการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็ก

4.1 วงจรที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบ

4.2 ผลการทดสอบ

จากการทำการสร้างชุดทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็กแบบแผ่นเดียนี่สร้างขึ้นมาเพื่อต้องการหาคุณลักษณะหรือกราฟคุณลักษณะของแผ่นแกนเหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยผลที่ได้แบ่งออกเป็น

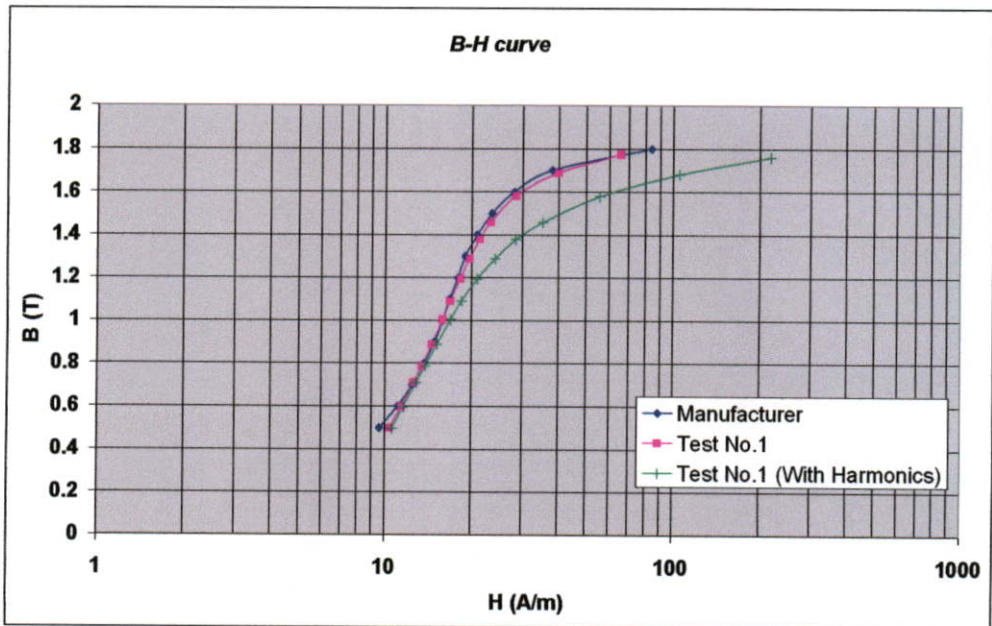
- กราฟผลของการ Magnetization (B-H Curves)
- กราฟแสดงค่าความสูญเสียของแผ่นแกนเหล็ก (Core Loss Curves)
- กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power curve)

ซึ่งแผ่นแกนเหล็กที่เราได้นำมาใช้ในการทดสอบทั้งหมด 5 ชนิด ชนิดละ 3 แผ่น คือ

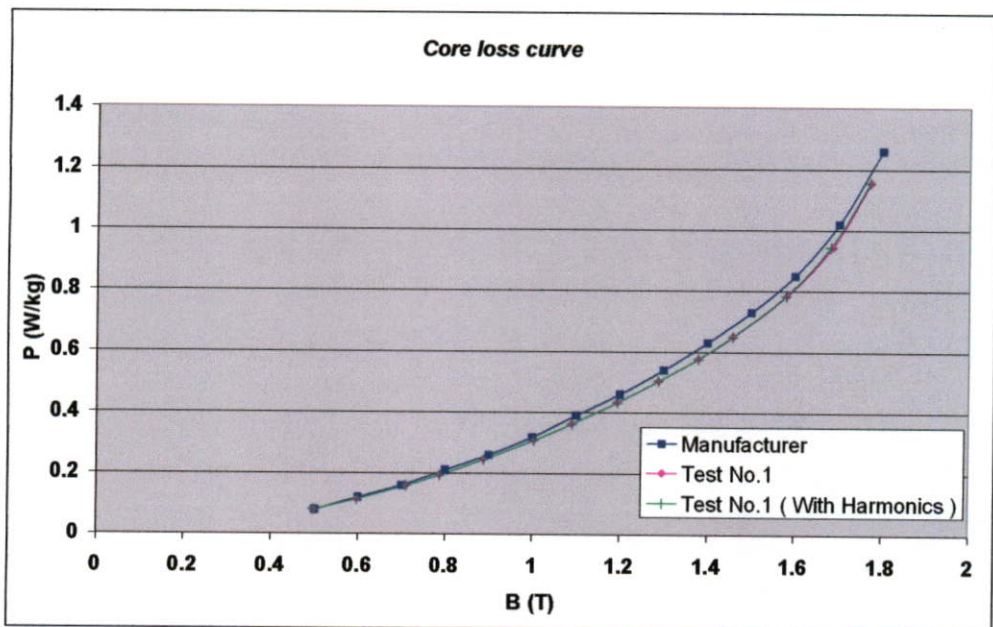
- 1) 27JGH110
- 2) 27ZH100
- 3) 27ZH110
- 4) 35JGH135
- 5) 35JGH155

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของแผ่นแกนเหล็กที่นำมาทดสอบ

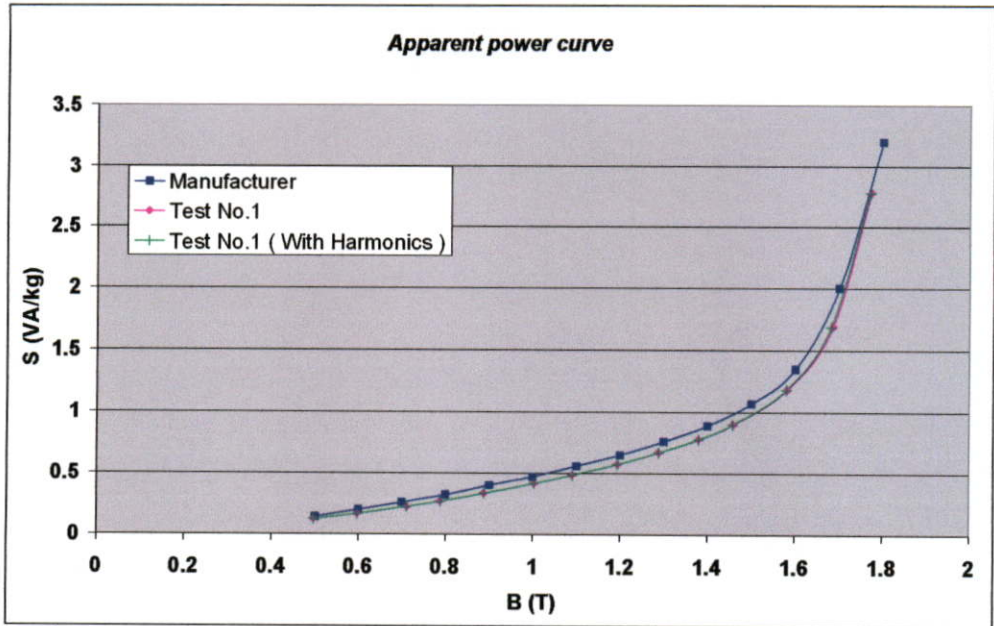
เกรด	กว้าง (m)	ยาว (m)	ความ หนาแน่น (kg / dm ³)	น้ำหนัก (kg)	พื้นที่หน้าตัด (10 ⁻⁵ m ²)
27JGH110 No.1	0.1	0.5	7.65	0.0992	2.565
27JGH110 No.2	0.1	0.5	7.65	0.0995	2.565
27JGH110 No.3	0.1	0.5	7.65	0.0998	2.565
27ZH100 No.1	0.1	0.5	7.65	0.0988	2.565
27ZH100 No.2	0.1	0.5	7.65	0.1003	2.565
27ZH100 No.3	0.1	0.5	7.65	0.0994	2.565
27ZH110 No.1	0.1	0.5	7.65	0.1000	2.565
27ZH110 No.2	0.1	0.5	7.65	0.1001	2.565
27ZH110 No.3	0.1	0.5	7.65	0.1001	2.565
35JGH135 No.1	0.1	0.5	7.65	0.1289	3.360
35JGH135 No.2	0.1	0.5	7.65	0.1292	3.360
35JGH135 No.3	0.1	0.5	7.65	0.1289	3.360
35JGH155 No.1	0.1	0.5	7.65	0.1290	3.360
35JGH155 No.2	0.1	0.5	7.65	0.1271	3.360
35JGH155 No.3	0.1	0.5	7.65	0.1270	3.360



รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต



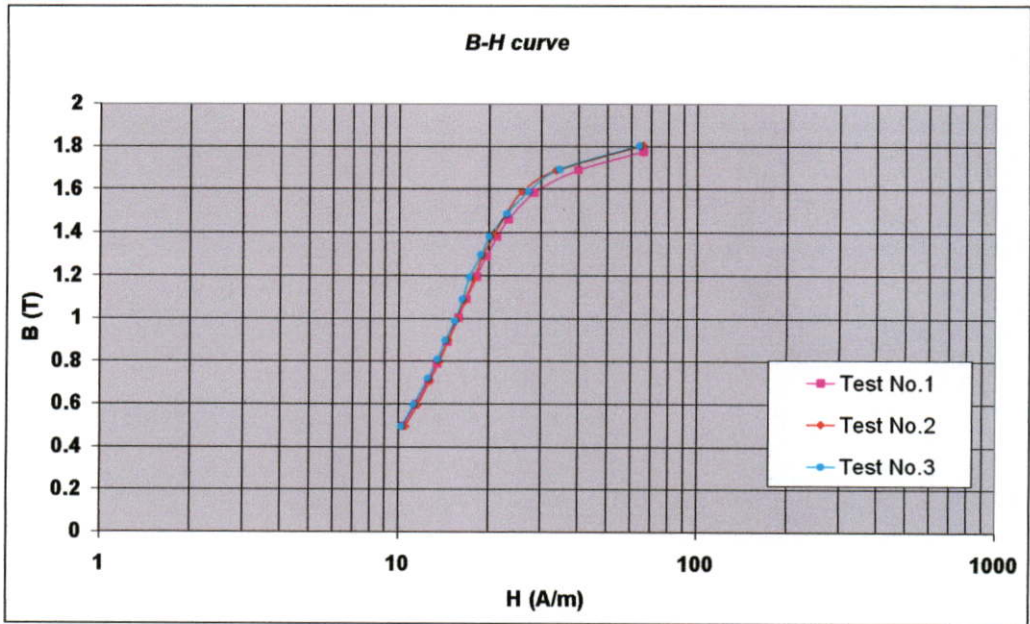
รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต



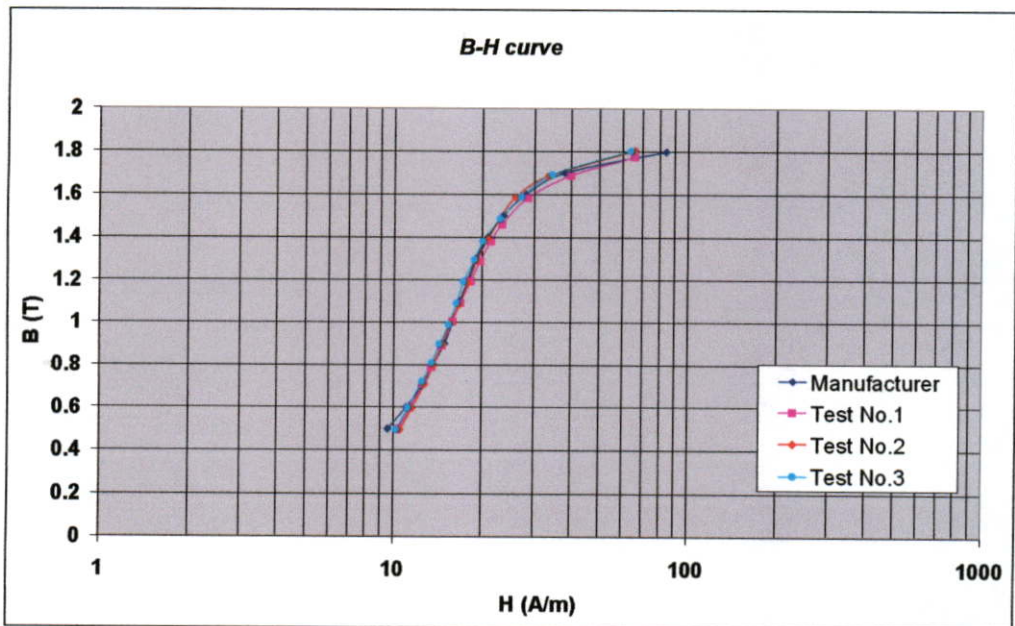
รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต

จากผลการทดสอบนั้น ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำผ่านขด H coil นั้นจะมีค่า ฮาโมนิกส์ปนอยู่มาก ซึ่งจากกราฟรูปที่ 4.2 ถึง รูปที่ 4.4 แสดงกราฟผลการทดสอบของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบการระหว่างนำค่าแรงดันจากขด H coil มาทำการคำนวณ และเมื่อนำแรงดันจากขด H coil มาใช้ fast fourier transform (fft) เพื่อหาค่าแรงดันที่ความถี่ 50 Hz และผลที่ได้จากผู้ผลิต ซึ่งจะเห็นได้ว่าในส่วนของ กราฟ B-H นั้น ค่าที่คำนวณจากแรงดันที่รวมฮาโมนิกส์นั้นจะมีค่าความผิดพลาดค่อนข้างในค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงขึ้น แต่ในส่วนของ กราฟค่าความสูญเสีย และกราฟกำลังไฟฟ้าปรากฏนั้นค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน ดังนั้นในผลการทดลองต่อไปจะใช้ค่าแรงดันจาก H coil ที่ความถี่ 50 Hz เท่านั้น

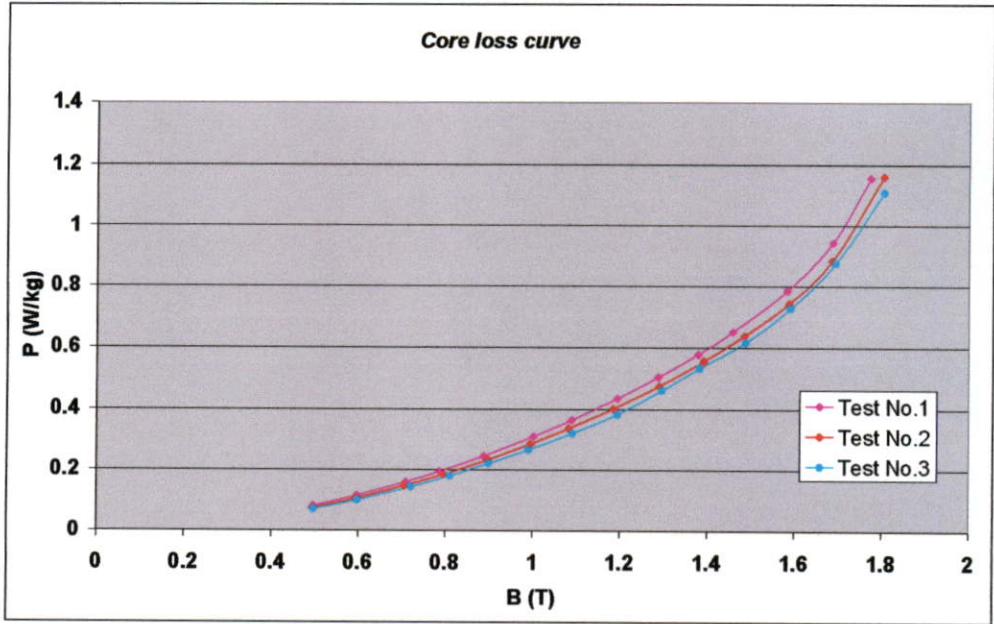
4.2.1 ผลการทดสอบแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110



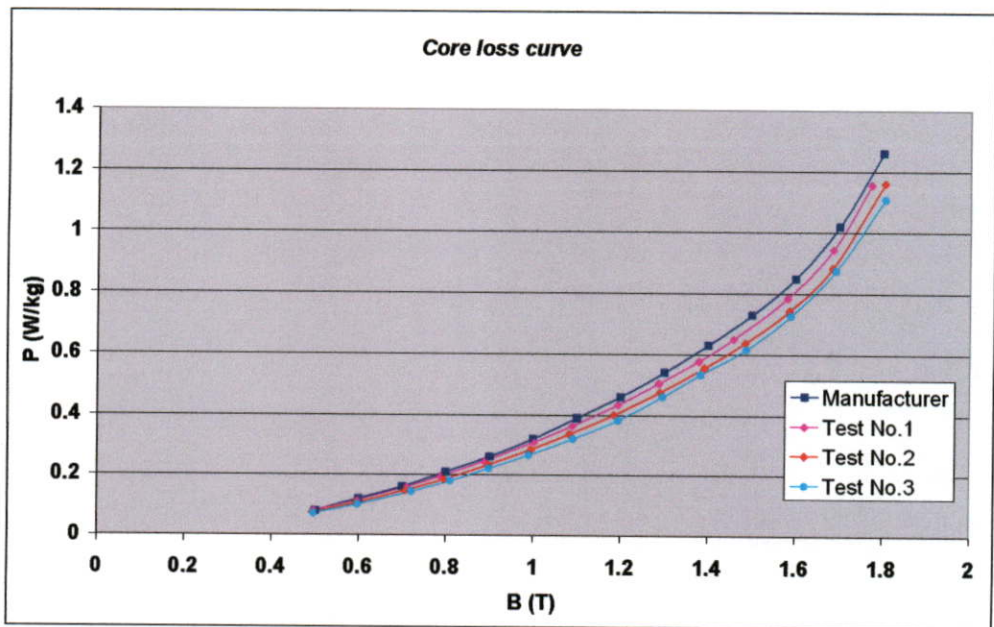
รูปที่ 4.5 กราฟผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ



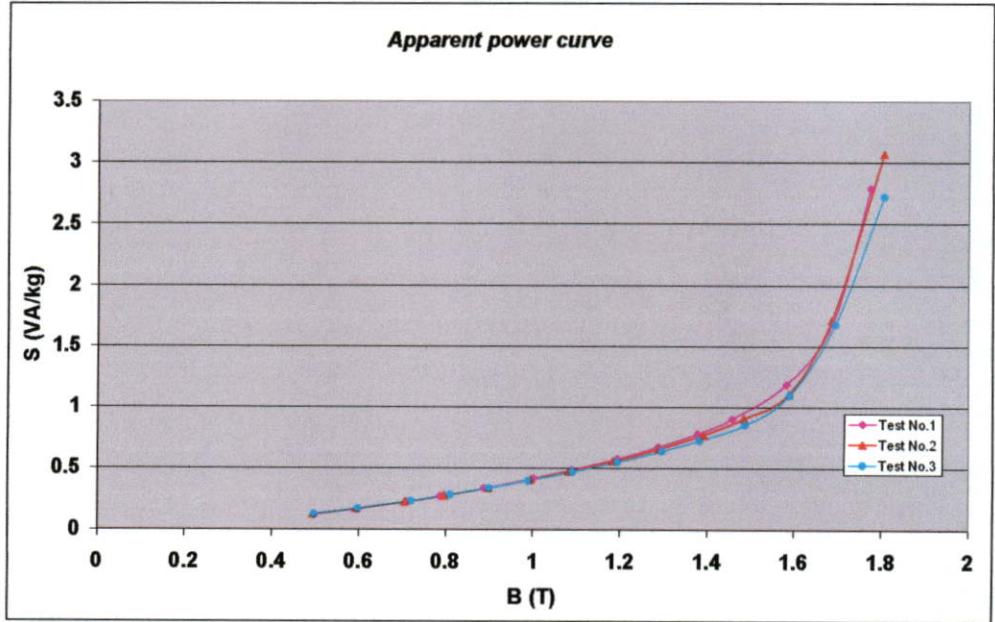
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต



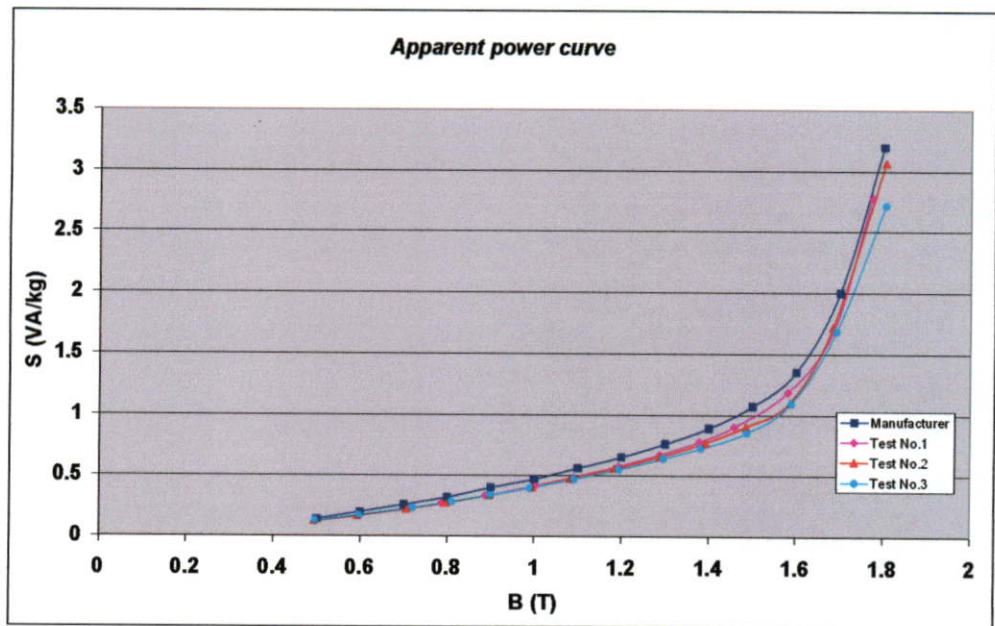
รูปที่ 4.7 กราฟผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ



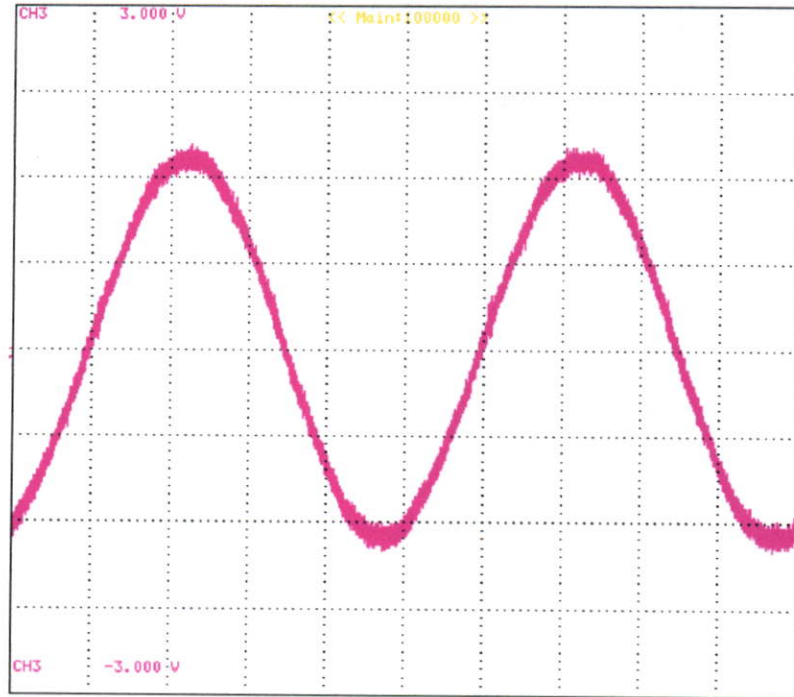
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต



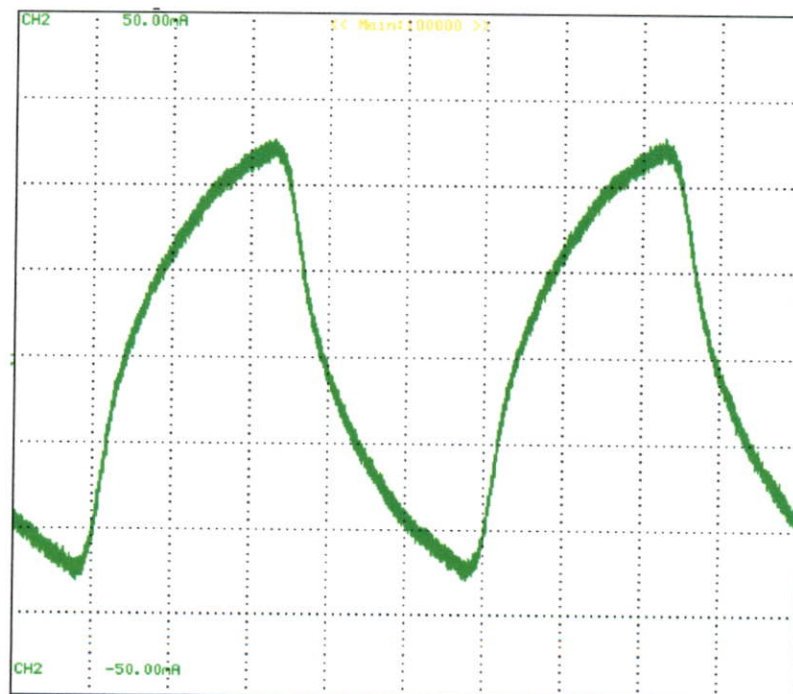
รูปที่ 4.9 กราฟผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ



รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต

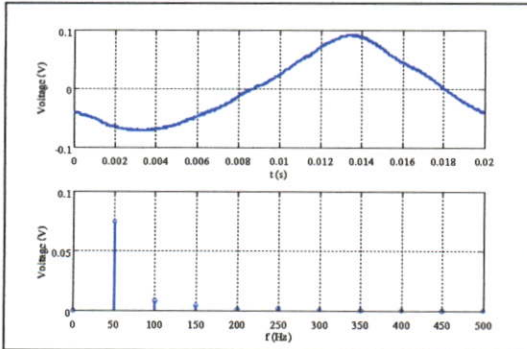
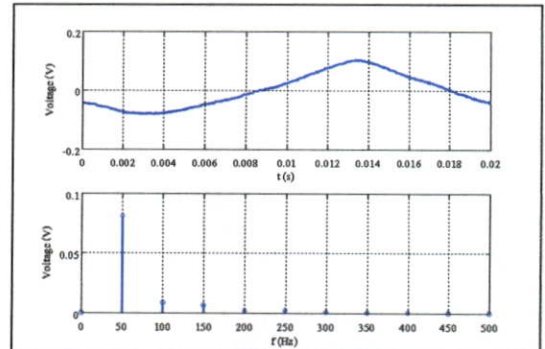
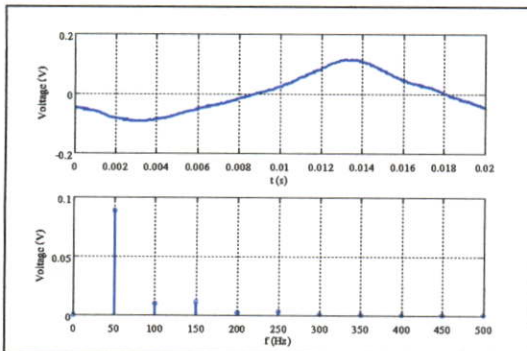
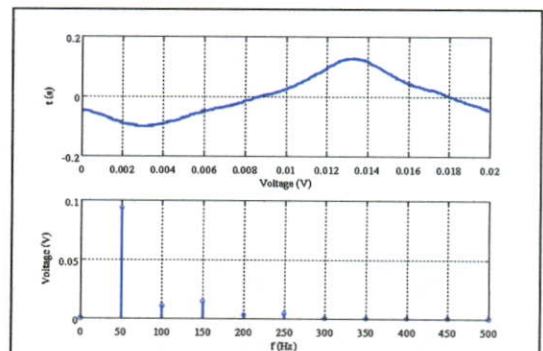
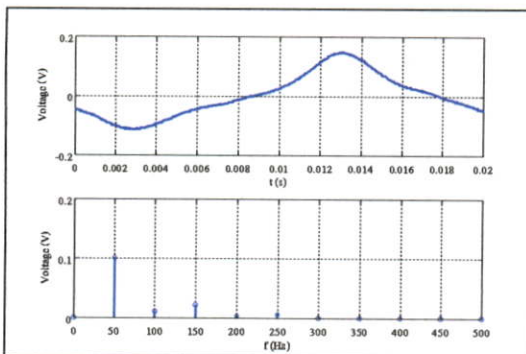
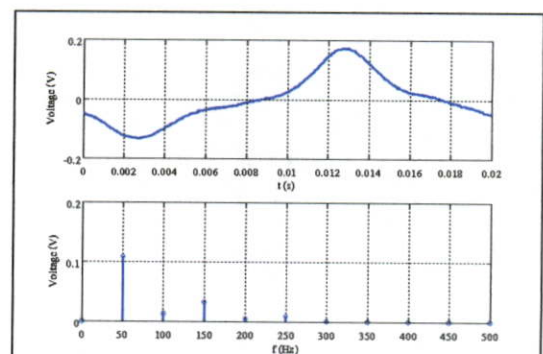


รูปที่ 4.11 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด B coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.45 T
(0.75V/div)

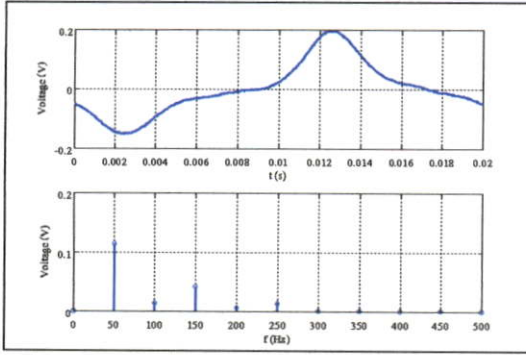
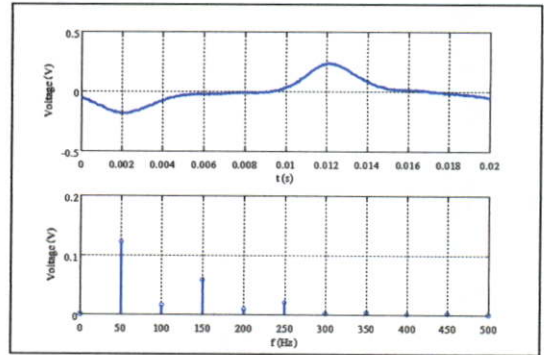
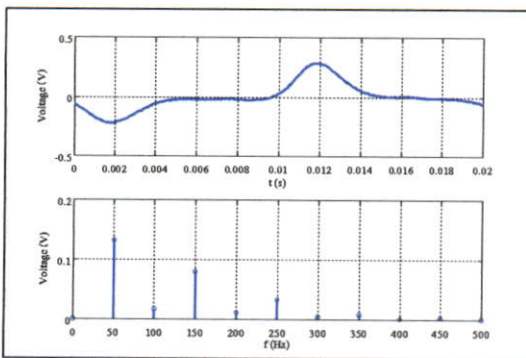
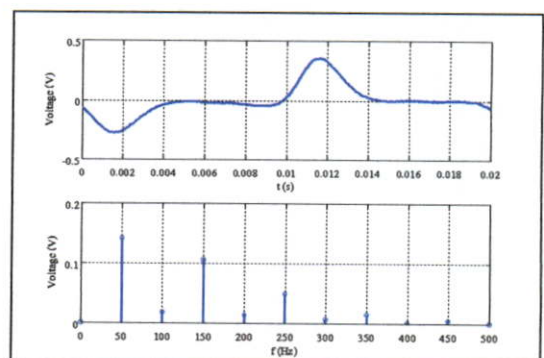
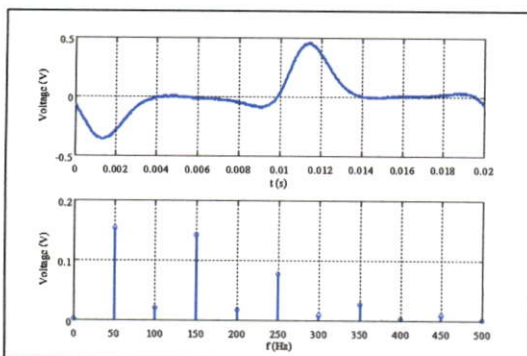
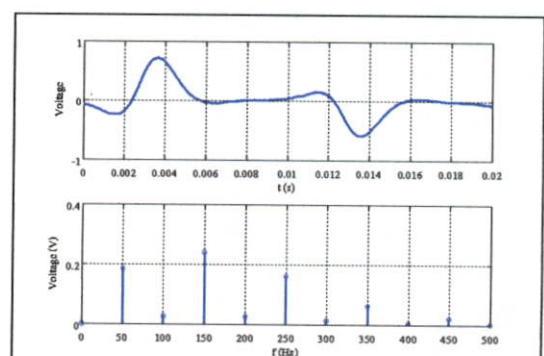


รูปที่ 4.12 กระแสกระตุ้นผ่านขดลวด Exciting coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.45 T
(12.5mA/div)

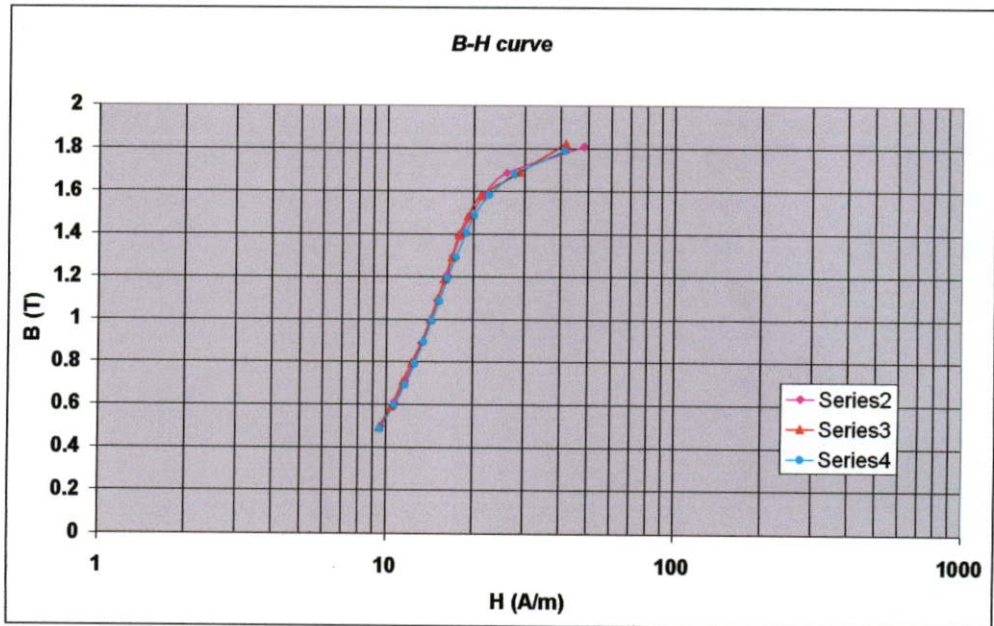
การแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจาก H coil โดยวิธีการ fast fourier transform ซึ่งจะทำการแปลง จากโดเมนของเวลามาเป็น โดเมนของความถี่เพื่อหาค่าแรงดันที่ความถี่ 50Hz

(a) $B = 0.49$ T(b) $B = 0.59$ T(c) $B = 0.71$ T(d) $B = 0.78$ T(e) $B = 0.88$ T(f) $B = 1.00$ T

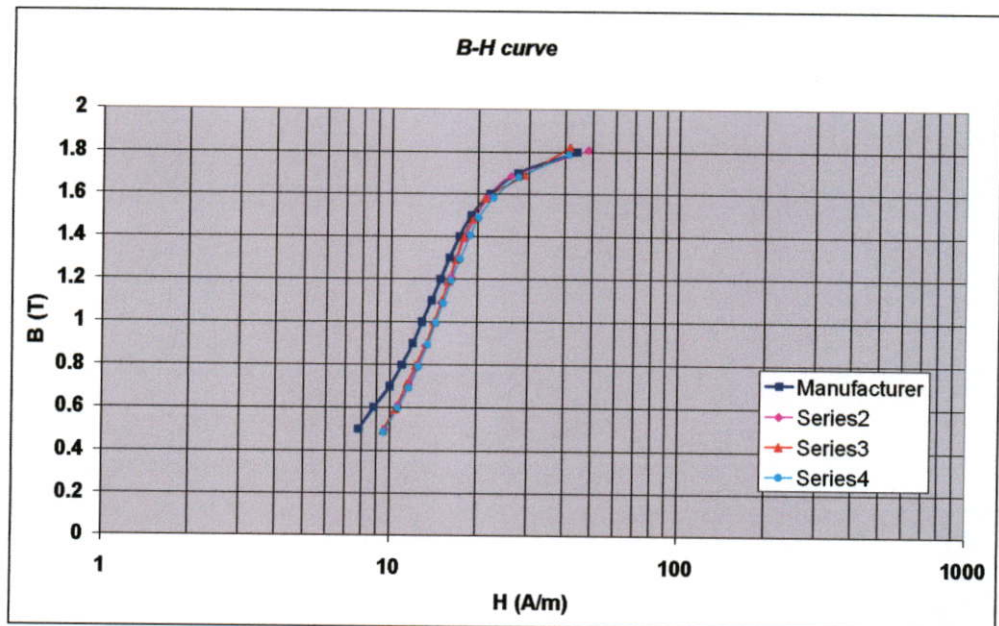
รูปที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด H coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ต่างๆ ของแผ่นเหล็กชนิด 27JGH110

(g) $B = 1.09$ T(h) $B = 1.19$ T(i) $B = 1.28$ T(j) $B = 1.38$ T(k) $B = 1.45$ T(l) $B = 1.58$ T

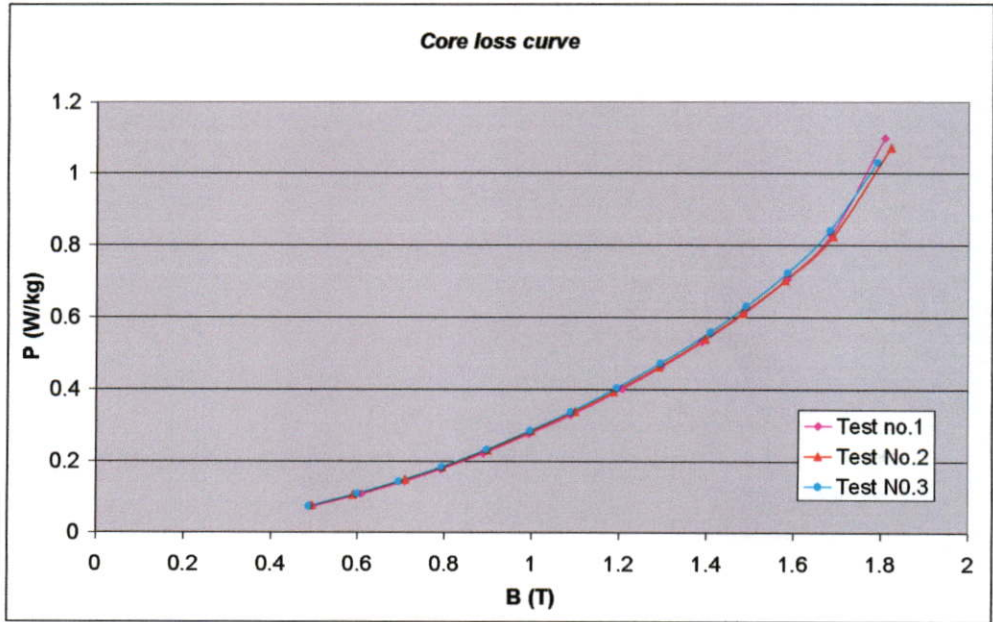
4.2.2 ผลการทดสอบแผ่นเหล็กชนิด 27ZH100



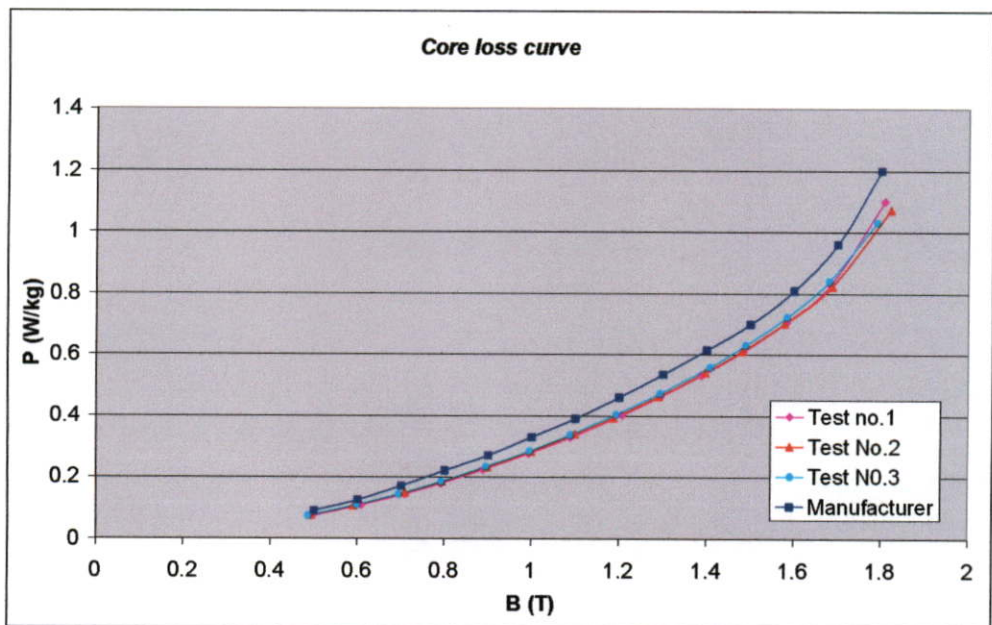
รูปที่ 4.14 กราฟผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH100 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ



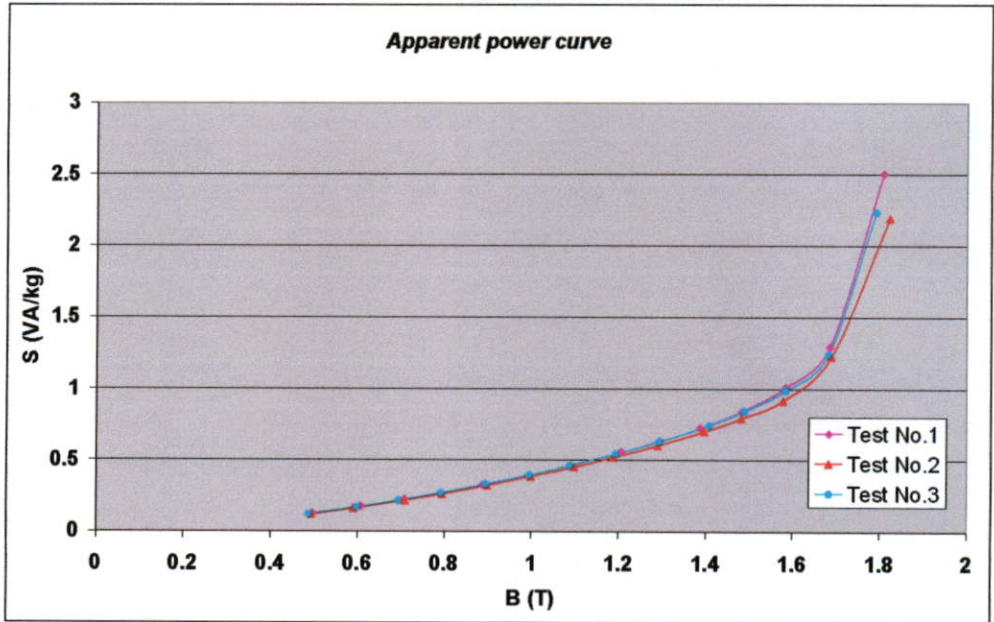
รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH100 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต



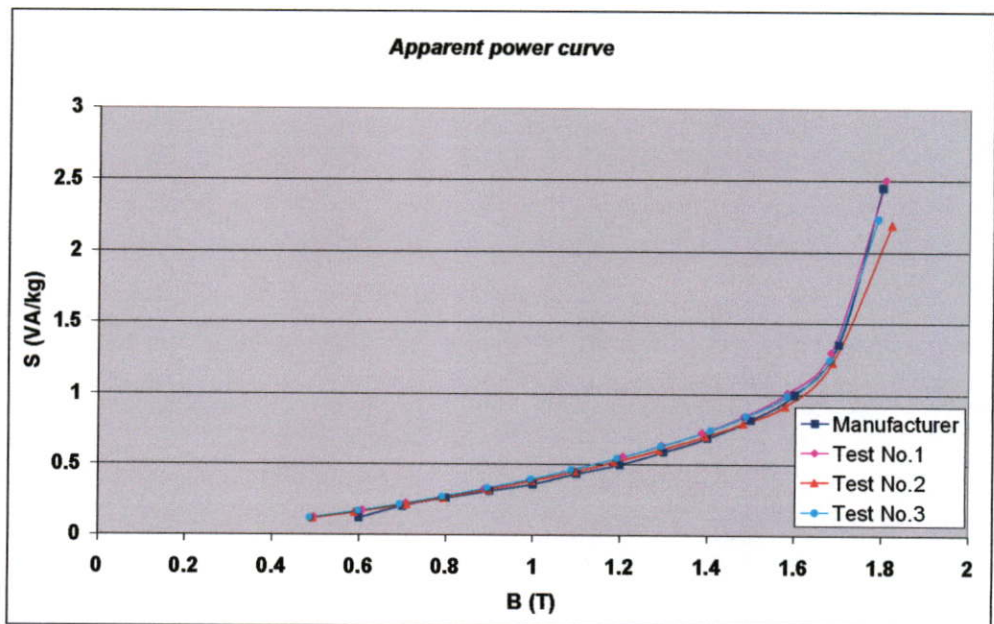
รูปที่ 4.16 กราฟผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH100 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ



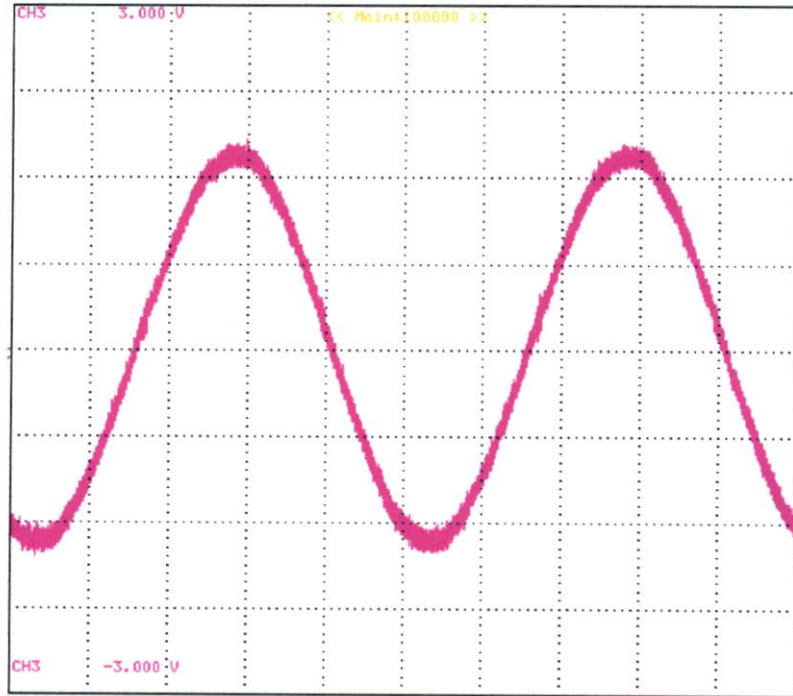
รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH100 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต



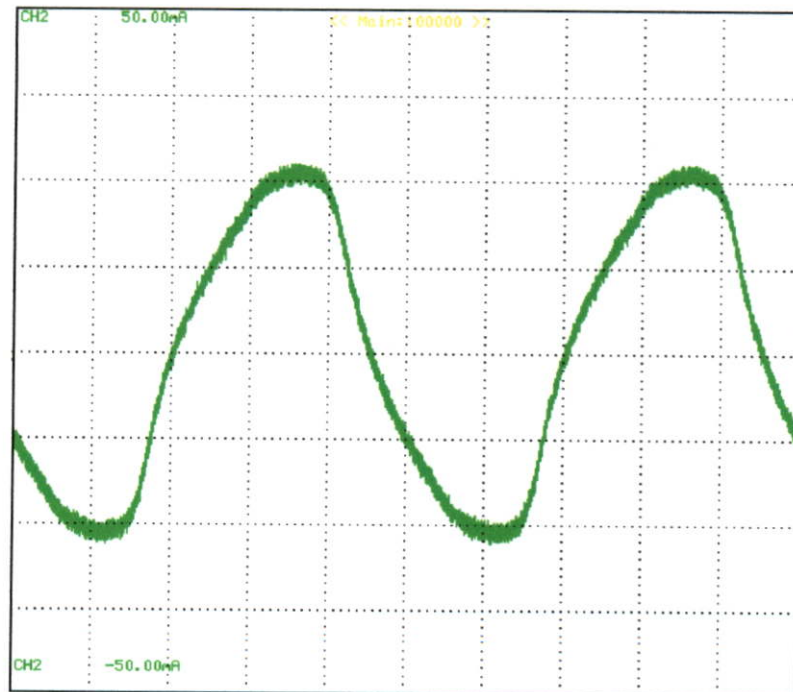
รูปที่4.18 กราฟผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH100 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ



รูปที่4.19 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH100 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต

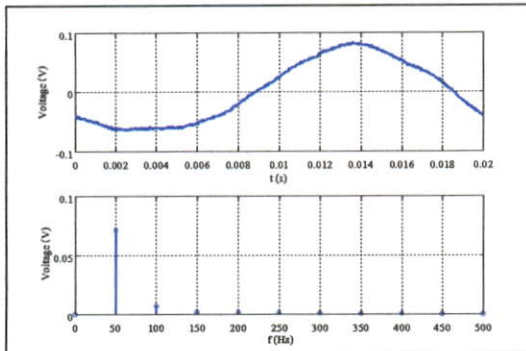
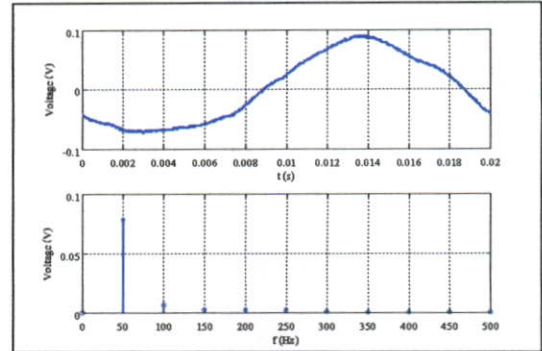
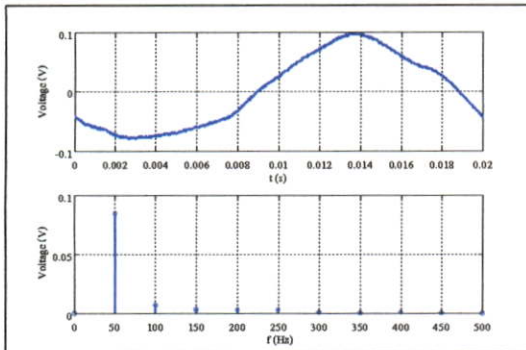
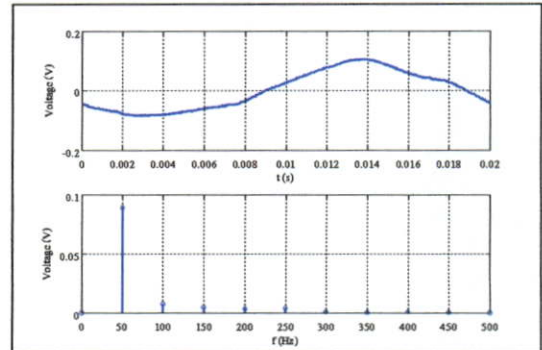
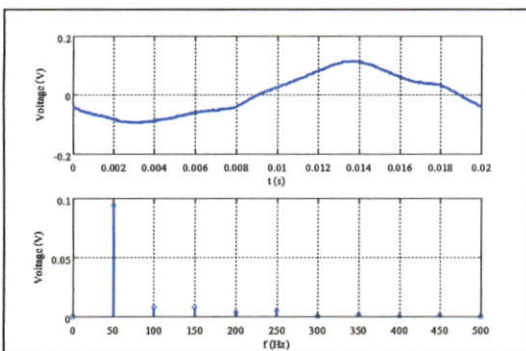
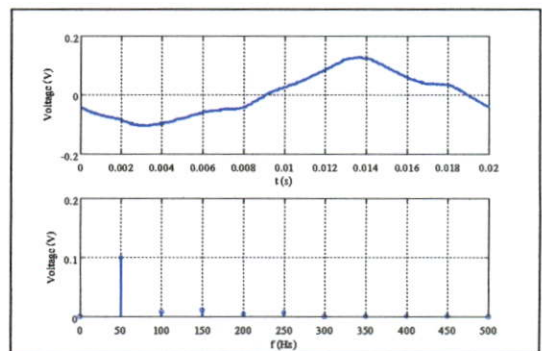


รูปที่ 4.20 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด B coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.48 T
(0.75V/div)

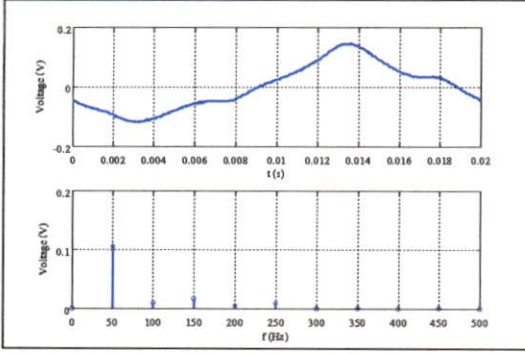
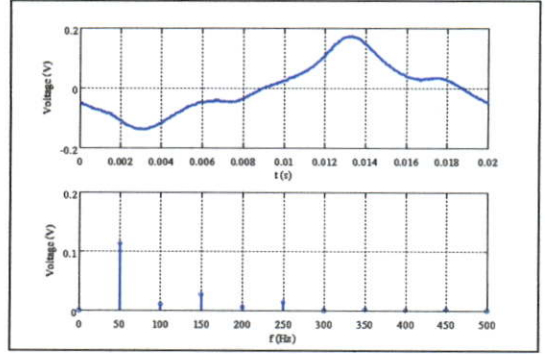
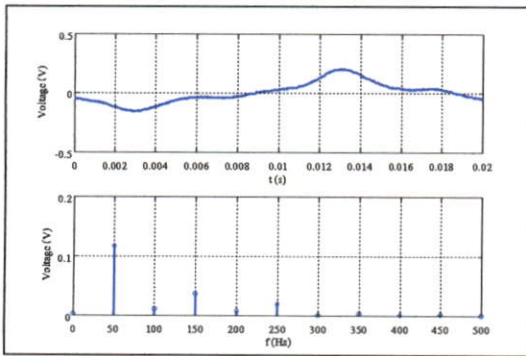
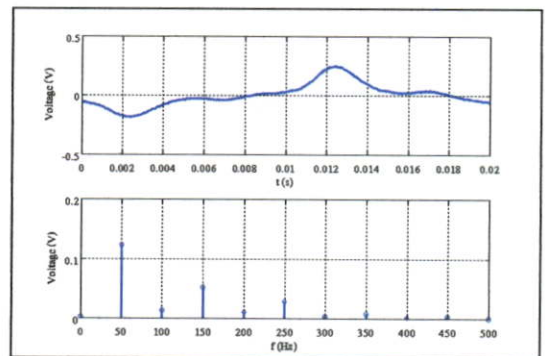
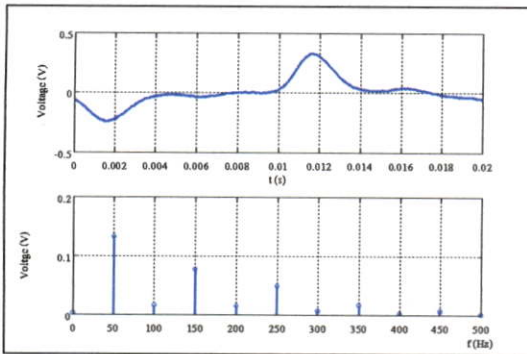
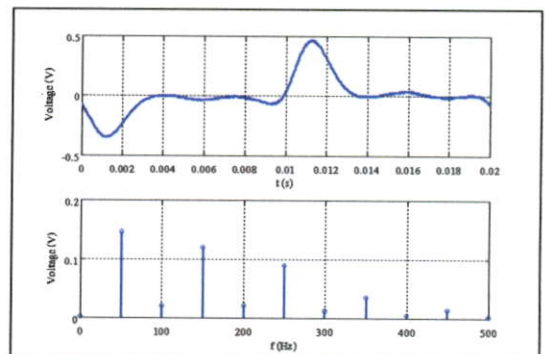


รูปที่ 4.21 กระแสกระตุ้นผ่านขดลวด Exciting coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.48 T
(12.5mA/div)

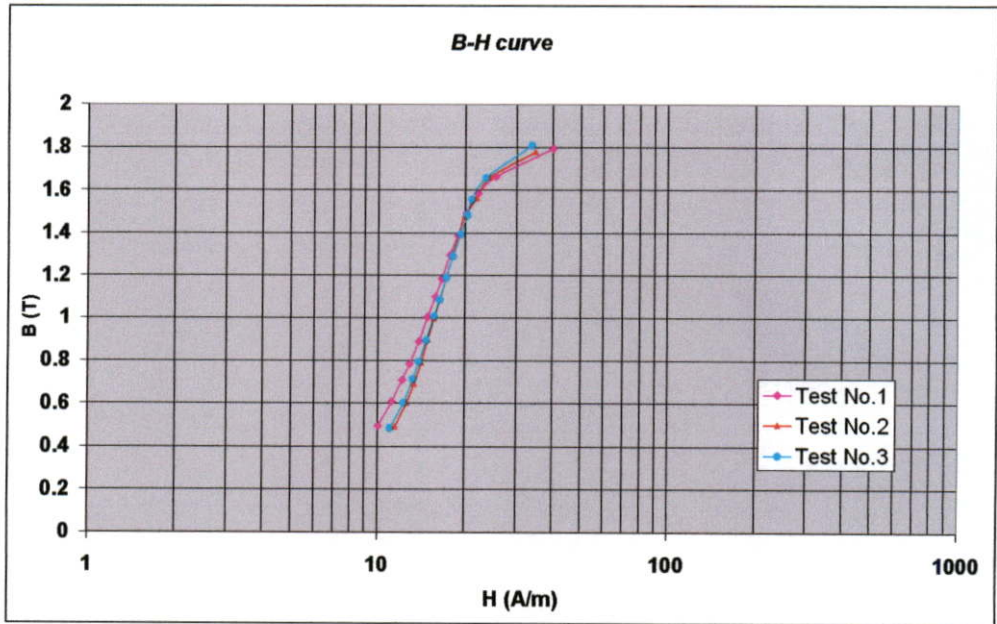
การแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจาก H coil โดยวิธีการ fast fourier transform ซึ่งจะทำการแปลง จากโดเมนของเวลามาเป็น โดเมนของความถี่เพื่อหาค่าแรงดันที่ความถี่ 50Hz

(a) $B = 0.49$ T(b) $B = 0.60$ T(c) $B = 0.70$ T(d) $B = 0.79$ T(e) $B = 0.88$ T(f) $B = 0.99$ T

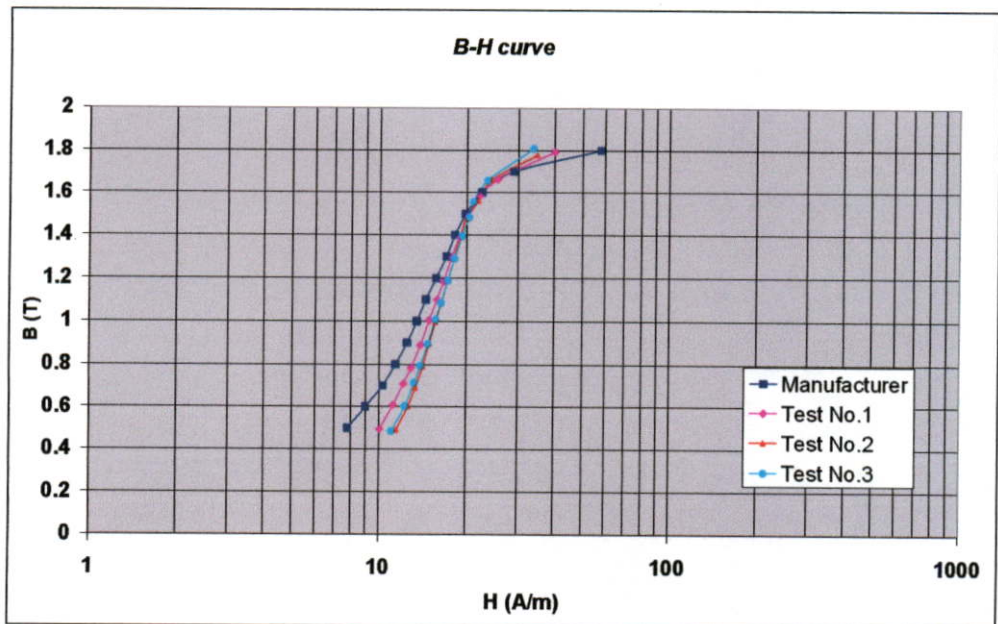
รูปที่ 4.22 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด H coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ต่างๆ ของแผ่นเหล็ก 27ZH100

(g) $B = 1.08$ T(h) $B = 1.20$ T(i) $B = 1.29$ T(j) $B = 1.38$ T(k) $B = 1.48$ T(l) $B = 1.58$ T

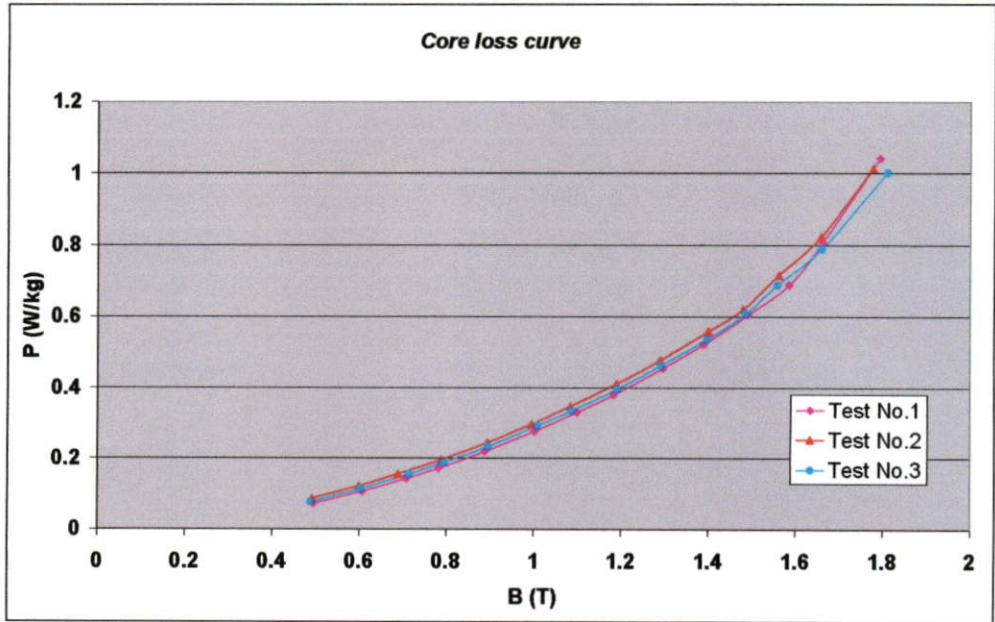
4.2.3 ผลการทดสอบแผ่นเหล็กชนิด 27ZH110



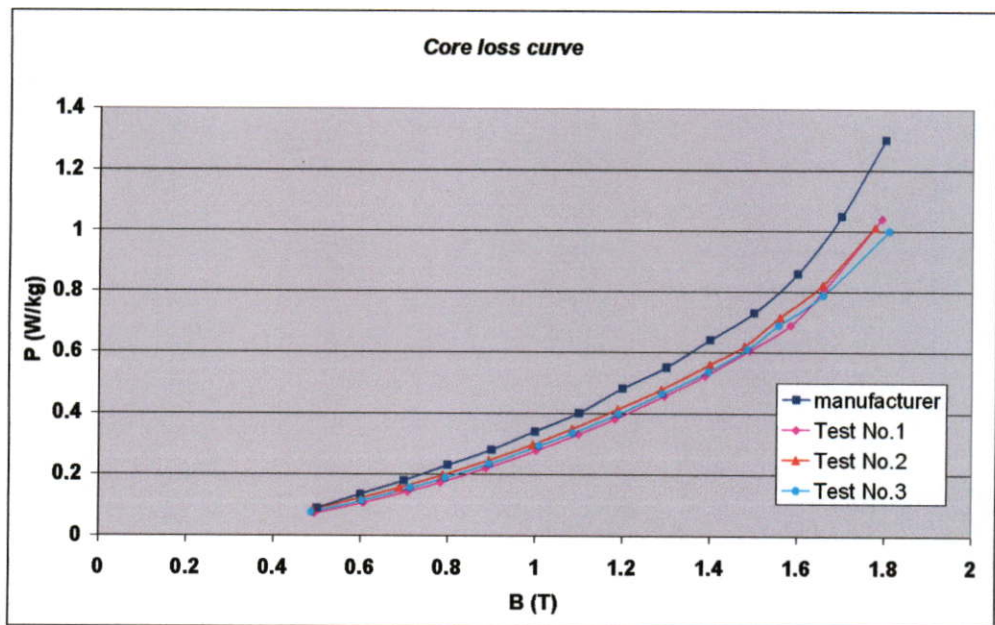
รูปที่ 4.23 กราฟผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH110 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ



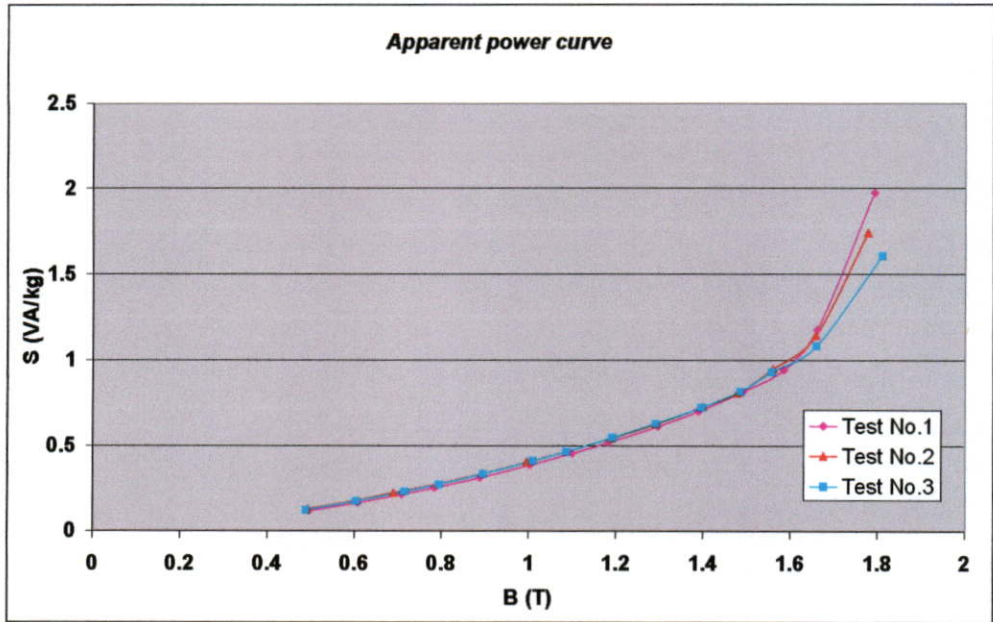
รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต



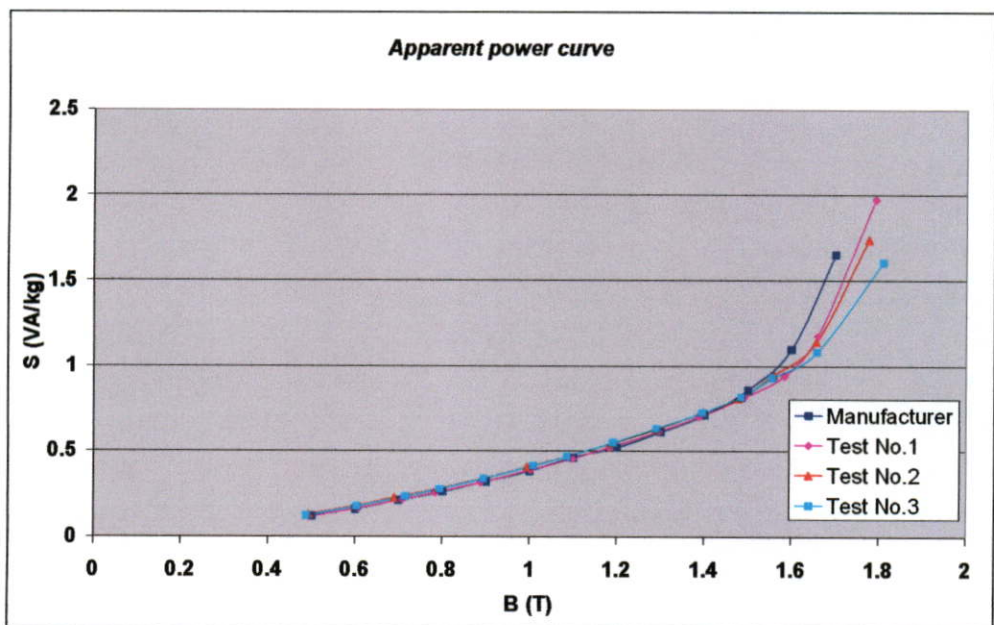
รูปที่ 4.25 กราฟผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH110 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ



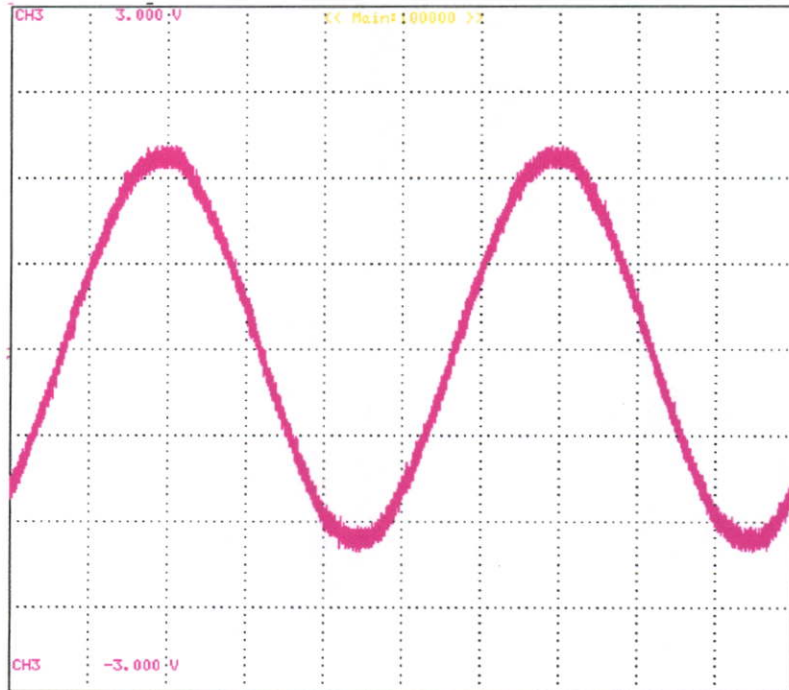
รูปที่ 4.26 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต



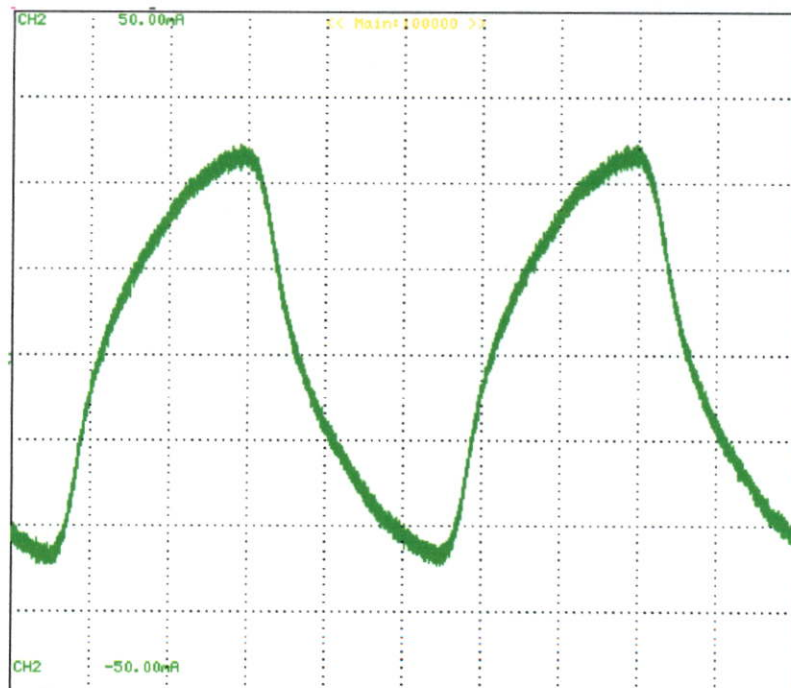
รูปที่ 4.27 กราฟผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏ ของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH110 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ



รูปที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH110 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต

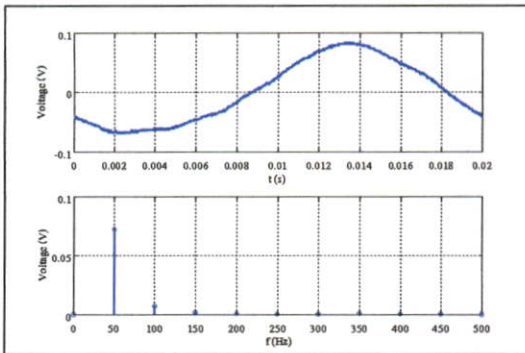
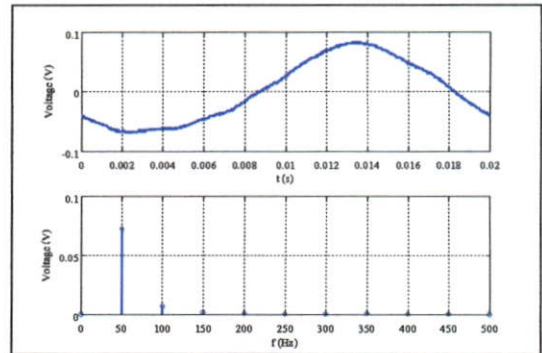
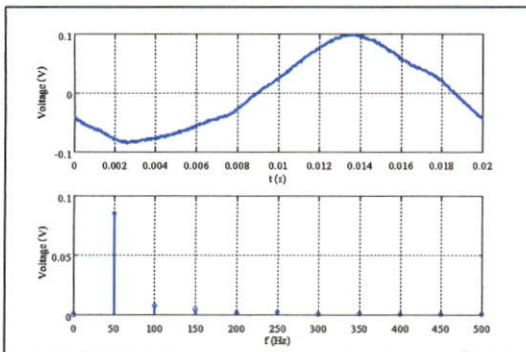
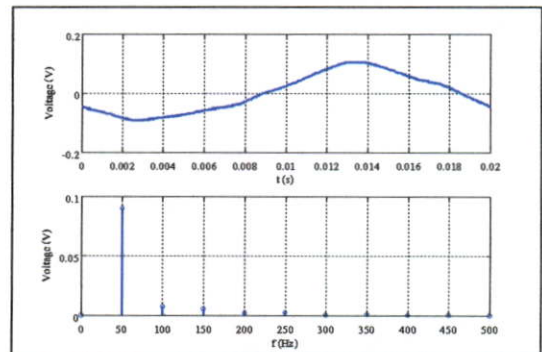
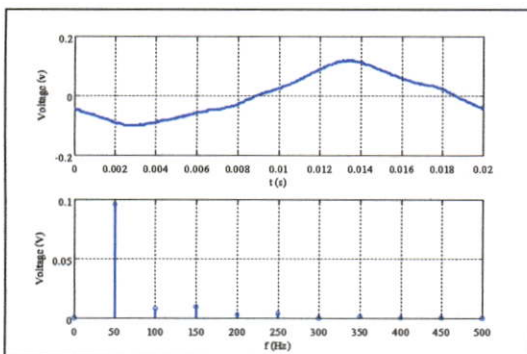
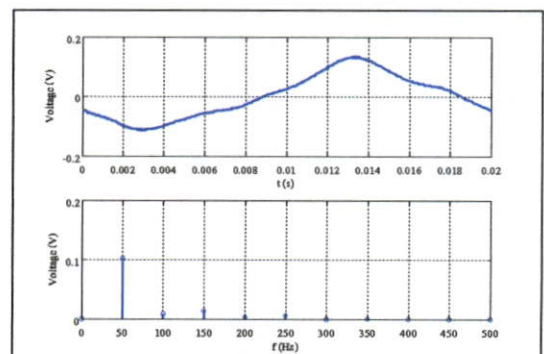


รูปที่ 4.29 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด B coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.49 T
(0.75V/div)

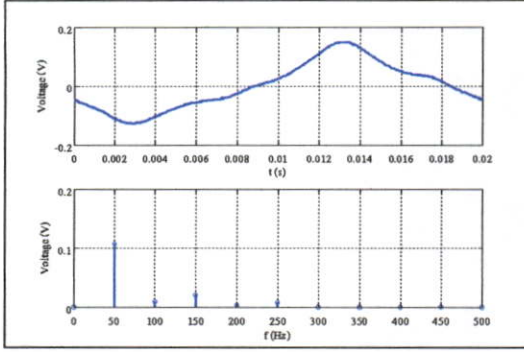
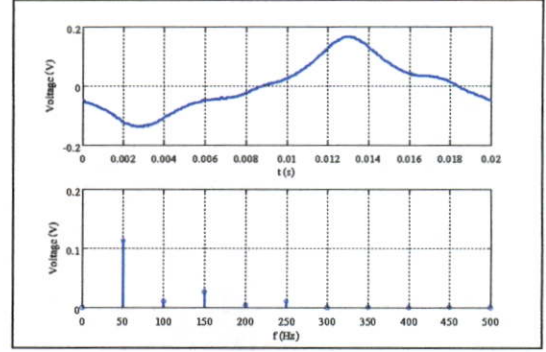
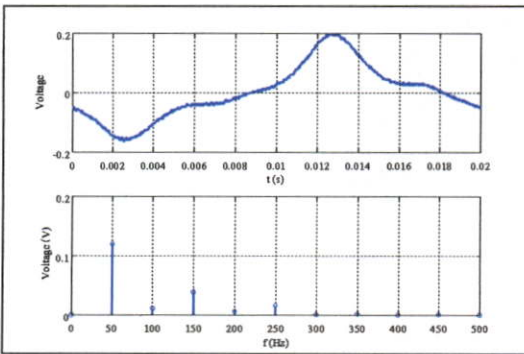
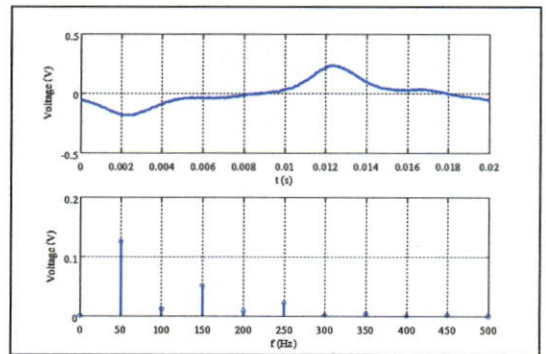
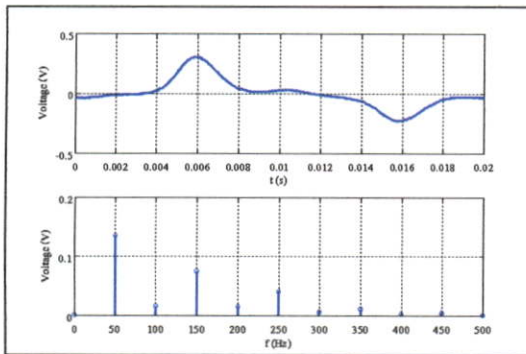
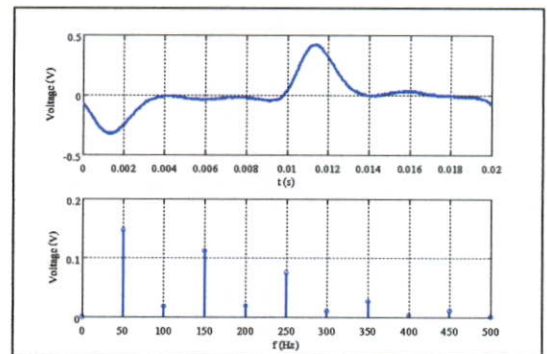


รูปที่ 4.30 กระแสกระตุ้นผ่านขดลวด Exciting coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.49 T
(12.5mA/div)

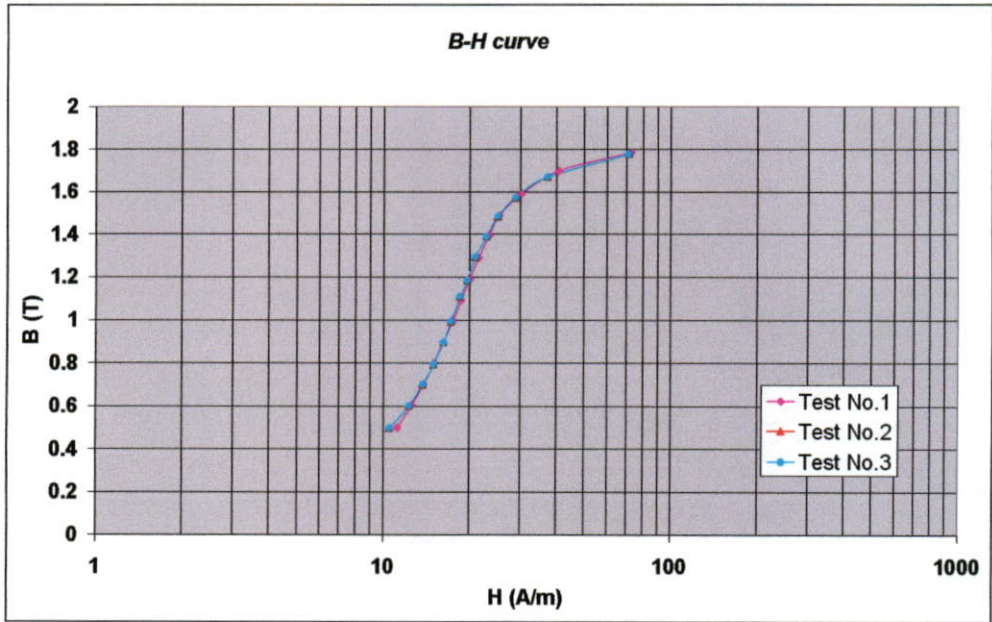
การแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจาก H coil โดยวิธีการ fast fourier transform ซึ่งจะทำให้การแปลง จากโดเมนของเวลามาเป็นโดเมนของความถี่เพื่อหาค่าแรงดันที่ความถี่ 50Hz

(a) $B = 0.49$ T(b) $B = 0.60$ T(c) $B = 0.70$ T(d) $B = 0.78$ T(e) $B = 0.88$ T(f) $B = 1.00$ T

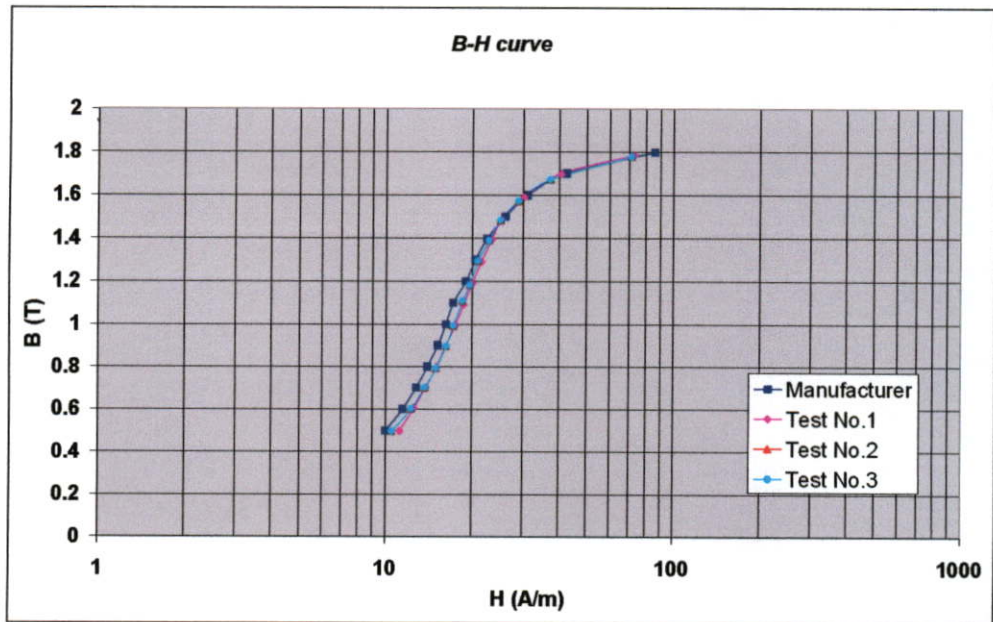
รูปที่ 4.31 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด H coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ต่างๆ ของแผ่นเหล็กชนิด 27ZH110

(g) $B = 1.09$ T(h) $B = 1.18$ T(i) $B = 1.29$ T(j) $B = 1.38$ T(k) $B = 1.49$ T(l) $B = 1.58$ T

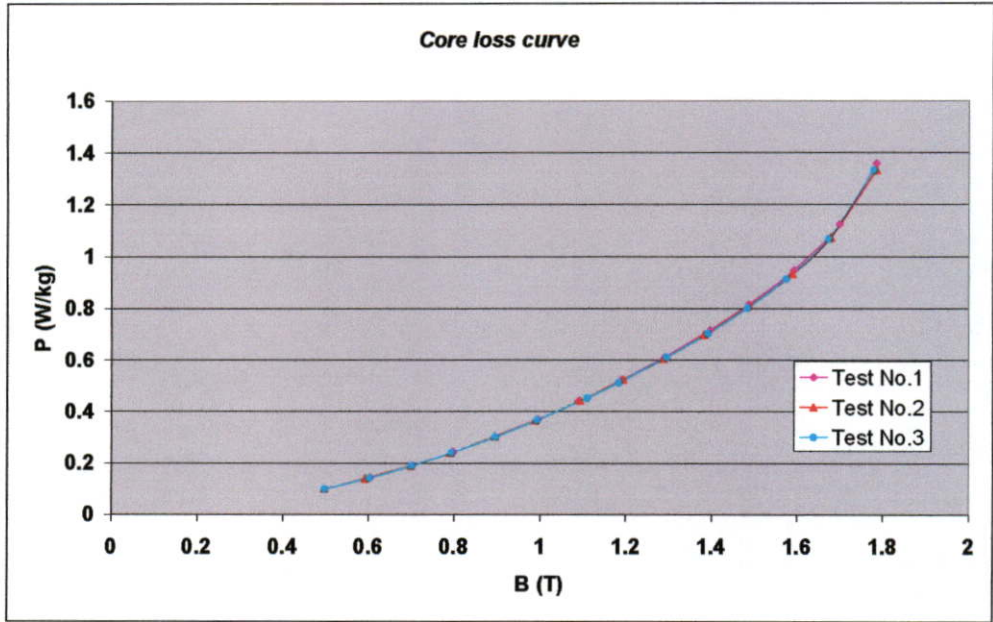
4.2.4 ผลการทดสอบแผ่นเหล็กชนิด 35JGH135



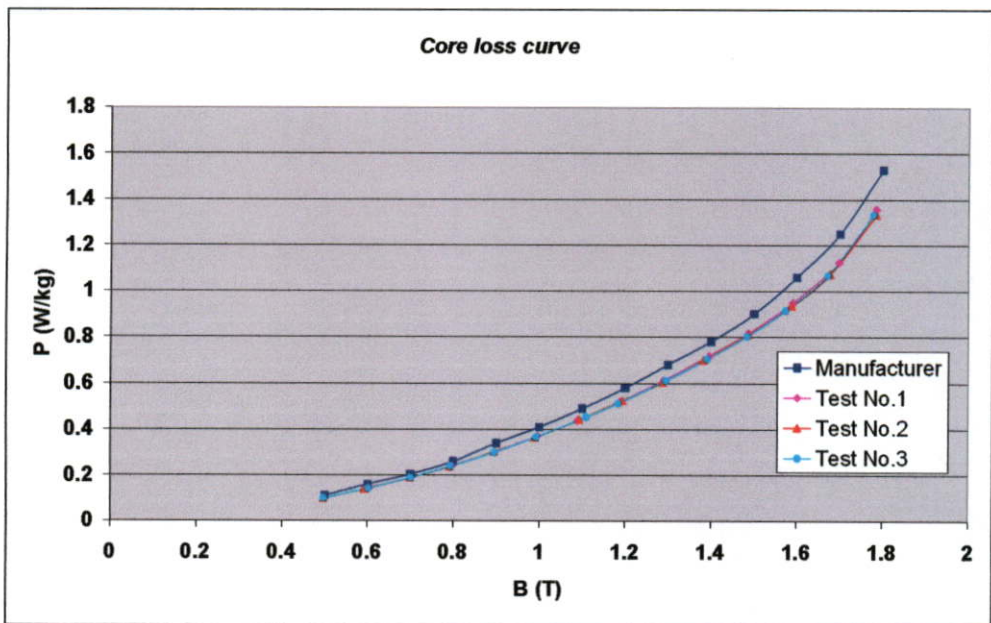
รูปที่ 4.32 กราฟผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH135 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ



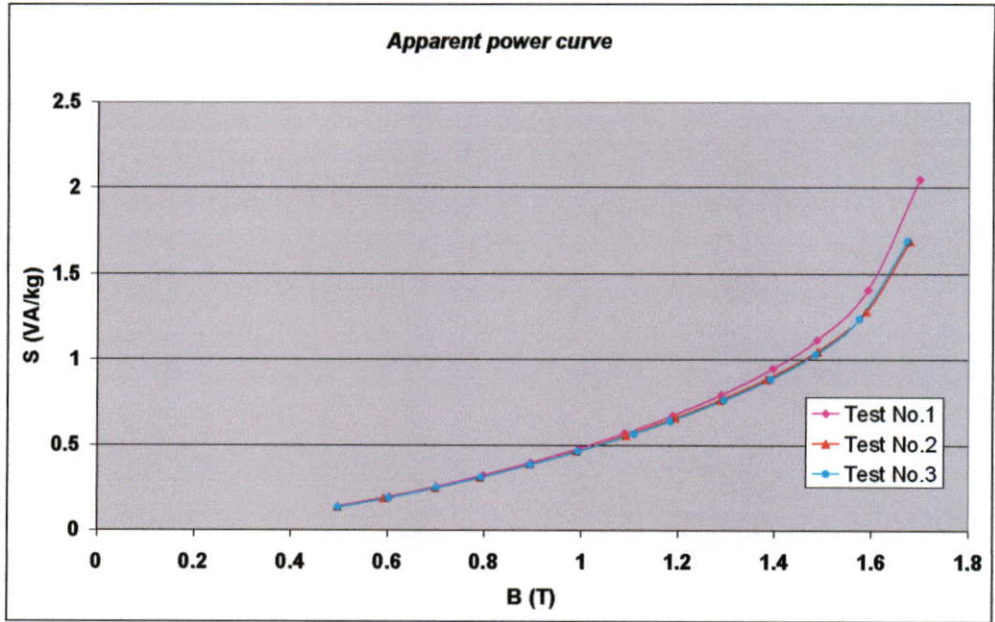
รูปที่ 4.33 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH135 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต



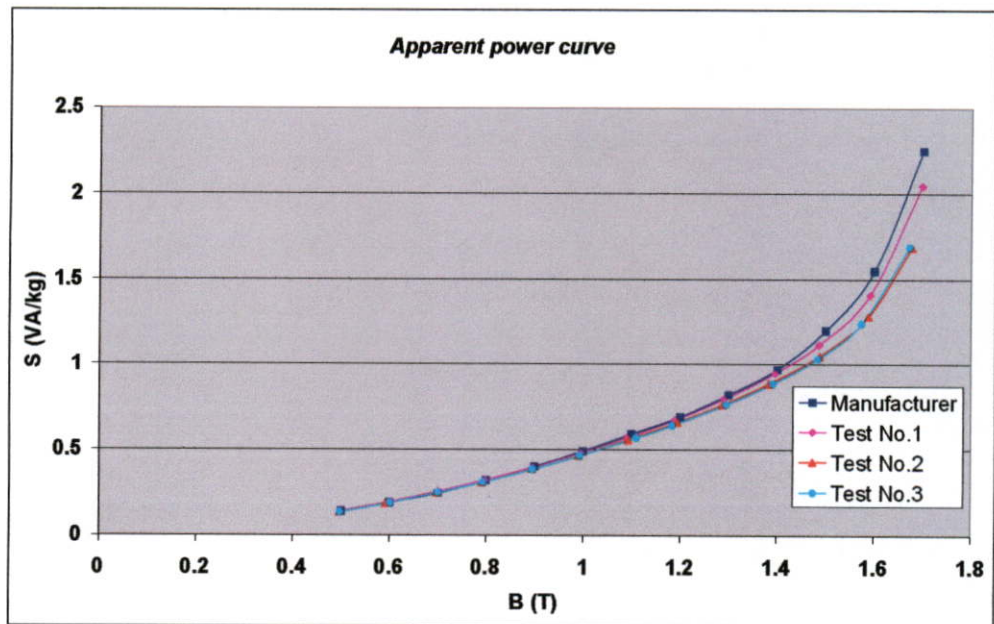
รูปที่ 4.34 กราฟผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH135 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ



รูปที่ 4.35 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH135 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต



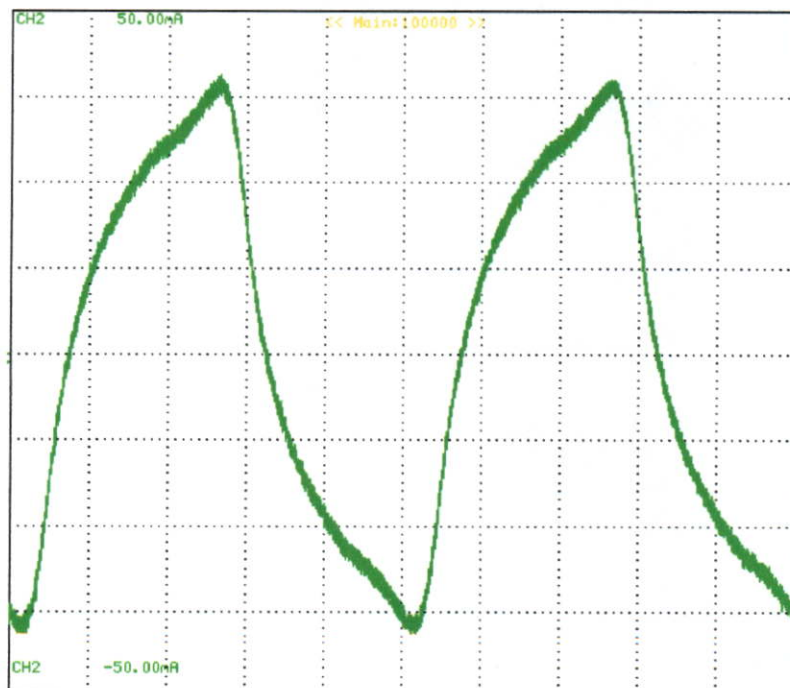
รูปที่ 4.36 กราฟผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH135 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ



รูปที่ 4.37 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH135 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต

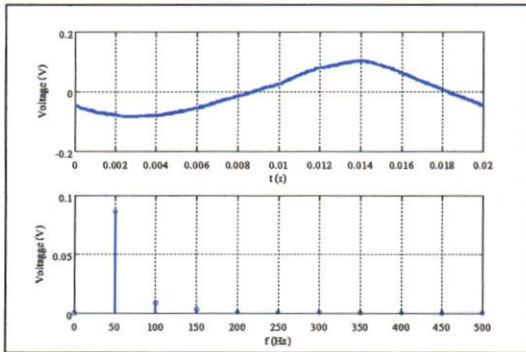
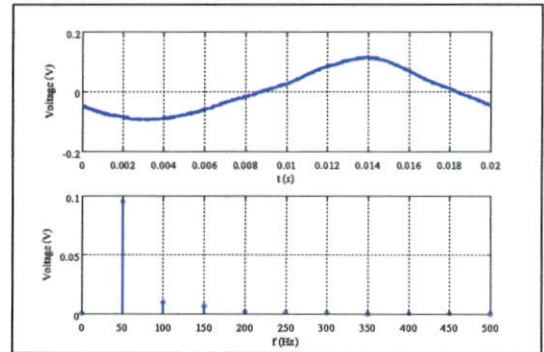
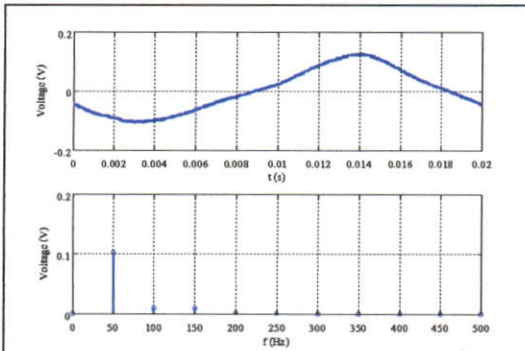
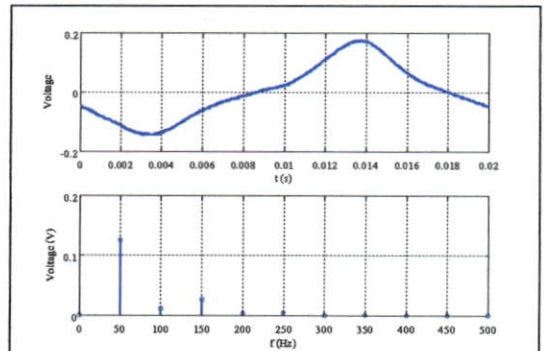
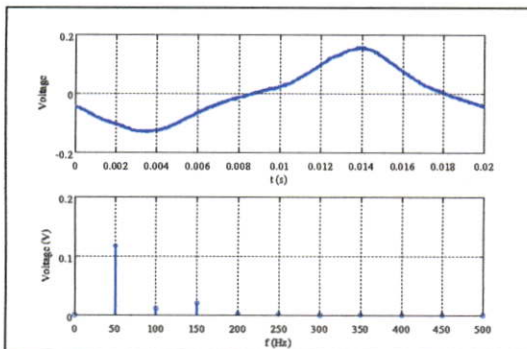
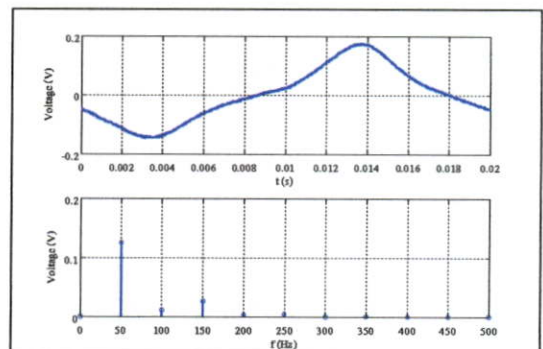


รูปที่ 4.38 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด B coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.48 T
(0.75V/div)

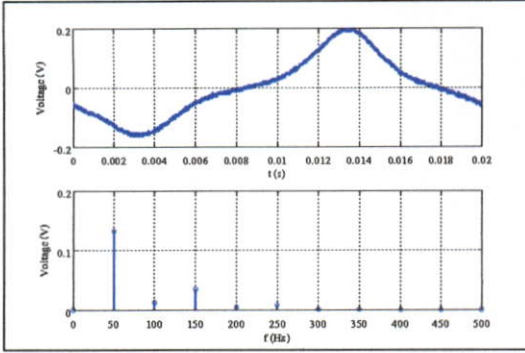
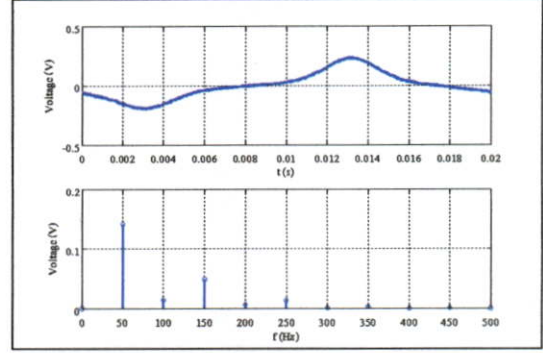
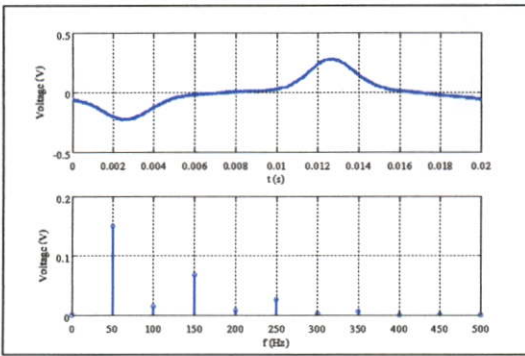
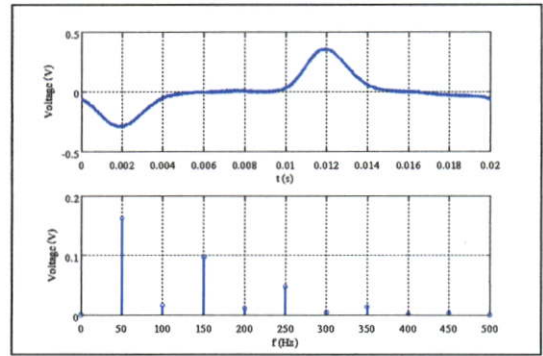
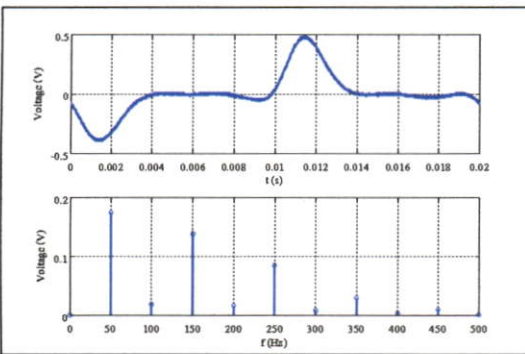
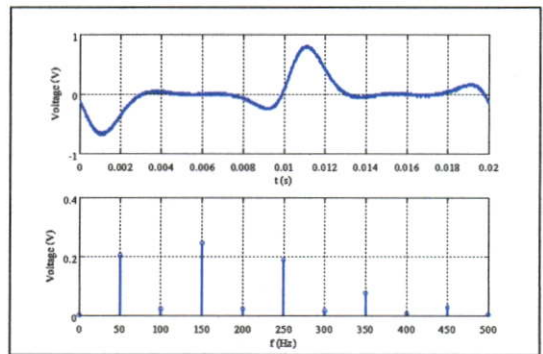


รูปที่ 4.39 กระแสกระตุ้นผ่านขดลวด Exciting coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.48 T
(12.5mA/div)

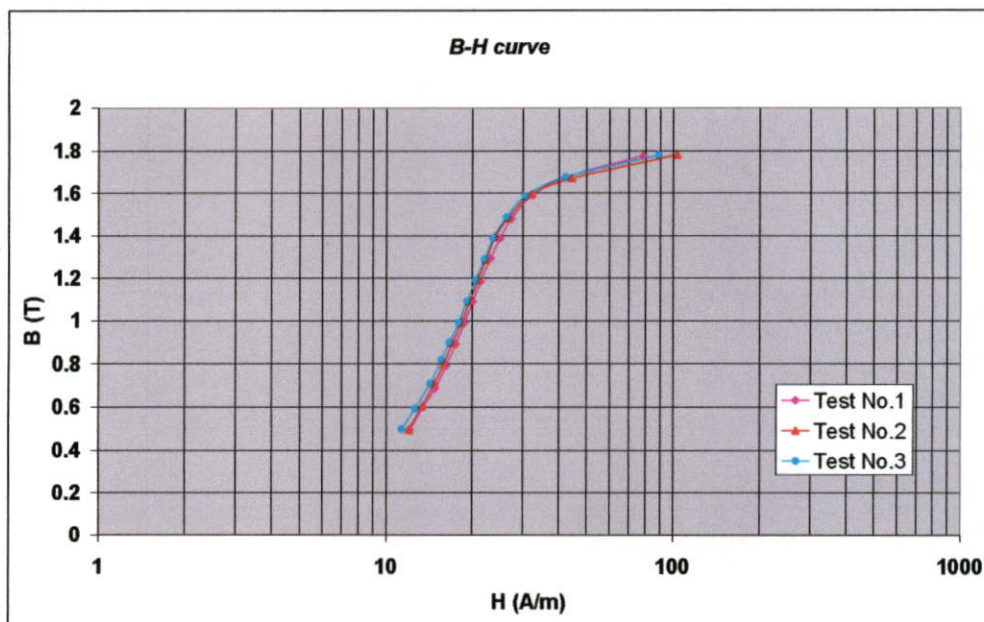
การแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจาก H coil โดยวิธีการ fast fourier transform ซึ่งจะทำการแปลง จากโดเมนของเวลามาเป็น โดเมนของความถี่เพื่อหาค่าแรงดันที่ความถี่ 50Hz

(a) $B = 0.49$ T(b) $B = 0.60$ T(c) $B = 0.70$ T(d) $B = 0.79$ T(e) $B = 0.89$ T(f) $B = 0.99$ T

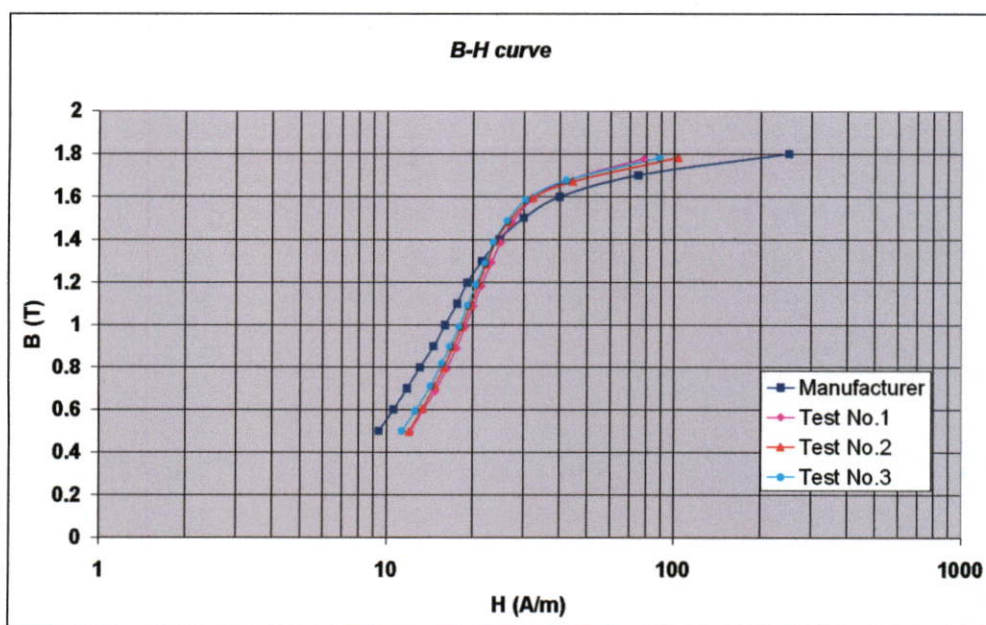
รูปที่ 4.40 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด H coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ต่างๆ ของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH135

(g) $B = 1.09$ T(h) $B = 1.18$ T(i) $B = 1.29$ T(j) $B = 1.39$ T(k) $B = 1.48$ T(l) $B = 1.59$ T

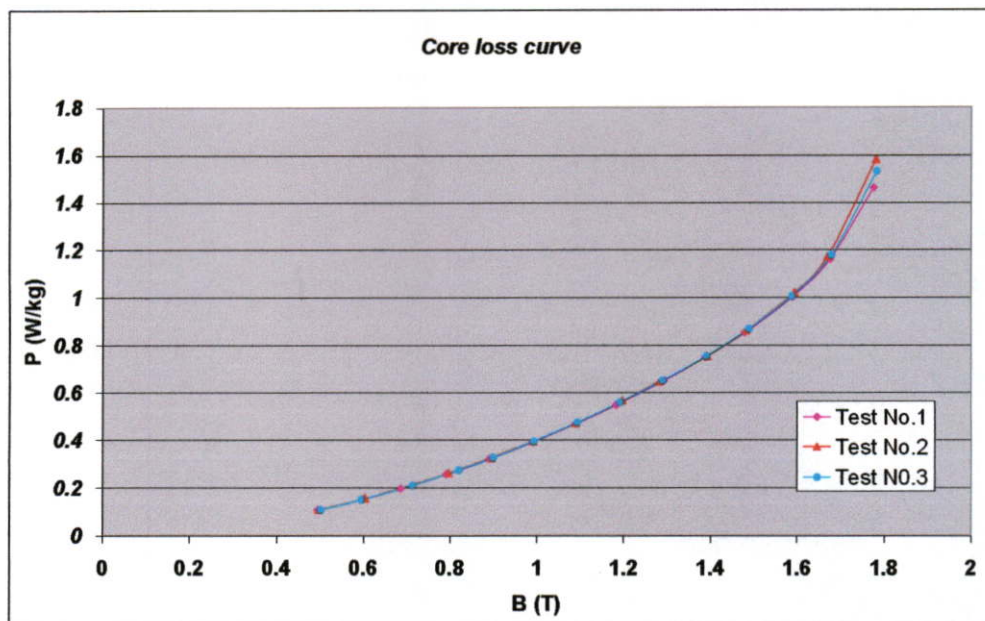
4.2.5 ผลการทดสอบแผ่นเหล็กชนิด 35JGH155



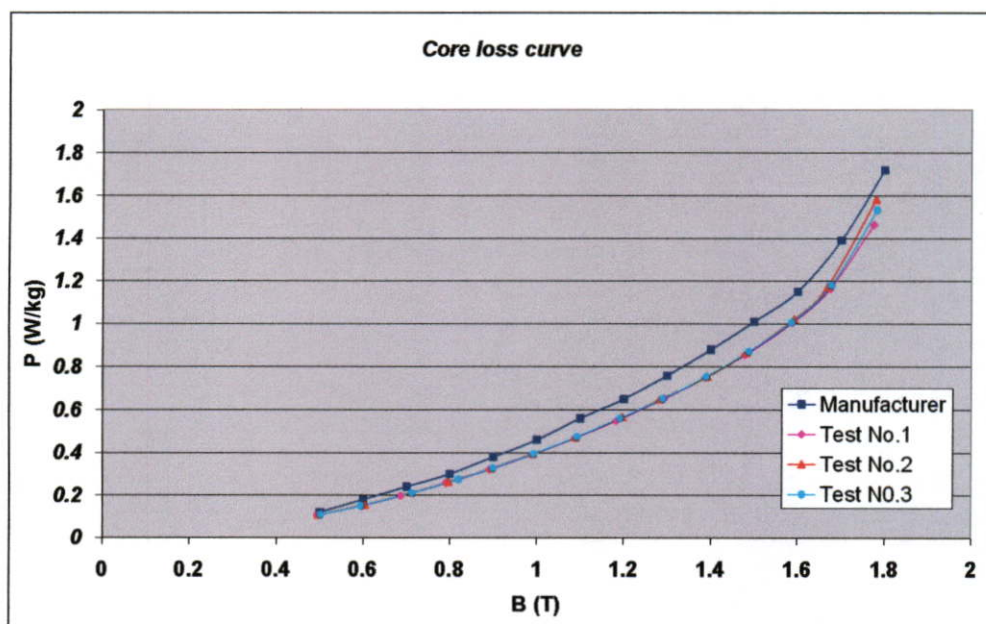
รูปที่ 4.41 กราฟผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH155 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ



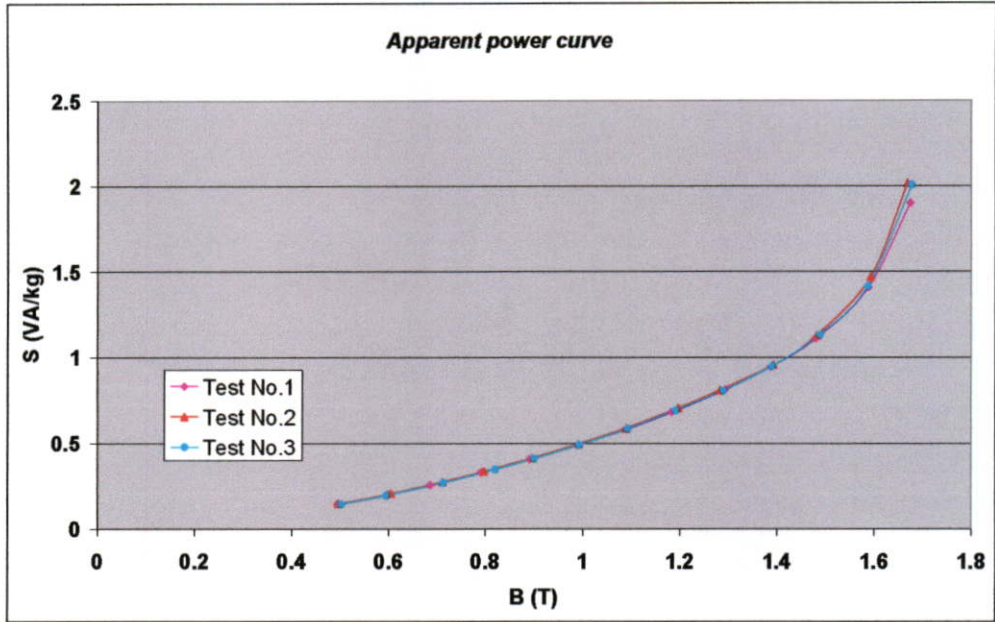
รูปที่ 4.42 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบการ Magnetization ของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH155 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต



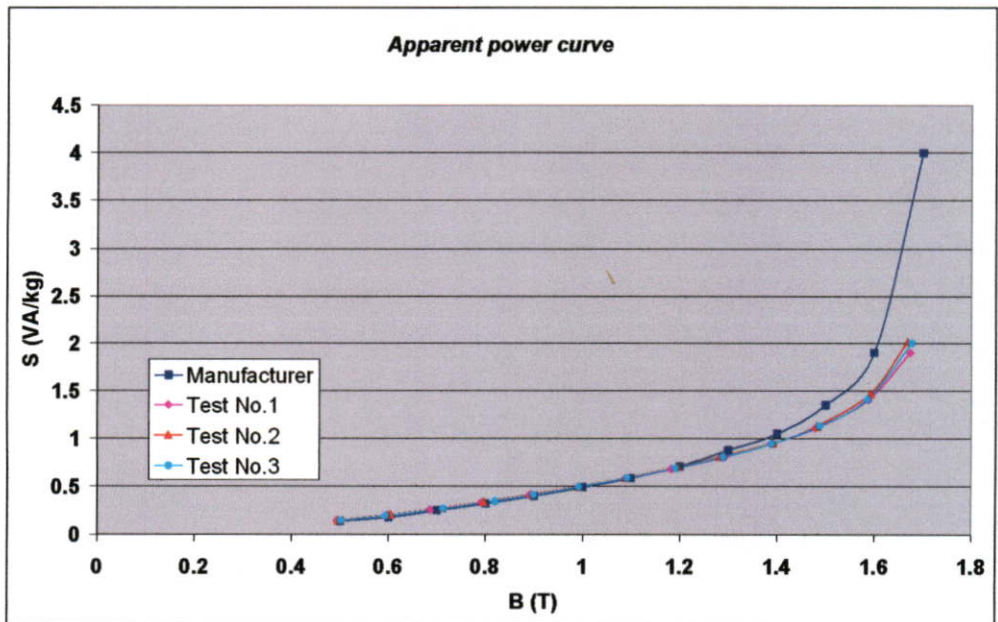
รูปที่ 4.43 กราฟผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH155 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ



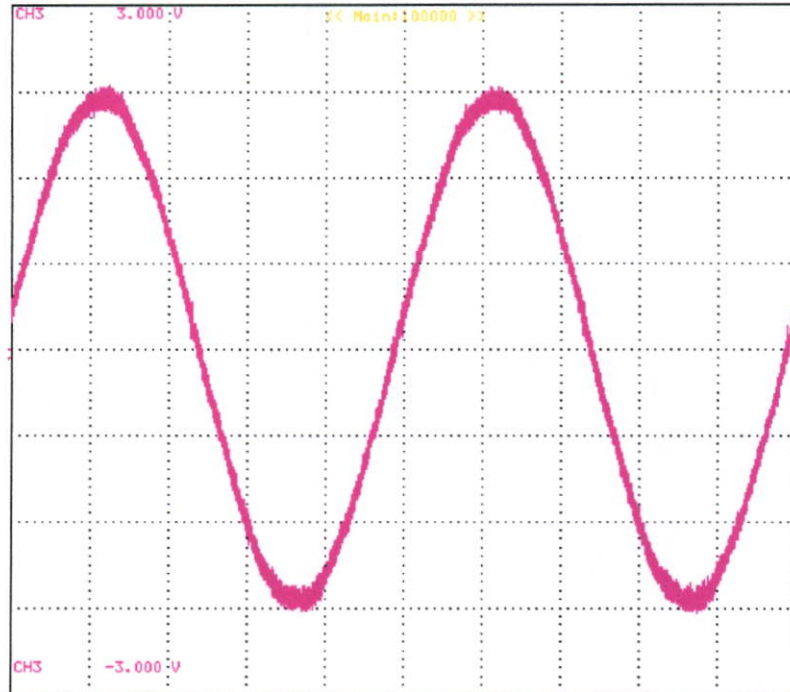
รูปที่ 4.44 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH155 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต



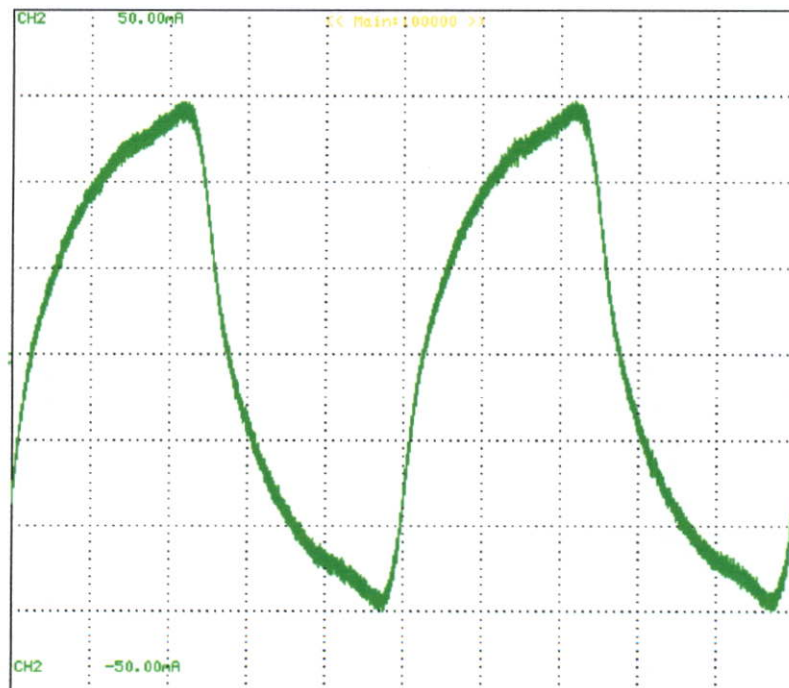
รูปที่ 4.45 กราฟผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH155 โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวของแผ่นเหล็ก 3 ตัวอย่างการทดสอบ



รูปที่ 4.46 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH155 ระหว่างผลจากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวกับผลที่ได้จากผู้ผลิต

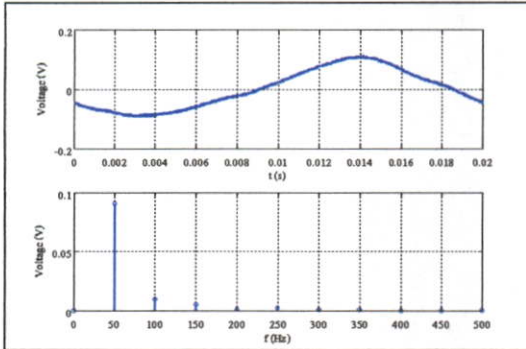
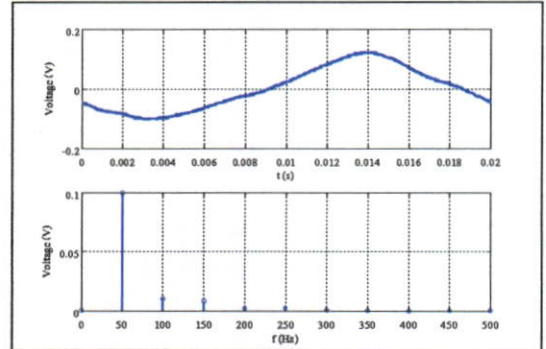
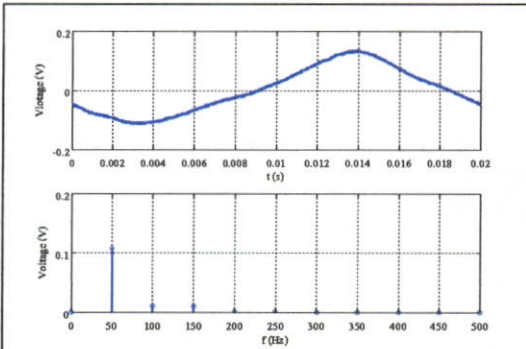
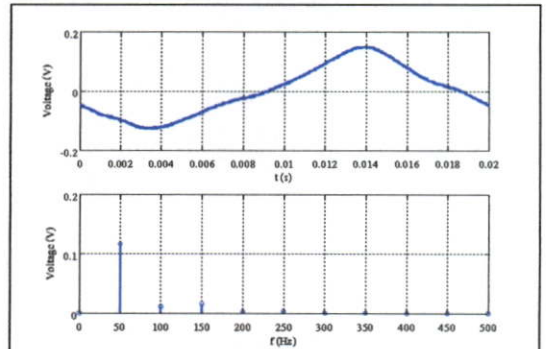
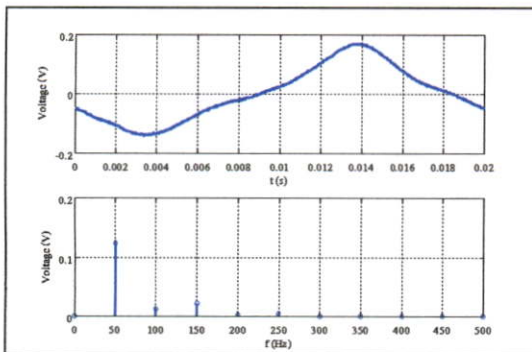
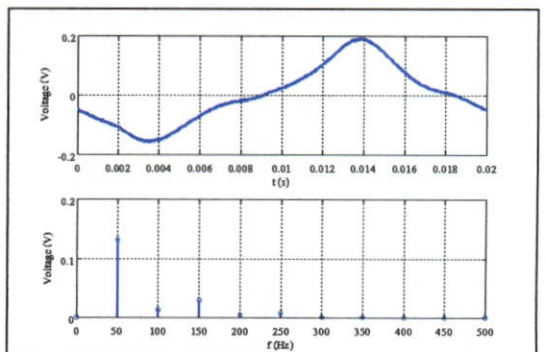


รูปที่4.47 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด B coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.47 T
(0.75V/div)

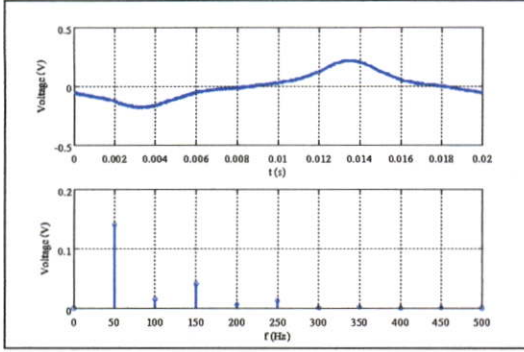
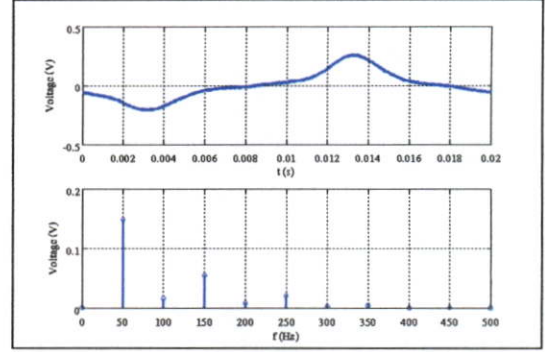
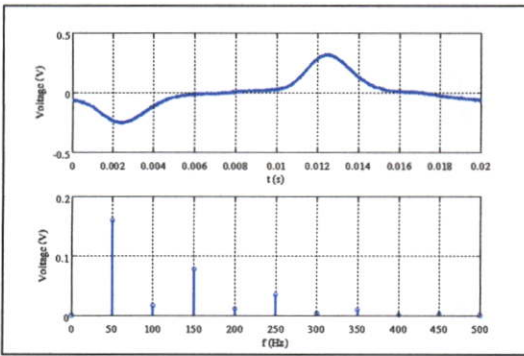
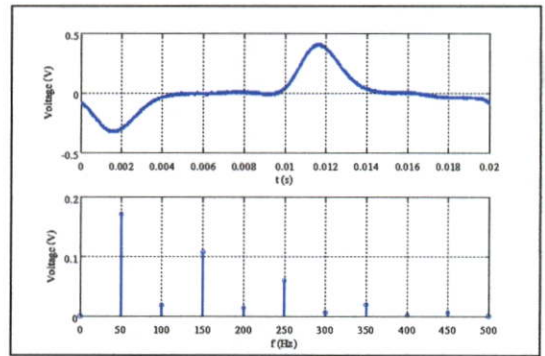
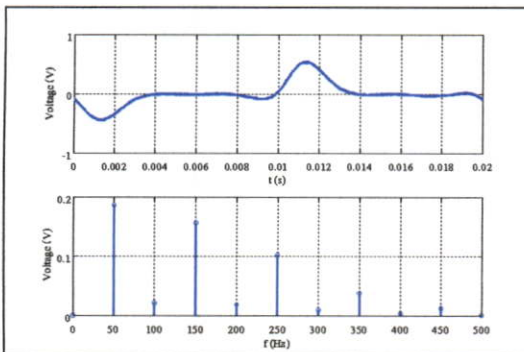
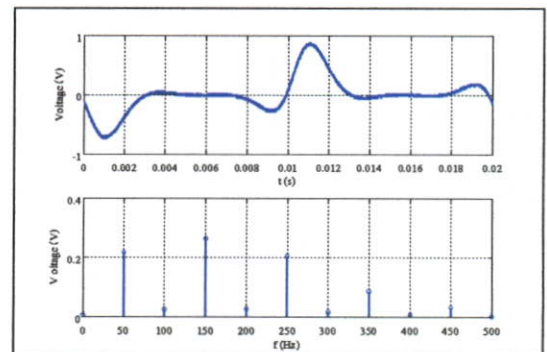


รูปที่4.48 กระแสกระตุ้นผ่านขดลวด Exciting coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1.47 T
(12.5mA/div)

การแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจาก H coil โดยวิธีการ fast fourier transform ซึ่งจะทำการแปลง จากโดเมนของเวลามาเป็น โดเมนของความถี่เพื่อหาค่าแรงดันที่ความถี่ 50Hz

(a) $B = 0.49$ T(b) $B = 0.59$ T(c) $B = 0.68$ T(d) $B = 0.79$ T(e) $B = 0.89$ T(f) $B = 0.98$ T

รูปที่ 4.49 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวด H coil ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ต่างๆ ของแผ่นเหล็กชนิด 35JGH155

(g) $B = 1.08$ T(h) $B = 1.18$ T(i) $B = 1.29$ T(j) $B = 1.38$ T(k) $B = 1.47$ T(l) $B = 1.58$ T

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบหาค่าคุณลักษณะทางแม่เหล็กของแผ่นแกนเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบแผ่นเดียนั้น โดยการป้อนค่าแรงดันไฟฟ้า เข้าไปค่าขดลวด Exciting coil แล้วทำการ วัดค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้า กระแสไฟฟ้าป้อนเข้า แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่ B coil และ H coil แล้วนำไปคำนวณจากรายละเอียดต่างๆ โดยการแยกค่าความสูญเสียจากส่วนต่างๆ ซึ่งผลที่ได้นั้นประกอบไปด้วย กราฟเส้นโค้งก้านแม่เหล็ก (B-H curves) กราฟค่าความสูญเสียของแผ่นเหล็ก (Core loss curves) และกราฟกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power curve)

5.1 สรุปผลวิจัย

การสร้างชุดทดสอบนั้นต้องใช้ความละเอียดในการสร้าง จึงทำให้มีโอกาสดังส่วนประกอบต่างๆจะมีค่าความผิดพลาดบ้าง ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบเพื่อหาค่าตัวแปรต่าง เช่น ค่าความต้านทานของขดลวด Exciting coil, ค่า Area-turn ของขด H coil, ค่าความสูญเสียของ Yoke

ในส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำที่ H coil นั้นที่ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงๆจะประกอบด้วยฮาร์มอนิกส์ค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้ในการคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก มีค่าความผิดพลาดกับผลของทางผู้ผลิตค่อนข้างสูง จึงได้มีการนำแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำของ H coil มาทำการคำนวณ โดยใช้ fast fourier transformer ในโปรแกรม MATLAB โดยจะทำการแปลงจากโดเมนเวลาอยู่ใน โดเมนความถี่ เพื่อที่จะได้ทราบค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่ 50 Hz และนำค่าแรงดันที่ความถี่ 50 Hz ไปทำการคำนวณหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก และค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏนั้น ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ H coil นั้นจะส่งผลน้อย เนื่องจากจะนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำไปคำนวณเป็นเส้นแรงแม่เหล็กในอากาศ ซึ่งจะมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเส้นแรงแม่เหล็กในแผ่นเหล็ก ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำที่ H coil นั้นเมื่อคิดที่ความถี่ 50 Hz หรือที่รวมฮาร์มอนิกส์นั้น จะได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน

จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นเหล็ก โดยการสร้างชุดทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดียนั้นมีค่าใกล้เคียงสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับผลของผู้ผลิต จึงสรุปได้ว่าชุดทดสอบที่สร้างขึ้นนั้นมีความเชื่อถือได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ชุดทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นแม่เหล็กแบบแผ่นเดียนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยอื่นๆได้ เช่น การนำชุดทดสอบไปใช้ในการศึกษาผลของการเกิดค่าความสูญเสียของกระแสไหลวนที่เกิดจากการวางซ้อนกันของแผ่นเหล็ก หรือ การนำแนวความคิดในการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยใช้ H coil ไปประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งการสูญเสียของแกนสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] JIS C 2556 (1996) Methods of measurement of the magnetic properties of magnetic steel sheet and strip by means of a single sheet tester
- [2] JIS C 2553 (2000): Grain-oriented magnetic steel sheet and strip.
- [3] Lotten T Mthombeni, P. Pillay “Core Losses in Motor Laminations Exposed to High Frequency or Non-Sinusoidal Excitation” IEEE Transactions On Volume40, Issue 5, Sept.-Oct. 2004 Page(s) 1325-1332
- [4] J. Sievert “The measurement of magnetic properties of electrical sheet steel –survey on methods and situation of standards,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 215-216 (2000) 647-651
- [5] Lui Shuo, Lui Zhiqiang, Wang Yong, Lui Fugui and Yan Weili “Study of Single Sheet Tester for A.C. Magnetization Characteristics Measurement,” *ICEM 2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Volume, 18-20 Aug 2001 Page(s):361-364vol.1*
- [6] Kazunori Matsubara, Norio Takahashi, Takayoshi Nakata, Koji Fujiwara (1995) : “Effects of impedances of primary winding and mutual inductor on distortion of flux waveform in single sheet tester.” IEEE Trans. Magn., vol 31, no.6, November 1995.
- [7] D.Son, J.D. Sievert, Y. Cho “Core loss measurements including higher harmonics of magnetic induction in electric steel” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 160(1996)65-67
- [8] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Uman “*Electric Machinery*” Sixth Edition Mcgraw-Hill, 2003
- [9] ธนาพันธุ์ แสนสุข, วีระศักดิ์ วงวิวัฒน์, พิชิต ถ้ายอง “การศึกษาการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยว” การประชุมวิชาการท่งวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 27
- [10] MARTIN CLIFFORD “*Electric/Electronic Motor Data Handbook*”
- [11] Jimmie J. Cathey “*Electricmachines ANALYSIS AND DESIGN APPLYING MATLAB*”
- [12] MULUKUTLA S.SARMA “*Electric Machines Steady- Second Theory and Dynamic Performance*” Second Edition
- [13] Young and Freedman “*University Physics with modern physics*” 11.edition
- [14] พิชิต ถ้ายอง. “*Electrical Machine I เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1.*” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[15] ผศ.ดร.ชัยวุฒิ นัตริอุทัย “*Electrical Engineering Material*” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ภาคผนวก ก.

ตารางผลการทดสอบ

ภาคผนวก ก.
ตารางผลการทดสอบ

ตารางผลการทดสอบแผ่นเหล็กเกรด 27JGH110 NO.1

V_{excite} (V)	$V_h(50Hz)$ (V)	B_H (T)	ϕ_{air} (Wb)	V_b (V)	ϕ_t (Wb)	ϕ_s (Wb)	B_s (T)	H (A/m)
1.3776	0.0456	1.30702E-05	2.09817E-08	0.3965	1.27574E-05	1.2736E-05	0.496547	10.39672
1.6583	0.0502	1.43886E-05	2.30982E-08	0.4764	1.53282E-05	1.53048E-05	0.59669	11.44551
1.9736	0.0555	1.59078E-05	2.55369E-08	0.5671	1.82465E-05	1.82205E-05	0.710367	12.6539
2.1849	0.0592	1.69683E-05	2.72393E-08	0.6284	2.02188E-05	2.01909E-05	0.787195	13.49749
2.4653	0.0641	1.83727E-05	2.9494E-08	0.7089	2.28089E-05	2.27783E-05	0.888085	14.61468
2.7843	0.0697	1.99779E-05	3.20706E-08	0.8003	2.57497E-05	2.57156E-05	1.002636	15.89147
3.0268	0.074	2.12103E-05	3.40492E-08	0.8702	2.79987E-05	2.79616E-05	1.09024	16.87187
3.3146	0.08	2.29301E-05	3.68099E-08	0.9532	3.06692E-05	3.06271E-05	1.194247	18.23986
3.5749	0.0863	2.47359E-05	3.97087E-08	1.0279	3.30727E-05	3.30241E-05	1.287837	19.67625
3.8246	0.0936	2.68282E-05	4.30676E-08	1.1007	3.54151E-05	3.53576E-05	1.379025	21.34063
4.0473	0.1022	2.92932E-05	4.70247E-08	1.164	3.74517E-05	3.73806E-05	1.458273	23.30142
4.389	0.1246	3.57136E-05	5.73315E-08	1.2625	4.0621E-05	4.05089E-05	1.581429	28.40858
4.6936	0.1748	5.01023E-05	8.04297E-08	1.3469	4.33366E-05	4.31244E-05	1.686398	39.85409
4.9541	0.2888	8.27777E-05	1.32884E-07	1.418	4.56242E-05	4.51846E-05	1.77354	65.84588

ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียและค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในแผ่นแกนเหล็กทดสอบเกรด 27JGH110 NO.1

V_{excite} (V)	I_{excite} (mA)	P_{in} (W)	VA (VA)	B_s (T)	Core loss (W/kg)	Apparent Power (VA/kg)
1.3776	8.803	0.00797	0.012127	0.496547	0.078155	0.080343
1.6583	9.953	0.01134	0.016505	0.59669	0.111518	0.114315
1.9736	11.299	0.01581	0.0223	0.710367	0.155771	0.159375
2.1849	12.212	0.01921	0.026682	0.787195	0.18944	0.193649
2.4653	13.397	0.02426	0.033028	0.888085	0.23949	0.244556
2.7843	14.75	0.03062	0.041068	1.002636	0.302528	0.308669
3.0268	15.807	0.03596	0.047845	1.09024	0.355447	0.3625
3.3146	17.178	0.04296	0.056938	1.194247	0.424736	0.433065
3.5749	18.561	0.04991	0.066354	1.287837	0.493401	0.503125
3.8246	20.149	0.05715	0.077062	1.379025	0.56465	0.576109
4.0473	22.032	0.06445	0.08917	1.458273	0.635997	0.649698
4.389	26.751	0.0778	0.11741	1.581429	0.764075	0.784274
4.6936	35.719	0.09371	0.167651	1.686398	0.908645	0.944657
4.9541	55.703	0.11461	0.275958	1.77354	1.067763	1.155343

ตารางผลการทดสอบแผ่นเหล็กเกรด 27JGH110 NO.2

V_{excite} (V)	$V_h(50Hz)$ (V)	B_H (T)	ϕ_{air} (Wb)	V_b (V)	ϕ_i (Wb)	ϕ_s (Wb)	B_s (T)	H (A/m)
1.3666	0.0463	1.32708E-05	2.13037E-08	0.3941	1.26802E-05	1.26587E-05	0.493523	10.55632
1.6466	0.0509	1.45893E-05	2.34203E-08	0.4735	1.52349E-05	1.52113E-05	0.593039	11.60511
1.9601	0.056	1.60511E-05	2.57669E-08	0.5641	1.81499E-05	1.81239E-05	0.706595	12.7679
2.2093	0.0601	1.72262E-05	2.76535E-08	0.6356	2.04505E-05	2.04225E-05	0.79621	13.70269
2.4902	0.0645	1.84874E-05	2.9678E-08	0.7168	2.30631E-05	2.30329E-05	0.897988	14.70588
2.7628	0.0687	1.96912E-05	3.16105E-08	0.7947	2.55695E-05	2.5537E-05	0.995629	15.66348
3.0042	0.0731	2.09524E-05	3.36351E-08	0.8642	2.78057E-05	2.77706E-05	1.08273	16.66667
3.2858	0.0784	2.24715E-05	3.60737E-08	0.9456	3.04247E-05	3.0386E-05	1.184742	17.87506
3.5753	0.084	2.40766E-05	3.86504E-08	1.0296	3.31274E-05	3.30837E-05	1.29001	19.15185
3.8592	0.0917	2.62836E-05	4.21934E-08	1.1108	3.574E-05	3.56879E-05	1.391728	20.90744
4.118	0.1006	2.88346E-05	4.62885E-08	1.1851	3.81306E-05	3.80668E-05	1.48477	22.93662
4.401	0.1135	3.25321E-05	5.22241E-08	1.2661	4.07368E-05	4.06463E-05	1.586144	25.8778
4.6782	0.1471	4.21627E-05	6.76843E-08	1.3452	4.32819E-05	4.31192E-05	1.684763	33.53854
5.0314	0.2884	8.2663E-05	1.327E-07	1.4422	4.64028E-05	4.59373E-05	1.803904	65.75468

ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียและค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในแผ่นแกนเหล็กทดสอบเกรด 27JGH110 NO.2

V_{excite} (V)	I_{excite} (mA)	P_{in} (W)	VA (VA)	B_s (T)	Core loss (W/kg)	Apparent Power (VA/kg)
1.3666	8.977	0.00732	0.012268	0.493523	0.0713	0.123296
1.6466	10.112	0.01041	0.01665	0.593039	0.101746	0.167341
1.9601	11.405	0.01457	0.022355	0.706595	0.142772	0.224673
2.2093	12.38	0.0183	0.027351	0.79621	0.179607	0.274886
2.4902	13.528	0.02314	0.033687	0.897988	0.227413	0.338567
2.7628	14.577	0.02827	0.040273	0.995629	0.278141	0.404757
3.0042	15.614	0.03338	0.046908	1.08273	0.328617	0.471433
3.2858	16.805	0.03979	0.055218	1.184742	0.391952	0.554953
3.5753	18.173	0.04712	0.064974	1.29001	0.464274	0.653004
3.8592	19.819	0.05516	0.076485	1.391728	0.543318	0.768698
4.118	21.743	0.06338	0.089538	1.48477	0.623681	0.899876
4.401	24.898	0.07388	0.109576	1.586144	0.725068	1.101267
4.6782	36.518	0.08786	0.170839	1.684763	0.845488	1.71697
5.0314	60.611	0.11545	0.304958	1.803904	1.056921	3.064906

ตารางผลการทดสอบแผ่นเหล็กเกรด 27JGH110 NO.3

V_{excite} (V)	V_h (50Hz) (V)	B_H (T)	ϕ_{air} (Wb)	V_b (V)	ϕ_t (Wb)	ϕ_s (Wb)	B_s (T)	H (A/m)
1.3746	0.0449	1.28695E-05	2.06596E-08	0.3958	1.27349E-05	1.27136E-05	0.495681	10.23712
1.6516	0.0493	1.41307E-05	2.26841E-08	0.4765	1.53314E-05	1.53085E-05	0.596831	11.24031
1.992	0.055	1.57644E-05	2.53068E-08	0.575	1.85006E-05	1.84751E-05	0.720286	12.5399
2.2392	0.0593	1.69969E-05	2.72854E-08	0.646	2.07851E-05	2.0758E-05	0.80927	13.52029
2.4909	0.0629	1.80288E-05	2.89418E-08	0.7172	2.30759E-05	2.30471E-05	0.898518	14.34109
2.7367	0.0676	1.93759E-05	3.11044E-08	0.7898	2.54118E-05	2.53807E-05	0.989502	15.41268
3.0202	0.0717	2.05511E-05	3.29909E-08	0.8704	2.80051E-05	2.79717E-05	1.090532	16.34747
3.302	0.0756	2.16689E-05	3.47854E-08	0.9525	3.06467E-05	3.06109E-05	1.193448	17.23666
3.5866	0.0825	2.36467E-05	3.79602E-08	1.0339	3.32658E-05	3.32266E-05	1.295431	18.80985
3.8238	0.0881	2.52518E-05	4.05369E-08	1.1026	3.54762E-05	3.54327E-05	1.381507	20.08664
4.1151	0.1006	2.88346E-05	4.62885E-08	1.1863	3.81692E-05	3.81172E-05	1.486275	22.93662
4.3988	0.1187	3.40225E-05	5.46167E-08	1.2677	4.07883E-05	4.07181E-05	1.588057	27.06339
4.6916	0.1509	4.32519E-05	6.94327E-08	1.3508	4.3462E-05	4.3347E-05	1.691719	34.40493
5.0127	0.2797	8.01694E-05	1.28697E-07	1.4417	4.63867E-05	4.61034E-05	1.803433	63.7711

ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียและค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในแผ่นแกนเหล็กทดสอบเกรด 27JGH110 NO.3

V_{excite} (V)	I_{excite} (mA)	P_{in} (W)	VA (VA)	B_s (T)	Core loss (W/kg)	Apparent Power (VA/kg)
1.3746	9.239	0.00714	0.0127	0.495681	0.069148	0.127254
1.6516	10.433	0.01009	0.017231	0.596831	0.098048	0.172657
1.992	11.793	0.01443	0.023492	0.720286	0.140687	0.235387
2.2392	12.739	0.01802	0.028525	0.80927	0.176008	0.285823
2.4909	13.622	0.0221	0.033931	0.898518	0.216237	0.33999
2.7367	14.512	0.02654	0.039715	0.989502	0.260023	0.397946
3.0202	15.569	0.03205	0.047021	1.090532	0.314342	0.471157
3.302	16.674	0.03823	0.055058	1.193448	0.375266	0.551679
3.5866	17.836	0.04599	0.063971	1.295431	0.451896	0.640988
3.8238	18.991	0.05321	0.072618	1.381507	0.523048	0.727633
4.1151	20.694	0.06147	0.085158	1.486275	0.603917	0.853285
4.3988	24.85	0.07264	0.10931	1.588057	0.71053	1.095292
4.6916	35.846	0.08751	0.168175	1.691719	0.840803	1.685121
5.0127	54.161	0.11073	0.271493	1.803433	1.027219	2.720369

ตารางผลการทดสอบแผ่นเหล็กเกรด 27ZH100 NO.1

V_{excite} (V)	V_h (50Hz) (V)	B_H (T)	ϕ_{air} (Wb)	V_b (V)	ϕ_l (Wb)	ϕ_s (Wb)	B_s (T)	H (A/m)
1.3729	0.0421	1.207E-05	1.93712E-08	0.3961	1.27445E-05	1.2725E-05	0.496108	9.598724
1.6871	0.0469	1.344E-05	2.15798E-08	0.4859	1.56338E-05	1.5612E-05	0.608665	10.69312
1.9642	0.0512	1.468E-05	2.35584E-08	0.5658	1.82046E-05	1.8181E-05	0.708814	11.67351
2.1916	0.0544	1.559E-05	2.50308E-08	0.6315	2.03185E-05	2.0293E-05	0.79117	12.4031
2.4637	0.0583	1.671E-05	2.68252E-08	0.7092	2.28185E-05	2.2791E-05	0.888566	13.2923
2.7514	0.0622	1.783E-05	2.86197E-08	0.7924	2.54955E-05	2.5466E-05	0.992861	14.18149
3.0181	0.0658	1.886E-05	3.02762E-08	0.8687	2.79505E-05	2.7919E-05	1.088506	15.00228
3.3441	0.0711	2.038E-05	3.27148E-08	0.9634	3.09974E-05	3.0963E-05	1.207201	16.21067
3.5862	0.0745	2.135E-05	3.42792E-08	1.0332	3.32432E-05	3.3206E-05	1.294696	16.98587
3.8249	0.0787	2.256E-05	3.62118E-08	1.1076	3.56371E-05	3.5596E-05	1.387948	17.94346
4.108	0.0858	2.459E-05	3.94786E-08	1.1842	3.81017E-05	3.8052E-05	1.483906	19.56225
4.3872	0.095	2.723E-05	4.37118E-08	1.2638	4.06628E-05	4.0596E-05	1.58359	21.65983
4.6668	0.1142	3.273E-05	5.25462E-08	1.344	4.32432E-05	4.3133E-05	1.683848	26.03739
5.0255	0.2118	6.071E-05	9.74543E-08	1.4439	4.64575E-05	4.6111E-05	1.80741	48.29002

ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียและค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในแผ่นแกนเหล็กทดสอบเกรด 27ZH100 NO.1

V_{excite} (V)	I_{excite} (mA)	P_{in} (W)	VA (VA)	B_s (T)	Core loss (W/kg)	Apparent Power (VA/kg)
1.3729	8.827	0.00718	0.012119	0.496108	0.070464	0.122657776
1.6871	10.124	0.01063	0.017080	0.608665	0.104686	0.172876522
1.9642	11.215	0.01421	0.022029	0.708814	0.140261	0.222960557
2.1916	12.078	0.01752	0.026470	0.791170	0.173194	0.267916445
2.4637	13.097	0.02913	0.032267	0.888566	0.289977	0.326589867
2.7514	14.186	0.02715	0.039031	0.992861	0.269094	0.395054255
3.0181	15.188	0.0324	0.045839	1.088506	0.321398	0.463956506
3.3441	16.489	0.03964	0.055141	1.207201	0.393509	0.55810592
3.5862	17.524	0.04559	0.062845	1.294696	0.452734	0.636078632
3.8249	18.761	0.05250	0.071759	1.387948	0.521402	0.726305151
4.108	20.300	0.0603	0.083392	1.483906	0.598645	0.844052632
4.3872	22.742	0.06983	0.099774	1.58359	0.692124	1.009855287
4.6668	27.359	0.08184	0.127679	1.683848	0.807127	1.292297381
5.0255	49.195	0.10856	0.247229	1.807410	1.030198	2.502322596

ตารางผลการทดสอบแผ่นเหล็กเกรด 27ZH100 NO.2

V_{excite} (V)	V_h (50Hz) (V)	B_H (T)	ϕ_{air} (Wb)	V_b (V)	ϕ_l (Wb)	ϕ_s (Wb)	B_s (T)	H (A/m)
1.3666	0.0416	1.192E-05	1.91412E-08	0.3941	1.26802E-05	1.2661E-05	0.493608	9.484725
1.6384	0.0459	1.316E-05	2.11197E-08	0.4709	1.51512E-05	1.513E-05	0.589868	10.46512
1.9695	0.0503	1.442E-05	2.31442E-08	0.566	1.82111E-05	1.8188E-05	0.709081	11.46831
2.2056	0.0539	1.545E-05	2.48007E-08	0.6344	2.04118E-05	2.0387E-05	0.794816	12.2891
2.4910	0.0585	1.677E-05	2.69173E-08	0.7167	2.30598E-05	2.3033E-05	0.89797	13.33789
2.7693	0.0624	1.789E-05	2.87117E-08	0.7973	2.56532E-05	2.5624E-05	0.999004	14.22709
3.0462	0.0663	1.9E-05	3.05062E-08	0.8766	2.82046E-05	2.8173E-05	1.098407	15.11628
3.2917	0.0695	1.992E-05	3.19786E-08	0.9472	3.04762E-05	3.0443E-05	1.186909	15.84588
3.5757	0.0739	2.118E-05	3.40032E-08	1.0295	3.31242E-05	3.3088E-05	1.290066	16.84907
3.8694	0.0780	2.238E-05	3.59242E-08	1.1146	3.58623E-05	3.5822E-05	1.396739	17.80096
4.1074	0.0840	2.408E-05	3.86504E-08	1.1826	3.80502E-05	3.8004E-05	1.481931	19.15185
4.3763	0.0929	2.663E-05	4.27455E-08	1.2596	4.05277E-05	4.0468E-05	1.57836	21.18103
4.6817	0.1264	3.623E-05	5.81597E-08	1.3473	4.33494E-05	4.326E-05	1.687768	28.81897
5.0649	0.1828	5.24E-05	8.41107E-08	1.4549	4.68115E-05	4.6583E-05	1.821729	41.67807

ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียและค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในแผ่นแกนเหล็กทดสอบเกรด 27ZH100 NO.2

V_{excite} (V)	I_{excite} (A)	P_{in} (W)	VA (VA)	B_s (T)	$Core\ loss$ (W/kg)	$Apparent\ Power$ (VA/kg)
1.3666	8.641	0.00759	0.011809	0.493608	0.073589	0.117734702
1.6384	9.691	0.01057	0.015878	0.589868	0.102762	0.158302437
1.9695	10.949	0.0149	0.021564	0.709081	0.145208	0.214995568
2.2056	11.807	0.01841	0.026042	0.794816	0.179658	0.259636283
2.4910	12.846	0.0231	0.031999	0.89797	0.225702	0.31903675
2.7693	13.907	0.02832	0.038513	0.999004	0.276954	0.383974627
3.0462	14.809	0.03388	0.045111	1.098407	0.331664	0.449762471
3.2917	15.779	0.03926	0.05194	1.186909	0.384475	0.517843812
3.5757	16.917	0.04627	0.06049	1.290066	0.453327	0.603091893
3.8694	18.152	0.05415	0.070237	1.396739	0.530682	0.70027267
4.1074	19.35	0.0613	0.079478	1.481931	0.600714	0.792404686
4.3763	21.024	0.07034	0.092007	1.57836	0.688957	0.917321348
4.6817	24.225	0.08262	0.113414	1.687768	0.807346	1.130749576
5.0649	37.362	0.10751	0.189235	1.821729	1.032916	1.886687874

ตารางผลการทดสอบแผ่นเหล็กเกรด 27ZH100 NO.3

V_{excite} (V)	$V_h(50Hz)$ (V)	B_H (T)	ϕ_{air} (Wb)	V_b (V)	ϕ_i (Wb)	ϕ_s (Wb)	B_s (T)	H (A/m)
1.3498	0.0418	1.198E-05	1.92332E-08	0.3884	1.24968E-05	1.2476E-05	0.486454	9.530325
1.6580	0.0468	1.341E-05	2.15338E-08	0.4771	1.53507E-05	1.5327E-05	0.597629	10.67032
1.9243	0.051	1.462E-05	2.34663E-08	0.5537	1.78153E-05	1.779E-05	0.693639	11.62791
2.1975	0.055	1.576E-05	2.53068E-08	0.6322	2.03411E-05	2.0314E-05	0.792037	12.5399
2.4807	0.059	1.691E-05	2.71473E-08	0.7141	2.29762E-05	2.2947E-05	0.894700	13.45189
2.7590	0.063	1.806E-05	2.89878E-08	0.7939	2.55438E-05	2.5512E-05	0.994728	14.36389
3.0156	0.0668	1.915E-05	3.07363E-08	0.8682	2.79344E-05	2.7901E-05	1.087861	15.23028
3.3055	0.0711	2.038E-05	3.27148E-08	0.9519	3.06274E-05	3.0591E-05	1.192776	16.21067
3.5825	0.0760	2.178E-05	3.49694E-08	1.0319	3.32014E-05	3.3161E-05	1.293039	17.32786
3.8985	0.0825	2.365E-05	3.79602E-08	1.1232	3.6139E-05	3.6093E-05	1.407448	18.80985
4.1252	0.0878	2.517E-05	4.03989E-08	1.1882	3.82304E-05	3.8175E-05	1.488888	20.01824
4.3879	0.0991	2.84E-05	4.55983E-08	1.2635	4.06532E-05	4.0578E-05	1.583141	22.59462
4.6587	0.1213	3.477E-05	5.58131E-08	1.3411	4.31499E-05	4.3031E-05	1.680083	27.65618
4.9700	0.1807	5.179E-05	8.31444E-08	1.4289	4.59749E-05	4.5726E-05	1.789152	41.19928

ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียและค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในแผ่นแกนเหล็กทดสอบเกรด 27ZH100 NO.3

V_{excite} (V)	I_{excite} (A)	P_{in} (W)	VA (VA)	B_s (T)	$Core\ loss$ (W/kg)	$Apparent\ Power$ (VA/kg)
1.3498	0.008922	0.00737	0.012043	0.486454	0.071903	0.121156093
1.6580	0.010225	0.01085	0.016953	0.597629	0.10621	0.170553823
1.9243	0.011248	0.01435	0.021645	0.693639	0.140802	0.217751775
2.1975	0.012235	0.01837	0.026886	0.792037	0.180592	0.270487047
2.4807	0.013313	0.02321	0.033026	0.894700	0.228508	0.332249086
2.7590	0.014295	0.02833	0.03944	0.994728	0.279254	0.396779728
3.0156	0.015268	0.03359	0.046042	1.087861	0.331361	0.463201014
3.3055	0.016425	0.04021	0.054293	1.192776	0.396928	0.546205609
3.5825	0.017579	0.04711	0.062977	1.293039	0.465239	0.63356909
3.8985	0.019049	0.05566	0.074263	1.407448	0.549738	0.747107912
4.1252	0.020394	0.06279	0.084129	1.488888	0.619974	0.846371517
4.3879	0.022459	0.072	0.098548	1.583141	0.710137	0.991427023
4.6587	0.026519	0.08366	0.123544	1.680083	0.82184	1.242898041
4.9700	0.038674	0.10256	0.19221	1.789152	0.989659	1.9337

ตารางผลการทดสอบแผ่นเหล็กเกรด 27ZH110 NO.1

V_{excite} (V)	$V_h(50Hz)$ (V)	B_H (T)	ϕ_{air} (Wb)	V_b (V)	ϕ_i (Wb)	ϕ_s (Wb)	B_s (T)	H (A/m)
1.3661	0.0442	1.26689E-05	2.04983E-08	0.3946	1.2696E-05	1.26758E-05	0.494188	10.07752
1.6795	0.0492	1.4102E-05	2.27926E-08	0.4843	1.5582E-05	1.55596E-05	0.606617	11.21751
1.9602	0.0534	1.53058E-05	2.47575E-08	0.5652	1.8185E-05	1.81606E-05	0.708022	12.1751
2.1677	0.0567	1.62517E-05	2.63156E-08	0.6249	2.0106E-05	2.00799E-05	0.782849	12.9275
2.4611	0.061	1.74842E-05	2.84149E-08	0.7086	2.2799E-05	2.27708E-05	0.887765	13.90789
2.7791	0.0653	1.87167E-05	3.06339E-08	0.8003	2.575E-05	2.5719E-05	1.002715	14.88828
3.0481	0.0695	1.99205E-05	3.28823E-08	0.8775	2.8234E-05	2.82007E-05	1.099478	15.84588
3.2757	0.073	2.09237E-05	3.50033E-08	0.9437	3.0364E-05	3.03286E-05	1.182456	16.64387
3.5879	0.078	2.23569E-05	3.84691E-08	1.0344	3.3282E-05	3.32434E-05	1.296139	17.78386
3.8461	0.0826	2.36753E-05	4.22704E-08	1.108	3.565E-05	3.56077E-05	1.388379	18.83265
4.1293	0.0887	2.54238E-05	4.97256E-08	1.1899	3.8285E-05	3.82353E-05	1.491004	20.22344
4.3874	0.0974	2.79174E-05	6.30163E-08	1.2642	4.0676E-05	4.06127E-05	1.584049	22.20703
4.6701	0.1118	3.20448E-05	9.37839E-08	1.3256	4.2651E-05	4.25574E-05	1.66081	25.4902
5.0452	0.1759	5.04176E-05	2.28792E-07	1.4315	4.6059E-05	4.58298E-05	1.7925	40.10488

ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียและค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ในแผ่นแกนเหล็กทดสอบเกรด 27ZH110 NO.1

V_{excite} (V)	I_{excite} (mA)	P_{in} (W)	VA (VA)	B_s (T)	$Core\ loss$ (W/kg)	$Apparent\ Power$ (VA/kg)
1.3661	8.522	0.00721	0.011642	0.494188	0.071884	0.116071
1.6795	9.804	0.01063	0.016466	0.606617	0.105982	0.164166
1.9602	10.935	0.01425	0.021435	0.708022	0.142074	0.213707
2.1677	11.712	0.01725	0.025388	0.782849	0.171984	0.253122
2.4611	12.712	0.02191	0.031286	0.887765	0.218445	0.311919
2.7791	13.934	0.02767	0.038724	1.002715	0.275872	0.386082
3.0481	14.935	0.03303	0.045523	1.099478	0.329312	0.453872
3.2757	15.828	0.03807	0.051848	1.182456	0.379561	0.516927
3.5879	17.099	0.04558	0.06135	1.296139	0.454437	0.61166
3.8461	18.228	0.0522	0.070107	1.388379	0.520439	0.69897
4.1293	19.745	0.06062	0.081533	1.491004	0.604387	0.812892
4.3874	21.498	0.069	0.09432	1.584049	0.687936	0.940382
4.6701	25.248	0.08085	0.117911	1.66081	0.806082	1.17558
5.0452	39.237	0.1044	0.197959	1.7925	1.040877	1.973664

ตารางผลการทดสอบแผ่นเหล็กเกรด 27ZH110 NO.2

V_{excite} (V)	V_h (50Hz) (V)	B_H (T)	ϕ_{air} (Wb)	V_b (V)	ϕ_t (Wb)	ϕ_s (Wb)	B_s (T)	H (A/m)
1.3625	0.0455	1.30415E-05	2.09356E-08	0.3922	1.2619E-05	1.25957E-05	0.491154	10.37392
1.6665	0.052	1.49046E-05	2.39265E-08	0.479	1.5412E-05	1.53863E-05	0.599919	11.85591
1.9131	0.0559	1.60224E-05	2.57209E-08	0.5505	1.7712E-05	1.76852E-05	0.689537	12.7451
2.1884	0.0604	1.73122E-05	2.77915E-08	0.6299	2.0267E-05	2.02383E-05	0.789055	13.77109
2.4828	0.0653	1.87167E-05	3.00461E-08	0.7142	2.2979E-05	2.29492E-05	0.894712	14.88828
2.7612	0.0686	1.96626E-05	3.15645E-08	0.7944	2.556E-05	2.5528E-05	0.995255	15.64068
3.0086	0.0717	2.05511E-05	3.29909E-08	0.8659	2.786E-05	2.78269E-05	1.084888	16.34747
3.2995	0.0754	2.16116E-05	3.46934E-08	0.9496	3.0553E-05	3.05178E-05	1.189814	17.19106
3.5732	0.0793	2.27295E-05	3.64878E-08	1.0292	3.3115E-05	3.30763E-05	1.289593	18.08026
3.8779	0.0837	2.39906E-05	3.85124E-08	1.117	3.594E-05	3.58971E-05	1.399649	19.08345
4.0935	0.0874	2.50511E-05	4.02148E-08	1.1802	3.7973E-05	3.79259E-05	1.47886	19.92704
4.3885	0.0959	2.74875E-05	4.41259E-08	1.2452	4.0064E-05	4.00037E-05	1.560243	21.86503
4.6665	0.1067	3.0583E-05	4.90952E-08	1.3228	4.2561E-05	4.24742E-05	1.657389	24.32741
5.001	0.1528	4.37965E-05	7.0307E-08	1.4185	4.564E-05	4.54354E-05	1.776607	34.83813

ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียและค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ในแผ่นแกนเหล็กทดสอบเกรด 27ZH110 NO.2

V_{excite} (V)	I_{excite} (mA)	P_{in} (W)	VA (VA)	B_s (T)	Core loss (W/kg)	Apparent Power (VA/kg)
1.3625	0.009261	0.00845	0.012618	0.491154	0.083096	0.127714
1.6665	0.010507	0.01198	0.01751	0.599919	0.118126	0.177226
1.9131	0.011508	0.01534	0.022016	0.689537	0.15151	0.222834
2.1884	0.012475	0.01938	0.0273	0.789055	0.191743	0.276319
2.4828	0.013444	0.02415	0.033379	0.894712	0.239311	0.337842
2.7612	0.014447	0.02924	0.039891	0.995255	0.290036	0.403756
3.0086	0.015331	0.0343	0.046125	1.084888	0.340505	0.466851
3.2995	0.016337	0.04059	0.053904	1.189814	0.403266	0.545586
3.5732	0.017323	0.04702	0.061899	1.289593	0.467406	0.626503
3.8779	0.018588	0.05514	0.072082	1.399649	0.548305	0.729579
4.0935	0.019486	0.06112	0.079766	1.47886	0.607863	0.807348
4.3885	0.0213	0.07063	0.093475	1.560243	0.702021	0.946104
4.6665	0.024144	0.08123	0.112668	1.657389	0.805646	1.140364
5.001	0.034335	0.10006	0.171709	1.776607	0.979343	1.737949

ตารางผลการทดสอบแผ่นเหล็กเกรด 27ZH110 NO.3

V_{excite} (V)	V_h (50Hz) (V)	B_H (T)	ϕ_{air} (Wb)	V_b (V)	ϕ_t (Wb)	ϕ_s (Wb)	B_s (T)	H (A/m)
1.3489	0.0484	1.38727E-05	2.227E-08	0.3887	1.2506E-05	1.24842E-05	0.486712	11.03511
1.6715	0.0539	1.54492E-05	2.48007E-08	0.4813	1.5486E-05	1.5461E-05	0.60277	12.2891
1.9798	0.058	1.66243E-05	2.66872E-08	0.5702	1.8346E-05	1.83195E-05	0.714211	13.2239
2.2001	0.0609	1.74555E-05	2.80216E-08	0.6336	2.0386E-05	2.03581E-05	0.793687	13.88509
2.4838	0.0645	1.84874E-05	2.9678E-08	0.7142	2.2979E-05	2.29497E-05	0.894726	14.70588
2.796	0.0686	1.96626E-05	3.15645E-08	0.8046	2.5888E-05	2.58565E-05	1.008049	15.64068
3.013	0.0716	2.05224E-05	3.29449E-08	0.8665	2.788E-05	2.78467E-05	1.085642	16.32467
3.3006	0.0754	2.16116E-05	3.46934E-08	0.9505	3.0582E-05	3.05477E-05	1.190942	17.19106
3.5745	0.0795	2.27868E-05	3.65799E-08	1.0298	3.3134E-05	3.30973E-05	1.290342	18.12586
3.8648	0.0844	2.41913E-05	3.88345E-08	1.1137	3.5833E-05	3.57945E-05	1.395497	19.24305
4.1169	0.0891	2.55384E-05	4.09971E-08	1.1847	3.8118E-05	3.80768E-05	1.484474	20.31464
4.3806	0.0922	2.64269E-05	4.24234E-08	1.2418	3.9955E-05	3.99125E-05	1.556044	21.02143
4.6632	0.103	2.95225E-05	4.73928E-08	1.3231	4.2571E-05	4.25234E-05	1.657832	23.48382
5.0846	0.1484	4.25353E-05	6.82824E-08	1.4442	4.6467E-05	4.63989E-05	1.808924	33.83493

ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียและค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ในแผ่นแกนเหล็กทดสอบเกรด 27ZH110 NO.3

V_{excite} (V)	I_{excite} (mA)	P_{in} (W)	VA (VA)	B_s (T)	Core loss (W/kg)	Apparent Power (VA/kg)
1.3489	9.067	0.00768	0.01223	0.486712	0.074948	0.123043
1.6715	10.47	0.01138	0.017501	0.60277	0.111399	0.176062
1.9798	11.69	0.0155	0.023144	0.714211	0.152086	0.232836
2.2001	12.509	0.01879	0.027521	0.793687	0.184626	0.276872
2.4838	13.497	0.02333	0.033524	0.894726	0.229577	0.337262
2.796	14.643	0.0291	0.040942	1.008049	0.286717	0.41189
3.013	15.4	0.03328	0.0464	1.085642	0.328128	0.466803
3.3006	16.49	0.03952	0.054427	1.190942	0.389926	0.547554
3.5745	17.555	0.04602	0.06275	1.290342	0.454297	0.631291
3.8648	18.643	0.05334	0.072051	1.395497	0.526829	0.724864
4.1169	19.748	0.06054	0.081301	1.484474	0.598069	0.817913
4.3806	21.13	0.0685	0.092562	1.556044	0.676558	0.931208
4.6632	23.091	0.07845	0.107678	1.657832	0.774216	1.083279
5.0846	31.385	0.09962	0.15958	1.808924	0.974466	1.605434

ตารางผลการทดสอบแผ่นเหล็กเกรด 35JGH135 NO.1

V_{excite} (V)	V_h (50Hz) (V)	B_H (T)	ϕ_{air} (Wb)	V_b (V)	ϕ_t (Wb)	ϕ_s (Wb)	B_s (T)	H (A/m)
1.8081	0.0492	1.4102E-05	2.25063E-08	0.5199	1.67278E-05	1.67051E-05	0.4971813	11.21751166
2.1906	0.0553	1.58504E-05	2.52967E-08	0.6306	2.02896E-05	2.0264E-05	0.6031035	12.60830071
2.5477	0.0605	1.73409E-05	2.76754E-08	0.7328	2.35779E-05	2.35498E-05	0.7008985	13.79389137
2.8987	0.0659	1.88887E-05	3.01456E-08	0.8342	2.68404E-05	2.68098E-05	0.7979246	15.02508168
3.2538	0.0709	2.03218E-05	3.24328E-08	0.9363	3.01255E-05	3.00921E-05	0.8956265	16.1650727
3.6146	0.0768	2.20129E-05	3.51317E-08	1.0404	3.34749E-05	3.34386E-05	0.9952313	17.51026211
3.9570	0.0819	2.34747E-05	3.74647E-08	1.1399	3.66763E-05	3.6637E-05	1.0904421	18.67305295
4.3153	0.0877	2.51371E-05	4.01179E-08	1.2431	3.99968E-05	3.99534E-05	1.1891864	19.99544254
4.6833	0.0943	2.70289E-05	4.3137E-08	1.3487	4.33945E-05	4.33454E-05	1.2902181	21.50023069
5.0665	0.1027	2.94365E-05	4.69795E-08	1.4594	4.69562E-05	4.6898E-05	1.396109	23.41541561
5.3936	0.1109	3.17869E-05	5.07306E-08	1.5542	5.00064E-05	4.99338E-05	1.4867769	25.28500088
5.7753	0.1327	3.80353E-05	6.07028E-08	1.6637	5.35296E-05	5.342E-05	1.5913363	30.25536174
6.1707	0.1785	5.11628E-05	8.16538E-08	1.7759	5.71396E-05	5.69413E-05	1.6981543	40.69767951
6.4979	0.319	9.14338E-05	1.45925E-07	1.868	6.0103E-05	5.95724E-05	1.7844356	72.73142725

ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียและค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในแผ่นแกนเหล็กทดสอบเกรด 35JGH135 NO.1

V_{excite} (V)	I_{excite} (mA)	P_{in} (W)	VA (VA)	B_s (T)	Core loss (W/kg)	Apparent Power (VA/kg)
1.8081	9.876	0.01274	0.017857	0.4971813	0.096718	0.138532
2.1906	11.453	0.01837	0.025089	0.6031035	0.139664	0.194639
2.5477	12.861	0.02443	0.032766	0.7008985	0.185934	0.254197
2.8987	14.227	0.0312	0.04124	0.7979246	0.237651	0.319936
3.2538	15.629	0.03894	0.050854	0.8956265	0.296789	0.39452
3.6146	17.069	0.04758	0.061698	0.9952313	0.362795	0.478647
3.9570	18.468	0.05659	0.073078	1.0904421	0.431614	0.566935
4.3153	20.049	0.06704	0.086517	1.1891864	0.511362	0.671198
4.6833	21.834	0.07875	0.102255	1.2902181	0.600583	0.793291
5.0665	24.095	0.09227	0.122077	1.396109	0.703215	0.94707
5.3936	26.652	0.10495	0.14375	1.4867769	0.798767	1.115207
5.7753	31.432	0.12209	0.181529	1.5913363	0.925707	1.408295
6.1707	42.739	0.14486	0.26373	1.6981543	1.084139	2.046001
6.4979	70.813	0.17495	0.460136	1.7844356	1.248328	3.569711

ตารางผลการทดสอบแผ่นเหล็กเกรด 35JGH135 NO.2

V_{excite} (V)	V_h (50Hz) (V)	B_H (T)	ϕ_{air} (Wb)	V_b (V)	ϕ_t (Wb)	ϕ_s (Wb)	B_s (T)	H (A/m)
1.8055	0.04609	1.32106E-05	2.10836E-08	0.5188	1.66924E-05	1.66708E-05	0.4961703	10.50843725
2.1524	0.052457	1.50356E-05	2.39961E-08	0.6188	1.99099E-05	1.98856E-05	0.5918427	11.96010182
2.5389	0.058256	1.66977E-05	2.66489E-08	0.7303	2.34974E-05	2.34704E-05	0.698535	13.2822634
2.8771	0.062923	1.80354E-05	2.87838E-08	0.8273	2.66184E-05	2.6589E-05	0.7913577	14.34633102
3.2503	0.068721	1.96972E-05	3.1436E-08	0.9354	3.00965E-05	3.00643E-05	0.8947943	15.66826461
3.5949	0.074307	2.12983E-05	3.39913E-08	1.035	3.33012E-05	3.32659E-05	0.9900943	16.94186258
3.9677	0.079681	2.28387E-05	3.64496E-08	1.1425	3.676E-05	3.67214E-05	1.092962	18.16712494
4.3349	0.08555	2.45209E-05	3.91343E-08	1.2483	4.01641E-05	4.01216E-05	1.1941952	19.5052464
4.6718	0.091985	2.63653E-05	4.2078E-08	1.3464	4.33205E-05	4.32726E-05	1.2880472	20.97241484
5.0211	0.098844	2.83313E-05	4.52156E-08	1.4453	4.65026E-05	4.6447E-05	1.3826595	22.53625453
5.402	0.1119	3.20735E-05	5.1188E-08	1.5549	5.0029E-05	4.99607E-05	1.4874336	25.51299909
5.7654	0.130875	3.75122E-05	5.9868E-08	1.6598	5.34041E-05	5.33015E-05	1.5876265	29.83926502
6.0975	0.162523	4.65834E-05	7.43452E-08	1.7538	5.64286E-05	5.62601E-05	1.6772091	37.0549522
6.5074	0.304117	8.71679E-05	1.39117E-07	1.8679	6.00997E-05	5.9591E-05	1.7845424	69.33812997

ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียและค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ในแผ่นแกนเหล็กทดสอบเกรด 35JGH135 NO.2

V_{excite} (V)	I_{excite} (A)	P_{in} (W)	VA (VA)	B_s (T)	Core loss (W/kg)	Apparent Power (VA/kg)
1.8055	9.597	0.01273	0.017327	0.4961703	0.096608	0.134217
2.1524	11.075	0.01784	0.023838	0.5918427	0.135527	0.184646
2.5389	12.561	0.02434	0.031891	0.698535	0.185114	0.247027
2.8771	13.841	0.03073	0.039822	0.7913577	0.233878	0.308458
3.2503	15.315	0.03891	0.049778	0.8947943	0.296307	0.38558
3.5949	16.631	0.04711	0.059787	0.9900943	0.358912	0.463104
3.9677	18.087	0.05699	0.071764	1.0929620	0.434346	0.555878
4.3349	19.563	0.06754	0.084804	1.1941952	0.514860	0.656883
4.6718	21.021	0.07809	0.098206	1.2880472	0.595296	0.760696
5.0211	22.745	0.09017	0.114205	1.3826595	0.687231	0.884624
5.4020	25.059	0.1045	0.135369	1.4874336	0.795831	1.048557
5.7654	28.690	0.12039	0.165409	1.5876265	0.914681	1.28125
6.0975	35.681	0.13851	0.217565	1.6772091	1.045277	1.685243
6.5074	63.164	0.17203	0.411033	1.7845424	1.246002	3.183837

ตารางผลการทดสอบแผ่นเหล็กเกรด 35JGH135 NO.3

V_{excite} (V)	$V_h(50Hz)$ (V)	B_H (T)	ϕ_{air} (Wb)	V_b (V)	ϕ_l (Wb)	ϕ_s (Wb)	B_s (T)	H (A/m)
1.8049	0.0461	1.32135E-05	2.10882E-08	0.5193	1.67085E-05	1.66874E-05	0.4966490	10.51071723
2.1865	0.054	1.54778E-05	2.4702E-08	0.6284	2.02188E-05	2.01941E-05	0.6010145	12.31190304
2.5452	0.0602	1.72549E-05	2.75381E-08	0.7323	2.35618E-05	2.35342E-05	0.7004237	13.72549191
2.8818	0.0657	1.88313E-05	3.00541E-08	0.829	2.66731E-05	2.6643E-05	0.7929478	14.97948204
3.2522	0.0712	2.04078E-05	3.257E-08	0.936	3.01158E-05	3.00833E-05	0.8953351	16.23347216
3.6051	0.0755	2.16403E-05	3.4537E-08	1.0379	3.33945E-05	3.33599E-05	0.9928550	17.21386444
4.0258	0.0811	2.32454E-05	3.70987E-08	1.1596	3.73102E-05	3.72731E-05	1.1093175	18.49065439
4.2942	0.0859	2.46212E-05	3.92945E-08	1.2372	3.98069E-05	3.97677E-05	1.1835612	19.58504577
4.7021	0.0915	2.62263E-05	4.18561E-08	1.3532	4.35393E-05	4.34974E-05	1.2945654	20.86183571
5.0519	0.1002	2.872E-05	4.58359E-08	1.4537	4.67728E-05	4.6727E-05	1.3906848	22.84542009
5.3868	0.1098	3.14716E-05	5.02274E-08	1.5511	4.99067E-05	4.98565E-05	1.4838234	25.03420286
5.7165	0.1268	3.63442E-05	5.80039E-08	1.6445	5.29118E-05	5.28538E-05	1.5730308	28.91017233
6.0820	0.1634	4.68347E-05	7.47464E-08	1.7484	5.62548E-05	5.61801E-05	1.6720262	37.25490662
6.4878	0.3126	8.95994E-05	1.42997E-07	1.8607	5.98681E-05	5.97251E-05	1.7775323	71.27223874

ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียและค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ในแผ่นแกนเหล็กทดสอบเกรด 35JGH135 NO.3

V_{excite} (V)	I_{excite} (mA)	P_{in} (W)	VA (VA)	B_s (T)	Core loss (W/kg)	Apparent Power (VA/kg)
1.8049	9.574	0.01267	0.01728	0.4966490	0.096602	0.134476
2.1865	11.081	0.01814	0.024229	0.6010145	0.138492	0.188549
2.5452	12.517	0.02429	0.031858	0.7004237	0.185613	0.247924
2.8818	13.798	0.03071	0.039763	0.7929478	0.23484	0.30944
3.2522	15.183	0.03858	0.049378	0.8953351	0.29521	0.384266
3.6051	16.537	0.04713	0.059618	0.9928550	0.360811	0.46395
4.0258	18.13	0.05823	0.072988	1.1093175	0.445989	0.567998
4.2942	19.169	0.06587	0.082316	1.1835612	0.5046	0.640588
4.7021	20.855	0.07856	0.098062	1.2945654	0.601885	0.763131
5.0519	22.557	0.0905	0.113956	1.3906848	0.693193	0.886815
5.3868	24.659	0.10313	0.132833	1.4838234	0.789318	1.033721
5.7165	27.912	0.11752	0.159559	1.5730308	0.897576	1.241704
6.082	35.734	0.13728	0.217334	1.6720262	1.040503	1.691317
6.4878	65.097	0.17137	0.422336	1.7775323	1.241281	3.286664

ตารางผลการทดสอบแผ่นเหล็กเกรด 35JGH155 NO.1

V_{excite} (V)	$V_h(50Hz)$ (V)	B_H (T)	ϕ_{air} (Wb)	V_b (V)	ϕ_l (Wb)	ϕ_s (Wb)	B_s (T)	H (A/m)
1.7980	0.0534	1.522E-05	2.43083E-08	0.5165	1.66184E-05	1.65937E-05	0.493872	12.10509
2.1766	0.0594	1.693E-05	2.70396E-08	0.6253	2.0119E-05	2.00915E-05	0.597976	13.46521
2.4962	0.0653	1.861E-05	2.97254E-08	0.7173	2.30792E-05	2.30488E-05	0.685995	14.80266
2.8756	0.0715	2.038E-05	3.25477E-08	0.8269	2.66055E-05	2.65722E-05	0.790863	16.20812
3.2384	0.0774	2.206E-05	3.52334E-08	0.9311	2.99582E-05	2.99218E-05	0.890564	17.54558
3.5966	0.0828	2.36E-05	3.76916E-08	1.0349	3.32979E-05	3.32586E-05	0.989888	18.76969
3.9531	0.0886	2.525E-05	4.03318E-08	1.1378	3.66088E-05	3.65658E-05	1.088346	20.08447
4.2967	0.0942	2.684E-05	4.2881E-08	1.2366	3.97876E-05	3.97405E-05	1.18288	21.35392
4.6973	0.1023	2.915E-05	4.65682E-08	1.3515	4.34846E-05	4.34302E-05	1.292797	23.19008
5.0431	0.1103	3.143E-05	5.02099E-08	1.4504	4.66667E-05	4.66024E-05	1.387395	25.00358
5.3762	0.1207	3.44E-05	5.49441E-08	1.5461	4.97458E-05	4.96637E-05	1.478895	27.36112
5.7768	0.1424	4.058E-05	6.48223E-08	1.6605	5.34266E-05	5.32983E-05	1.588149	32.28023
6.0994	0.1857	5.292E-05	8.45329E-08	1.7514	5.63514E-05	5.6119E-05	1.674608	42.09578
6.4890	0.3463	9.869E-05	1.5764E-07	1.8587	5.98037E-05	5.92213E-05	1.775181	78.50172

ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียและค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏในแผ่นแกนเหล็กทดสอบเกรด 35JGH155 NO.1

V_{excite} (V)	I_{excite} (A)	P_{in} (W)	VA (VA)	B_s (T)	Core loss (W/kg)	Apparent Power (VA/kg)
1.7980	10.292	0.01371	0.018505	0.493872	0.10398	0.14345
2.1766	11.857	0.01959	0.025808	0.597976	0.148809	0.200062
2.4962	13.195	0.02532	0.032937	0.685995	0.1925	0.255328
2.8756	14.728	0.03306	0.042352	0.790863	0.251571	0.328309
3.2384	16.132	0.04126	0.052242	0.890564	0.314196	0.404976
3.5966	17.557	0.05043	0.063146	0.989888	0.38424	0.4895
3.9531	19.02	0.06042	0.075188	1.088346	0.46052	0.582852
4.2967	20.422	0.0707	0.087747	1.18288	0.53901	0.680211
4.6973	22.276	0.08402	0.104637	1.292797	0.640547	0.81114
5.0431	24.2	0.09674	0.122043	1.387395	0.737211	0.94607
5.3762	26.585	0.11021	0.142926	1.478895	0.839001	1.107956
5.7768	31.423	0.12952	0.181524	1.588149	0.982599	1.407166
6.0994	40.19	0.14984	0.245135	1.674608	1.126491	1.90027
6.4890	74.668	0.18858	0.484521	1.775181	1.340846	3.755974

ตารางผลการทดสอบแผ่นเหล็กเกรด 35JGH155 NO.2

V_{excite} (V)	$V_h(50Hz)$ (V)	B_H (T)	ϕ_{air} (Wb)	V_b (V)	ϕ_t (Wb)	ϕ_s (Wb)	B_s (T)	H (A/m)
1.8047	0.0530	1.51E-05	2.41263E-08	0.5185	1.66828E-05	1.66586E-05	0.495792	12.01441
2.1975	0.0591	1.684E-05	2.69031E-08	0.6316	2.03218E-05	2.02948E-05	0.604013	13.3972
2.5883	0.0652	1.858E-05	2.96799E-08	0.7438	2.39318E-05	2.39021E-05	0.711372	14.77999
2.8962	0.0700	1.995E-05	3.18649E-08	0.8327	2.67921E-05	2.57603E-05	0.796437	15.86809
3.2527	0.0753	2.146E-05	3.42775E-08	0.9357	3.01062E-05	3.00719E-05	0.894997	17.06953
3.6007	0.0810	2.308E-05	3.68722E-08	1.0365	3.33494E-05	3.33125E-05	0.991445	18.36165
3.9539	0.0864	2.462E-05	3.93304E-08	1.1386	3.66345E-05	3.65952E-05	1.089142	19.58576
4.3472	0.0928	2.645E-05	4.22437E-08	1.2512	4.02574E-05	4.02152E-05	1.196880	21.03656
4.6613	0.0985	2.807E-05	4.48384E-08	1.3412	4.31532E-05	4.31083E-05	1.282986	22.32867
5.0512	0.1058	3.015E-05	4.81615E-08	1.4557	4.68372E-05	4.67890E-05	1.392531	23.98349
5.3836	0.1177	3.354E-05	5.35785E-08	1.5491	4.98423E-05	4.97888E-05	1.481808	26.68106
5.7881	0.1417	4.038E-05	6.45036E-08	1.6650	5.35714E-05	5.35069E-05	1.592468	32.12155
6.0738	0.1955	5.571E-05	8.8994E-08	1.7457	5.61680E-05	5.60790E-05	1.669017	44.31731
6.5169	0.4546	0.0001296	2.0694E-07	1.8660	6.00386E-05	5.98317E-05	1.780704	103.0519

ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียและค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ในแผ่นแกนเหล็กทดสอบเกรด 35JGH155 NO.2

V_{excite} (V)	I_{excite} (A)	P_{in} (W)	VA (VA)	B_s (T)	$Core\ loss$ (W/kg)	$Apparent\ Power$ (VA/kg)
1.8047	10.272	0.01369	0.018538	0.495792	0.105386	0.145853
2.1975	11.843	0.01974	0.026025	0.604013	0.152221	0.204760
2.5883	13.446	0.02688	0.034802	0.711372	0.207504	0.273818
2.8962	14.693	0.03321	0.042554	0.796437	0.256534	0.334806
3.2527	16.096	0.04135	0.052355	0.894997	0.319627	0.411923
3.6007	17.493	0.05018	0.062987	0.991445	0.388066	0.495571
3.9539	18.917	0.05992	0.074796	1.089142	0.463556	0.588481
4.3472	20.580	0.07188	0.089465	1.196880	0.556208	0.703898
4.6613	22.027	0.08221	0.102674	1.282986	0.636125	0.807824
5.0512	24.026	0.09589	0.121360	1.392531	0.741729	0.954840
5.3836	26.629	0.10976	0.143360	1.481808	0.847951	1.127930
5.7881	32.236	0.12966	0.186585	1.592468	0.997249	1.468019
6.0738	42.173	0.14900	0.256150	1.669017	1.133124	2.015345
6.5169	93.784	0.20100	0.611181	1.780704	1.387669	4.808662

ตารางผลการทดสอบแผ่นเหล็กเกรด 35JGH155 NO.3

V_{excite} (V)	V_h (50Hz) (V)	B_H (T)	ϕ_{air} (Wb)	V_b (V)	ϕ_l (Wb)	ϕ_s (Wb)	B_s (T)	H (A/m)
1.8251	0.0499	1.422E-05	2.27151E-08	0.5241	1.68629E-05	1.68399E-05	0.501197	11.31168
2.161	0.0556	1.584E-05	2.53098E-08	0.6211	1.99839E-05	1.99582E-05	0.594006	12.6038
2.5902	0.0628	1.79E-05	2.85873E-08	0.7448	2.3964E-05	2.39348E-05	0.712362	14.23595
2.9797	0.0687	1.958E-05	3.12731E-08	0.8569	2.75708E-05	2.75387E-05	0.819628	15.5734
3.2669	0.0732	2.086E-05	3.33216E-08	0.9398	3.02381E-05	3.02037E-05	0.898952	16.59349
3.6036	0.0790	2.251E-05	3.59618E-08	1.0373	3.33752E-05	3.33375E-05	0.992238	17.90828
3.9664	0.0842	2.4E-05	3.83289E-08	1.1415	3.67278E-05	3.66867E-05	1.091949	19.08705
4.3252	0.0903	2.573E-05	4.11057E-08	1.2451	4.00611E-05	4.00155E-05	1.191072	20.46984
4.6822	0.0971	2.767E-05	4.42011E-08	1.3478	4.33655E-05	4.33135E-05	1.289325	22.01131
5.0450	0.1039	2.961E-05	4.72966E-08	1.4525	4.67342E-05	4.66731E-05	1.389492	23.55278
5.4026	0.1159	3.303E-05	5.27591E-08	1.5548	5.00257E-05	4.99441E-05	1.487291	26.27303
5.7656	0.1343	3.827E-05	6.1135E-08	1.6582	5.33526E-05	5.32275E-05	1.586057	30.44407
6.0999	0.1859	5.298E-05	8.4624E-08	1.7537	5.64254E-05	5.6176E-05	1.676807	42.14112
6.5122	0.3909	0.0001114	1.77943E-07	1.8663	6.00483E-05	5.93718E-05	1.781855	88.61196

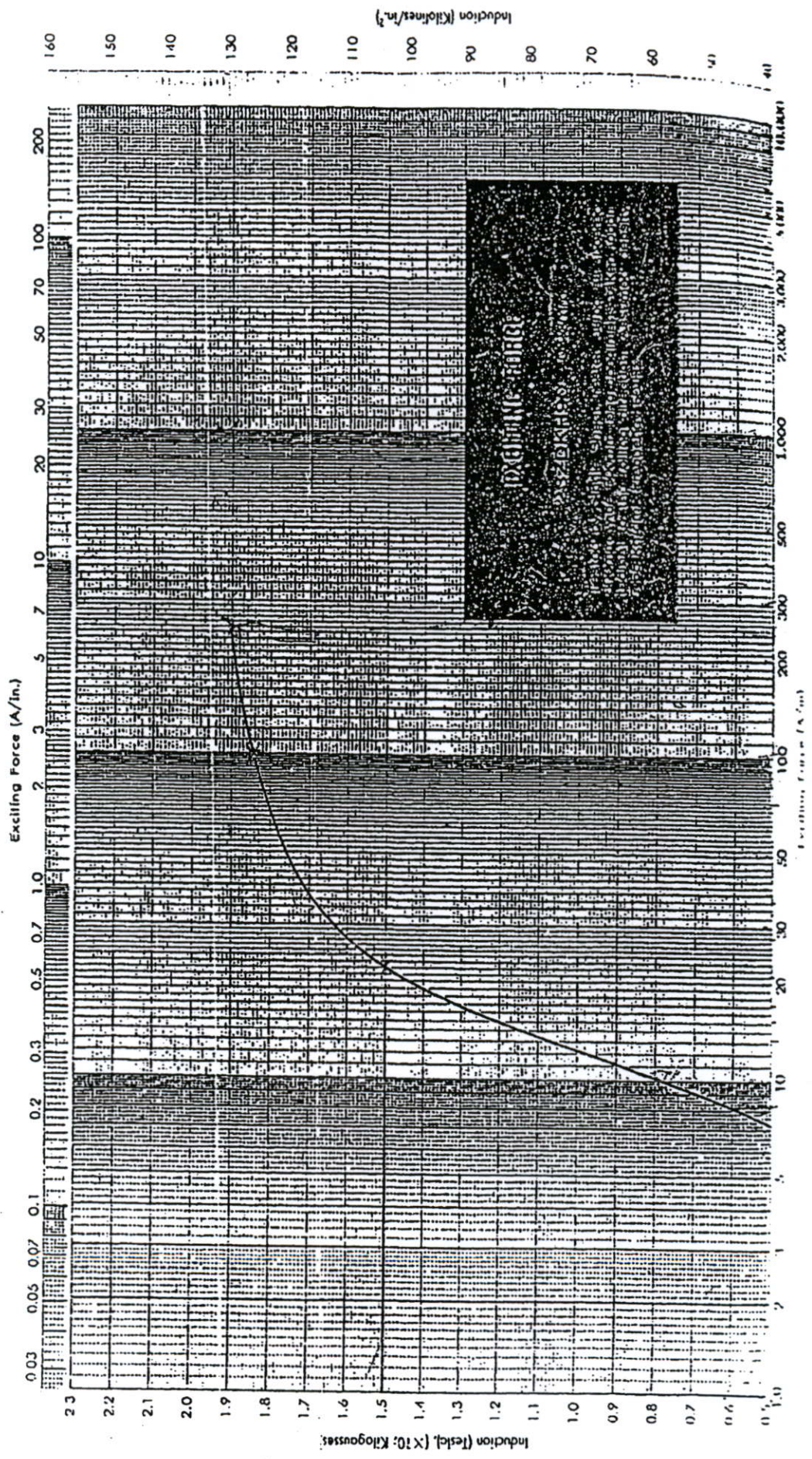
ตารางแสดงผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียและค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ในแผ่นแกนเหล็กทดสอบเกรด 35JGH155 NO.3

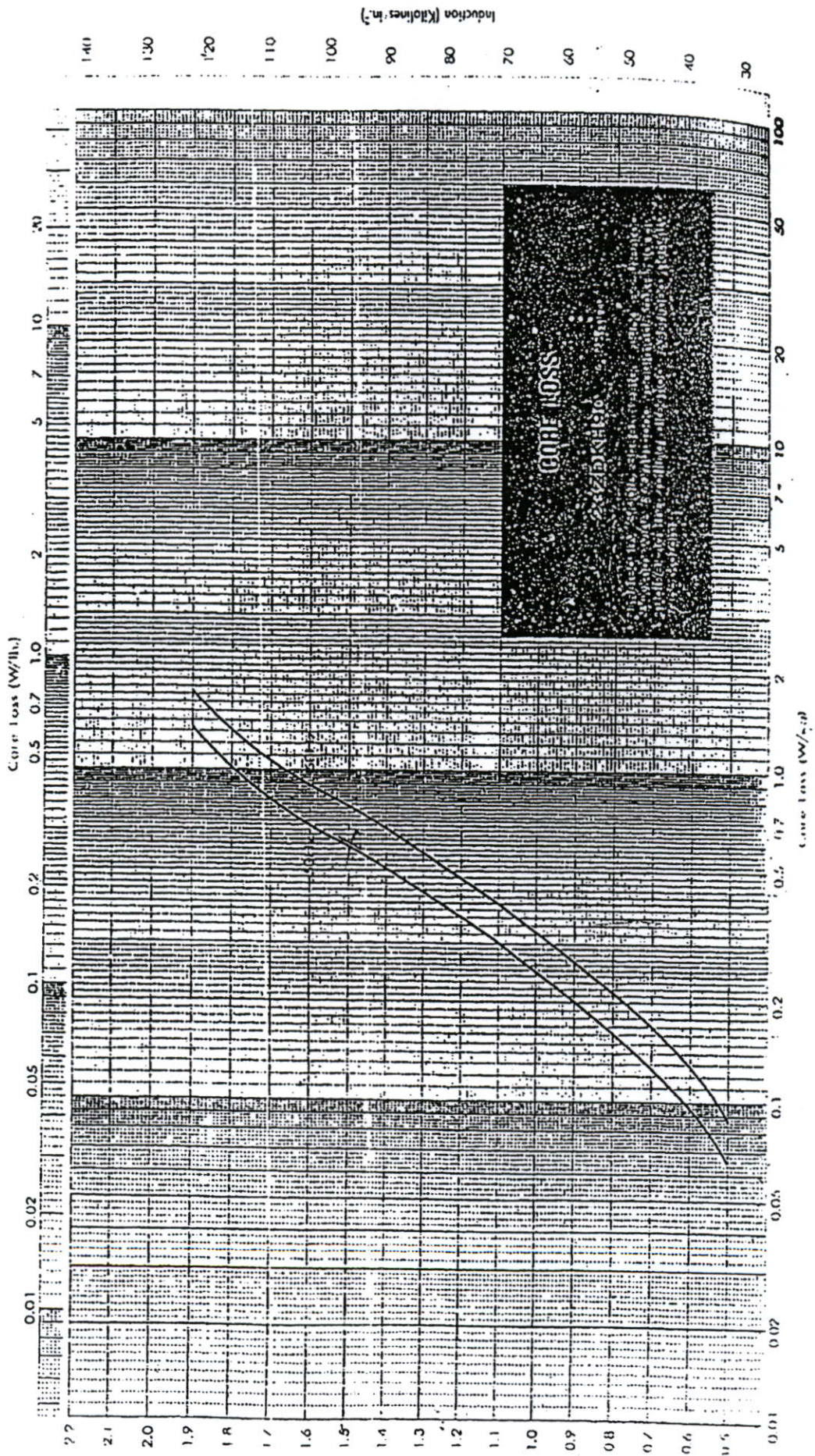
V_{excite} (V)	I_{excite} (mA)	P_{in} (W)	VA (VA)	B_s (T)	$Core\ loss$ (W/kg)	$Apparent\ Power$ (VA/kg)
1.8251	10.162	0.01385	0.018547	0.501197	0.106778	0.146037
2.161	11.566	0.01906	0.024994	0.594006	0.147129	0.196804
2.5902	13.308	0.02675	0.034470	0.712362	0.206725	0.271420
2.9797	14.884	0.03498	0.044350	0.819628	0.270549	0.349211
3.2669	15.971	0.04152	0.052176	0.898952	0.321305	0.410832
3.6036	17.361	0.05014	0.062562	0.992238	0.388158	0.492615
3.9664	18.817	0.06023	0.074636	1.091949	0.466445	0.587683
4.3252	20.361	0.07120	0.088065	1.191072	0.551490	0.693428
4.6822	21.917	0.08274	0.102620	1.289325	0.640906	0.808030
5.0450	23.879	0.09584	0.120470	1.389492	0.742074	0.948579
5.4026	26.61	0.11066	0.143763	1.487291	0.855727	1.131994
5.7656	31.158	0.12796	0.179645	1.586057	0.986155	1.414524
6.0999	41.772	0.14982	0.254805	1.676807	1.141215	2.006339
6.5122	84.964	0.19467	0.553303	1.781855	1.373678	4.356713

ภาคผนวก ข.
ระบบหน่วยสำหรับวงจรแม่เหล็ก

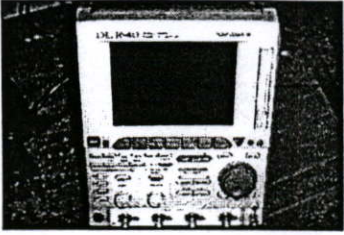
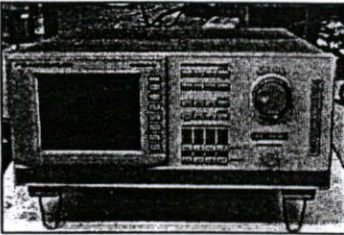


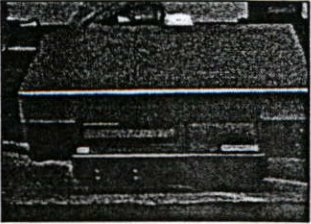
	สัญลักษณ์	หน่วย CGS	หน่วย MKS	หน่วย English
เส้นแรงแม่เหล็ก	$\phi = \frac{mmf}{\mathcal{R}}$	1 maxwell = 1 line	1 weber = 10^8 lines	1 kiloline
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก	$B = \frac{\phi}{A}$	1 gauss = 1 maxwell / cm ²	tesla = $\frac{\text{weber}}{m^2}$	kilolines / in ²
แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า	$F = \phi \times \mathcal{R}$	gilberts = 1.256 × amp-turns	Amp-turn	Amp-turn
ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	H	1 oersted = 1 gilbert / cm	Amp-turn / m	Amp-turn / in
ความต้านทานแม่เหล็ก	$\mathcal{R} = \frac{mmf}{\phi}$	Gilbert หรือ Maxwell	Amp-turn / weber	Amp-turn / kiloline
ความซึมซาบ	$\mu = \frac{B}{H}$	Gauss หรือ oersted	$1.256 \times 10^{-6} \mu$	$3.2 \times 10^{-3} \mu$

ภาคผนวก ก.
กราฟคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นเหล็ก
ที่นำมาใช้เป็น YOKE





ภาคผนวก ง.
เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	รูป
<p style="text-align: center;">Digital Oscilloscope (DL1640 YOKOGAWA)</p>	
<p style="text-align: center;">Power Analyzer (PZ4000 YOKOGAWA)</p>	
<p style="text-align: center;">Digital Low Resistance Ohmmeter</p>	
<p style="text-align: center;">หม้อแปลงปรับค่าได้</p>	
<p style="text-align: center;">เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด</p>	

ภาคผนวก จ.

ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 28th Electrical Engineering Conference



Electrical Engineering

สาขาบทความที่น่าสนใจในการประชุม

- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ครั้งที่ 28 ประจำปี 2551
20-21 ตุลาคม 2551
ณ โรงแรมอิมพีเรียล กรุงเทพมหานคร

การศึกษาการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยว

A Study of Single Sheet Test of Electrical Steel

ธนาพันธุ์ แสนสุข^๑ วีระศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์^๒ และ ทิฆิณธ์ ฉายทอง^๓
 ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรมฯ ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องจักรกลไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า^๑
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 โทร./โทรสาร 0-2326-4175 E-mail: s7060209@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเรื่อง การทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยว โดยได้ทำการศึกษาและสร้างชุดทดสอบตามมาตรฐาน JIS C 2556 [1] เป็นโครงสร้างหลัก และได้้นำเสนอการประยุกต์วิธีคำนวณ เพื่อใช้ในการหาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเหล็ก ได้แก่ กราฟ B-H กราฟค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก กราฟกำลังไฟฟ้าปรากฏ ซึ่งในบทความนี้ได้ทำการทดสอบแผ่นแกนเหล็ก 2 ชนิด โดยแต่ละชนิดจะนำผลที่ได้จากการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของผู้ผลิต เพื่อยืนยันว่าทั้งสองวิธีมีผลที่สอดคล้องในทิศทางเดียวกัน
 คำสำคัญ : การทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยว, มาตรฐาน JIS C 2556

Abstract

This paper presents the single sheet test of electrical steel. The testing set which is studied and built in accordance JIS C2556 standard will be the major structure . It also presents the application of calculation method to find out the magnetic characteristic of electrical steel result include B-H curve, core loss curve, apparent power curve. Finally the testing is made on two types of electrical steel. The testing results of each will be later compared with the ones made by the manufacturers to confirm that the testing results of both methods are in the same direction.

Keywords : Single sheet test , JIS C 2556 standard

1. บทนำ

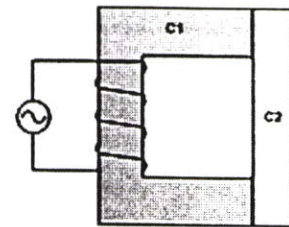
การวัดค่าคุณสมบัติของแกนเหล็กนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทดสอบแบบเอปสไตน์ (Epstein Method), การทดสอบแบบวงแหวน (Ring Specimen Method) และการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยว ซึ่งวิธีการทดสอบแบบเอปสไตน์ และแบบวงแหวนนั้นมีข้อเสียที่ขั้นตอนการสร้าง และมีความยุ่งยากในการเตรียมอุปกรณ์ [2,3] ในขณะที่การทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวทำได้สะดวกกว่า และใช้เหล็กที่นำมาทดสอบเพียงแผ่นเดียว

ในประเทศไทยนั้นการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยว ยังไม่เป็นที่แพร่หลาย บทความนี้จึงเป็นการศึกษาการสร้างชุดทดสอบและ

ประยุกต์วิธีคำนวณหา คุณสมบัติทางแม่เหล็กซึ่งประกอบด้วย กราฟ B-H กราฟค่าความสูญเสีย และ กราฟกำลังไฟฟ้าปรากฏ

2. ทฤษฎีวงจรแม่เหล็ก

วงจรแม่เหล็กที่มีสารอนุกรม 2 ชนิด จะทำให้เกิดค่าความต้านทานวงจรแม่เหล็ก 2 ส่วน ดังแสดงตามรูปที่ 1 ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความต้านทานวงจรแม่เหล็กดังสมการที่ (1)



รูปที่ 1 วงจรแม่เหล็กที่มีสารอนุกรม 2 ชนิด

$$\mathcal{R}_l = \mathcal{R}_{c_1} + \mathcal{R}_{c_2} \quad (1)$$

ดังนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นดังสมการ

$$Ni = \phi \mathcal{R}_l \quad (2)$$

ค่าความสูญเสียในวงจรแม่เหล็กจึงเกิดจาก 3 ส่วนซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$P_{in} = P_{cu} + P_{c1} + P_{c2} \quad (3)$$

เมื่อ \mathcal{R} : ความต้านทานวงจรแม่เหล็ก, N : จำนวนรอบ, i : กระแสไฟฟ้า
 ϕ : เส้นแรงแม่เหล็ก, P_{in} : กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า, P_{cu} : กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขดลวด, P_{c1} : กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแกนเหล็กชนิดที่ 1, P_{c2} : กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแกนเหล็กชนิดที่ 2

3. โครงสร้างชุดทดสอบ

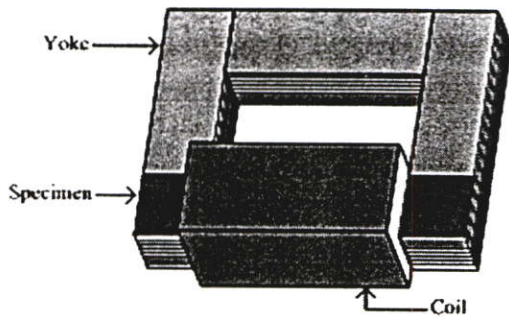
การทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวนั้น โดยทั่วไปประกอบด้วย ส่วนประกอบหลัก 4 ส่วน ดังนี้

Yoke สร้างจากแผ่นเหล็กเรียงตามแนวรีดวางอัดซ้อนกัน เพื่อทำให่วงจรแม่เหล็กสมบูรณ์ โดยค่าความสูญเสียของแกนเหล็กที่นำมาใช้ต้องมีค่าไม่เกิน 1.0 W/kg ที่ความถี่ 50 Hz และค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ 1.5 เทสลา แสดงในรูปที่ 2

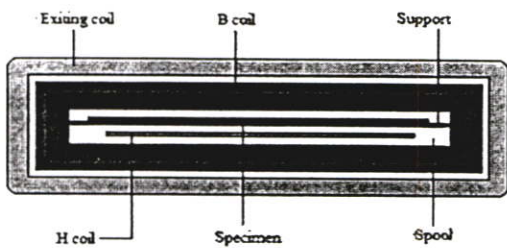
ขดลวดวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก (H coil) พันด้วยลวดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.21 มม. อย่างสม่ำเสมอบนแผ่นฉนวน จำนวน 810 รอบ บนแผ่นฉนวนที่ไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กหนา 1 มม. แสดงในรูปที่ 3

ขดลวดวัดความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (B coil) พันด้วยลวดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มม. อย่างสม่ำเสมอบนตัว bobbin จำนวน 140 รอบ แสดงในรูปที่ 3

ขดลวดกระตุ้น (Exciting coil) พันด้วยลวดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 มม. อย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงความยาวของแผ่นทดสอบ แบบอนุกรม 2 ชั้น ชั้นละ 240 รอบ แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 โครงสร้างชุดทดสอบ



รูปที่ 3 ภาพตัดขวางการพันขดลวด และการวางแผ่นทดสอบ

4. การคำนวณคุณสมบัติต่างๆของแกนเหล็ก

4.1 การคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

เนื่องจาก H coil นั้นวางชิดกับแผ่นแกนเหล็กที่ทดสอบเมื่อเกิดการกระตุ้นที่แผ่นเหล็กที่ทดสอบ จึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่ H coil ซึ่งจากหลักการ การเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ เมื่อทราบแรงดันที่เกิดขึ้นใน H coil ทำให้สามารถคำนวณหาความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจาก H coil ได้ ดังสมการที่ (4) ซึ่งค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่คำนวณได้นั้นจะเป็นค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในอากาศที่เกิดภายใน bobbin และ นำค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในอากาศมาคำนวณหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กดังสมการที่ (5) ซึ่งค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในอากาศนั้นจะเท่ากับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่แผ่นแกนเหล็กทดสอบ [4]

$$B_H = \frac{E_H}{4.44 N_H f A_H} \tag{4}$$

$$H = \frac{B_H}{\mu_0} \tag{5}$$

เมื่อ E_H : ค่า Voltage ที่วัดได้ ณ H coil , A_H : พื้นที่หน้าตัดของแกน H coil , N_H : จำนวนรอบของ H coil , B_H : ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในอากาศที่คำนวณจาก H coil , H : ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก , μ_0 : ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กของอากาศ

4.2 การคำนวณค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

แรงดันที่ได้จาก B coil นั้น เมื่อนำมาคำนวณค่าที่ได้จะเป็นค่าของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากสองส่วนรวมกัน คือส่วนของแกนเหล็กและของอากาศ ดังนั้นเมื่อต้องการเฉพาะค่าเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กจึงต้องนำค่าเส้นแรงแม่เหล็กของอากาศมาหักออก ดังสมการ

$$\phi_I = \frac{E_B}{4.44 f N_B} \tag{6}$$

$$\phi_{air} = B_H (A_I - A_S) \tag{7}$$

$$\phi_S = \phi_I - \phi_{air} \tag{8}$$

จากสมการข้างต้น สามารถคำนวณหา B_S (ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กได้จาก สมการ)

$$B_S = \frac{\phi_S}{A_S} \tag{9}$$

เมื่อ A_S : พื้นที่หน้าตัดของแผ่นแกนเหล็กทดสอบ , A_I : พื้นที่หน้าตัดภายใน bobbin , N_B : จำนวนรอบของ B coil , ϕ_S : เส้นแรงแม่เหล็กของแกนที่ทดสอบ , ϕ_{air} : เส้นแรงแม่เหล็กในอากาศ ϕ_I : เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด

4.3 การคำนวณค่าความสูญเสียของแกนเหล็กแผ่นเดียว

จาก (3) ที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่างๆ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวด Exciting coil (P_{in}) สามารถแบ่งแยกค่าสูญเสียได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

- ค่าสูญเสียของขดลวด Exciting coil (P_{cu})
- ค่าสูญเสียของ Yoke (P_{Yoke})
- ค่าสูญเสียของแกนเหล็กแผ่นเดียว (P_S)

ดังนั้นสามารถหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กได้จากสมการ

$$P_S = P_{in} - P_{cu} - P_{Yoke} \tag{10}$$

เมื่อทราบค่า P_S แล้วจึงนำน้ำหนักของแผ่นเหล็กทดสอบมาหารเพื่อให้เป็นหน่วย W/kg

4.4 การหาค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ

ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏสามารถหาได้จาก แรงดันกระตุ้น และ กระแสกระตุ้นที่ ป้อนเข้า Exciting coil จากสมการ

$$S_S = \frac{V \times I}{\rho_m \cdot Vol.} \tag{11}$$

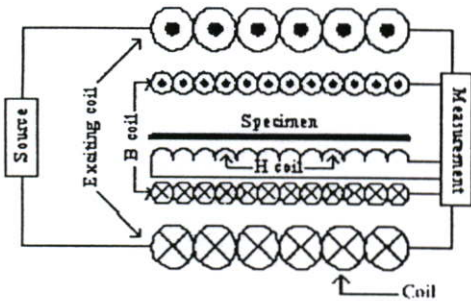
เมื่อ V : แรงดันไฟฟ้ากระตุ้น(rms) , I : กระแสไฟฟ้ากระตุ้น(rms) , ρ_m : ความหนาแน่นของแผ่นแกนเหล็กทดสอบ , $Vol.$: ปริมาตรของแผ่นแกนเหล็กทดสอบ , S_S : ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏต่อ 1 kg

5. การทดสอบและผลการทดสอบ

ในการทดสอบนี้ใช้แผ่นแกนเหล็กชนิด 35JGH135 และ 27JGH110 โดยข้อมูลของแผ่นเหล็กมีดังนี้

ตารางที่ 1 ข้อมูลแผ่นเหล็กที่นำมาทดสอบ

ชนิด	กว้าง (m)	ยาว (m)	ความหนาแน่น (kg/dm ³)	น้ำหนัก (kg)	พื้นที่หน้าตัด (10 ⁻⁵ m ²)
35JGH135	0.1	0.5	7.65	0.1285	3.360
27JGH110	0.1	0.5	7.65	0.1000	2.565



รูปที่ 4 วงจรการทดสอบ

5.1 การทดสอบเพื่อหาค่าสูญเสียต่างๆ

จากสมการที่ (10) เมื่อต้องการหาค่าความสูญเสียของแกนเหล็กนั้นต้องทราบค่า P_{cu} และ P_{Yoke} เพื่อนำมาหักออกจาก P_{in}

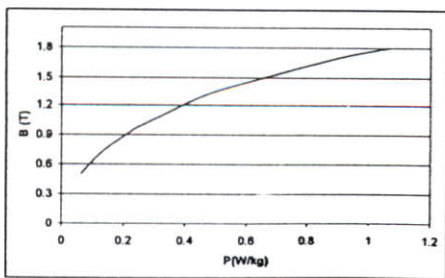
5.1.1 การหาค่าความสูญเสียใน Exciting coil (P_{cu})

การวัดค่าความสูญเสียใน Exciting coil ทำได้โดยวัดกระแสกระตุ้นที่ป้อนเข้า (I) และค่าความต้านทานของ Exciting coil (R) แล้วคำนวณตามสมการที่ (12)

$$P_{cu} = I^2 R \tag{12}$$

5.1.2 การหาค่าความสูญเสียใน Yoke (P_{Yoke})

ก่อนอื่นนั้นต้องทำการตรวจสอบว่า Yoke นั้นเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด โดยที่ B 1.5 T ความถี่ที่ 50 Hz มีค่าต่ำกว่า 1 W/kg ซึ่งทดลองโดยการนำแกนเหล็กที่จะทำเป็น Yoke ซึ่งเป็นชนิด Steel Sheet Grade 23ZDKH90 มาวางเรียงทั้ง 4 ด้าน แล้วทำการปรับแรงดันกระตุ้นป้อนเข้าเพื่อคำนวณค่าความสูญเสียที่ B ต่างๆ



รูปที่ 5 กราฟค่าความสูญเสียของ Yoke

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าค่าความสูญเสียของ Yoke เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ จึงสามารถนำเหล็กชนิดนี้มาใช้เป็น Yoke ได้

เมื่อทำการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวนั้นจะวางเรียง Yoke 3 ด้านโดยอีกด้านหนึ่งเป็นแผ่นเหล็กที่จะนำมาทดสอบ ดังนั้นเมื่อทำการป้อนแรงดันกระตุ้นเข้าไป จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กไหลในวงจรแม่เหล็ก ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่าเท่ากันทั้งวงจร ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่า B_{Yoke} ได้จากสมการที่ (13)

$$B_s A_s = B_{Yoke} A_{Yoke} \tag{13}$$

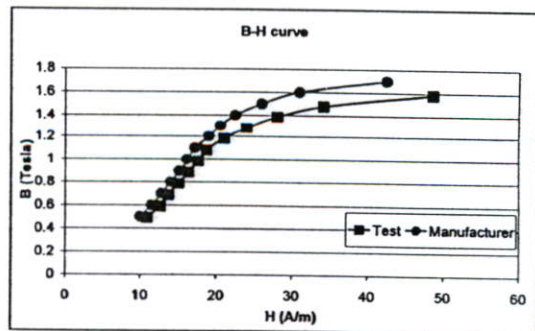
เมื่อทราบค่า B_{Yoke} จึงไปทดสอบเพื่อหาค่า P_{Yoke} ซึ่งค่า P_{Yoke} จะมีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับ P_{in} ที่ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระตุ้นเท่ากัน เนื่องจาก B_{Yoke} มีค่าต่ำกว่า B_s มาก ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าความสูญเสียของกำลังไฟฟ้าป้อนเข้ากับ ค่าความสูญเสียของ Yoke เมื่อทำการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยว

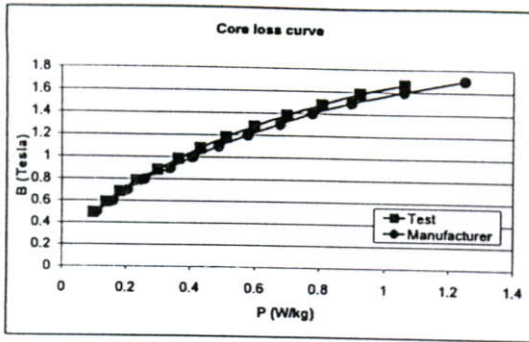
B_s (T)	B_{Yoke} (T)	P_{in} (W)	P_{Yoke} (W)
0.495073	0.020349	0.01284	0.000468
0.591354	0.024454	0.01806	0.000624
0.690342	0.028413	0.0238	0.000858
0.789605	0.032586	0.0306	0.001171
0.888978	0.036699	0.0394	0.001405
0.987666	0.040773	0.0477	0.001717
1.088258	0.044728	0.0565	0.00203
1.184257	0.048841	0.06682	0.002421
1.281297	0.052913	0.07831	0.002812
1.384911	0.057221	0.09156	0.003202
1.484337	0.06125	0.1057	0.003671
1.580747	0.065428	0.1211	0.004219

5.2 ผลการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยว

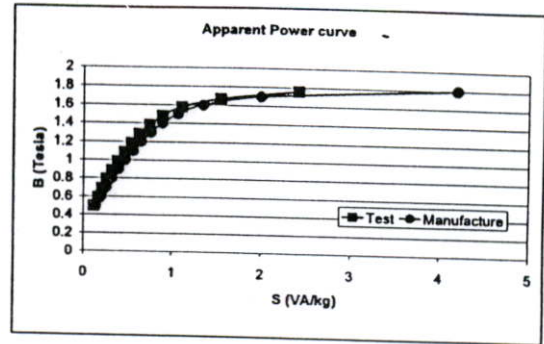
ในการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวนั้นผลที่ทดสอบเมื่อนำมาทำการคำนวณจะได้ กราฟคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเหล็กซึ่งจะนำผลที่ได้จากการคำนวณมาเทียบกับผลของทางผู้ผลิต ซึ่งได้กราฟดังนี้



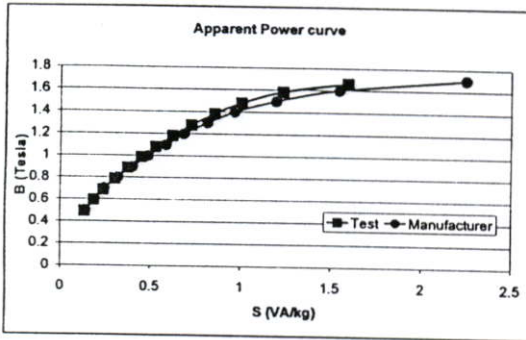
(ก)



(ข)

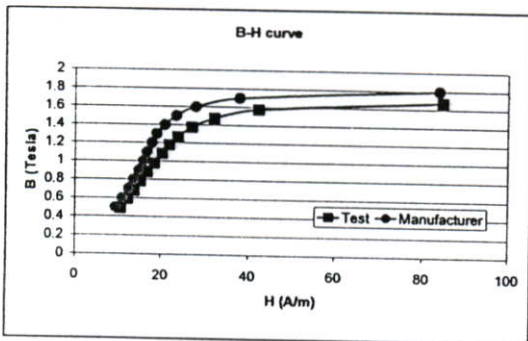


(ก)

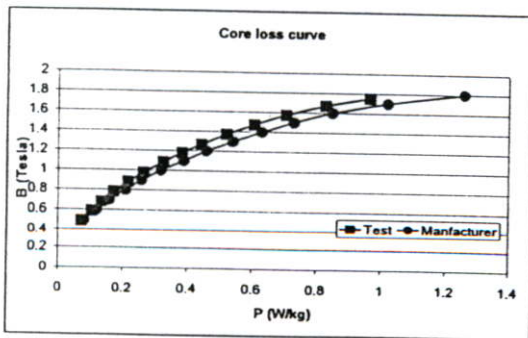


(ค)

รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติของแกนเหล็กชนิด 35 JGH 135 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากผู้ผลิต (ก) กราฟ B-H (ข) กราฟค่าความสูญเสีย (ค) กราฟกำลังไฟฟ้าปรากฏ



(ง)



(ข)

รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติของแกนเหล็กชนิด 27 JGH 110 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากผู้ผลิต (ก) กราฟ B-H (ข) กราฟค่าความสูญเสีย (ค) กราฟกำลังไฟฟ้าปรากฏ

6. บทสรุป

จากการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติของแกนเหล็ก โดยวิธีการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยวนั้น ผลที่ได้จะประกอบด้วย กราฟ B-H กราฟค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก และ กราฟกำลังไฟฟ้าปรากฏ โดยกราฟที่ได้นั้นจะนำมาเปรียบเทียบกับกราฟผลการทดสอบของผู้ผลิต ซึ่งผลที่ได้นั้น มีทิศทางค่อนข้างสอดคล้องใกล้เคียงกับทางผู้ผลิต จึงทำให้ยืนยันได้ว่า แนวทางในการสร้างชุดทดสอบ และวิธีการคำนวณที่ประยุกต์มานั้นมีความถูกต้องและเชื่อถือได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] JIS C 2556 Methods of measurement of the magnetic properties of magnetic steel sheet and strip by means of a single sheet tester
- [2] Lotten T Mthombeni, P. Pillay "Core Losses in Motor Laminations Exposed to High Frequency or Non-Sinusoidal Excitation" IEEE Transactions On Volume40, Issue 5, Sept.-Oct. 2004 Page(s) 1325-1332
- [3] J. Sievert "The measurement of magnetic properties of electrical sheet steel –survey on methods and situation of standards," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 215-216 (2000) 647-651
- [4] Lui Shuo, Lui Zhiqiang, Wang Yong, Lui Fugui and Yan Weili "Study of Single Sheet Tester for A.C. Magnetization Characteristics Measurement," *ICEM 2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Volume, 18-20 Aug 2001* Page(s):361-364vol.1
- [5] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Uman "Electric Machinery" Sixth Edition Mcgraw-Hill, 2003

ประวัติผู้เขียน

นาย ธนาพันธุ์ แสนสุข เกิดเมื่อวันที่ 23 พฤศจิกายน 2525 ที่ จังหวัด กรุงเทพฯ สำเร็จ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง ปี 2547 กำลังศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเดียวกัน

ประวัติการทำงาน

2547	วิศวกรฝ่ายทดสอบ	ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
2548-ปัจจุบัน	เจ้าหน้าที่วิจัย	ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม สจล.