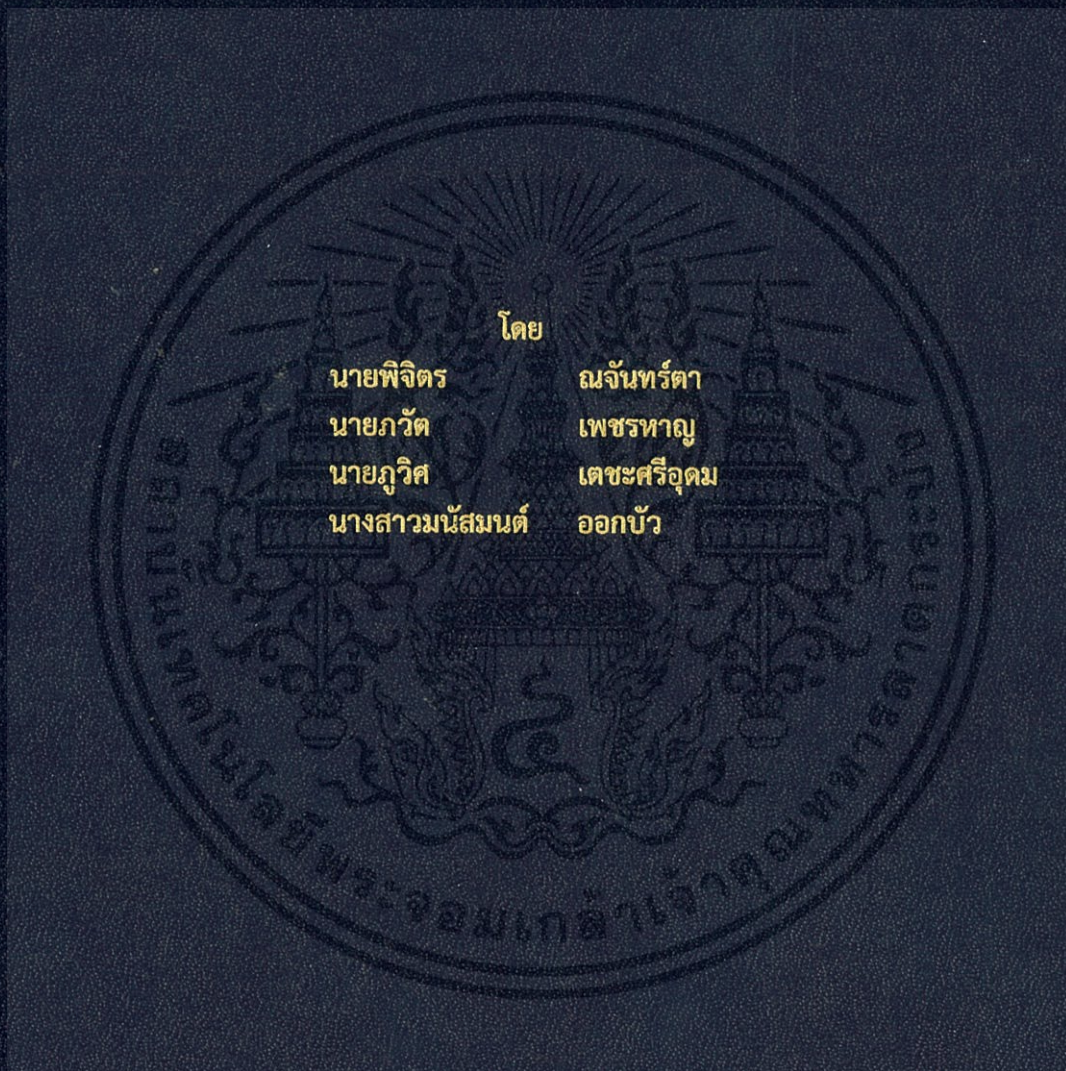


การศึกษาและตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในวงจรแม่เหล็ก
A study and measurement of permanent magnet performance
in magnetic circuit



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

การศึกษาและตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในวงจรแม่เหล็ก
A study and measurement of permanent magnet performance
in magnetic circuit



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A study and measurement of permanent magnet performance
in magnetic circuit



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2561

การศึกษาและตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในวงจรแม่เหล็ก

A study and measurement of permanent magnet performance in magnetic circuit



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. เปี่ยมภูมิ

รศ. พชิต

สฤกพฤกษ์

ล้ายอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง การศึกษาและตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในวงจรแม่เหล็ก

ผู้จัดทำ

1. นายพิจิตร ฌจันทร์ตา
2. นายภวัต เพชรหาญ
3. นายภูวิศ เตชะศรีอุดม
4. นางสาวมนัสมนต์ ออกบัว




..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกษ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ พิชิต ล้ายอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในวงจรแม่เหล็ก

นายพิจิตร	ณจันทร์ตา
นายภวัต	เพชรหาญ
นายภูวิศ	เตชะศรีอุดม
นางสาวมนัสมนต์	ออกบัว
ผศ.ดร.เปี่ยมภูมิ	สฤกษ์พฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.พิชิต	ลำยอง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ปีการศึกษา 2561	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาและตรวจวัดสมรรถนะแม่เหล็กถาวรที่ถูกทำการกระตุ้นที่ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงตามข้อมูลของผู้ผลิตโดยวงจรแม่เหล็กที่มีช่องว่างอากาศ โดยทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรทดสอบ ประกอบด้วย ระยะช่องว่างอากาศในวงจรแม่เหล็ก คุณลักษณะความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบ และผลความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวร โดยทำการเปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กแบบมีช่องว่างอากาศที่มีแม่เหล็กถาวรและไม่มีแม่เหล็กถาวร จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรทดสอบ คือผลจากความต้านทานภายในแม่เหล็ก ซึ่งจะมีผลต่อการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร และการประเมินสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรเมื่อถูกใช้งานในสภาวะต่าง ๆ

คำสำคัญ

แม่เหล็กถาวร , ความต้านทานแม่เหล็ก , วงจรแม่เหล็ก, นีโอติเมียมไอออนโบรอน

A study and measurement of permanent magnet performance in magnetic circuit

Pijit	Najanta	
Pawat	Petharn	
Puvis	Techasriudom	
Manasamon	Okbua	
Asst.Prof.Dr.Piampoom	Sarikprueck	Advisor
Assoc.Prof.Pichit	Lumyoung	Co-Advisor
Year 2018		

ABSTRACT

This thesis presents the study and measurement of magnetized permanent magnet performance with high magnetic field intensity based on manufacturing data requirement in air gap magnetic circuit. The purpose of this study is to investigate various parameters affected to tested permanent magnet measurement including air gap distance, permanent magnet characteristics, and permanent magnet reluctance. The comparison between air gap magnetic circuit with and without permanent magnets is studied. The initial results show that the major impact of permanent magnet performance measurement is its reluctance. This leads to the design of permanent magnet machines and the evaluation of these machines performances using in various conditions.

KEYWORD : Permanent Magnet, Reluctance, Magnetic Circuit, Neodymium iron boron

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาและตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในวงจรแม่เหล็ก (A study and measurement of permanent magnet performance in magnetic circuit) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำเร็จจุล่งด้วยดีเนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่านดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ. พิชิต ลำยอง และ ดร. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ อาจารย์ปรึกษาในการทำปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาและตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในวงจรแม่เหล็ก ที่ให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาต่างๆ รวมถึงการตรวจสอบและแก้ไขการเขียนปริญญาานิพนธ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังทุกท่านที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้ทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติให้แก่คณะผู้จัดทำ จนปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จจุล่งไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดามารดา ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจมาโดยตลอด จนปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จจุล่งไปด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้การช่วยเหลือในการทำปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จจุล่งไปด้วยดี



สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VIII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ตารางการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	3
บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง	4
2.1. ประวัติความเป็นมาเกี่ยวกับแม่เหล็ก	4
2.2. คุณสมบัติของสารแม่เหล็ก	7
2.2.1 เส้นแรงแม่เหล็ก	7
2.3 โดเมนแม่เหล็ก	9
2.4 การทำลายอำนาจแม่เหล็ก (demagnetization)	10

สารบัญ(ต่อ)

2.4.1 อุณหภูมิคูรี (curie temperature)	10
2.4.2 ใช้ความร้อนสูงในการลบล้างความเป็นแม่เหล็ก	11
2.4.3 วางในสนามแม่เหล็กที่มีขั้วตรงกันข้าม	11
2.5 วงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loop)	12
2.6 ทฤษฎีพื้นฐาน	13
2.6.1 ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity)	13
2.6.2 กฎของแอมแปร์ (AMPERE'S law)	14
2.6.3 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law)	16
2.6.4 กฎของเลนซ์ (Lenz's law)	17
2.6.5 ความต้านทานภายในวงจรแม่เหล็ก	17
2.6.6 ลีคเกจฟลักซ์และการป้องกัน	19
2.7 การศึกษาผลของค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องจักรซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent-Magnet Synchronous Machines)	20
บทที่ 3 การศึกษาและวัดสมรรถนะของแม่เหล็ก	22
3.1 บทนำ	22
3.2 แม่เหล็กถาวรทดสอบ	22
3.3 วงจรที่ใช้กระตุ้นแม่เหล็ก	23
3.4 วงจรรูป E – I	24
3.5 การออกแบบและการวิเคราะห์ผลของปัจจัยอื่นๆในแม่เหล็กถาวร	25

สารบัญ(ต่อ)

3.5.1	วงจรมแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองหาความต้านทานแม่เหล็ก ภายในแม่เหล็กถาวร	26
3.5.2	วงจรมมูลแม่เหล็ก	26
3.5.3	การทดลองหาความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็ก โดยการปรับระยะช่องอากาศ	27
3.5.4	การทดลองหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็ก โดยการปรับอำนาจความเป็นแม่เหล็ก	27
3.5.5	การทดลองหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็ก โดยการเปลี่ยนขนาดแม่เหล็ก	27
3.6	เตาอบ	28
บทที่ 4	วิธีการทดลองและผลการทดลอง	29
4.1	อุปกรณ์การทดลอง	29
4.2	การทดลองที่ 1	30
4.3	การทดลองที่ 2	39
4.4	การทดลองที่ 3	49
4.5	การทดลองที่ 4	59
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	69
	เอกสารอ้างอิง	71
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก.	74
	ภาคผนวก ข.	78

สารบัญ(ต่อ)

ภาคผนวก ค.	81
ภาคผนวก ง.	83
ภาคผนวก จ.	88
ประวัติผู้เขียน	90



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 Horseshoe magnet	5
รูปที่ 2.2 ช่วงเวลาที่ค้นพบสารแม่เหล็กชนิดต่างๆ	6
รูปที่ 2.3 เส้นแรงแม่เหล็ก	8
รูปที่ 2.4 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อนำแท่งแม่เหล็กมาวางไว้ใกล้กัน	8
รูปที่ 2.5 โดเมนแม่เหล็กเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ	9
รูปที่ 2.6 โดเมนแม่เหล็กเรียงตัวเป็นระเบียบ	9
รูปที่ 2.7 แสดงการเพิ่มอุณหภูมิมีผลต่ออำนาจความเป็นแม่เหล็กของสารนิเกิล	10
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงการลดอำนาจความเป็นแม่เหล็กด้วยความร้อน	11
รูปที่ 2.9 B-H Curve	12
รูปที่ 2.10 ขดลวดพันรอบแกนเหล็กที่เป็นวงรอบปิด	14
รูปที่ 2.11 ขดลวดพันรอบแกนเหล็กที่เป็นวงรอบเปิด	15
รูปที่ 2.12 การทดลองของฟาราเดย์	16
รูปที่ 2.13 ลีคเกจฟลักซ์และการป้องกัน	19
รูปที่ 2.14 โครงสร้างภายในเครื่องจักรซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร	20
รูปที่ 3.1 แม่เหล็กถาวรทดสอบชนิด Neodymium iron boron (Nd-Fe-B)	22
รูปที่ 3.2 วงจรที่ใช้กระตุ้นแม่เหล็ก	23
รูปที่ 3.3 วงจรแม่เหล็กแบบ E - I	24
รูปที่ 3.4 วิธีการวัดโดยใช้วงจรแม่เหล็กแบบ E - I	24

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่ 3.5 การทดสอบหาความต้านทานภายในแม่เหล็ก	25
รูปที่ 3.6 วงจรแม่เหล็ก	25
รูปที่ 3.7 วงจรที่จ่ายแรงดันเพื่อสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก	26
รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลแม่เหล็ก	26
รูปที่ 3.9 เตาอบ	28
รูปที่ 4.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กโดยมีแม่เหล็กถาวรทดสอบ	36
รูปที่ 4.2 การทดสอบหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กโดยไม่มีแม่เหล็กถาวรทดสอบ	36
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความต้านทานภายในแม่เหล็กที่ระยะช่องว่างอากาศต่างๆ	47
รูปที่ 4.4 ค่าความต้านทานภายในของแม่เหล็กขนาด 20 X 24 X 7 mm. ที่ค่าความเป็นแม่เหล็กระดับต่างๆ	58
รูปที่ 4.5 ค่าความต้านทานภายในของแม่เหล็กขนาด 24 x 30 x 10 mm. ที่ค่าความเป็นแม่เหล็กระดับต่างๆ	67

สารบัญตาราง

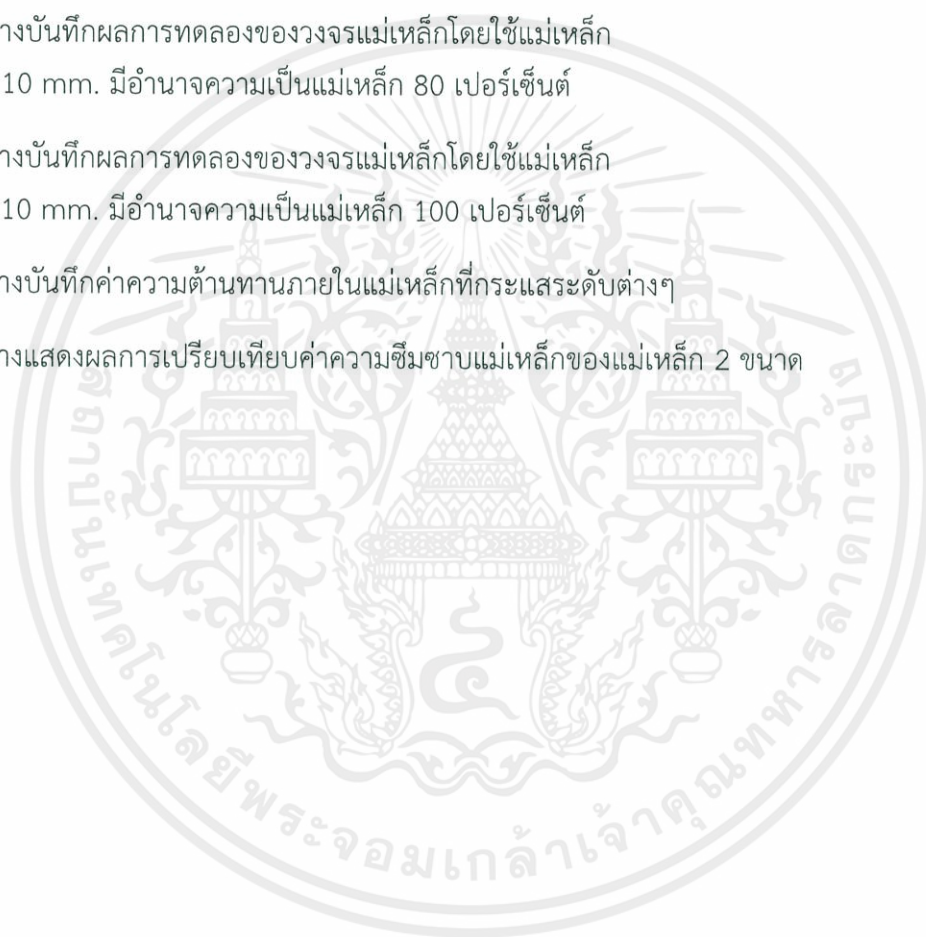
ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์วงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก	18
2.2 ข้อมูลของส่วนประกอบหลักภายในเครื่องจักรซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร	20
4.1 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้ช่องว่างอากาศขนาด 7 mm.	33
4.2 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้แม่เหล็กถาวรทดสอบที่มีความเป็นแม่เหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์ ขนาด 7 mm. แทนที่ช่องว่างอากาศ	34
4.3 ตารางบันทึกผลค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ 3.5 mm.	35
4.4 ตารางบันทึกผลค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบที่มีขนาด 20 × 24 × 7 mm	38
4.5 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้แม่เหล็กถาวรทดสอบขนาด 20mm. × 24mm. × 7 mm.	40
4.6 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้ช่องว่างอากาศขนาด 3.5 mm.	40
4.7 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้แม่เหล็กถาวรทดสอบขนาด 20mm. × 24mm. × 7 mm. และช่องว่างอากาศ 1 mm.	41
4.8 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้ช่องว่างอากาศขนาด 4.5 mm.	42
4.9 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้แม่เหล็กถาวรทดสอบขนาด 20mm. × 24mm. × 7 mm. และช่องว่างอากาศ 1.5 mm.	43
4.10 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้ช่องว่างอากาศขนาด 5 mm.	44
4.11 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้แม่เหล็กขนาด 7 mm. และช่องว่างอากาศ 2 mm.	45
4.12 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้ช่องว่างอากาศขนาด 5.5 mm.	45

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.13 ตารางบันทึกผลการทดลองค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กที่ระยะช่องว่างอากาศขนาดต่างๆ	46
4.14 ตารางบันทึกผลการทดลองฟลักซ์แม่เหล็กที่ระยะช่องว่างอากาศขนาดต่างๆ	48
4.15 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 10 เปอเซ็นต์	50
4.16 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 20 เปอเซ็นต์	51
4.17 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 30 เปอเซ็นต์	51
4.18 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 40 เปอเซ็นต์	52
4.19 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 50 เปอเซ็นต์	52
4.20 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 60 เปอเซ็นต์	53
4.21 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 70 เปอเซ็นต์	53
4.22 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 80 เปอเซ็นต์	54
4.23 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 90 เปอเซ็นต์	54
4.24 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 100 เปอเซ็นต์	55
4.25 ตารางบันทึกค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 10 – 50 เปอร์เซ็นต์	56
4.26 ตารางบันทึกค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 60 – 100 เปอร์เซ็นต์	57
4.27 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กที่ใช้ช่องว่างอากาศระยะ 5 mm.	60
4.28 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กที่ใช้แม่เหล็กที่มีขนาด 10 mm. มีอำนาจความเป็นแม่เหล็ก 20 เปอร์เซ็นต์	61

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.29 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กโดยใช้แม่เหล็กที่มีขนาด 10 mm. มีอำนาจความเป็นแม่เหล็ก 40 เปอร์เซ็นต์	62
4.30 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กโดยใช้แม่เหล็กที่มีขนาด 10 mm. มีอำนาจความเป็นแม่เหล็ก 60 เปอร์เซ็นต์	63
4.31 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กโดยใช้แม่เหล็กที่มีขนาด 10 mm. มีอำนาจความเป็นแม่เหล็ก 80 เปอร์เซ็นต์	64
4.32 ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กโดยใช้แม่เหล็กที่มีขนาด 10 mm. มีอำนาจความเป็นแม่เหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์	65
4.33 ตารางบันทึกค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กที่กระแสดับต่างๆ	66
4.34 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแม่เหล็ก 2 ขนาด	68



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันเครื่องจักรกลไฟฟ้าเข้ามามีบทบาทสำคัญมากขึ้นในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ซึ่งเครื่องจักรกลไฟฟ้านอกจากจะทำให้เกิดความสะดวกรวดสบายในการดำเนินชีวิตแล้ว ยังเข้ามามีบทบาทกับหลายภาคส่วน เช่น ภาคอุตสาหกรรม ภาคครัวเรือน ภาคการผลิตพลังงาน เป็นต้น โดยภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นมีส่วนประกอบสำคัญคือ แม่เหล็กถาวร โดยแม่เหล็กถาวรที่เป็นส่วนประกอบสำคัญภายในเครื่องจักรสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักรให้ดียิ่งขึ้น เช่น การมีแม่เหล็กถาวรในมอเตอร์สามารถทำให้มอเตอร์มีค่าสนามแม่เหล็กที่สูงที่สุด ซึ่งจะทำให้มอเตอร์ขับเคลื่อนทางกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังไม่จำเป็นต้องใช้กระแสกระตุ้นขดลวดซึ่งทำให้มีการสูญเสียที่น้อยลง

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้จึงได้มีการนำเสนอการศึกษาและตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH ว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อการตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวร โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบ การเพิ่มลวดระยะช่องว่างอากาศ การวิเคราะห์ผลความต้านทานภายในแม่เหล็ก การเพิ่มลวดอำนาจความเป็นแม่เหล็ก การปรับเปลี่ยนขนาดของแม่เหล็กถาวรทดสอบ

ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรทดสอบ จะทำให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้งานแม่เหล็กถาวรที่มีความเหมาะสมและใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นมอเตอร์กระแสตรง รถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้ากระแสตรงและซิงโครนัสเจนเนอเรเตอร์ขนาดใหญ่ได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและเรียนรู้หลักการตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรทดสอบ
2. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของแม่เหล็กถาวรทดสอบ
3. เพื่อเสนอแนวทางการออกแบบและจัดสร้างวงจรแม่เหล็กที่สามารถหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กทดสอบ
4. เพื่อศึกษาปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับแม่เหล็กถาวรทดสอบ

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

โครงการนี้เป็นการศึกษาตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรทดสอบโดยจะทดสอบความน่าจะเป็นในหลายรูปแบบเพื่อศึกษาแนวโน้มสิ่งที่เป็นไปได้ให้ได้ค่าที่ถูกต้องและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

1.4 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับโครงสร้างและหลักการทำงานของวงจรมแม่เหล็ก
2. ศึกษาคุณลักษณะและพฤติกรรมของสารแม่เหล็กถาวรทดสอบ
3. ออกแบบวงจรมแม่เหล็กเพื่อตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรทดสอบ
4. ทดสอบและวัดค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กทดสอบ
5. สรุปผลการทดสอบ
6. รวบรวมข้อมูลการศึกษาและจัดทำปริญญานิพนธ์



1.5 ตารางการดำเนินโครงการ

ระยะเวลาการดำเนินงาน	ปี 2561					ปี 2562		
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
ศึกษาความรู้ที่เกี่ยวข้อง	■	■	■					
ศึกษาคุณลักษณะและพฤติกรรมของสารแม่เหล็กถาวรทดสอบ		■	■					
ออกแบบวงจรแม่เหล็กเพื่อตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรทดสอบ		■	■			■	■	
ทดสอบและวัดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก		■	■	■		■	■	
วิเคราะห์ผลการทดลอง			■	■	■		■	■
เก็บรวบรวมข้อมูลและสรุปผลการทดลอง			■	■	■		■	■
จัดทำปริญญานิพนธ์และเตรียมการนำเสนอ			■	■	■		■	■

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. มีความรู้ความเข้าใจหลักการเหนี่ยวนำและการใช้งานของแม่เหล็กถาวร
2. มีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีของวงจรแม่เหล็ก
3. ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการตรวจวัดสมรรถนะแม่เหล็กถาวร

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1. ประวัติความเป็นมาเกี่ยวกับแม่เหล็ก

2.1.1 การค้นพบแม่เหล็ก

แม่เหล็กถูกค้นพบและมีประวัติความเป็นมาเป็นมาพร้อมกับช่วงเวลาที่มีมนุษย์รู้จักกับคำว่า วิทยาศาสตร์ โดยคุณสมบัติของแม่เหล็กคือ มีความสามารถในการดึงดูดวัตถุที่เป็นเหล็กด้วยกัน ซึ่งธาตุที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กนั้นแท้จริงมีกระจายอยู่ตามที่ต่างๆในธรรมชาติ เช่น iron oxide (Fe_3O_4) โดยในสมัยที่ค้นพบเราเรียกวัตถุแม่เหล็กพวกนี้ว่า lodestones ซึ่ง ชาวสุเมเรียน กรีกโบราณ จีน และ อเมริกาจะมีความคุ้นเคยกับ lodestones เป็นอย่างดี ในครั้งแรกวัตถุ lodestone นี้ ถูกแกะสลักเป็นรูป ข้อน และวางอยู่กลางโต๊ะกินข้าวของคนจีน ถูกใช้เป็นเข็มทิศที่เรียกว่า เข็มทิศทิศใต้ เพราะจะชี้ไปทางทิศ ใต้ตลอดเวลา โดยมีหลักการคือถูกควบคุมด้วยเส้นแรงแม่เหล็กโลก และเข็มทิศอันนี้ก็เป็นจุดเริ่มต้นของ ต้นกำเนิดแม่เหล็กยุคแรก ในเวลาต่อมา Zheng Gongliang ได้สามารถประดิษฐ์เข็มทิศที่ทำจากแม่เหล็ก ถาวรได้เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1064 และถูกพัฒนาต่อไปการประดิษฐ์เข็มทิศเดินเรือได้เป็นครั้งแรกโดย Shen Kua ในปี ค.ศ. 1088 ซึ่งเข็มทิศเดินเรือนี้นำไปสู่การค้นพบแผ่นดินยุโรป อเมริกา จีน และแอฟริกา

จากประวัติการเริ่มค้นพบแม่เหล็กนั้น จะเห็นได้ว่ามีมาตั้งแต่ในสมัยที่มนุษย์ยังไม่มีความรู้ วิทยาศาสตร์มากพอมาอธิบายเหตุการณ์ต่างๆได้ จนในเวลาต่อมา มนุษย์เริ่มมีความรู้ทางวิทยาศาสตร์ และรู้จักกับธาตุต่างๆมากขึ้น ในขณะนั้น ธาตุที่ถูกนำมาทำเป็นแม่เหล็กได้แก่ โลหะผสมจำพวกโคบอลต์ และเหล็ก ซึ่งในกระบวนการการผลิตแม่เหล็กนั้น มนุษย์ก็ได้นำหลักความรู้ของ โลหะวิทยา สารในเคมี และ systematic มาประยุกต์ใช้ จนกระทั่งในศตวรรษที่ 20 ความก้าวหน้าของฟิสิกส์ควอนตัมเริ่มเข้า มามีส่วนร่วมในการพัฒนาแม่เหล็กซึ่ง นำไปสู่วิทยาการ การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ในช่วงไม่กี่ทศวรรษมานี้ การขยายตัวของเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับแม่เหล็ก มีความก้าวกระโดด สูงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุตสาหกรรมในยุโรป การพัฒนาและเข้าใจอำนาจแม่เหล็ก นำไปสู่วิทยาการ เทคโนโลยีหลายๆอย่างที่ถูกรอบๆตัวเรา เช่น คอมพิวเตอร์ มอเตอร์ [2]

2.1.2 วิวัฒนาการของการค้นพบทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแม่เหล็ก

ค.ศ. 1600 - งานบรรยายของ William Gilbert นักดาราศาสตร์และนักค้นคว้าวิจัยด้านวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับแม่เหล็กและไฟฟ้า ได้ถูกตีพิมพ์เป็นครั้งแรก โดยจะกล่าวถึงการทดลองที่ใช้ลูกโลกจำลอง ที่เรียกว่า "เทอร์เรลลา" (terrella) จากการทดลองของเขา เขาสรุปได้ว่าโลกนั้น ก็คือตัวแม่เหล็กเอง และสรุปว่า นี่คือเหตุผลที่ทำให้เข็มทิศชี้ไปทางทิศเหนือซึ่งทำให้เกิดการหักล้างกับทฤษฎีก่อนๆ (ก่อนนี้บางคนเชื่อว่า เข็มทิศชี้ไปหาดาวเหนือ หรือเกาะแม่เหล็กขนาดใหญ่ทางขั้วโลกเหนือ ซึ่งเป็นตัวดึงดูดเข็มทิศ) [3]

ค.ศ.1743 - Daniel Bernoulli นักคณิตศาสตร์ชื่อดังชาวเนเธอร์แลนด์ ได้ประดิษฐ์แม่แบบของแม่เหล็กที่นิยมใช้กันมาตลอดจนถึงปัจจุบัน เรียกว่า Horseshoe magnet [4]



รูปที่ 2.1 Horseshoe magnet [5]

ค.ศ.1820 - Hans Christian Oersted ศาสตราจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ ประจำมหาวิทยาลัยโคเปนเฮเกน ประเทศเดนมาร์ก เขาค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กด้วยความบังเอิญ ขณะบรรยายวิชาฟิสิกส์ในหัวข้อ คุณสมบัติของกระแสไฟฟ้า (Electricity, Galvanism and Magnetism) โดยมีอุปกรณ์ในการทำการทดลองประกอบการบรรยาย คือ แบตเตอรี่ สายไฟ และเข็มทิศ เขาได้ทำการทดลองเกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่เข็มทิศจะเบนเมื่อมีฝนตกหนัก และฟ้าแลบ เพื่อลองดูว่าจะเกิดอะไรขึ้นกับเข็มทิศ ถ้าผ่านกระแสไฟเข้าไปในลวดตัวนำ เขานำลวดตัวนำตั้งฉากกับเข็มทิศและพบว่าไม่มีอะไรเกิดขึ้น แต่หลังจากการบรรยายสิ้นสุด เขาลองวางลวดตัวนำขนานกับเข็มทิศ และผ่านกระแสไฟฟ้าไปในลวดตัวนำ กลับพบว่าเข็มทิศกระดิก และเริ่มเบน การ ค้นพบนี้ทำให้ Oersted เป็นบุคคลแรกที่ค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และแม่เหล็ก หรือนำไปสู่ทฤษฎีความสัมพันธ์ระหว่างแม่เหล็กกับไฟฟ้า [6]

ค.ศ.1820 - Andre Marie Ampere นักฟิสิกส์และนักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ได้รับทราบถึงการค้นพบของ Hans Christian Oersted และเขาได้ทำการปรับปรุงการทดลองของ Hans Christian Oersted โดยการทำการปรับปรุงการทำลวดโดยนำตัวนำในการทดลองเดิมมาพันเป็นขดลวดซึ่งเมื่อทำการจ่าย

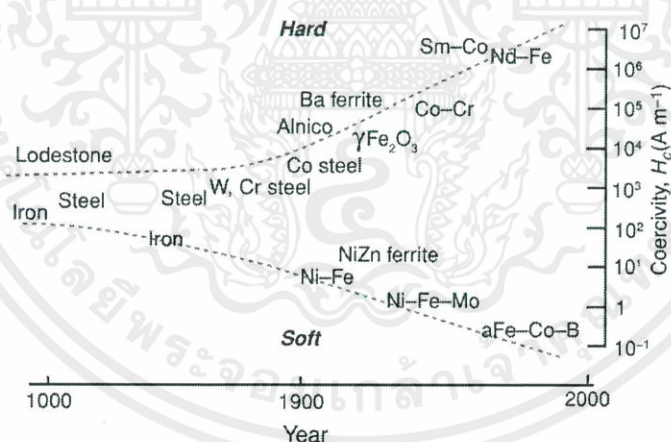
กระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดจะทำให้เกิดสถานะความเป็นแม่เหล็ก ซึ่งการทดลองนี้นำไปสู่การสร้างสนามแม่เหล็กและมอเตอร์ในเวลาต่อมา [7]

ค.ศ.1821 – Michael Faraday ค้นพบแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำและนั่นทำให้เขาแสดงการทดลองเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยแม่เหล็ก ลวดตัวนำไฟฟ้า และจานปรอท นอกจากนี้เขายังค้นพบเส้นแรงแม่เหล็กจากการทดลองแท่งตะไบเหล็ก ลงบนกระดาษที่อยู่บนแม่เหล็ก [8]

ค.ศ.1864 - James Clerk Maxwell ได้เริ่มการทดลองเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างแม่เหล็กและไฟฟ้า แมกเวลล์ กล่าวว่า ไฟฟ้าและแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กันเมื่อมีแม่เหล็กก็ต้องมีไฟฟ้า ดังนั้นแมกเวลล์จึงใช้หลักการนี้สร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าให้แผ่รัศมีออกไป โดยใช้ความเร็วคงที่จากการคำนวณของแมกเวลล์ที่เกิดจากการนำอำนาจแม่เหล็กกับหน่วยไฟฟ้ามาหาอัตราส่วนกัน ผลปรากฏว่าความเร็วที่เหมาะสม คือ 300,000 กิโลเมตรต่อวินาที [9]

ค.ศ.1881 – James Ewings นักวิจัยชาวสก๊อตแลนด์ ได้ศึกษาการเกิดความเป็นแม่เหล็กของสารชนิด ferromagnetic และนำไปสู่กราฟคุณลักษณะของสารแม่เหล็ก Hysteresis loops [10]

ค.ศ.1925 – นักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบถึงการหมุนของอิเล็กตรอน และนั่นนำไปสู่การศึกษาฟิสิกส์ควอนตัม ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้หรืออธิบายเหตุการณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับแม่เหล็กได้มากขึ้น [11]



รูปที่ 2.2 ช่วงเวลาที่ค้นพบสารแม่เหล็กชนิดต่างๆ [12]

2.2. คุณสมบัติของสารแม่เหล็ก

แม่เหล็ก คือ สารที่สามารถดูดเหล็กหรือเหนี่ยวนำให้เหล็กหรือสารแม่เหล็กเป็นแม่เหล็กได้ สารแม่เหล็กโดยทั่วไปจะสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดด้วยกัน

1. ไดอามกเนติก (Diamagnetic) ได้แก่ สารที่ไม่ซึมซาบสนามแม่เหล็กได้ ($\mu_r < 1$) ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง (copper) บิสมัท (bismuth) เงิน (silver) และทอง (Gold) เป็นต้น

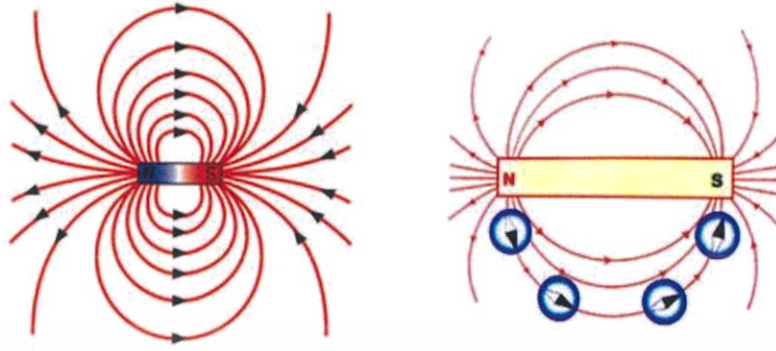
2. พาราแมกเนติก (Paramagnetic) ได้แก่ สารที่สามารถซึมซาบความเป็นแม่เหล็กได้เล็กน้อย ($\mu_r > 1$) ยกตัวอย่างเช่น อากาศ โครเมียม (Chromium) แพลตตินัม (Platinum) และ อลูมิเนียม (Aluminum) เป็นต้น

3. เฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) ได้แก่ สารที่สามารถซึมซาบแม่เหล็กได้มาก ($\mu_r \gg 1$) ยกตัวอย่างเช่น เหล็ก (Iron) นิกเกิล (Nickel) โคบอลต์ (Cobalt) เป็นต้น

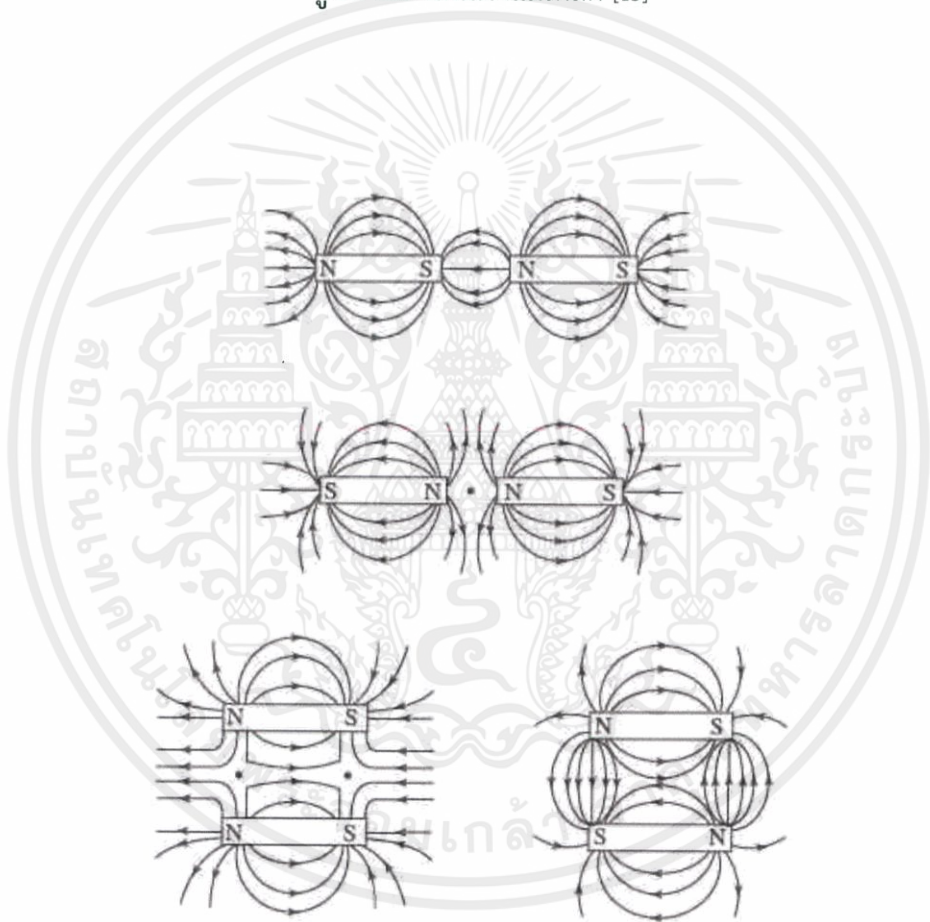
ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density ; B) กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity ; H) สำหรับวัสดุหนึ่งๆ จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กตรอนที่อยู่ในวัสดุนั้นๆ โดยอัตราส่วนของความสัมพันธ์ดังกล่าวคือ ค่าความซึมซาบของแม่เหล็ก (Permeability ; μ) จะขึ้นอยู่กับชนิดของเนื้อ สารนั้นๆ จัดให้อยู่ในรูปสมการ $B = \mu H$ โดยที่ $\mu = \mu_0 \mu_r$ โดยค่า μ_r เป็นตัวที่กำหนดชนิดของสารแม่เหล็กที่กล่าวมาข้างต้นนั่นเอง [13]

2.2.1 เส้นแรงแม่เหล็ก

เส้นแรงแม่เหล็ก เป็นเส้นที่แสดงทิศของสนามแม่เหล็กรอบๆ แท่งแม่เหล็ก นอกจากนั้นยังแสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วย ทิศของสนามคือ ทิศของแรงที่กระทำกับขั้วเหนือ ในสนามแม่เหล็กเส้นแรงแม่เหล็กแสดงให้เห็นได้โดยใช้ผงเหล็กโรยรอบๆ แท่งแม่เหล็ก หรือการระบุตำแหน่งของเข็มทิศ เล็กๆ ณ จุดต่างๆ รอบๆ แท่งแม่เหล็ก การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่จุดๆหนึ่ง แสดงได้โดย เส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่ชิดกัน เส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่ภายนอกแท่งแม่เหล็กจะมีทิศทางออกจากขั้ว N และวนเข้าหาขั้ว S ส่วนเส้นแรงแม่เหล็กภายในแท่งแม่เหล็กเอง มีทิศพุ่งจากขั้ว S ไปยังขั้ว N ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 [14]



รูปที่ 2.3 เส้นแรงแม่เหล็ก [15]

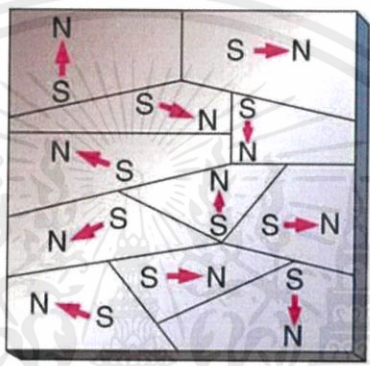


รูปที่ 2.4 เส้นแรงแม่เหล็กเมื่อนำแท่งแม่เหล็กมาวางไว้ใกล้กัน [16]

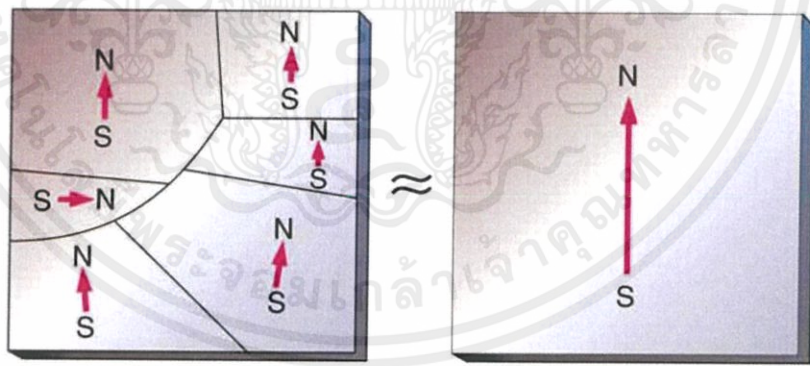
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 โดเมนแม่เหล็ก

สารแม่เหล็ก ประกอบด้วยไดโพล หรือ โมเลกุลแม่เหล็กซึ่งมีแรงกระทำซึ่งกันและกันและอยู่ในบริเวณหนึ่งๆเรียกว่า โดเมน และเมื่อโดเมนแม่เหล็กชี้ไปทางเดียวกันจะทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กขึ้นมาดังรูปที่ 2.6 ในการกระตุ้นสารแม่เหล็กให้เป็นแม่เหล็กต้องใช้สนามแม่เหล็กภายนอกมาทำให้โดเมนแม่เหล็กเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบแต่ในภาวะที่โดเมนแม่เหล็กไม่เป็นระเบียบจะมีผลให้อำนาจแม่เหล็กหักล้างกันหมดดังรูปที่ 2.5 [17]



รูปที่ 2.5 โดเมนแม่เหล็กเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ [18]



รูปที่ 2.6 โดเมนแม่เหล็กเรียงตัวเป็นระเบียบ [18]

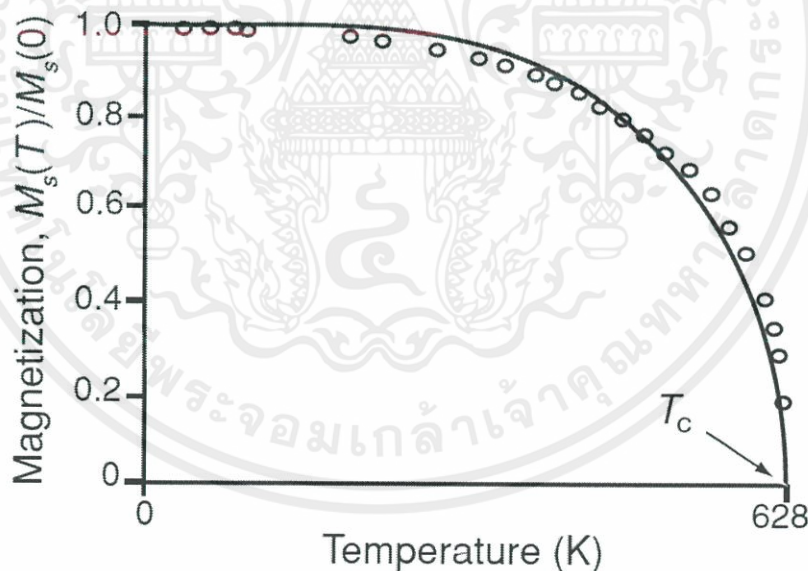
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การทำลายอำนาจแม่เหล็ก (demagnetization)

แม่เหล็กถาวรต้องการเทคนิคพิเศษเพื่อให้วัสดุมีการจัดเรียงของฟลักซ์แม่เหล็กอย่างเหมาะสม การที่จะลบล้างความเป็นแม่เหล็กต้องเปลี่ยนทิศทางการจัดเรียงตัวของแม่เหล็ก ขบวนการนี้เป็นขบวนการที่ต้องการความร้อนสูง หรือใช้สนามแม่เหล็กที่มีชั่วตรงกันข้ามความหนาแน่นสูง

2.4.1 อุณหภูมิคูรี (curie temperature)

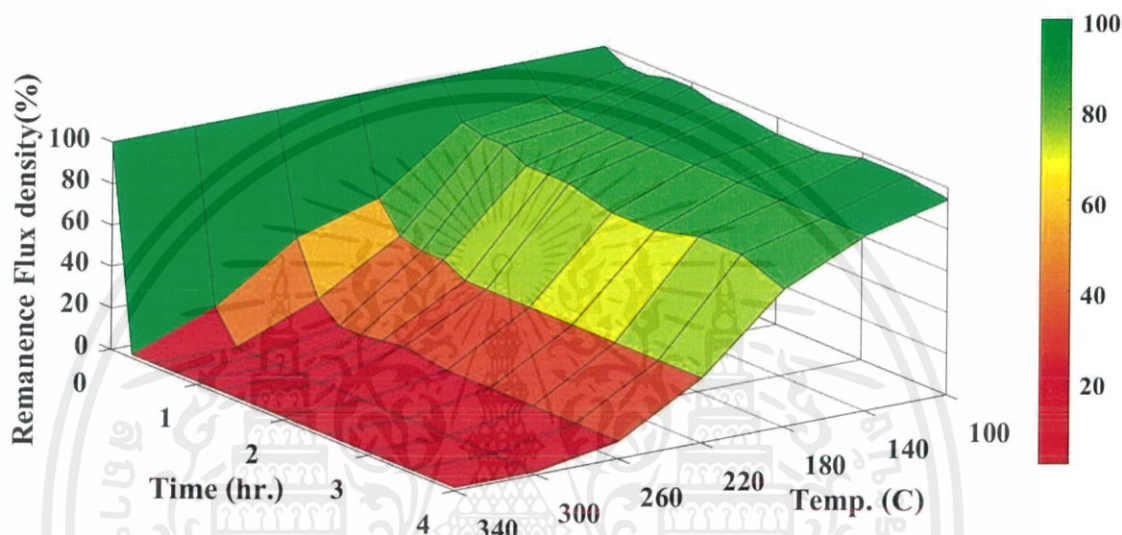
ค่าความเป็นแม่เหล็กขึ้นอยู่กับ การเรียงตัวของโดเมนแม่เหล็กซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และค่าความเป็นแม่เหล็กจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อแม่เหล็กอยู่ภายใต้อุณหภูมิคูรี โดยอุณหภูมิคูรีของสารแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก เหล็ก (Iron) นิกเกิล (Nickel) และ โคบอลต์ (Cobalt) มีค่าเท่ากับ 1044 K , 628 K และ 1388 K ตามลำดับ และอุณหภูมิคูรีของ แมกนีไทต์ (Magnetite) เท่ากับ 856 K จากรูปที่ 2.7 แสดงการเพิ่มอุณหภูมิมีผลต่ออำนาจความเป็นแม่เหล็กของสารนิกเกิลจะสังเกตได้ว่าค่าความเป็นแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 0 ที่อุณหภูมิคูรี (T_c)



รูปที่ 2.7 แสดงการเพิ่มอุณหภูมิมีผลต่ออำนาจความเป็นแม่เหล็กของสารนิกเกิล [19]

2.4.2 ใช้ความร้อนสูงในการลบล้างความเป็นแม่เหล็ก

การอบแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนด้านในแม่เหล็กเกิดการปั่นจนเคลื่อนที่ไปสถานะพลังงานสูง ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนเหล่านั้นอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกับข้ามกับอิเล็กตรอนอื่นที่อยู่ข้างเคียง ด้วยเหตุนี้ทำให้อิเล็กตรอนไม่เกิดการจัดเรียงตัวในแนวเดิมอีกต่อไป จึงทำให้ความเป็นแม่เหล็กลดลง จากรูปที่ 2.8 แสดงถึงค่าความเป็นแม่เหล็กที่ลดลงภายใต้อุณหภูมิต่างๆ ค่าความเป็นแม่เหล็กที่อุณหภูมินั้นๆซึ่งอุณหภูมิตรงจุดทำงานนั้นๆเรียกว่า working temperature



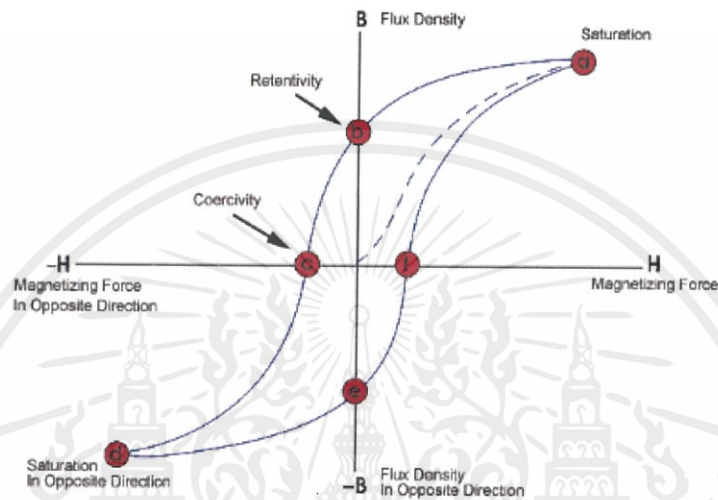
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงการลดอำนาจความเป็นแม่เหล็กด้วยความร้อน [1]

2.4.3 วางในสนามแม่เหล็กที่มีขั้วตรงกันข้าม

สามารถลบล้างสมบัติความเป็นแม่เหล็กได้โดยวางแม่เหล็กไว้ในสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตรงกันข้าม สนามแม่เหล็กนี้จะคัดค้านความเป็นแม่เหล็ก โดยให้กระแสไฟฟ้าสลับผ่านส่วนประกอบของแม่เหล็ก

2.5 วงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loop)

วงรอบฮิสเทอรีซิสแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเหนี่ยวนำ (B) และความแรงสนามแม่เหล็ก (H) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.9 B-H Curve [20]

วงรอบเกิดจากการวัดค่าของฟลักซ์แม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรขณะที่แรงของเหล็กเปลี่ยนไป วัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรที่ไม่เคยถูกทำให้เป็นแม่เหล็กหรือลดความเป็นแม่เหล็กมาก่อนจะมีค่า B เพิ่มขึ้นเมื่อ H เพิ่มขึ้นตามเส้นประ จากรูปที่ 2.8 ค่าความแรงแม่เหล็ก ($H +$) ที่มากที่สุดจะให้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเหนี่ยวนำที่แรงที่สุด ($B +$) ที่จุด a โดเมนเกือบทั้งหมดจะถูกจัดเรียงและการเพิ่มของแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์แม่เหล็กน้อยมาก วัสดุจะถึงจุดอิ่มตัวความเป็นแม่เหล็ก เมื่อทำการลด H ลงจนถึง 0 เส้นโค้งจะเคลื่อนที่จากจุด a ไปยังจุด b ที่จุด b จะเห็นได้ว่าฟลักซ์แม่เหล็กบางส่วนยังคงค้างอยู่ในวัสดุแม้ว่าแรงแม่เหล็กจะเป็นศูนย์แล้วก็ตาม ค่าที่เก็บรักษาไว้ได้บนกราฟนี้แสดงถึงแม่เหล็กตกค้างในวัสดุ (ฟลักซ์แม่เหล็กบางส่วนจัดเรียงตัวเองแต่บางส่วนไม่มีทิศทางแน่นอน) ถ้าป้อนแรงแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้าม เส้นโค้งจะเคลื่อนไปยังจุด c จุดที่ ฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเป็น 0 เรียกจุดนี้ว่า coercivity (แรงแม่เหล็กพลิกกลับอย่างรวดเร็วจะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กในวัสดุเป็น 0 โดยแรงจำเป็นจะต้องเพียงพอที่จะล้างแรงแม่เหล็กตกค้างออกจากวัสดุ)

เมื่อเพิ่มแรงแม่เหล็กในทิศทางลบ วัสดุจะเข้าสู่จุดอิมิตัวอีกครั้งในทิศทางตรงกันข้าม (จุด d) ต่อมาลด H เป็น 0 จะทำให้เส้นโค้งมาถึงจุด e จะมีแรงแม่เหล็กตกค้างเท่ากับแรงแม่เหล็กที่ตกค้างในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อเพิ่ม H กลับสู่ทิศทางบวกจะทำให้ B เป็น 0 จากข้างต้นจะสังเกตได้ว่าเส้นโค้งจะไม่ตัดผ่านจุดกำเนิด เส้นโค้งที่ได้จะมีเส้นทางที่แตกต่างกันได้โดยขึ้นอยู่กับจุด f

จากวงรอบฮิสเทอรีซิส คุณสมบัติหลักมีดังนี้

1. Retentivity วัดได้จากค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างที่สัมพันธ์กับจุดอิมิตัวของแม่เหล็กหรือสามารถบอกได้ว่าวัสดุสามารถรักษาแม่เหล็กตกค้างไว้ได้หลังจากการอิมิตัว (จุด b ของกราฟ)
2. Residual Magnetism (แม่เหล็กตกค้าง) หรือ Residual Flux (ฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง) ฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างจะยังคงอยู่ในวัสดุแม่แรงแม่เหล็กจะเป็น 0
3. Coercive Force (แรงบังคับ) เป็นแรงที่จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเป็น 0 (จุด c ของกราฟ)
4. Permeability เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่สามารถลบฟลักซ์แม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นได้
5. Reluctance เป็นความต้านทานของแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรที่ใช้แสดงในสนามแม่เหล็ก คล้ายกับความต้านทานในวงจรไฟฟ้า [21]

2.6 ทฤษฎีพื้นฐาน

2.6.1 ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity)

ความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นการวัดในเชิงปริมาณของกระแสที่จ่ายเข้าไปสำหรับแม่เหล็ก ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดในแกนเหล็กขึ้นอยู่กับสารที่ใช้ทำแกนเหล็ก ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก กับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ภายในเนื้อสารที่ใช้ในแกนเหล็กคือ

$$B = \mu H \quad (2.1)$$

โดยที่ H = ความเข้มสนามแม่เหล็ก (A-t/m)

μ = ความซึมซาบของแม่เหล็ก (H/m)

B = ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.2)$$

μ_0 = ความซึมซาบของแม่เหล็กของอากาศ = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

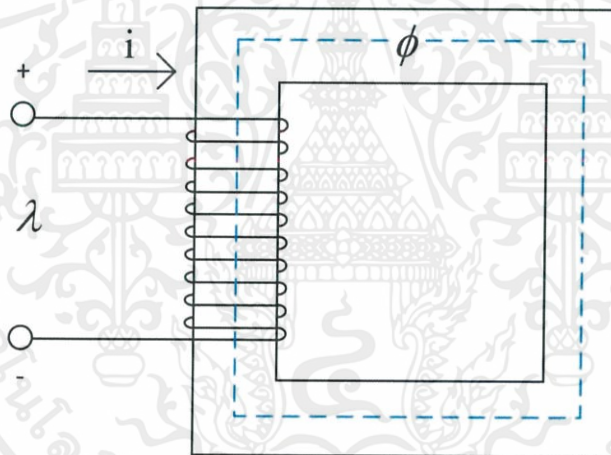
μ_r = ความซึมซาบของแม่เหล็กสัมพัทธ์

2.6.2 กฎของแอมแปร์ (AMPERE'S law)

เมื่อมีกระแสไหลผ่านตัวนำ ทองแดงจะทำให้สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นหรือเรียกว่า ความเข้มสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นตาม โดยมีหน่วยเป็นแอมแปร์รอบต่อเมตร (A-t/m) ซึ่งจากกฎของแอมแปร์ได้กล่าวไว้ว่า “การอินทิเกรตความเข้มสนามแม่เหล็กตามเส้นทางสนามแม่เหล็กในแนววงรอบปิดจะมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ล้อมรอบโดยสนามแม่เหล็กนั้น” แสดงในสมการที่ 2.3 และอธิบายตามรูปที่ 2.9

$$\oint H dl = Ni \quad (2.3)$$

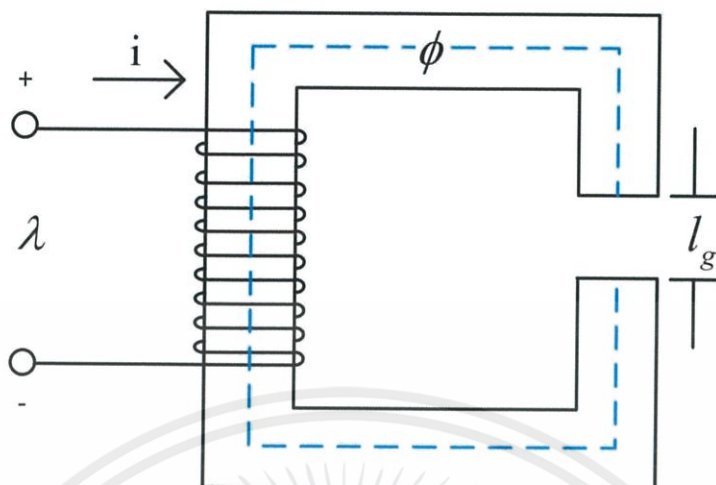
โดยที่	H	=	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (A-t/m)
	l	=	ระยะการแพร่ของสนามแม่เหล็ก (m)
	N	=	จำนวนรอบการพันขดลวด
	i	=	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด (A)



รูปที่ 2.10 ขดลวดพันรอบแกนเหล็กที่เป็นวงรอบปิด

จากรูปที่ 2.9 แสดงว่าวงจรแม่เหล็กที่มีขดลวด N รอบ พันรอบแกนเหล็กที่มีลักษณะเปิดวงรอบปิด (Closed core) เมื่อกำหนดให้ H_c เป็นค่าความเข้าสนามแม่เหล็กของ H ในส่วนที่เป็นแกนเหล็ก จากกฎของแอมแปร์จะได้ว่า

$$Ni = \oint H dl = H_c l_c \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.11 ขดลวดพันรอบแกนเหล็กที่เป็นวงรอบปิด

ในบางกรณีแกนเหล็กของวงจรแม่เหล็กอาจจะไม่ต่อเนื่องกันเป็นวงรอบปิดแต่จะมีบางส่วนเป็นช่องอากาศ (Air gap) ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงวงจรแม่เหล็กในลักษณะที่แกนเหล็กด้านขวามีช่องว่างอากาศ l_g เกิดขึ้น เมื่อกำหนดให้ H_g เป็นค่าความเข้มข้นสนามแม่เหล็กในส่วนที่เป็นอากาศจากกฎของแอมแปร์จะได้ว่า

$$Ni = \oint H dl = H_c l_c + H_g l_g \quad (2.5)$$

2.6.3 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law)

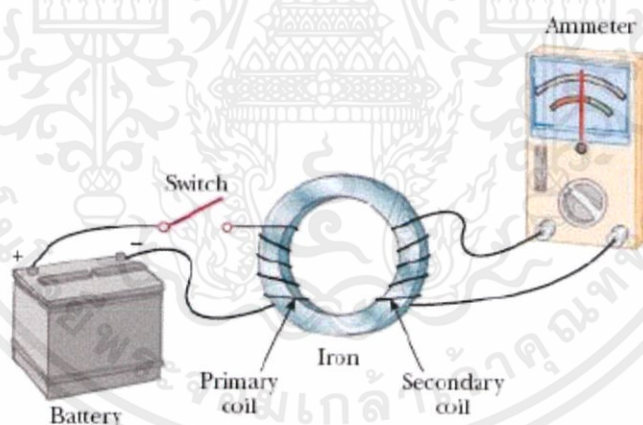
“เมื่อเราจ่ายกระแสไฟฟ้าแล้วทำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้แล้ว แล้วทำไมเราจึงจะนำแม่เหล็กมาสร้างกระแสไฟฟ้าไม่ได้ ?” ฟาราเดย์ได้กล่าวไว้ เขาใช้เวลาประมาณ 10 ปีจนประสบความสำเร็จจากการที่ได้ทดลองโดยการที่ นำขดลวดแยกเป็นสองชุดโดยนำทั้งสองชุดพันกับวงแหวนไทรอยด์ โดยที่ข้างหนึ่งต่อกับแบตเตอรี่ อีกข้างหนึ่งต่อกับแกลวานอมิเตอร์ แล้วทำการปิดวงจรแล้วเขาสังเกตพบว่าเกิดการแกว่งของเข็มในแกลวานอมิเตอร์ไปในทิศทางติดลบ เขาจึงได้ข้อสรุปว่า ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือทำให้แกนเหล็กเคลื่อนที่จะสามารถทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ (electromotive force) ได้ โดยกฎของฟาราเดย์สามารถแสดงได้ตามสมการที่ 2.6

$$emf = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.6)$$

โดยที่

emf = แรงดันเหนี่ยวนำ (V)

ϕ = ฟลักซ์แม่เหล็ก (wb)



รูปที่ 2.12 การทดลองของฟาราเดย์ [22]

2.6.4 กฎของเลนซ์ (Lenz's law)

จากกฎของฟาราเดย์ทำให้เห็นว่าถ้า emf เหนี่ยวนำและฟลักซ์แม่เหล็กเปลี่ยนแปลงมีเครื่องหมายทางคณิตศาสตร์ตรงกันข้าม จึงทำให้เห็นความจริงจากด้านฟิสิกส์จากกฎของเลนซ์กล่าวว่า “แรงดันเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ในทิศทางตรงข้าม” ซึ่งเป็นไปตามกฎของการอนุรักษ์พลังงาน

2.6.5 ความต้านทานภายในวงจรแม่เหล็ก

จากกฎของแอมแปร์จะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานมีค่าดังสมการที่ 2.9

$$\mathcal{R} = Ni = \phi / \mathcal{R} \quad (2.9)$$

โดยที่

\mathcal{R}	=	แรงเคลื่อนแม่เหล็ก
N	=	จำนวนรอบการพันขดลวด
i	=	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด (A)
ϕ	=	ฟลักซ์แม่เหล็ก (Wb)
\mathcal{R}	=	ความต้านทานแม่เหล็ก (A-t/Wb)

โดยความความต้านทานของแม่เหล็กนั้นจะขึ้นอยู่กับสารแม่แม่เหล็ก โครงสร้างของสารแม่เหล็ก ความยาว (l_m) และ พื้นที่หน้าตัด (A)

$$\mathcal{R} = \frac{l_m}{\mu A} \quad (2.10)$$

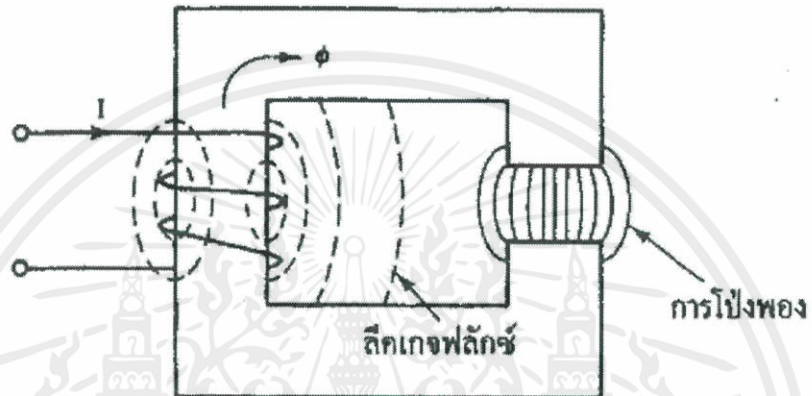
ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์วงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก

วงจรไฟฟ้า		วงจรแม่เหล็ก
Current density	J	Magnetic flux density
Current	I	B
Electric field intensity	E	Magnetic flux
Voltage	V	ϕ
Conductivity	σ	Magnetic field intensity
Resistance	R	H
		Magnetomotive force
		\mathfrak{F}
	$V = IR$	Permeability
		μ
	$J = \sigma E$	Reluctance
	$R = \frac{l}{\sigma A}$	\mathfrak{R}
		$\mathfrak{F} = \phi \mathfrak{R}$
		$B = \mu H$
		$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

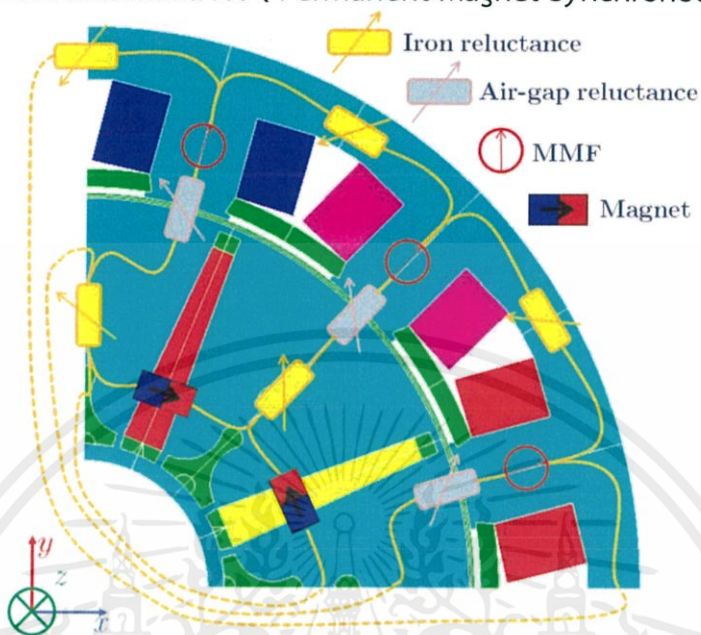
2.6.6 ลีคเกจฟลักซ์และการโป่งพอง

ในวงจรแม่เหล็กที่มีช่องว่างอากาศ (air gap) เป็นส่วนประกอบวงจร เส้นแรงแม่เหล็กมักจะรั่วไหลออกจากแนวหรือทางเดินของวงจรแม่เหล็กและแพร่กระจายออกไปในอากาศเรียกว่าลีคเกจฟลักซ์ หรือ ฟลักซ์รั่ว แต่เส้นแรงแม่เหล็กตรงช่องว่างอากาศจะมีการโป่งพอง (fringing) ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็กตรงช่องว่างอากาศใหญ่ขึ้นเป็นผลทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศลดลง [24]



รูปที่ 2.13 ลีคเกจฟลักซ์และการโป่งพอง [23]

2.7 การศึกษาผลของค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องจักรซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent-Magnet Synchronous Machines)



รูปที่ 2.14 โครงสร้างภายในเครื่องจักรซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร

Number of stator slots	12
Number of rotor poles	8
Max. Power	58 kw
Max. Torque @1500 rpm	215 N.m
Max. current (RMS)	63.6 A
Number of turns (coils)	50
Diameter (x,y)	200 mm.
Depth (z)	200 mm.
Air-gap	0.9 mm.
Radius of rotor	0.07 mm.
height of Permanent magnet	4.6875 mm.
Width of Permanent magnet	10.15625mm.
Relative permeability	19.22

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลของส่วนประกอบหลักภายในเครื่องจักรซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร

จากการนำข้อมูลที่ได้ในรูปที่ 2.13 และ ตารางที่ 2.2 มาทำการคำนวณหาค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศและค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบที่แสดงในภาคผนวก ค พบว่าค่าความต้านทานแม่เหล็กจากการคำนวณทั้ง 2 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยเมื่อพิจารณาจากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศและค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร จะสรุปได้ว่าผลของค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวร เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะการใช้งานของเครื่องจักรชิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร[24]



บทที่ 3

การศึกษาและวัดสมรรถนะของแม่เหล็ก

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาและวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรซึ่งทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนช่องว่างอากาศ การเพิ่มลดอำนาจแม่เหล็ก และการเปลี่ยนแปลงขนาดของแม่เหล็กถาวรทดสอบเพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวร เมื่อนำแม่เหล็กถาวรไปใช้งานภายในเครื่องจักรชิงโครนัส

3.2 แม่เหล็กถาวรทดสอบ

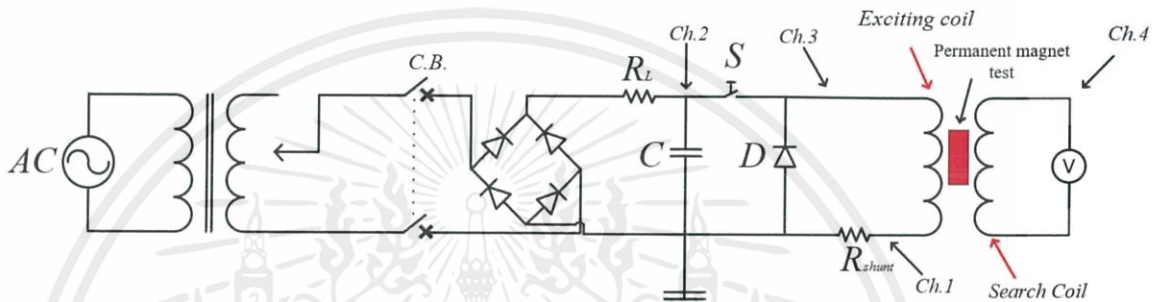
เป็นแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในการศึกษาและวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวร เป็นแม่เหล็กชนิด Neodymium iron boron (Nd-Fe-B) ซึ่งมีขนาด $20 \times 24 \times 7$ mm. และ $24 \times 30 \times 10$ mm. ซึ่งมีอุณหภูมิคูรีเท่ากับ 310 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิทำงานสูงสุดเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.1 แม่เหล็กถาวรทดสอบชนิด Neodymium iron boron (Nd-Fe-B)

3.3 วงจรที่ใช้กระตุ้นแม่เหล็ก

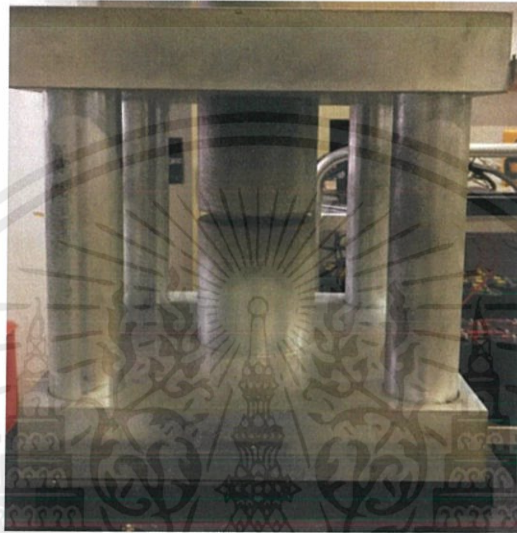
เป็นวงจรใช้ในการกระตุ้นสนามแม่เหล็กให้กับแม่เหล็กถาวรทดสอบดังรูปที่ 3.2 โดยวงจรกระตุ้นสนามแม่เหล็กจะทำให้การเรียงตัวโดเมนของแม่เหล็กเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยใช้ตัวเก็บประจุในการเก็บพลังงาน และเมื่อมีการคายประจุจะใช้ Thyristor เป็นสวิตช์เพื่อสร้างกระแสกระตุ้นผ่านขดลวดเหนี่ยวนำสร้างเป็นสนามแม่เหล็กผ่านสารแม่เหล็กแข็งเหนี่ยวนำโดเมนแม่เหล็กภายในแม่เหล็กเรียงให้อยู่ในทิศทางเดียวกันจนแม่เหล็กมีอำนาจความเป็นแม่เหล็กในตัวเอง จากนั้นนำแม่เหล็กถาวรทดสอบที่ได้จากการกระตุ้นไปศึกษาและวัดสมรรถนะ



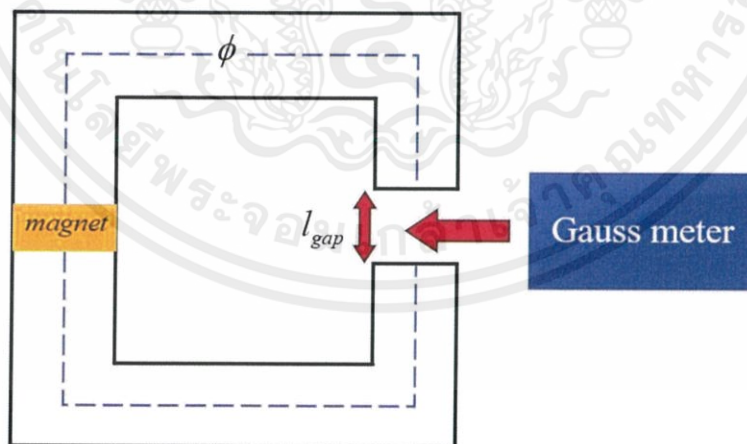
รูปที่ 3.2 วงจรที่ใช้กระตุ้นแม่เหล็ก

3.4 วงจรรูป E - I

เป็นวงจรที่ใช้ในการวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรทดสอบโดยเป็นการวัดค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งสามารถปรับช่องว่างอากาศของวงจรแม่เหล็กได้โดยนำ Gauss's meter ไปวัดตรงช่องว่าง อากาศที่อยู่ระหว่างแม่เหล็กถาวรทดสอบกับแกนเหล็กดังรูปที่ 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.3 วงจรแม่เหล็กแบบ E - I

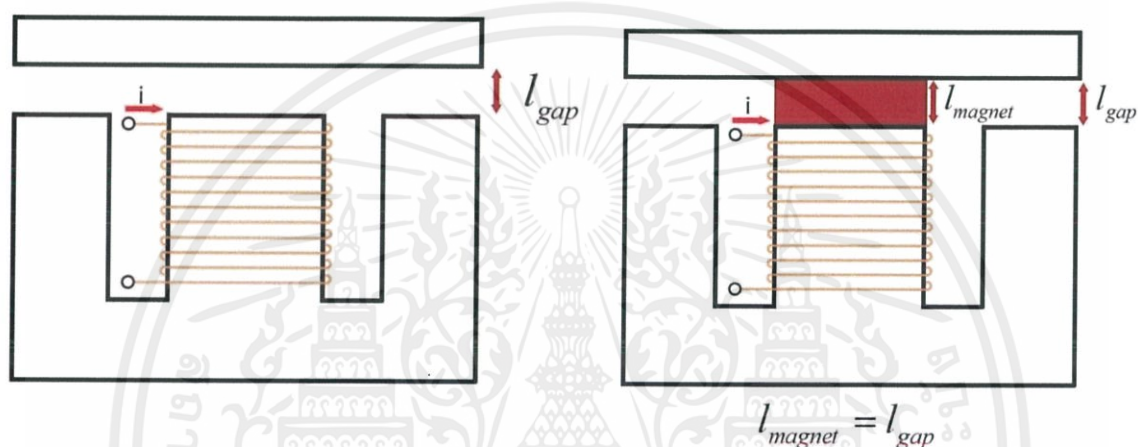


รูปที่ 3.4 วิธีการวัดโดยใช้วงจรแม่เหล็กแบบ E - I

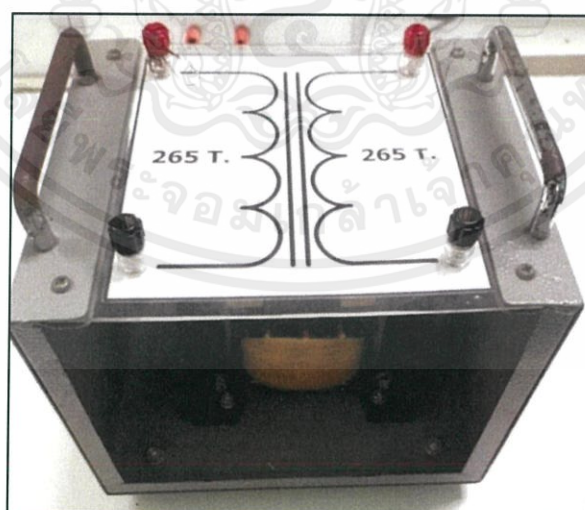
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การออกแบบและการวิเคราะห์ผลของปัจจัยอื่นๆในแม่เหล็กถาวร

เป็นการออกแบบวงจรแม่เหล็กเพื่อทดสอบสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรทดสอบ โดยมีสมมติฐานว่าภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบนั้นมีค่าความต้านทานภายในซึ่งอาจส่งผลให้การตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กมีความคลาดเคลื่อน โดยการทดลองจะนำแม่เหล็กถาวรทดสอบไปใส่ในวงจรแม่เหล็ก ทำการหาค่าความเหนี่ยวนำ (L) และทำการหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กโดยการหาค่าความต้านทานของช่องว่างอากาศจากค่าความต้านทานภายในแม่เหล็ก ว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางใด ดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 แสดงวงจรแม่เหล็กโดยใช้ขดลวด 265 รอบที่ใช้ในการทดสอบ



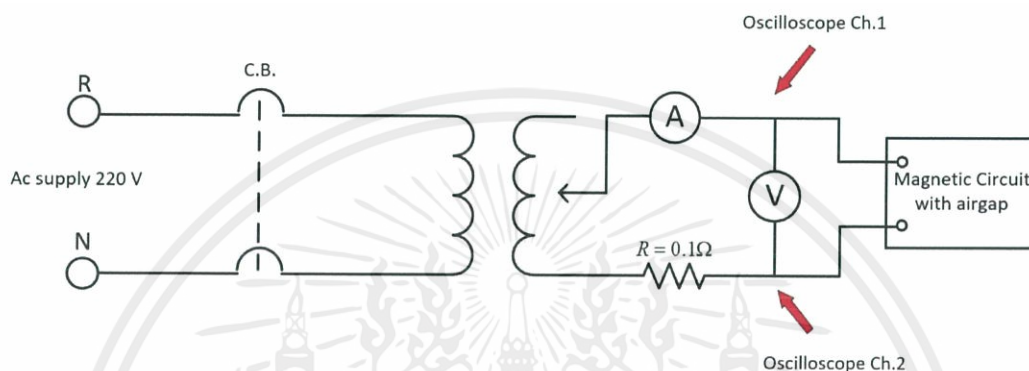
รูปที่ 3.5 การทดลองหาความต้านทานภายในแม่เหล็ก



รูปที่ 3.6 วงจรแม่เหล็ก

3.5.1 วงจรแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองหาความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวร

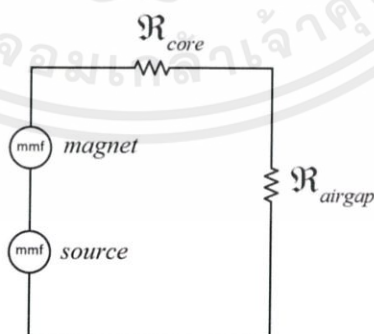
วงจรแม่เหล็กที่ใช้ในคำนวณหาความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวร เป็นดังรูปที่ 3.7 เมื่อขดลวดของวงจรแม่เหล็กได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ กระแสที่เกิดขึ้นในขดลวดจะถูกกำหนดโดยค่าอิมพีแดนซ์ Z ที่ประกอบไปด้วยความต้านทาน(R) และความเหนี่ยวนำ(L) ในขดลวด โดยต่อความต้านทานขนาด 0.1 โอห์มเพื่อใช้หาผลต่างมุมระหว่างแรงดันและกระแสมาใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 3.7 วงจรที่จ่ายแรงดันเพื่อสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

3.5.2 วงจรสมมูลแม่เหล็ก

วงจรแม่เหล็กที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 3.6 เมื่อมีแม่เหล็กถาวรอยู่ในวงจรแม่เหล็กจะสามารถเขียนรูปวงจรสมมูลแม่เหล็กได้ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นวงจรแบบอนุกรมและมีแรงเคลื่อนแม่เหล็ก 2 แหล่ง (แรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กและแรงเคลื่อนจากแม่เหล็กถาวร) ค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องอากาศ และค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็ก



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลแม่เหล็ก

3.5.3 การทดลองหาความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กโดยการปรับระยะช่องอากาศ

เป็นการทดลองเพื่อหาว่าระยะของช่องว่างอากาศส่งผลต่อค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรอย่างไร โดยนำแม่เหล็กขนาด $20 \times 24 \times 7$ mm. และเพิ่มช่องว่างอากาศบริเวณที่นำแม่เหล็กถาวรใส่ลงไป ในวงจรแม่เหล็กแล้วพิจารณาแนวโน้มของค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวร โดยระยะช่องอากาศเท่ากับ 1, 1.5 และ 2 mm.

3.5.4 การทดลองหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กโดยการปรับอำนาจความเป็นแม่เหล็ก

เป็นการทดลองเพื่อหาผลของอำนาจความเป็นแม่เหล็กว่ามีผลต่อค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรอย่างไร โดยนำแม่เหล็กขนาด $20 \times 24 \times 7$ mm. และปรับระยะช่องว่างอากาศให้คงที่และปรับอำนาจความเป็นแม่เหล็กเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยใช้ Gauss's meter วัดหาค่าความเป็นแม่เหล็กเป็นตัวอ้างอิง แล้วทำการพิจารณาแนวโน้มของค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวร

3.5.5 การทดลองหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กโดยการเปลี่ยนขนาดแม่เหล็ก

เป็นการทดลองเพื่อหาว่าขนาดของแม่เหล็กส่งผลต่อค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรอย่างไร โดยการเปลี่ยนขนาดเป็นแม่เหล็กขนาด $30 \times 24 \times 10$ mm. และปรับอำนาจความเป็นแม่เหล็กเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 0 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยใช้ Gauss's meter วัดหาค่าความเป็นแม่เหล็กเป็นตัวอ้างอิง แล้วทำการพิจารณาแนวโน้มของค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวร

3.6 เตาอบ

ใช้ปรับความร้อนเพื่อลดอำนาจความเป็นแม่เหล็กของสารแม่เหล็กเพื่อนำไปทดสอบสมรรถนะใน
วงจรแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เตาอบ

บทที่ 4

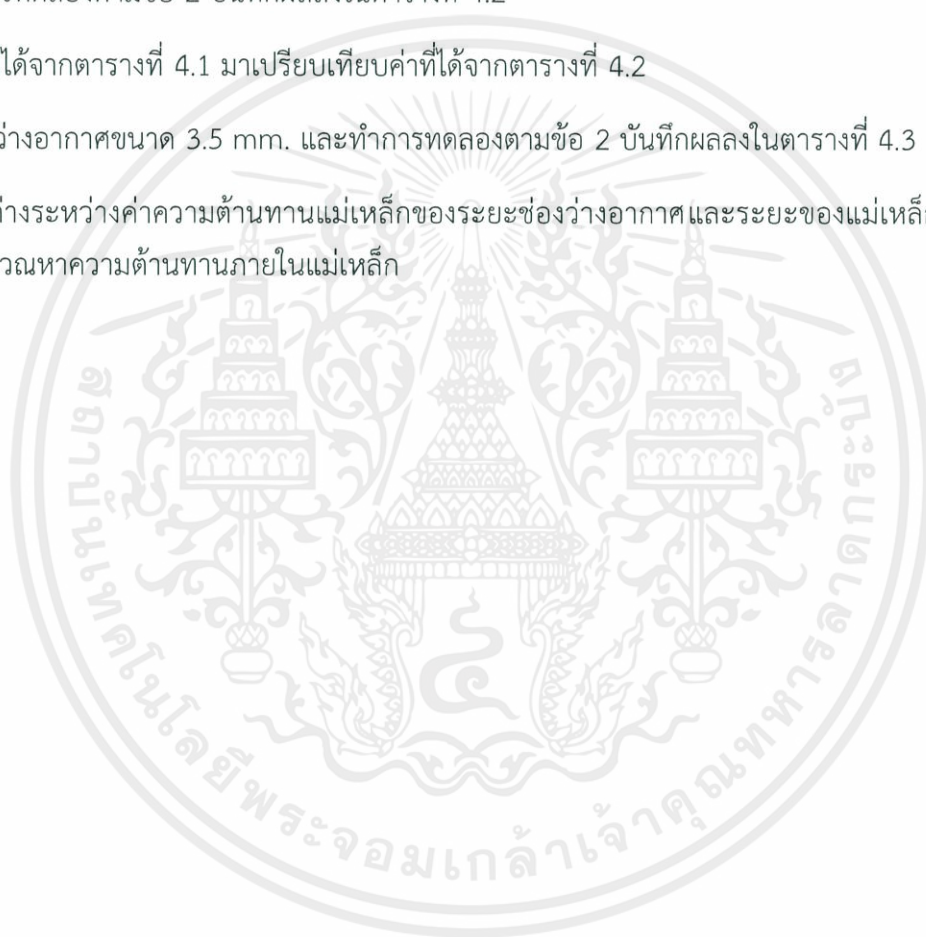
วิธีการทดลองและผลการทดลอง

4.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. วงจรแม่เหล็กแบบมีช่องอากาศ
2. แหล่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียวปรับค่าได้
3. โวลต์มิเตอร์กระแสสลับ
4. แอมป์มิเตอร์กระแสสลับ
5. ออสซิลโลสโคป
6. แผงค่าความต้านทานไฟฟ้าขนาด 0.1 โอห์ม
7. แผงจุดต่อวงจรไฟฟ้า
8. แกนอากาศขนาด 1 1.5 2 3.5 4.5 5 5.5 7 mm.
9. แม่เหล็กถาวรทดสอบ 10 ตัว ขนาด 20 X 24 X 7 mm.
- 10.แม่เหล็กถาวรทดสอบ 5 ตัว ขนาด 24 X 30 X 10 mm.
10. Gauss's meter
11. เต้าอบ

4.2 การทดลองที่ 1 การหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบ

1. ต่อบังจรวดทดลองดังรูปที่ 3.7 โดยใช้ขดลวดจำนวน 265 รอบ และใช้ช่องว่างอากาศขนาด 7 mm.
2. ปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าตามตารางที่ 4.1 ทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า มุมต่างเฟส ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า และคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ (L) และค่าความต้านทานแม่เหล็ก (\mathcal{R})
3. นำแม่เหล็กถาวรทดสอบที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์ ขนาด 7 mm. แทนที่ช่องว่างอากาศ และทำการทดลองตามข้อ 2 บันทึกผลลงในตารางที่ 4.2
4. นำค่าที่ได้จากตารางที่ 4.1 มาเปรียบเทียบค่าที่ได้จากตารางที่ 4.2
5. ใช้ช่องว่างอากาศขนาด 3.5 mm. และทำการทดลองตามข้อ 2 บันทึกผลลงในตารางที่ 4.3
6. หาผลต่างระหว่างค่าความต้านทานแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศและระยะของแม่เหล็กถาวรเพื่อนำมาคำนวณหาความต้านทานภายในแม่เหล็ก



วิธีการคำนวณหาค่าความต้านทานแม่เหล็ก (\mathfrak{R}) ที่กระแสเท่ากับ 0.2 A ความถี่ 50 Hz และ ใช้ช่องว่างอากาศขนาด 7 mm.

จาก
$$V = (I \angle \theta) \times Z$$

$$Z = \frac{2.3}{0.2 \angle 79.2} = 2.155 - 11.296i \ \Omega$$

ดังนั้น $X_L = 11.296 \Omega$

หาค่าความต้านทานเหนี่ยวนำ (L)

จาก

$$X_L = 2\pi fL$$

$$L = \frac{11.296}{2\pi \times 50} = 0.036 \ H$$

จาก

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_c}$$

ในกรณีนี้คิดว่าค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูงมากจึงทำให้ค่า $\mathfrak{R}_c = 0$

ดังนั้นจะได้ค่าความต้านทานแม่เหล็ก (\mathfrak{R}) เท่ากับ $\mathfrak{R}_g = \frac{265^2}{0.036} = 1953014 \ \frac{A-t}{Wb}$

วิธีการคำนวณการหาความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็ก ที่กระแสเท่ากับ 0.2 A ความถี่ 50 Hz และใช้แม่เหล็กถาวรทดสอบที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 100 เฟอร์เซ็นต์ ขนาด 7 mm. แทนที่ช่องว่างอากาศ

จาก
$$V = (I \angle \theta) \times Z$$

$$Z = \frac{2.1}{0.2 \angle 79.2} = 1.968 - 10.314i \quad \Omega$$

ดังนั้น $X_L = 10.314 \Omega$

หาค่าความต้านทานเหนี่ยวนำ (L)

จาก

$$X_L = 2\pi fL$$

$$L = \frac{10.314}{2\pi \times 50} = 0.0328 \quad H$$

จาก

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_{magnet} + \mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_c}$$

ในกรณีนี้คิดว่าค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูงมากจึงทำให้ค่า $\mathfrak{R}_c = 0$

ดังนั้นจะได้ค่าความต้านทานแม่เหล็ก (\mathfrak{R}) เท่ากับ $\mathfrak{R}_{magnet} + \mathfrak{R}_g = \frac{265^2}{0.0328} = 2139018 \frac{A-t}{Wb}$

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.1

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้ช่องว่างอากาศขนาด 7 mm.

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\mathfrak{R}_g \left(\frac{A-l}{\mu b} \right)$
0.2	2.3	79.2	0.035957	1953014
0.4	4.6	79.2	0.035957	1953014
0.6	6.9	79.2	0.035957	1953014
0.8	9.3	79.2	0.036348	1932012
1	11.6	79.2	0.03627	1936183
1.2	14.0	79.2	0.036478	1925116
1.4	16.3	79.2	0.036404	1929055
1.6	18.6	79.2	0.036348	1932012
1.8	20.9	79.2	0.036305	1934332
2	23.0	79.2	0.035957	1953014

จากตารางที่ 4.1 เมื่อมีการจ่ายกระแสที่มีค่าเท่ากับ 0.2 0.4 0.6 0.8 1 1.2 1.4 1.6 1.8 และ 2 แอมป์ จะเกิดแรงดันที่ตกคร่อมภายในวงจรแม่เหล็กทำให้เกิดความต่างเฟสกันระหว่าง แรงดัน กับกระแส จึงทำให้สามารถคิดค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแม่เหล็ก (L) และค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแม่เหล็ก (L) สามารถคำนวณหาความต้านแม่เหล็กได้จากสูตร $L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}$ ซึ่งค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในวงจรแม่เหล็กนี้คือค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องอากาศ (\mathfrak{R}_g)

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.2

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้แม่เหล็กถาวรทดสอบที่มีความเป็นแม่เหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์ ขนาด 7 mm. แทนที่ช่องว่างอากาศ

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{magnet} \left(\frac{A-t}{\mu b} \right)$
0.2	2.1	79.2	0.03283	2139018
0.4	4.1	79.2	0.032047	2191283
0.6	6.2	79.2	0.032309	2173516
0.8	8.3	79.2	0.03244	2164793
1	10.5	79.2	0.03283	2139018
1.2	12.6	79.2	0.03283	2139018
1.4	14.7	79.2	0.03283	2139018
1.6	16.8	79.2	0.03283	2139018
1.8	19	79.2	0.033002	2127878
2	21.2	79.2	0.033143	2118845

จากตารางที่ 4.2 เมื่อมีการจ่ายกระแสที่มีค่าเท่ากับ 0.2 0.4 0.6 0.8 1 1.2 1.4 1.6 1.8 และ 2 แอมป์ จะเกิดแรงดันที่ตกคร่อมภายในวงจรแม่เหล็กทำให้เกิดความต่างเฟสกันระหว่าง แรงดันกับกระแส จึงทำให้สามารถคิดค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแม่เหล็ก (L) และค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแม่เหล็ก (L) สามารถคำนวณหาค่าความต้านแม่เหล็กได้จากสูตร $L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}$ ซึ่งค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในวงจรแม่เหล็กนี้คือค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องอากาศรวมกับค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็ก ($\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{magnet}$)

เปรียบเทียบค่าความต้านทานแม่เหล็กของวงจรแม่เหล็กที่ใช้ช่องว่างอากาศขนาด 7 mm. กับค่าความต้านทานแม่เหล็กของวงจรแม่เหล็กที่ใช้แม่เหล็กถาวรทดสอบที่มีความเป็นแม่เหล็ก 100 เอร์เซ็นต์ ขนาด 7 mm. แทนที่ช่องว่างอากาศ

จากค่าความต้านทานแม่เหล็กที่ได้จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 พบว่าที่ระยะช่องว่างอากาศมีค่าเท่ากับ 8 mm. เท่ากันทั้งสองวงจรแต่พบว่าค่าของความต้านทานแม่เหล็กที่ได้จากคำนวณตั้งตารางที่ 4.1 และ 4.2 นั้นมีค่าไม่เท่ากัน จึงเป็นตามการสันนิษฐานที่ว่าภายในแม่เหล็กมีค่าความต้านทานแม่เหล็กจึงทำให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กของสองวงจรมีขนาดไม่เท่ากัน จึงสมมุติฐานว่าแม่เหล็กมีความต้านทานภายใน

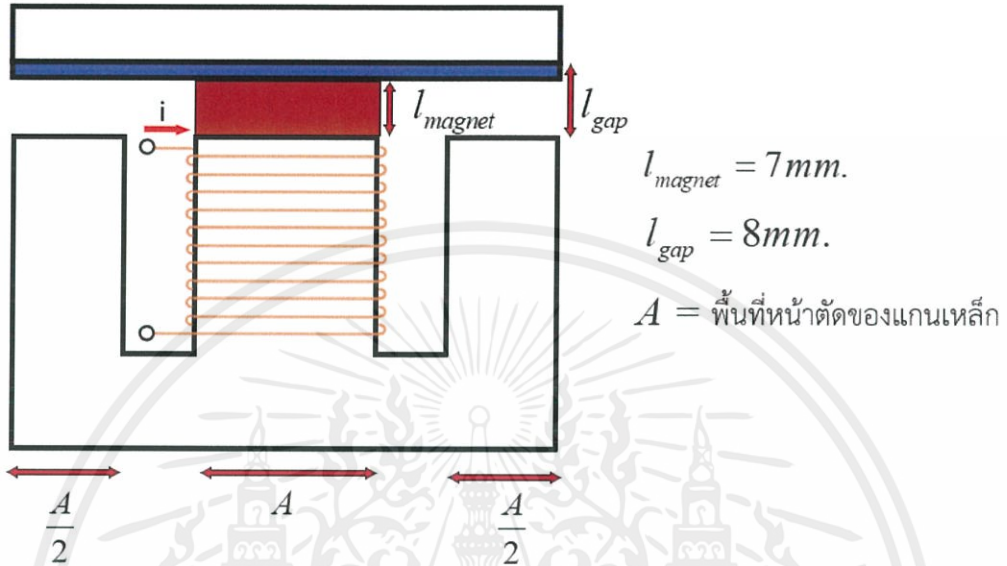
วิธีการหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบสามารถหาโดยทำการทดลองวัดค่าความต้านทานแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศ 3.5 mm. กำจัดค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศของวงจรแม่เหล็กที่มีแม่เหล็กถาวรทดสอบขนาด $20 \times 24 \times 7$ mm.

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.3

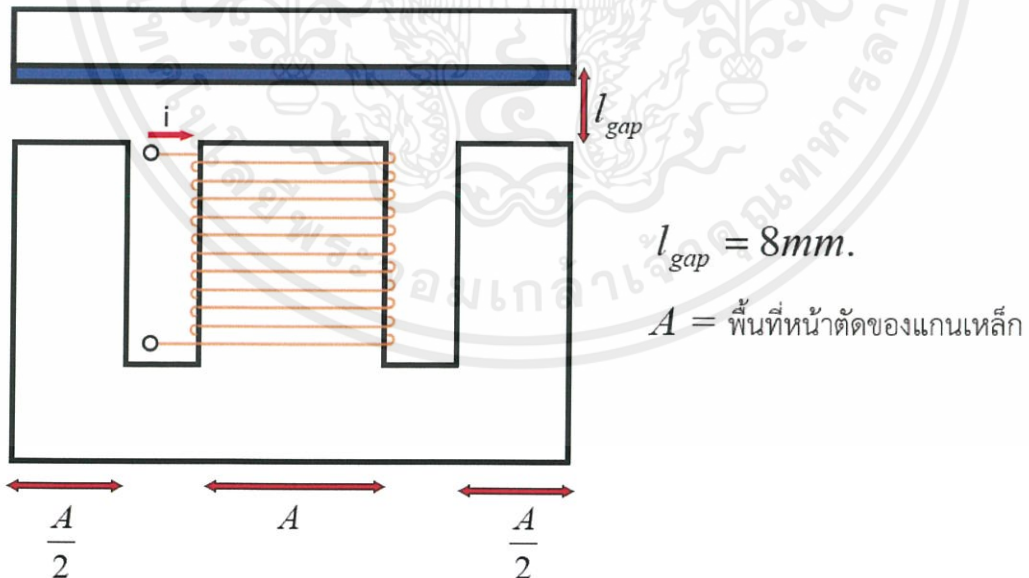
ตารางบันทึกผลค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ 3.5 mm.

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\mathfrak{R}_g \left(\frac{A-t}{Wb} \right)$
0.2	2.8	82.8	0.044212	1588371
0.4	5.8	82.8	0.045791	1533605
0.6	8.7	82.8	0.045791	1533605
0.8	11.7	82.8	0.046185	1520499
1	14.6	82.8	0.046107	1523092
1.2	17.5	82.8	0.046054	1524839
1.4	20.3	82.8	0.045791	1533605
1.6	23.1	82.8	0.045593	1540244
1.8	25.8	82.8	0.045265	1551432
2	28.4	82.8	0.044843	1566002

วิธีการคำนวณหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรโดยใช้วิธีการหาผลต่างระหว่างค่าความต้านทานแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศและระยะของแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 4.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กโดยมีแม่เหล็กถาวรทดสอบ



รูปที่ 4.2 การทดสอบหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กโดยไม่มีแม่เหล็กถาวรทดสอบ

วิธีการคำนวณหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบ (\mathcal{R}_{magnet}) ที่กระแสเท่ากับ 0.2 A ความถี่ 50 Hz

จาก $\mathcal{R} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A_g}$ จากรูปที่ 4.1 พบว่าพื้นที่หน้าตัดบริเวณแกนกลางมีค่าเป็น 2 เท่าของพื้นที่หน้าตัด

บริเวณด้านข้าง ค่าความยาวของช่องอากาศ (l_g) เท่ากับ 8 mm. และ ค่าความยาวแผ่นรองแกนเหล็กซึ่งเปรียบเสมือนช่องว่างอากาศเท่ากับ 1 mm.

$$\text{จะได้ } \mathcal{R}_{magnet} + \mathcal{R}_g = \mathcal{R}_{magnet} + \frac{l_g}{\mu_0 A_g}$$

$$\mathcal{R}_{magnet} + \mathcal{R}_g = \mathcal{R}_{magnet} + \frac{8}{\mu_0 A} + \frac{1}{\mu_0 A} = \mathcal{R}_{magnet} + \frac{9}{\mu_0 A}$$

ดังนั้น ถ้าหากกำจัดค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนอากาศ (\mathcal{R}_g) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{9}{\mu_0 A}$ จะสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กได้ (\mathcal{R}_{magnet})

โดยวิธีการกำจัด $\frac{9}{\mu_0 A}$ สามารถทำได้โดยต่อวงจรแม่เหล็กที่ใช้ระยะช่องอากาศในวงจรรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.2 พบว่าพื้นที่หน้าตัดบริเวณแกนกลางมีค่าเป็น 2 เท่าของพื้นที่หน้าตัดบริเวณด้านข้าง จะได้ค่าความยาวของช่องอากาศทั้งหมด (l_g) เท่ากับ 4.5+4.5=9 mm.

จากตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.3

$$\text{จะได้ว่า } \mathcal{R}_g = \frac{9}{\mu_0 A} = 1588371 \frac{A-t}{Wb}$$

จากตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.2

$$\text{ค่าความต้านทานแม่เหล็กของแม่เหล็กและช่องอากาศ } \mathcal{R}_{magnet} + \mathcal{R}_g \text{ เท่ากับ } 2139018 \frac{A-t}{Wb}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กได้ } (\mathcal{R}_{magnet}) \text{ จะเท่ากับ } 2139018 - 1588371 = 550647.5 \frac{A-t}{Wb}$$

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.4

ตารางบันทึกผลค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบที่มีขนาด 20mm. × 24mm. × 7 mm.

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$\mathfrak{R}_{magnet} \left(\frac{A-t}{Wb} \right)$
0.2	2.1	79.2	550647.5
0.4	4.1	79.2	657677.3
0.6	6.2	79.2	639910.1
0.8	8.3	79.2	644293.5
1	10.5	79.2	615926.3
1.2	12.6	79.2	614178.8
1.4	14.7	79.2	605412.8
1.6	16.8	79.2	598774.6
1.8	19	79.2	576445.1
2	21.2	79.2	552842.8

อภิปรายผลการทดลอง

เมื่อทำการหาผลต่างระหว่างค่าความต้านทานแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศและระยะของแม่เหล็กถาวร เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กพบว่าค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มกระแส 0.2 ถึง 2 A

4.3 การทดลองที่ 2 วิธีการทดลองเพื่อหาว่าช่องว่างอากาศส่งผลต่อความต้านทานภายในแม่เหล็กอย่างไร

1. ต่อบรรจกทดลองดังรูปที่ 3.7 โดยใช้ขดลวดจำนวน 265 รอบ แม่เหล็กขนาด 7 mm. แทนที่ช่องว่างอากาศ
2. ปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าตามตารางที่ 4.5 ทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า มุมต่างเฟส ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า และคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ (L) และค่าความต้านทานแม่เหล็ก (R)
3. ต่อบรรจกทดลองดังรูปที่ 3.6 โดยใช้ขดลวดจำนวน 265 รอบ ช่องว่างอากาศระยะ 3.5 mm. และทำการทดลองตามข้อ 2 จากนั้นบันทึกผลตารางที่ 4.6
4. ทำการทดลองตามข้อที่ 1-2 โดยเพิ่มระยะของช่องว่างอากาศในข้อที่ 1 เป็น 1, 1.5 และ 2 mm. ตามลำดับ และบันทึกผลลงในตารางที่ 4.7 4.9 4.11 ตามลำดับ
5. ทำการทดลองตามข้อ 3 โดยใช้ระยะช่องว่างอากาศเป็น 4.5, 5 และ 5.5 mm. ตามลำดับและทำการบันทึกผลลงในตารางที่ 4.8 4.10 4.12 ตามลำดับ
6. หาผลต่างระหว่างค่าความต้านทานแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศและระยะของแม่เหล็กถาวร เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็ก บันทึกผลลงในตารางที่ 4.13
7. คำนวณหาค่าฟลักซ์และบันทึกผลลงในตารางที่ 4.14

วิธีการหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรที่ไม่มีช่องว่างอากาศ

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 สามารถหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบที่ไม่มีช่องว่างอากาศโดยทำการทดลองวัดค่าต้านทานของแม่เหล็กจากระยะช่องว่างอากาศ 3.5 mm และนำไปกำจัดค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศของวงจรมแม่เหล็กที่มีแม่เหล็กถาวรทดสอบขนาด $20 \times 24 \times 7$ mm.

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.5

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้แม่เหล็กถาวรทดสอบขนาด $20 \times 24 \times 7$ mm.

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{magnet} \left(\frac{A-t}{Wb} \right)$
0.2	2.1	81	0.033011	2127324
0.4	4.1	81	0.032225	2179205
0.6	6.2	81	0.032487	2161632
0.8	8.3	81	0.032618	2152941
1	10.5	81	0.033011	2127324
1.2	12.6	81	0.033011	2127324
1.4	14.7	81	0.033011	2127324
1.6	16.8	81	0.033011	2127324
1.8	19	81	0.033186	2116121
2	21.2	81	0.033325	2107248

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.6

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้ช่องว่างอากาศขนาด 3.5 mm.

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\mathfrak{R}_g \left(\frac{A-t}{Wb} \right)$
0.2	2.8	82.8	0.044212	1588371
0.4	5.8	82.8	0.045791	1533605
0.6	8.7	82.8	0.045791	1533605
0.8	11.7	82.8	0.046185	1520499
1	14.6	82.8	0.046107	1523092
1.2	17.5	82.8	0.046054	1524839
1.4	20.3	82.8	0.045791	1533605
1.6	23.1	82.8	0.045593	1540244
1.8	25.8	82.8	0.045265	1551432
2	28.4	82.8	0.044843	1566002

วิธีการหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กที่มีช่องว่างอากาศ 1 mm.

จากตารางที่ 4.7 และ 4.8 สามารถหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบที่มีช่องว่างอากาศเท่ากับ 1 mm. ได้โดยทำการทดลองวัดค่าต้านทานของแม่เหล็กจากระยะช่องว่างอากาศ 4.5 mm และนำไปกำจัดค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศของวงจรมแม่เหล็กที่มีแม่เหล็กถาวรทดสอบขนาด $20 \times 24 \times 7$ mm.

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.7

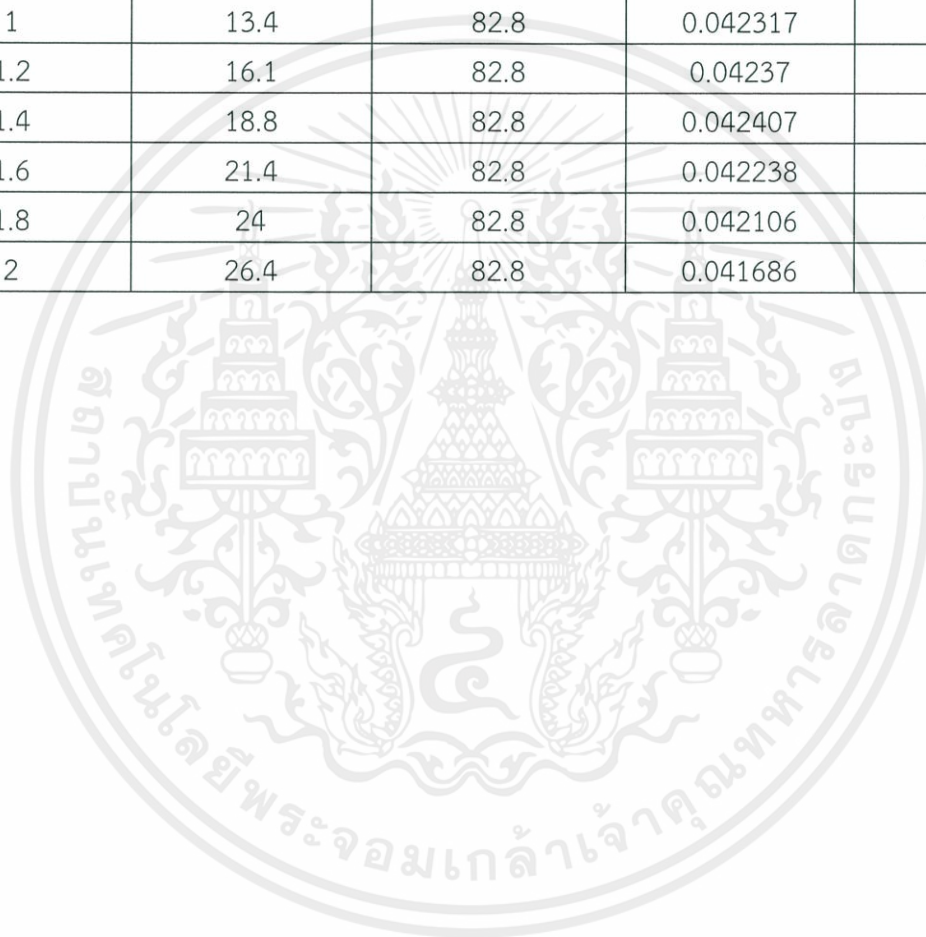
ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กที่ใช้แม่เหล็กถาวรทดสอบขนาด $20 \times 24 \times 7$ mm. และช่องว่างอากาศ 1 mm.

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\mathcal{R}_g + \mathcal{R}_{magnet} \left(\frac{A-t}{Wb} \right)$
0.2	2	79.2	0.031267	2245982
0.4	4	79.2	0.031267	2245982
0.6	6	79.2	0.031267	2245982
0.8	8	79.2	0.031267	2245982
1	10	79.2	0.031267	2245982
1.2	12.1	79.2	0.031528	2227411
1.4	14.2	79.2	0.031714	2214354
1.6	16.3	79.2	0.031853	2204640
1.8	18.4	79.2	0.031962	2197153
2	20.5	79.2	0.032049	2191196

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.8

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้ช่องว่างอากาศขนาด 4.5 mm.

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\Re_g \left(\frac{A-t}{hb} \right)$
0.2	2.6	82.8	0.041054	1710564
0.4	5.3	82.8	0.044212	1588371
0.6	8	82.8	0.042106	1667801
0.8	10.8	82.8	0.042633	1647205
1	13.4	82.8	0.042317	1659496
1.2	16.1	82.8	0.04237	1657439
1.4	18.8	82.8	0.042407	1655971
1.6	21.4	82.8	0.042238	1662597
1.8	24	82.8	0.042106	1667801
2	26.4	82.8	0.041686	1684637



วิธีการหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กที่มีช่องว่างอากาศ 1.5 mm.

จากตารางที่ 4.9 และ 4.10 สามารถหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบที่มีช่องว่างอากาศเท่ากับ 1.5 mm. ได้โดยทำการทดลองวัดค่าต้านทานแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศ 5 mm. และนำไปกำจัดค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศของวงจรมแม่เหล็กที่มีแม่เหล็กถาวรทดสอบขนาด $20 \times 24 \times 7$ mm.

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.9

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กที่ใช้แม่เหล็กถาวรทดสอบขนาด $20 \times 24 \times 7$ mm. และช่องว่างอากาศ 1.5 mm.

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{magnet} \left(\frac{A-t}{wb} \right)$
0.2	1.9	79.2	0.029704	2364182
0.4	3.9	79.2	0.030485	2303555
0.6	5.9	79.2	0.030746	2284047
0.8	7.9	79.2	0.030876	2274416
1	9.9	79.2	0.030954	2268662
1.2	11.9	79.2	0.031007	2264843
1.4	14	79.2	0.031267	2245959
1.6	16	79.2	0.031267	2245959
1.8	18.1	79.2	0.031441	2233567
2	20.2	79.2	0.03158	2223729

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.10

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้ช่องว่างอากาศขนาด 5 mm.

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\mathfrak{R}_g \left(\frac{l}{\mu_0 \mu_r} \right)$
0.2	2.5	79.2	0.039084	1796786
0.4	5.1	79.2	0.039865	1761550
0.6	7.8	79.2	0.040647	1727671
0.8	10.4	79.2	0.040647	1727671
1	13	79.2	0.040647	1727671
1.2	15.6	79.2	0.040647	1727671
1.4	18.2	79.2	0.040647	1727671
1.6	20.7	79.2	0.040452	1736018
1.8	23.2	79.2	0.0403	1742572
2	25.6	79.2	0.040022	1754671

วิธีการหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กที่มีช่องว่างอากาศ 2 mm.

จากตารางที่ 4.11 และ 4.12 สามารถหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กมีช่องว่างอากาศเท่ากับ 2 mm. โดยทำการทดลองวัดค่าต้านทานแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศ 5.5 mm และนำไปกำจัดค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศของวงจรแม่เหล็กที่มีแม่เหล็กถาวรทดสอบขนาด $20 \times 24 \times 7$ mm.

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.11

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้แม่เหล็กขนาด 7 mm. และช่องว่างอากาศ 2 mm.

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{magnet} \left(\frac{A-l}{wb} \right)$
0.2	1.9	79.2	0.029704	2364182
0.4	3.9	79.2	0.030485	2303555
0.6	5.9	79.2	0.030746	2284035
0.8	7.9	79.2	0.030876	2274416
1	9.9	79.2	0.030954	2268662
1.2	11.9	79.2	0.031007	2264843
1.4	13.9	79.2	0.031044	2262126
1.6	16	79.2	0.031267	2245982
1.8	18	79.2	0.031267	2245982
2	20.1	79.2	0.031423	2234811

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.12

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่ใช้ช่องว่างอากาศขนาด 5.5 mm.

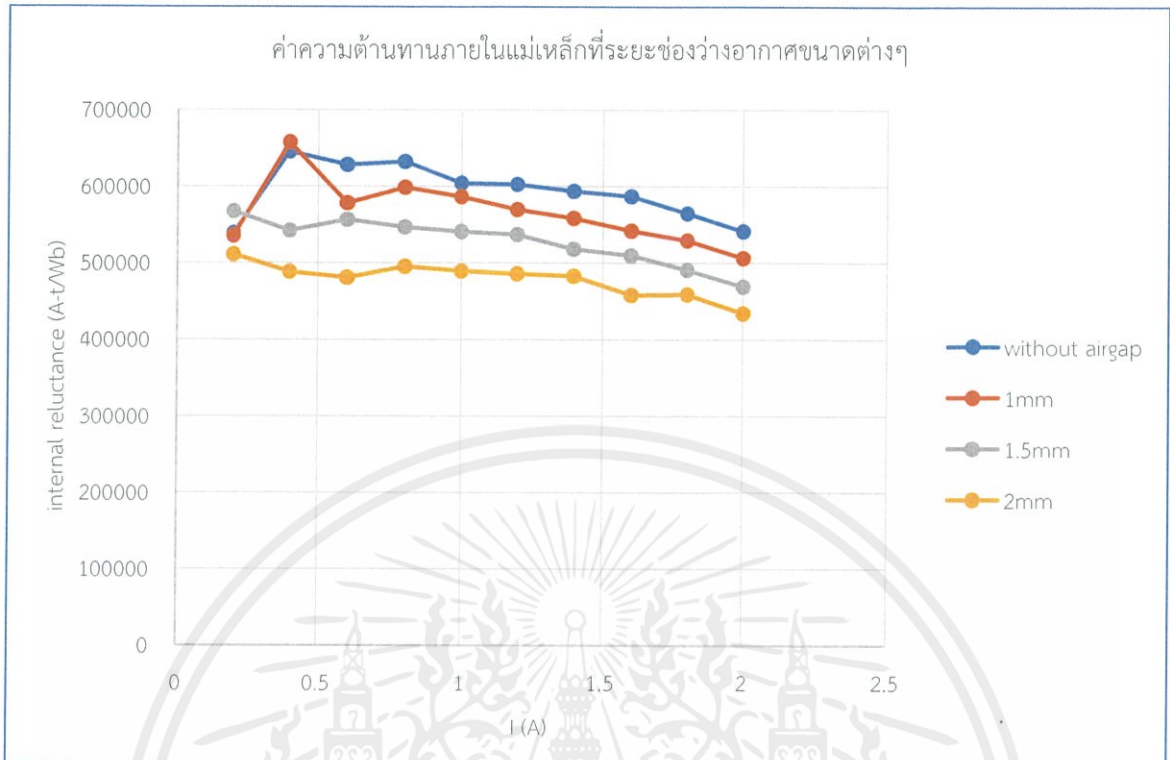
$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\mathfrak{R}_g \left(\frac{A-l}{wb} \right)$
0.2	2.4	82.8	0.037896	1853110
0.4	4.9	82.8	0.038685	1815281
0.6	7.4	82.8	0.038948	1803027
0.8	10	82.8	0.039475	1778979
1	12.5	82.8	0.039475	1778979
1.2	15	82.8	0.039475	1778979
1.4	17.5	82.8	0.039475	1778979
1.6	19.9	82.8	0.039278	1787918
1.8	22.4	82.8	0.039299	1786919
2	24.7	82.8	0.039001	1800584

จากการกำจัดค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศจากวงจรแม่เหล็กที่มีแม่เหล็กถาวรทดสอบเพื่อไปหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบ เมื่อได้ค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบในแต่ละระยะช่องว่างอากาศจากนั้นนำค่าที่ได้ไปบันทึกผลลงในตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.13

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.13

ตารางบันทึกผลการทดลองค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กที่ระยะช่องว่างอากาศขนาดต่างๆ

$I(A)$	$R_{magnet} \left(\frac{A-t}{wb} \right)$			
	ไม่มีช่องว่างอากาศ	ช่องว่างอากาศ 1 mm.	ช่องว่างอากาศ 1.5 mm.	ช่องว่างอากาศ 2 mm.
0.2	538952.8	535417.8	567395.9	511071.4
0.4	645599.4	657611.5	542004.2	488273.8
0.6	628026.8	578181.5	556376.1	481008.1
0.8	632442.1	598777.7	546745.4	495436.6
1	604231.6	586486.5	540991.9	489683.1
1.2	602484.1	569972	537172.3	485863.5
1.4	593718.1	558383.8	518288.8	483146.5
1.6	587079.9	542042.9	509941.6	458064.3
1.8	564688.9	529352.4	490994.8	459063.5
2	541246.3	506558.9	469057.3	434227.5



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความต้านทานภายในแม่เหล็กที่ระยะช่องว่างอากาศต่างๆ

วิธีการคำนวณฟลักซ์แม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กทดสอบที่ (\mathcal{R}) ที่กระแสเท่ากับ 0.2 A และ ไม่มีช่องว่างอากาศ

จาก

$$\mathcal{S} = Ni = \phi \mathcal{R}$$

และ $N = 265$ รอบ , $\mathcal{R} = 2127324 \frac{A-t}{Wb}$

จะได้

$$265 \times 0.2 = \phi \times 2127324$$

$$\phi = 0.0000249139 \quad Wb$$

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.14

ตารางบันทึกผลการทดลองฟลักซ์แม่เหล็กที่ระยะช่องว่างอากาศขนาดต่างๆ

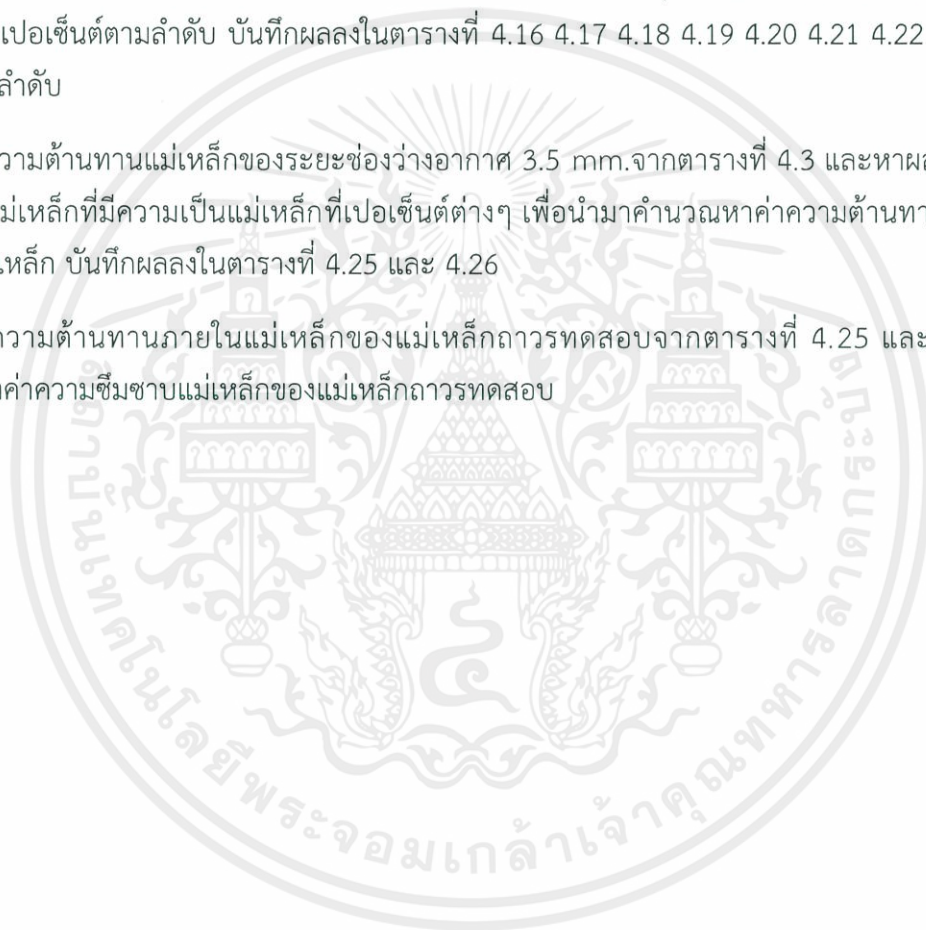
$I(A)$	$\phi(Wb)$			
	ไม่มีช่องว่างอากาศ	ช่องว่างอากาศ 1 mm.	ช่องว่างอากาศ 2 mm.	ช่องว่างอากาศ 3 mm.
0.2	0.0000249139	0.0000235977	0.0000224179	0.0000224179
0.4	0.0000486416	0.0000471954	0.0000460158	0.0000460158
0.6	0.0000735555	0.0000707931	0.0000696133	0.0000696137
0.8	0.0000984699	0.0000943908E	0.0000932107	0.0000932107
1	0.00012457	0.000117988	0.000116809	0.000116809
1.2	0.000149484	0.000142767	0.000140407	0.000140407
1.4	0.000174398	0.000167543	0.000165186	0.000164005
1.6	0.000199311	0.000192322	0.000188783	0.000188782
1.8	0.000225412	0.000217099	0.00021356	0.000212379
2	0.000251513	0.000241877	0.000238338	0.000237156

อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มกระแส 0.2 ถึง 2 A ค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบมีแนวโน้มลดลง ค่าฟลักซ์แม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กถาวรทดสอบจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อปรับระยะของช่องว่างอากาศเป็น 0 1 1.5 และ 2 mm. ตามลำดับ จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบลดลงและค่าฟลักซ์แม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กทดสอบมีค่าน้อยลง

4.4 การทดลองที่ 3 วิธีการทดลองเพื่อหาว่าค่าความเป็นแม่เหล็กส่งผลต่อค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กอย่างไร

1. นำแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 100 เปอเซ็นต์ ไปลดค่าความเป็นแม่เหล็กโดยใช้ความร้อนจากเตาอบ ให้เหลือค่าความเป็นแม่เหล็กที่ 10 20 30 40 50 60 70 80 และ 90 เปอเซ็นต์ ตามลำดับ
2. ต่อบางจรทดลองดังรูปที่ 3.7 โดยใช้ขดลวดจำนวน 265 รอบ และนำแม่เหล็กที่ค่าความเป็นแม่เหล็กที่ 10 เปอเซ็นต์ไปแทนที่ช่องว่างอากาศและบันทึกผลลงในตารางที่ 4.15
3. ทำการทดลองตามข้อที่ 1-3 ซ้ำ โดยค่าความเป็นแม่เหล็กที่ค่าต่างๆดังนี้ 20 30 40 50 60 70 80 90 และ 100 เปอเซ็นต์ตามลำดับ บันทึกผลลงในตารางที่ 4.16 4.17 4.18 4.19 4.20 4.21 4.22 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ
4. นำค่าความต้านทานแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศ 3.5 mm. จากตารางที่ 4.3 และหาผลต่างความต้านของแม่เหล็กที่มีความเป็นแม่เหล็กที่เปอเซ็นต์ต่างๆ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็ก บันทึกผลลงในตารางที่ 4.25 และ 4.26
5. นำค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบจากตารางที่ 4.25 และ 4.26 มาคำนวณหาค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบ



วิธีการหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรที่ค่าความเป็นแม่เหล็กระดับต่างๆ

วิธีการหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรสามารถหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบที่ค่าความเป็นแม่เหล็กระดับต่างๆ โดยทำการทดลองวัดค่าต้านทานแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศ 3.5 mm และนำไปกำจัดค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศของวงจรมแม่เหล็กที่มีแม่เหล็กถาวรทดสอบขนาด 20 × 24 × 7 mm.

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.15

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 10 เปอเซ็นต์

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$R_g + R_{magnet} \left(\frac{A-I}{I} \right)$
0.2	2.4	79.2	0.03752	1871646
0.4	4.9	79.2	0.038302	1833444
0.6	7.5	79.2	0.039084	1796771
0.8	10.1	79.2	0.039475	1778979
1	12.8	79.2	0.040022	1754657
1.2	15.4	79.2	0.040126	1750106
1.4	17.9	79.2	0.039977	1756627
1.6	20.4	79.2	0.039866	1761536
1.8	22.8	79.2	0.039605	1773132
2	25.5	79.2	0.039866	1761536

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.16

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 20 เปอเซ็นต์

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$R_g + R_{magnet} \left(\frac{A-t}{mb} \right)$
0.2	2.3	79.2	0.035957	1953014
0.4	4.7	79.2	0.036739	1911473
0.6	7.1	79.2	0.036999	1898004
0.8	9.6	79.2	0.03752	1871646
1	12	79.2	0.03752	1871646
1.2	14.4	79.2	0.03752	1871646
1.4	16.7	79.2	0.037297	1882859
1.6	19.1	79.2	0.037325	1881446
1.8	21.6	79.2	0.03752	1871646
2	24	79.2	0.03752	1871646

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.17

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 30 เปอเซ็นต์

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$R_g + R_{magnet} \left(\frac{A-t}{mb} \right)$
0.2	2.3	79.2	0.035957	1953014
0.4	4.7	79.2	0.036739	1911473
0.6	7.1	79.2	0.036999	1898004
0.8	9.6	79.2	0.03752	1871646
1	12	79.2	0.03752	1871646
1.2	14.4	79.2	0.03752	1871646
1.4	16.7	79.2	0.037297	1882859
1.6	19.1	79.2	0.037325	1881446
1.8	21.6	79.2	0.03752	1871646
2	24	79.2	0.03752	1871646

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.18

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 40 เปอเซ็นต์

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{magnet} \left(\frac{A-t}{\mu_0} \right)$
0.2	2.2	79.2	0.034394	2041798
0.4	4.4	79.2	0.034394	2041798
0.6	6.6	79.2	0.034394	2041798
0.8	8.9	79.2	0.034782	2019020
1	11.3	79.2	0.035332	1987588
1.2	13.7	79.2	0.035697	1967277
1.4	15.9	79.2	0.03551	1977593
1.6	18.2	79.2	0.035566	1974478
1.8	20.6	79.2	0.035783	1962500
2	23.1	79.2	0.036114	1944562

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.19

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 50 เปอเซ็นต์

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{magnet} \left(\frac{A-t}{\mu_0} \right)$
0.2	2.1	79.2	0.03283	2139018
0.4	4.2	79.2	0.03283	2139018
0.6	6.4	79.2	0.033352	2105599
0.8	8.7	79.2	0.034003	2065270
1	10.9	79.2	0.034081	2060525
1.2	13.2	79.2	0.034394	2041798
1.4	15.5	79.2	0.034617	2028618
1.6	17.8	79.2	0.034785	2018854
1.8	20.1	79.2	0.034915	2011326
2	22.4	79.2	0.035019	2005330

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.20

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 60 เปอเซ็นต์

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{magnet} \left(\frac{A-I}{W} \right)$
0.2	2.1	79.2	0.03283	2139018
0.4	4.2	79.2	0.03283	2139018
0.6	6.4	79.2	0.033352	2105599
0.8	8.5	79.2	0.033221	2113850
1	10.8	79.2	0.033769	2079598
1.2	13	79.2	0.033873	2073208
1.4	15.1	79.2	0.033724	2082366
1.6	17.4	79.2	0.034003	2065270
1.8	19.8	79.2	0.034394	2041798
2	22.1	79.2	0.03455	2032562

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.21

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 70 เปอเซ็นต์

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{magnet} \left(\frac{A-I}{W} \right)$
0.2	2.1	79.2	0.03283	2139018
0.4	4.2	79.2	0.03283	2139018
0.6	6.3	79.2	0.03283	2139018
0.8	8.5	79.2	0.033221	2113850
1	10.7	79.2	0.033456	2099048
1.2	12.9	79.2	0.033612	2089288
1.4	15	79.2	0.033501	2096236
1.6	17.2	79.2	0.033612	2089288
1.8	19.8	79.2	0.034394	2041798
2	22.1	79.2	0.03455	2032562

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.22

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 80 เปอเซ็นต์

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{magnet} \left(\frac{l-t}{\mu b} \right)$
0.2	2.1	79.2	0.03283	2139018
0.4	4.2	79.2	0.03283	2139018
0.6	6.3	79.2	0.03283	2139018
0.8	8.4	79.2	0.03283	2139018
1	10.6	79.2	0.033143	2118845
1.2	12.8	79.2	0.033352	2105599
1.4	14.9	79.2	0.033277	2110312
1.6	17	79.2	0.033221	2113850
1.8	19.3	79.2	0.033525	2094683
2	21.6	79.2	0.033769	2079598

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.23

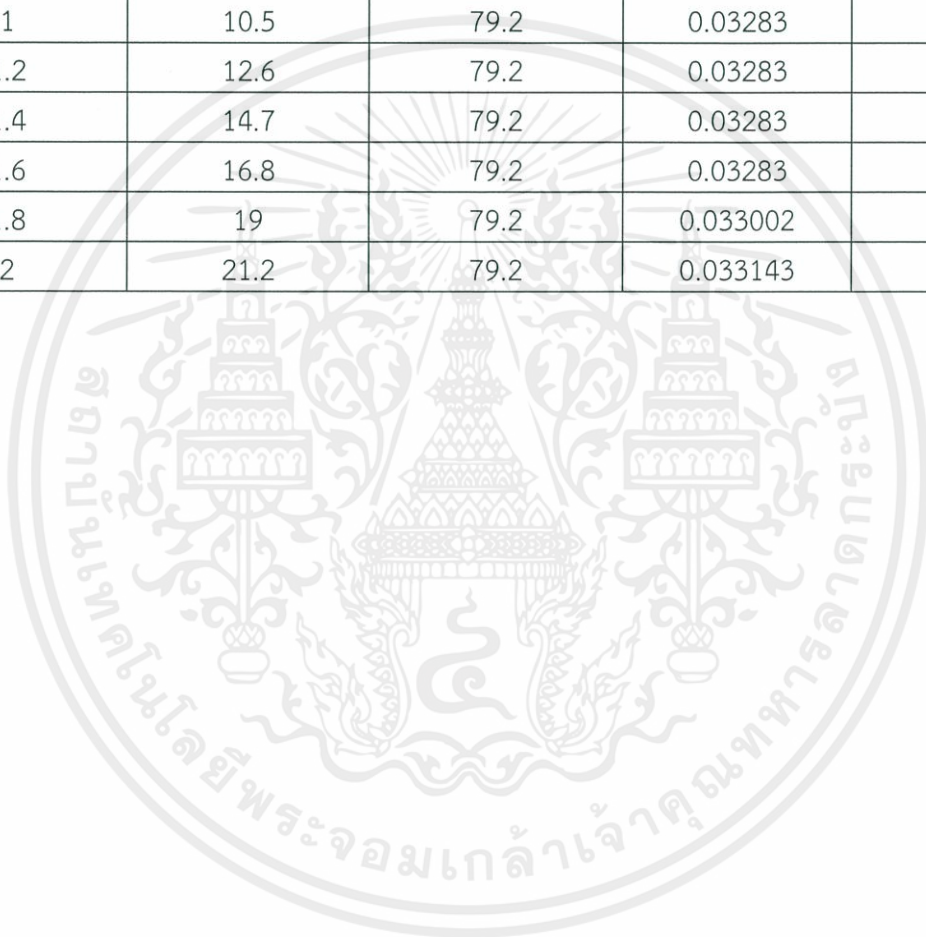
ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 90 เปอเซ็นต์

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{magnet} \left(\frac{l-t}{\mu b} \right)$
0.2	2.1	79.2	0.03283	2139018
0.4	4.2	79.2	0.03283	2139018
0.6	6.3	79.2	0.03283	2139018
0.8	8.3	79.2	0.03244	2164793
1	10.5	79.2	0.03283	2139018
1.2	12.7	79.2	0.033091	2122167
1.4	14.8	79.2	0.033054	2124558
1.6	17	79.2	0.033221	2113850
1.8	19.2	79.2	0.033352	2105599
2	21.4	79.2	0.033456	2099028

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.24

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 100 เปอเซ็นต์

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$R_g + R_{magnet} \left(\frac{L-1}{bb} \right)$
0.2	2.1	79.2	0.03283	2139018
0.4	4.1	79.2	0.032047	2191283
0.6	6.2	79.2	0.032309	2173516
0.8	8.3	79.2	0.03244	2164793
1	10.5	79.2	0.03283	2139018
1.2	12.6	79.2	0.03283	2139018
1.4	14.7	79.2	0.03283	2139018
1.6	16.8	79.2	0.03283	2139018
1.8	19	79.2	0.033002	2127878
2	21.2	79.2	0.033143	2118845



จากการกำจัดค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศของวงจรมแม่เหล็กที่มีแม่เหล็กถาวรทดสอบเพื่อไปหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบเมื่อได้ค่าค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบที่ค่าความเป็นแม่เหล็กระดับต่างๆแล้วจากนั้นนำค่าที่ได้ไปบันทึกผลลงในตารางที่ 4.25 และ ตารางที่ 4.26

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.25

ตารางบันทึกค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 10 – 50 เปอร์เซ็นต์

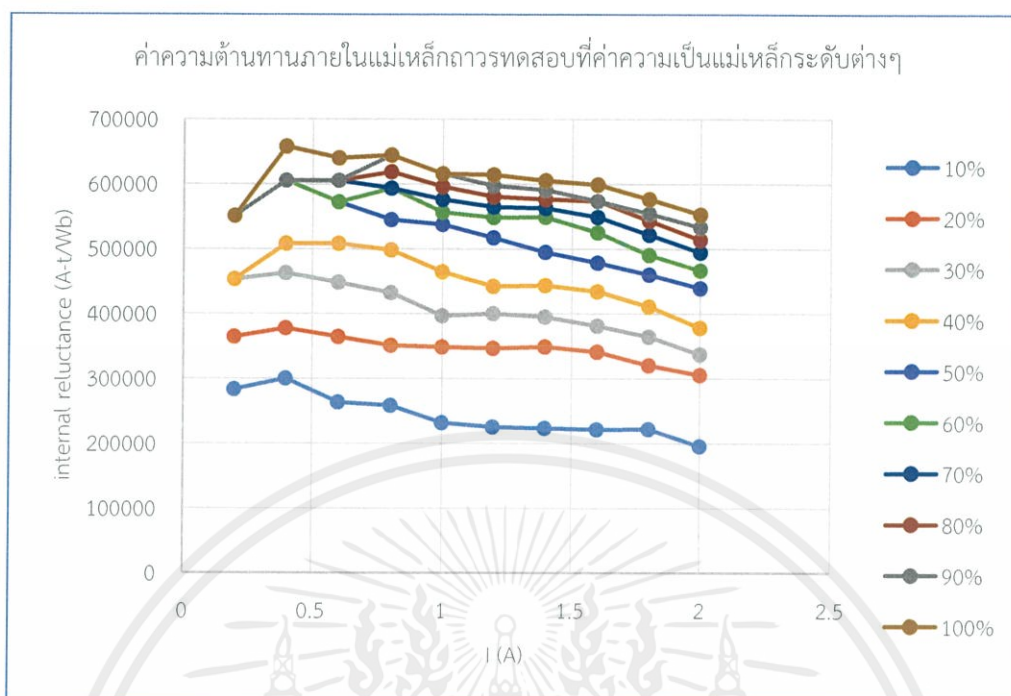
$I(A)$	$R_{magnet} \left(\frac{A-t}{W} \right)$				
	10%	20%	30%	40%	50%
0.2	283274.8	364643.5	453427.5	453427.5	550647.5
0.4	299838.8	377867.2	462814.2	508192.8	605412.8
0.6	263165.7	364399	448144.8	508192.8	571993.5
0.8	258480.2	351146.4	432515.1	498521.1	544770.9
1	231565.5	348553.6	396547	464496.5	537433
1.2	225266.4	346806.1	400277	442437.9	516958.8
1.4	223021.9	349253.5	395449.9	443988	495013
1.6	221292.7	341202.2	381451.9	434234.7	478610.3
1.8	221699.1	320213.1	364572.1	411067.4	459893.7
2	195534.5	305643.6	337373.6	378560.2	439327.8

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.26

ตารางบันทึกค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 60 – 100 เปอร์เซ็นต์

$I(A)$	$\mathcal{R}_{magnet} \left(\frac{A \cdot m}{Wb} \right)$				
	60%	70%	80%	90%	100%
0.2	550647.5	550647.5	550647.5	550647.5	550647.5
0.4	605412.8	605412.8	605412.8	605412.8	657677.3
0.6	571993.5	605412.8	605412.8	605412.8	639910.1
0.8	593351.3	593351.3	618519.1	644293.5	644293.5
1	556506.4	575956.1	595752.7	615926.3	615926.3
1.2	548368.5	564448.4	580759.5	597327.4	614178.8
1.4	548760.5	562630.4	576706.5	590952.5	605412.8
1.6	525026.4	549044.1	573606.8	573606.8	598774.6
1.8	490365.8	521775.5	543251	554166.6	576445.1
2	466560.1	494523.1	513596.4	533026.2	552842.8





รูปที่ 4.4 ค่าความต้านทานภายในของแม่เหล็กขนาด 20 X 24 X 7mm. ที่ค่าความเป็นแม่เหล็กระดับต่างๆ

อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในของแม่เหล็กถาวรทดสอบจะมีค่าลดลงเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น เนื่องจากแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานของวงจรที่นำแม่เหล็กไปแทนที่ช่องว่างอากาศกับความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบที่นำไปกำจัดนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ไม่เท่ากัน และสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มอำนาจความเป็นแม่เหล็กพบว่าค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในของแม่เหล็กถาวรทดสอบจะมีค่าเพิ่มขึ้น

4.5 การทดลองที่ 4 วิธีการทดลองเพื่อหาว่าขนาดของแม่เหล็กส่งผลกับค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กอย่างไร

1. นำแม่เหล็กขนาด $24 \times 30 \times 10$ mm. ที่มีค่าความเป็นแม่เหล็ก 100 เปอเซ็นต์ ไปลดค่าความเป็นแม่เหล็กโดยใช้ความร้อนจากเตาอบ ให้เหลือค่าความเป็นแม่เหล็กที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอเซ็นต์ตามลำดับ
2. ต่อบรรจทดลองดังรูปที่ 3.7 โดยใช้ขดลวดจำนวน 265 รอบ และนำแม่เหล็กที่ค่าความเป็นแม่เหล็กที่ 20 เปอเซ็นต์ไปแทนที่ช่องว่างอากาศ
3. ปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าตามตารางที่ 4.28 ทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า มุมต่างเฟส ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า และคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ(L) และค่าความต้านทานแม่เหล็ก (R) และบันทึกผลลงตารางที่ 4.28
4. หาค่าความต้านทานแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศ 5 mm.และบันทึกผลลงตารางที่ 4.27 และหาผลต่างความต้านของแม่เหล็กที่มีความเป็นแม่เหล็ก 20 เปอเซ็นต์ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวร บันทึกผลลงในตารางที่ 4.33
5. ทำการทดลองตามข้อที่ 1-4 ซ้ำ โดยค่าความเป็นแม่เหล็กที่ค่าต่างๆดังนี้ 40 60 80 และ 100 เปอเซ็นต์ตามลำดับ บันทึกผลลงในตารางที่ 4.29 4.30 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ
6. นำค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบจากตารางที่ 4.33 มาคำนวณหาค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบ บันทึกผลลงในตารางที่ 4.34

วิธีการหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงและมีค่าความเป็นแม่เหล็ก ระดับต่างๆ

วิธีการหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบสามารถหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรที่ความเป็นแม่เหล็กระดับต่างๆ โดยทำการทดลองวัดค่าต้านทานแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศ 5.5 mm และนำไปกำจัดค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศของวงจรมแม่เหล็กที่มีแม่เหล็กถาวรทดสอบขนาด $24 \times 30 \times 10$ mm.

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.27

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรมแม่เหล็กที่ใช้ช่องว่างอากาศระยะ 5 mm.

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\chi_g \left(\frac{A-t}{Hb} \right)$
0.2	2.5	79.2	0.039084	1796786
0.4	5.1	79.2	0.039865	1761550
0.6	7.8	79.2	0.040647	1727671
0.8	10.4	79.2	0.040647	1727671
1	13	79.2	0.040647	1727671
1.2	15.6	79.2	0.040647	1727671
1.4	18.2	79.2	0.040647	1727671
1.6	20.7	79.2	0.040452	1736018
1.8	23.2	79.2	0.0403	1742572
2	25.6	79.2	0.040022	1754671

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.28

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กโดยใช้แม่เหล็กที่มีขนาด 10 mm. มีอำนาจความเป็นแม่เหล็ก 20 เปอร์เซนต์

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$R_g + R_{magnet} \left(\frac{A-i}{W} \right)$
0.2	2	79.2	0.031267	2245982
0.4	4.1	79.2	0.032049	2191196
0.6	6.3	79.2	0.03283	2139018
0.8	8.4	79.2	0.03283	2139018
1	10.5	79.2	0.03283	2139018
1.2	12.7	79.2	0.033091	2122187
1.4	14.7	79.2	0.03283	2139018
1.6	16.9	79.2	0.033026	2126360
1.8	19.1	79.2	0.033178	2116629
2	21.3	79.2	0.033299	2108900



ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.29

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กโดยใช้แม่เหล็กที่มีขนาด 10 mm. มีอำนาจความเป็นแม่เหล็ก 40 เปอร์เซนต์

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$R_g + R_{magnet} \left(\frac{d-l}{W} \right)$
0.2	1.9	79.2	0.029704	2364182
0.4	3.9	79.2	0.030485	2303555
0.6	5.9	79.2	0.030746	2284023
0.8	7.9	79.2	0.030876	2274392
1	10	79.2	0.031267	2245959
1.2	12	79.2	0.031267	2245959
1.4	13.9	79.2	0.031051	2261616
1.6	15.9	79.2	0.031072	2260087
1.8	18	79.2	0.031267	2245959
2	20.1	79.2	0.031424	2234789



ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.30

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กโดยใช้แม่เหล็กที่มีขนาด 10 mm. มีอำนาจความเป็นแม่เหล็ก 60 เฮอร์เซ็นต์

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$\mathcal{R}_g + \mathcal{R}_{magnet} \left(\frac{A-i}{W} \right)$
0.2	1.9	79.2	0.029704	2364182
0.4	3.8	79.2	0.029704	2364182
0.6	5.7	79.2	0.029704	2364182
0.8	7.7	79.2	0.030095	2333474
1	9.7	79.2	0.030329	2315425
1.2	11.7	79.2	0.030485	2303555
1.4	13.6	79.2	0.030374	2312026
1.6	15.5	79.2	0.03029	2318418
1.8	17.5	79.2	0.030399	2310137
2	19.5	79.2	0.030485	2303555



ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.31

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กโดยใช้แม่เหล็กที่มีขนาด 10 mm. มีอำนาจความเป็นแม่เหล็ก 80 เปอร์เซนต์

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$R_g + R_{magnet} \left(\frac{d-l}{W} \right)$
0.2	1.9	79.2	0.029704	2364182
0.4	3.8	79.2	0.029704	2364182
0.6	5.7	79.2	0.029704	2364182
0.8	7.6	79.2	0.029704	2364182
1	9.5	79.2	0.029704	2364182
1.2	11.5	79.2	0.029964	2343613
1.4	13.3	79.2	0.029704	2364182
1.6	15.3	79.2	0.029899	2348728
1.8	17.3	79.2	0.030051	2336836
2	19.2	79.2	0.030017	2339537



ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.32

ตารางบันทึกผลการทดลองของวงจรแม่เหล็กโดยใช้แม่เหล็กที่มีขนาด 10 mm. มีอำนาจความเป็นแม่เหล็ก 100 เฟอร์เซ็นต์

$I(A)$	$V(V)$	θ (องศา)	$L(H)$	$R_g + R_{magnet} \left(\frac{d-l}{lR} \right)$
0.2	1.9	79.2	0.029704	2364182
0.4	3.7	79.2	0.028922	2428060
0.6	5.6	79.2	0.029183	2406396
0.8	7.6	79.2	0.029704	2364182
1	9.5	79.2	0.029704	2364182
1.2	11.4	79.2	0.029704	2364182
1.4	13.3	79.2	0.029704	2364182
1.6	15.2	79.2	0.029704	2364182
1.8	17.1	79.2	0.029704	2364182
2	19.1	79.2	0.02986	2351807

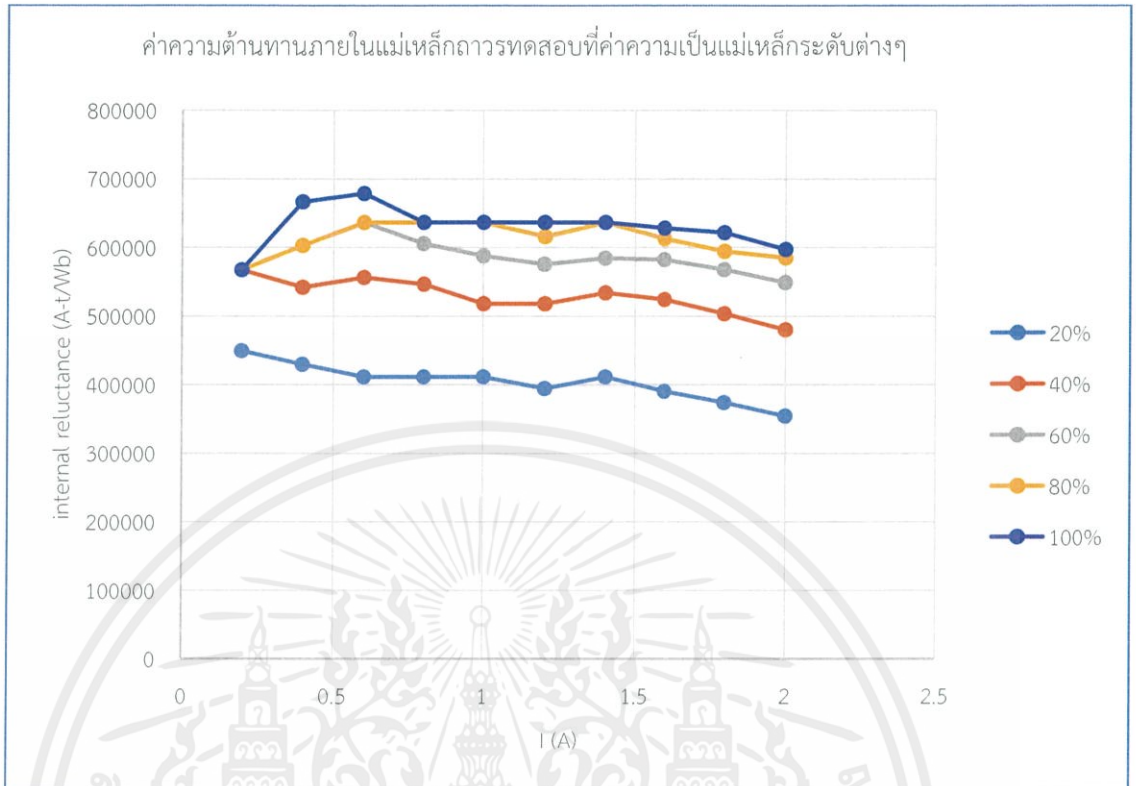


จากการกำจัดค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศของวงจรมแม่เหล็กที่มีแม่เหล็กถาวรทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบ เมื่อได้ค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบที่ความเป็นแม่เหล็กระดับต่างๆแล้วจากนั้นนำค่าที่ได้ไปบันทึกผลลงในตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.33

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.33

ตารางบันทึกค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กที่กระแสดังต่อไปนี้

$I(A)$	$R_{magnet} \left(\frac{A}{wb} \right)$				
	20%	40%	60%	80%	100%
0.2	449196.4	567395.9	567395.9	567395.9	567395.9
0.4	429645.2	542004.2	602631.2	602631.2	666509
0.6	411347.7	556352.4	636511.2	636511.2	678725
0.8	411347.7	546721.9	605803.9	636511.2	636511.2
1	411347.7	518288.8	587754.7	636511.2	636511.2
1.2	394516.7	518288.8	575884.2	615942.4	636511.2
1.4	411347.7	533945.1	584355.1	636511.2	636511.2
1.6	390342.1	524068.8	582400.3	612710	628164
1.8	374056.7	503387.3	567565.2	594263.8	621609.6
2	354228.5	480117.3	548883.3	584865.7	597136



รูปที่ 4.5 ค่าความต้านทานภายในของแม่เหล็กขนาด $24 \times 30 \times 10$ mm. ที่ค่าความเป็นแม่เหล็กระดับต่างๆ

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.34

ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแม่เหล็ก 2 ขนาด

$I(A)$	μ_r	
	20 x 24 x 7 mm.	24 x 30 x 10 mm.
0.2	21.07528	19.47921
0.4	17.64551	16.58256
0.6	18.13544	16.2841
0.8	18.01205	17.36407
1	18.84162	17.36407
1.2	18.89523	17.36407
1.4	19.16882	17.36407
1.6	19.38133	17.59481
1.8	20.13209	17.78034
2	20.99159	18.50906

อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองเมื่อเพิ่มขนาดแม่เหล็กถาวรทดสอบ พบว่าค่าต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบจะมีค่าลดลงเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นและสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มอำนาจความเป็นแม่เหล็ก จะส่งผลให้ค่าต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กอีกขนาดพบว่าแนวโน้มที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การทดลองที่ 1 การหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบ

จากการทดลองพบว่าแม่เหล็กถาวรทดสอบมีความต้านทานแม่เหล็กภายใน เพราะค่าความต้านทานแม่เหล็กของวงจรที่มีช่องว่างอากาศและวงจรที่แม่เหล็กถาวรทดสอบแทนที่ช่องว่างอากาศซึ่งมีระยะช่องอากาศของทั้ง 2 วงจรเท่ากัน แต่ได้ค่าความต้านทานแม่เหล็กออกมาแตกต่างกัน จึงสรุปได้ว่าค่าที่ทำให้ผลการทดสอบของทั้ง 2 วงจรแตกต่างกันเป็นผลมาจากค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบนั่นเอง

การทดลองที่ 2 ผลของช่องว่างอากาศที่มีต่อค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบ

จากการทดลองพบว่าค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะของช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งจากทฤษฎีแล้วค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบควรมีค่าคงที่สม่ำเสมอ แต่เนื่องจากผลมาจากฟลักซ์แม่เหล็กที่รั่วไหลในวงจรเมื่อมีการเพิ่มระยะช่องว่างอากาศส่งผลให้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าไม่คงที่ จึงทำให้ฟลักซ์มีค่าลดลงตามระยะการเพิ่มของช่องว่างอากาศ และส่งผลให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบมีค่าลดลงตามการเพิ่มของระยะช่องว่างอากาศ

การทดลองที่ 3 ผลของค่าความเป็นแม่เหล็กที่มีต่อค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบ

จากการทดลองพบว่าเมื่อค่าความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบมีค่าลดลงจากการอบด้วยความร้อนส่งผลให้การเรียงตัวของโดเมนแม่เหล็กในสารแม่เหล็กมีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ และค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบมีแนวโน้มลดลงตามตามเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าความเป็นแม่เหล็ก จึงสรุปได้ว่าถ้านำแม่เหล็กถาวรไปใช้งานภายใต้เครื่องจักรกลซึ่งมีผลมาจากความร้อน อาจทำให้เครื่องจักรกลทำงานได้อย่างไม่เต็มสมรรถนะเนื่องจากการเรียงตัวของโดเมนแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบมีผลต่อค่าความต้านทานภายในแม่เหล็ก

การทดลองที่ 4 ผลของขนาดของแม่เหล็กถาวรทดสอบที่มีต่อค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบ

จากการทดลองพบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดของแม่เหล็กถาวรทดสอบให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและทำการทดลองตามการทดลองที่ 3 พบว่าค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบมีแนวโน้มคงที่ จึงสรุปได้ว่าเมื่อขนาดของแม่เหล็กเปลี่ยนไปจะส่งผลให้ค่าความต้านทานของแม่เหล็กถาวรทดสอบมีค่าประมาณเดิม ตามสมการ $R = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A}$ จากที่ $\frac{l}{\mu_r A}$ มีอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กมีค่าประมาณเดิม

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลต่อการตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวร
2. ศึกษาหาค่าความเป็นแม่เหล็กที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานกับเครื่องจักร
3. สามารถนำผลจากการศึกษานี้ไปศึกษากับเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร เมื่อใช้งานจริงไปแล้วที่สภาวะต่าง ๆ ว่าสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรลดลงหรือไม่ อันจะทำให้สมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าลดลงด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] การทดสอบการลดความเป็นแม่เหล็กด้วยวิธีการอบความร้อน. นาย ชาญปกรณ์ ณ นิโรจน์. (2561). การศึกษาคุณลักษณะการลดและกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B เนื่องจากผลของความร้อน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาไฟฟ้า. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[2] A brief history of magnetism. J.M.D. COEY. (2553). MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS. (หน้าที่ 1). The United states of America: Cambridge University

[3] A brief history of magnetism. J.M.D. COEY. (2553). MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS. (หน้าที่ 2). The United states of America: Cambridge University

[4] A brief history of magnetism. J.M.D. COEY. (2553). MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS. (หน้าที่ 3). The United states of America: Cambridge University

[5] Horseshoe Magnet. สืบค้นเมื่อ 1 ธ.ค.2561, จาก <https://www.stemfinity.com/Steel-Horseshoe-Magnet-3in>

[6] A brief history of magnetism. J.M.D. COEY. (2553). MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS. (หน้าที่ 3). The United states of America: Cambridge University

[7] A brief history of magnetism. J.M.D. COEY. (2553). MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS. (หน้าที่ 3-4). The United states of America: Cambridge University

[8] A brief history of magnetism. J.M.D. COEY. (2553). MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS. (หน้าที่ 3-5). The United states of America: Cambridge University

[9] A brief history of magnetism. J.M.D. COEY. (2553). MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS. (หน้าที่ 3-5). The United states of America: Cambridge University

[10] James Alfred Ewing. สืบค้นเมื่อ 15 ธ.ค. 2561, จาก https://en.wikipedia.org/wiki/James_Alfred_Ewing

[11] A brief history of magnetism. J.M.D. COEY. (2553). MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS. (หน้าที่ 5). The United states of America: Cambridge University

[12] A brief history of magnetism. J.M.D. COEY. (2553). MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS. (หน้าที่ 10). The United states of America: Cambridge University

[13] คุณสมบัติของสารแม่เหล็ก. รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย (2558). เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1. (หน้า 17). คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาไฟฟ้า. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[14] เส้นแรงแม่เหล็ก. สืบค้นเมื่อ 1 ธ.ค. 2561, จาก <https://physicskruadd.wordpress.com/2012/03/13/%E0%B8%AA%E0%B8%99%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B9%88%E0%B9%80%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B9%87%E0%B8%81-megnetic-field/>

[15] เส้นแรงแม่เหล็ก. สืบค้นเมื่อ 1 ธ.ค. 2561, จาก http://www.digitalschool.club/digitalschool/physics2_2_2/physics5/page3.php

[16] เส้นแรงแม่เหล็ก. สืบค้นเมื่อ 1 ธ.ค. 2561, จาก <https://physicskruadd.wordpress.com/2012/03/13/%E0%B8%AA%E0%B8%99%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B9%88%E0%B9%80%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B9%87%E0%B8%81-megnetic-field/>

[17] Domain theory of magnetism. สืบค้นเมื่อ 1 ธ.ค. 2561, จาก <https://modps5.lib.kmutt.ac.th/st4kid/nonFlash/services/getText.jsp?id=18>

[18] Ferromagnets and Electromagnets. สืบค้นเมื่อ 1 ธ.ค. 2561, จาก <https://opentextbc.ca/physicstestbook2/chapter/ferromagnets-and-electromagnets/>

[19] The Curie temperature. J.M.D. COEY. (2553). MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS. (หน้าที่ 9). The United states of America: Cambridge University

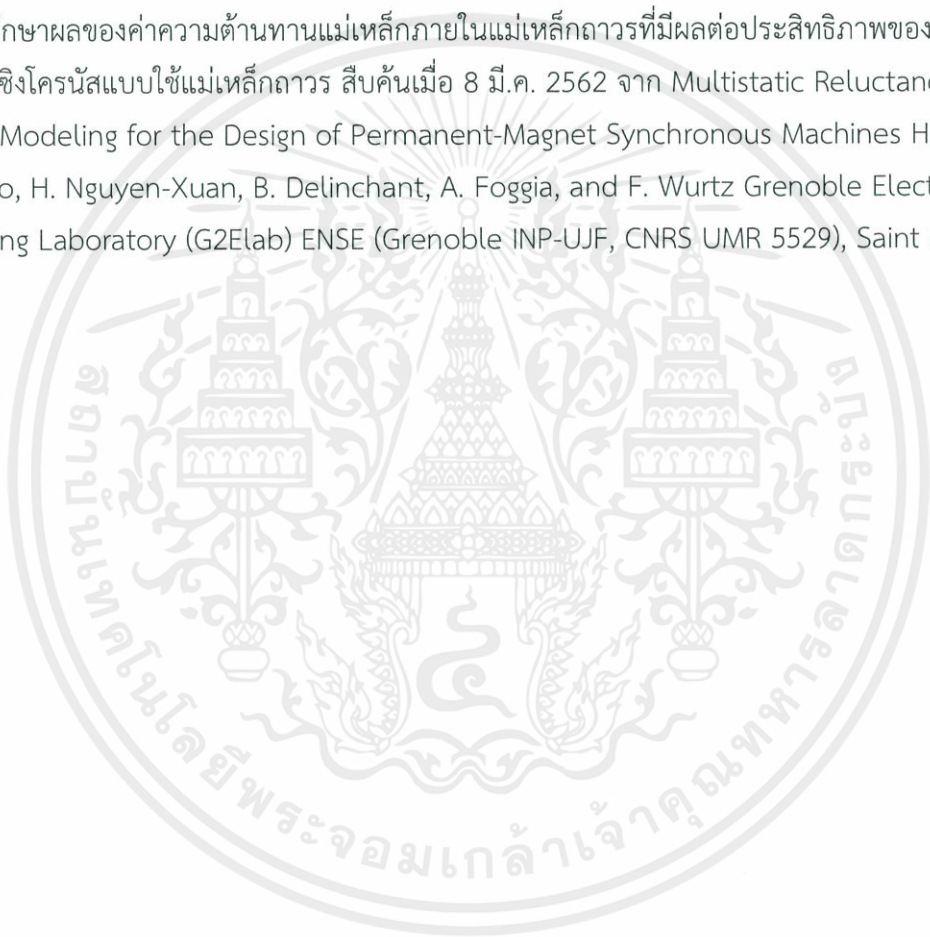
[20] Hysteresis loop. สืบค้นเมื่อ 1 ธ.ค. 2561 จาก <https://www.ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/HysteresisLoop.htm>

[21] Hysteresis loop. สืบค้นเมื่อ 1 ธ.ค. 2561, จาก <http://www.simotecthailand.co.th/knowledge9.html>

[22] Faraday's law. สืบค้นเมื่อ 1 ธ.ค. 2561, จาก <https://www.scribd.com/doc/6763267/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%81%E0%B8%8E%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%9F%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B9%80%E0%B8%94%E0%B8%A2>

[23] อาจารย์มนตรี เจาเดช ลีคเกจฟลักซ์และการโป่งพอง. สืบค้นเมื่อ 1 ธ.ค. 2561, จาก <https://blog.rmutl.ac.th/montri/assets/dc01.pdf>

[24] การศึกษาผลของค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องจักรซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร สืบค้นเมื่อ 8 มี.ค. 2562 จาก Multistatic Reluctance Network Modeling for the Design of Permanent-Magnet Synchronous Machines H. Dogan, L. Garbuio, H. Nguyen-Xuan, B. Delinchant, A. Foggia, and F. Wurtz Grenoble Electrical Engineering Laboratory (G2Elab) ENSE (Grenoble INP-UJF, CNRS UMR 5529), Saint Martin d'Hères





ภาคผนวก ก.

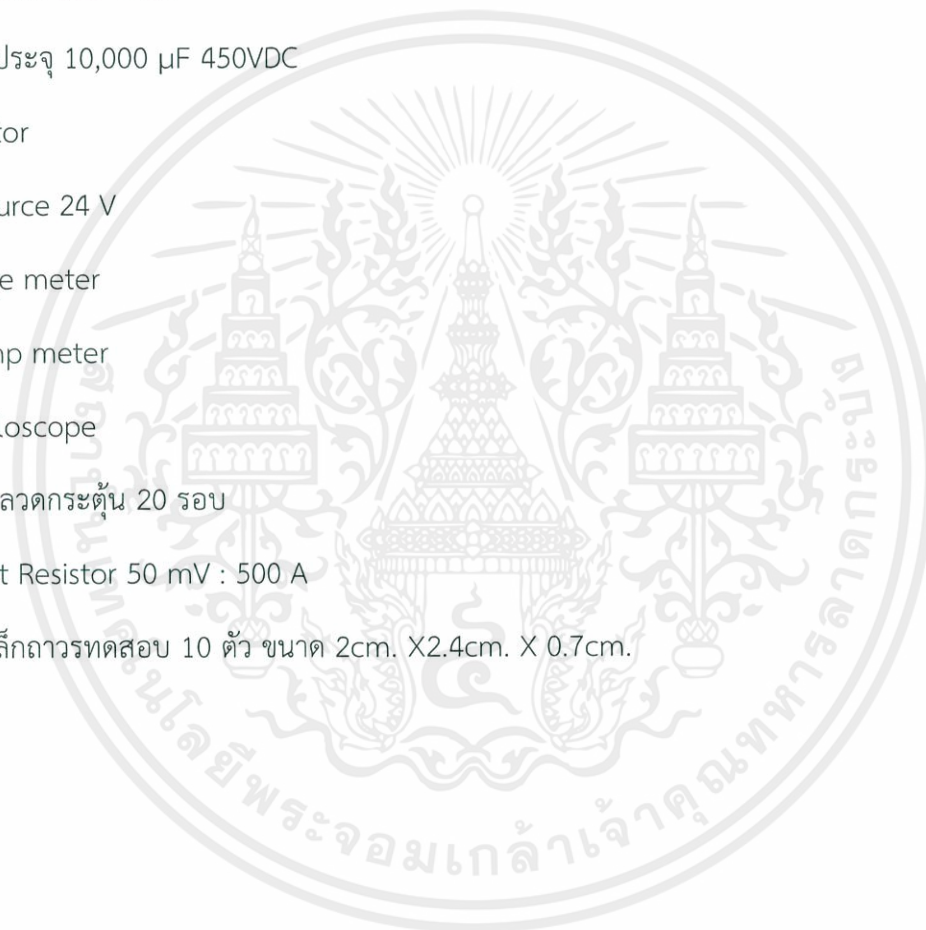
การทดลองกระตุ้นแม่เหล็กถาวรทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองกระตุ้นแม่เหล็กถาวรทดสอบ

อุปกรณ์การทดลอง

1. Variac 1 เฟส 260V
2. Bridge Diode
3. ชุดควบคุมการจ่ายกระแส
4. ชุดหลอดไฟ 100 Watt
5. ตัวเก็บประจุ 10,000 μ F 450VDC
6. Thyristor
7. DC Source 24 V
8. Voltage meter
9. DC Amp meter
10. Oscilloscope
11. ชุดขดลวดกระตุ้น 20 รอบ
12. Shunt Resistor 50 mV : 500 A
13. แม่เหล็กถาวรทดสอบ 10 ตัว ขนาด 2cm. X 2.4cm. X 0.7cm.



ขั้นตอนการทดลอง

การทดลอง วิธีการทดลองการกระตุ้นแม่เหล็กถาวรทดสอบ

1. ต่อบางจรวดรูปที่ 3.1 โดยใช้จำนวนขดลวดที่พันรอบ Exciting coil และ search coil เท่ากับ 20 รอบ
2. ปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุให้ได้ 50 V และรอกจนกระทั่งหลอดไฟดับและทำการตัดแหล่งจ่ายที่ จ่ายให้กับตัวเก็บประจุ
3. กดปุ่มจ่ายกระแสจากตัวเก็บไปจะสู่ Exciting coil และบันทึกผลจาก Oscilloscope
4. นำค่าที่ได้มา plot ลงใน MATLAB และทำการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำ (e_{\max}) ที่ขดลวดและค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (B_{\max}) บันทึกค่าลงในตารางที่ 3.1
5. นำแม่เหล็กถาวรทดสอบไปวัดค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก โดยใช้ Gauss's meter และบันทึกค่าลงในตารางที่ 3.1
6. ทำการทดลองอีกครั้งโดยปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ตัวเก็บประจุเป็น 100 150 200 250 V ตามลำดับ

วิธีการหาค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ที่แรงดัน 50 V, $N = 20$ รอบ, $A = 2.463 \times 10^{-3}$ ตารางเมตร

สามารถหาสมการแรงดันเหนี่ยวนำได้จากการทำ curve fitting ในโปรแกรม MATLAB

โดยใช้สมการ polynomial ลำดับ 3

$$\int e dt = 6.066 \times 10^6 t^3 + 3.014 \times 10^5 t^2 - 4.451 \times 10^3 t + 16.4023$$

$$e = \frac{6.066 \times 10^6 t^4}{4} + \frac{3.014 \times 10^5 t^3}{3} - \frac{4.451 \times 10^3 t^2}{2} + 16.4023t$$

จากนั้นแทนค่า t ที่กระแสสูงสุดเพื่อหา B_{\max} ที่สูงที่สุด ($i_{\max} = 2290$)

$$t = 5.25 \text{ ms}$$

$$\int e dt = 0.038212$$

ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหาได้จาก

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{Nd\phi}{dt} = \frac{NAdB}{dt}$$

ดังนั้น

$$B = \frac{\int edt}{NA}$$

$$B = \frac{0.038212}{20 \times 2.463 \times 10^{-3}}$$

$$B = 0.775718 \text{ T}$$

และ

$$B = \mu H$$

โดย $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$

ดังนั้น

$$H = 6.1729 \times 10^5 \text{ A-t/m}$$





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟคุณลักษณะของ Neodymium iron boron (Nd-Fe-B)

KETIAN MAGNET

Magnetic Characteristics And Physical Properties of Sintered Nd-Fe-B

Characteristics Grade	Remanence (Br mT/kg)	Coerciv FORCE (Hc 500(A/m))	Intrinsic Coercive (Hc 500(A/m))	Max Energy Product (BH) max (kJ/m ³ MG·Oe)	Maximum working temperature (T _w °C)
N35	1170-1210(11.7-12.1)	≥ 10.8 (≥860)	≥ 12 (≥955)	263-287 (33-36)	80
N38	1210-1250(12.1-12.5)	≥ 10.8 (≥860)	≥ 12 (≥955)	287-310 (36-39)	80
N40	1250-1280(12.5-12.8)	≥ 11.6 (≥923)	≥ 12 (≥955)	302-326 (38-41)	80
N42	1280-1320(12.8-13.2)	≥ 11.6 (≥923)	≥ 12 (≥955)	318-342 (40-43)	80
N45	1320-1380(13.2-13.8)	≥ 11.0 (≥876)	≥ 12 (≥955)	342-366 (43-46)	80
N48	1380-1420(13.8-14.2)	≥ 10.5 (≥835)	≥ 12 (≥955)	366-390 (46-49)	80
N50	1380-1450(13.8-14.5)	≥ 10.5 (≥835)	≥ 11 (≥955)	374-406 (47-51)	80
N52	1430-1480(14.3-14.8)	≥ 10.8 (≥860)	≥ 11 (≥876)	398-422 (50-53)	80
33M	1130-1170(11.3-11.7)	≥ 10.3 (≥820)	≥ 14 (≥1114)	247-263 (31-33)	100
35M	1170-1210(11.7-12.1)	≥ 10.8 (≥860)	≥ 14 (≥1114)	263-287 (33-36)	100
38M	1210-1250(12.1-12.5)	≥ 11.0 (≥876)	≥ 14 (≥1114)	287-310 (36-39)	100
40M	1250-1280(12.5-12.8)	≥ 11.4 (≥907)	≥ 14 (≥1114)	302-326 (38-41)	100
42M	1280-1320(12.8-13.2)	≥ 11.6 (≥923)	≥ 14 (≥1114)	318-342 (40-43)	100
45M	1320-1380(13.2-13.8)	≥ 11.8 (≥939)	≥ 14 (≥1114)	342-366 (43-46)	100
48M	1360-1400(13.6-14.0)	≥ 11.8 (≥939)	≥ 14 (≥1114)	366-390 (46-49)	100
50M	1400-1450(14.0-14.5)	≥ 13.0 (≥1033)	≥ 14 (≥1114)	382-406 (48-51)	100
30H	1080-1130(10.8-11.3)	≥ 10.2 (≥812)	≥ 17 (≥1353)	223-247 (28-31)	120
33H	1130-1170(11.3-11.7)	≥ 10.6 (≥844)	≥ 17 (≥1353)	247-263 (31-33)	120
35H	1170-1210(11.7-12.1)	≥ 11.0 (≥876)	≥ 17 (≥1353)	263-287 (33-36)	120
38H	1210-1250(12.1-12.5)	≥ 11.2 (≥890)	≥ 17 (≥1353)	287-310 (36-39)	120
40H	1250-1280(12.5-12.8)	≥ 11.5 (≥915)	≥ 17 (≥1353)	302-326 (38-41)	120
42H	1280-1320(12.8-13.2)	≥ 12.0 (≥955)	≥ 17 (≥1353)	318-342 (40-43)	120
45H	1320-1380(13.2-13.8)	≥ 12.0 (≥955)	≥ 17 (≥1353)	335-366 (42-46)	120
46H	1330-1380(13.3-13.8)	≥ 12.2 (≥972)	≥ 16 (≥1274)	350-374 (44-47)	120
48H	1360-1430(13.6-14.3)	≥ 12.5 (≥995)	≥ 16 (≥1274)	366-390 (46-49)	120
30SH	1080-1130(10.8-11.3)	≥ 10.0 (≥796)	≥ 20 (≥1672)	223-247 (28-31)	150
33SH	1130-1170(11.3-11.7)	≥ 10.6 (≥844)	≥ 20 (≥1672)	247-263 (31-33)	150
35SH	1170-1210(11.7-12.1)	≥ 11.0 (≥876)	≥ 20 (≥1672)	263-287 (33-36)	150
38SH	1210-1250(12.1-12.5)	≥ 11.4 (≥907)	≥ 20 (≥1672)	287-310 (36-39)	150
40SH	1250-1280(12.5-12.8)	≥ 11.8 (≥939)	≥ 20 (≥1672)	302-326 (38-41)	150
42SH	1280-1320(12.8-13.2)	≥ 11.8 (≥939)	≥ 20 (≥1672)	320-343 (40-43)	150
45SH	1320-1380(13.2-13.8)	≥ 12.6 (≥1003)	≥ 20 (≥1672)	342-366 (43-46)	150
30UH	1080-1130(10.8-11.3)	≥ 10.2 (≥812)	≥ 25 (≥1990)	223-247 (28-31)	180
33UH	1130-1170(11.3-11.7)	≥ 10.7 (≥852)	≥ 25 (≥1990)	247-263 (31-33)	180
35UH	1170-1210(11.7-12.1)	≥ 10.7 (≥852)	≥ 25 (≥1990)	263-287 (33-36)	180
38UH	1210-1250(12.1-12.5)	≥ 11.4 (≥907)	≥ 25 (≥1990)	287-310 (36-39)	180
40UH	1250-1280(12.5-12.8)	≥ 11.4 (≥907)	≥ 25 (≥1990)	302-326 (38-41)	180
28EH	1040-1080(10.4-10.8)	≥ 9.5 (≥756)	≥ 30 (≥2388)	207-231 (26-29)	200
30EH	1080-1130(10.8-11.3)	≥ 9.5 (≥756)	≥ 30 (≥2388)	223-247 (28-31)	200
33EH	1130-1170(11.3-11.7)	≥ 10.2 (≥812)	≥ 30 (≥2388)	247-263 (31-33)	200
35EH	1170-1210(11.7-12.1)	≥ 10.2 (≥812)	≥ 30 (≥2388)	263-287 (33-36)	200
38EH	1210-1250(12.1-12.5)	≥ 11.4 (≥907)	≥ 30 (≥2388)	287-310 (36-39)	200
30AH	1080-1130(10.8-11.3)	≥ 10.2 (≥812)	≥ 35 (≥2785)	223-255 (28-32)	220
33AH	1120-1170(11.2-11.7)	≥ 10.2 (≥812)	≥ 35 (≥2785)	247-271 (31-34)	220

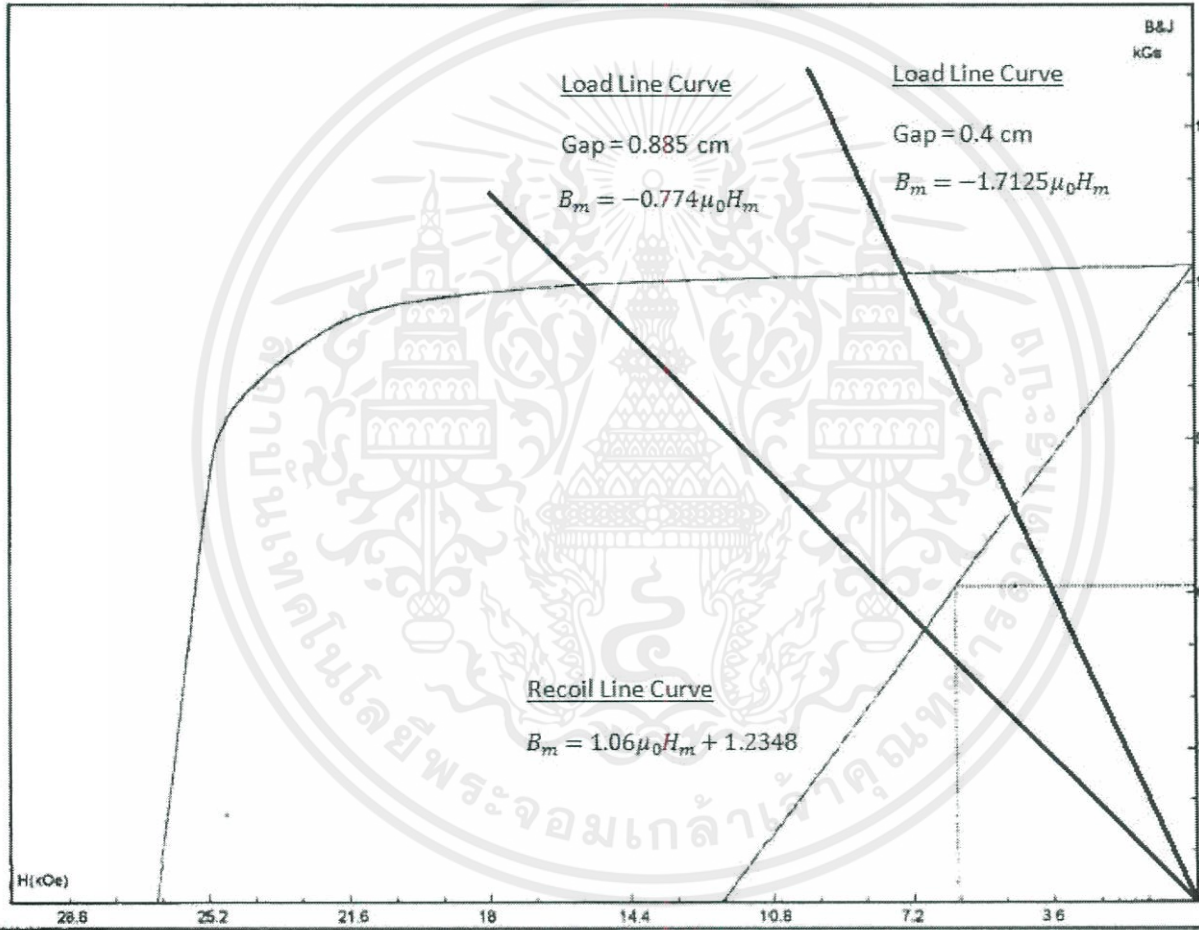
Note:

- The above-mentioned data of magnetic parameters and physical properties are given at room temperature.
- The maximum service temperature of magnet is changeable due to the ratio length and diameter and environmental factors.

+

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AUTOMATIC HYSTERESIGRAPH MODEL AMT-4 SJ LTD.



Result	
Br	12.348 kGs
Hcb	12.064 kOe
Hcj	26.559 kOe
(BH) _m	37.282 MGO
Hk	22.111 kOe
Hk/Hcj	83.3 %
Hd	6.085 kOe
Bd	6.127 kGs
Hm	24.255 kOe
Size	
Lenght	5.455 cm
Width	5.501 cm
Coil area	39.63 cmxcm
Wins	3
Condition	
Date	11-5-3
temp.	22
Type	38UH
Batch	10-1
S-N0.	1
User	



ภาคผนวก ค

การคำนวณหาค่าความต้านทานแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศและค่าความต้านทานภายใน
แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบภายในเครื่องจักรชิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร

วิธีการคำนวณหาค่าความต้านทานแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศและค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบภายในเครื่องจักรซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent-Magnet Synchronous Machines)

จาก $\mathcal{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g}$ จาก รูปที่ 2.15 และ ตารางที่ 2.2 พบว่า

A_g มีค่าเท่ากับ ความกว้าง \times ความลึก $= \frac{2\pi r}{12} \times 200\text{mm}$ และ l_g เท่ากับ 0.09 mm. เมื่อ รัศมี rotor r มีค่าเท่ากับ 0.07 m.

$$\text{ดังนั้น } \mathcal{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} = \frac{0.9 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} \times \frac{2\pi \times 0.07}{12} \times 200 \times 10^{-3}} = 97702.57 \frac{A-t}{Wb}$$

จาก $\mathcal{R}_{magnet} = \frac{l_{magnet}}{\mu_0 \mu_r A_{magnet}}$ จาก รูปที่ 2.15 และ ตารางที่ 2.2 พบว่า A_{magnet} มีค่าเท่ากับ ความกว้างของแม่เหล็ก \times ความลึกของแม่เหล็ก $= 10.15625\text{mm} \times 200\text{mm}$ และ l_{magnet} มีค่าเท่ากับ 4.6875 mm. และ μ_r มีค่าเท่ากับ 19.22

$$\text{ดังนั้น } \mathcal{R}_{magnet} = \frac{l_{magnet}}{\mu_0 \mu_r A_{magnet}} = \frac{4.6875 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} \times 19.22 \times 10.15625 \times 200 \times 10^{-6}} = 95546.47 \frac{A-t}{Wb}$$

ทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศและค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวร

$$\frac{\mathcal{R}_g}{\mathcal{R}_{magnet}} = \frac{97702.57}{95546.47} = 1.022 \text{ เท่า}$$

ดังนั้นเมื่อเทียบจากอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศและค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวร พบว่าค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรมีผลทำให้ต้องคำนึงถึงการคิดประสิทธิภาพของเครื่องจักรซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในวงจรแม่เหล็ก

A study and measurement of permanent magnet performance in magnetic circuit

พิจิตร ฌจันทร์ตา ภาวัต เพชรหาญ ภูวิศ เตชะศรีรอด มนัสมนต์ ออกบัว

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-800 ต่อ 3925

บทคัดย่อ

บทความวิชาการฉบับนี้นำเสนอการศึกษาและตรวจวัดสมรรถนะแม่เหล็กถาวรที่ถูกทำการกระตุ้นที่ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงตามข้อมูลของผู้ผลิตโดยวงจรแม่เหล็กที่มีช่องว่างอากาศ โดยทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรทดสอบ ประกอบด้วย ระยะช่องว่างอากาศในวงจรแม่เหล็ก คุณลักษณะความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบ และผลความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวร โดยทำการเปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กแบบมีช่องว่างอากาศที่มีแม่เหล็กถาวรและไม่มีแม่เหล็กถาวร จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรทดสอบ คือผลจากความต้านทานภายในแม่เหล็ก ซึ่งจะมีผลต่อการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร และการประเมินสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรเมื่อถูกใช้งานในสภาวะต่าง ๆ

ABSTRACT

This thesis presents the study and measurement of magnetized permanent magnet performance with high magnetic field intensity based on manufacturing data requirement in air gap magnetic circuit. The purpose of this study is to investigate various parameters affected to tested permanent magnet measurement including air gap distance, permanent magnet characteristics, and permanent magnet reluctance. The comparison between air gap magnetic circuit with and without permanent magnets is studied. The initial results show that the major impact of permanent magnet performance measurement is its reluctance. This leads to the design of permanent magnet machines and the evaluation of these machines performances using in various conditions.

1. บทนำ

ปัจจุบันเครื่องจักรกลไฟฟ้าเข้ามามีบทบาทสำคัญมากขึ้นในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ซึ่งเครื่องจักรกลไฟฟ้านอกจากจะทำให้เกิดความสะดวกรวดสบายในการดำเนินชีวิตแล้ว ยังเข้ามามีบทบาทกับหลายภาคส่วน โดยภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นมีส่วนประกอบสำคัญคือ แม่เหล็กถาวร โดยแม่เหล็กถาวรที่เป็นส่วนประกอบสำคัญภายในเครื่องจักรสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักรให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้มอเตอร์ขับเคลื่อนทางกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังไม่จำเป็นต้องใช้กระแสกระตุ้นขดลวดซึ่งทำให้มีการสูญเสียที่น้อยลง บทความวิชาการฉบับนี้จึงได้มีการนำเสนอการศึกษาและตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH ว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อการตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวร ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรทดสอบ จะทำให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้งานแม่เหล็กถาวรที่มีความเหมาะสมและใช้งานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.1 ขอบเขตการดำเนินงาน

บทความวิชาการฉบับนี้เป็นการศึกษาตรวจวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรทดสอบโดยจะทดสอบความน่าจะเป็นในหลายๆ รูปแบบเพื่อศึกษาแนวโน้มสิ่งที่เป็นไปได้ให้ได้ว่าค่าที่ถูกต้องและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1. คุณสมบัติของสารแม่เหล็ก

แม่เหล็ก คือ สารที่สามารถดูดเหล็กหรือเหนี่ยวนำให้เหล็กหรือสารแม่เหล็กเป็นแม่เหล็กได้ สารแม่เหล็กโดยทั่วไปจะสามารแบ่งได้เป็น 3 ชนิดด้วยกัน ไดอะแมกเนติก, พาราแมกเนติก, เฟอร์โรแมกเนติก

2.2. โดเมนแม่เหล็ก

สารแม่เหล็ก ประกอบด้วยโดโพล หรือ โมเลกุลแม่เหล็ก ซึ่งมีแรงกระทำซึ่งกันและกันและอยู่ในบริเวณหนึ่งๆเรียกว่า โดเมน และเมื่อโดเมนแม่เหล็กชี้ไปทางเดียวกันจะทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กขึ้นมา

2.3. การใช้ความร้อนสูงในการลบล้างความเป็นแม่เหล็ก

การอบแม่เหล็กจะทำให้ไอเล็กตรอนด้านในแม่เหล็กเกิดการปั่นจนเคลื่อนที่ไปสถานะพลังงานสูง ซึ่งทำให้ไอเล็กตรอนเหล่านั้นอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกับข้ามกับไอเล็กตรอนอื่นที่อยู่ข้างเคียงด้วยเหตุนี้ทำให้ไอเล็กตรอนไม่เกิดการจัดเรียงตัวในแนวเดิมอีกต่อไป จึงทำให้ความเป็นแม่เหล็กลดลง

2.4 วงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loop)

เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กกับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก B ในสารที่มีการทำให้มีสภาวะเป็นแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกัน

2.5. กฎของแอมแปร์ (AMPERE'S law)

เมื่อมีกระแสไหลผ่านตัวนำ ทองแดงจะทำให้สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นหรือเรียกว่า ความเข้มสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นตาม โดยมีหน่วยเป็นแอมแปร์รอบต่อเมตร (A-t/m)

2.6. กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law)

การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือทำให้แกนเหล็กเคลื่อนที่จะสามารถทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ (electromotive force) ได้

2.7 ลีคเกจฟลักซ์และการโป่งพอง

วงจรแม่เหล็กที่มีช่องว่างอากาศ เป็นส่วนประกอบวงจรเส้นแรงแม่เหล็กมักจะรั่วไหลออกจากทางเดินของวงจรแม่เหล็กและแพร่กระจายออกไปในอากาศเรียกว่าลีคเกจฟลักซ์ แต่เส้นแรงแม่เหล็กตรงช่องว่างอากาศจะมีการโป่งพอง (fringing) ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็กตรงช่องว่างอากาศใหญ่ขึ้นเป็นผลทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศลดลง

2.8. ศึกษาผลของค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องจักรซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร



$$\frac{\mu_g}{\mu_{magnet}} = \frac{97702.57}{95546.47} = 1.022$$

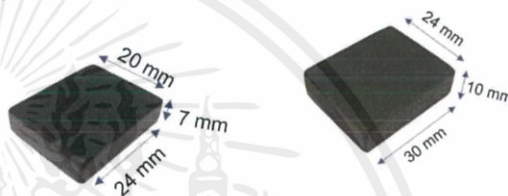
รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในเครื่องจักรซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร

ค่าความต้านทานแม่เหล็กจากการคำนวณทั้ง 2 มีค่าใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่าผลของค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะการใช้งานของเครื่องจักรซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร

3. การศึกษาและวัดสมรรถนะของแม่เหล็ก

3.2 แม่เหล็กถาวรทดสอบ

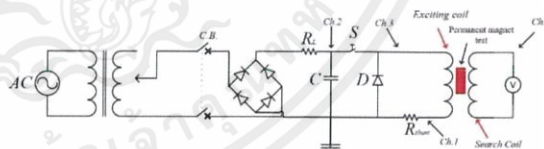
เป็นแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในการศึกษาและวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวร เป็นแม่เหล็กชนิด Neodymium iron boron (Nd-Fe-B) ซึ่งมีขนาด 20 × 24 × 7 mm. และ 24 × 30 × 10 mm. ซึ่งมีอุณหภูมิคูรีเท่ากับ 310 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิทำงานสูงสุดเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.1 แม่เหล็กถาวรทดสอบชนิด Neodymium iron boron

3.3 วงจรที่ใช้กระตุ้นแม่เหล็ก

วงจรกระตุ้นสนามแม่เหล็กจะทำให้การเรียงตัวโดเมนของแม่เหล็กเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยใช้ตัวเก็บประจุในการเก็บพลังงาน และเมื่อมีการคายประจุจะใช้ Thyristor เป็นสวิตช์เพื่อสร้างกระแสกระตุ้นผ่านขดลวดเหนี่ยวนำสร้างเป็นสนามแม่เหล็กผ่านสารแม่เหล็กแข็งเหนี่ยวนำโดเมนแม่เหล็กภายในแม่เหล็กเรียงให้อยู่ในทิศทางเดียวกันจนแม่เหล็กมีอำนาจความเป็นแม่เหล็กในตัวเอง



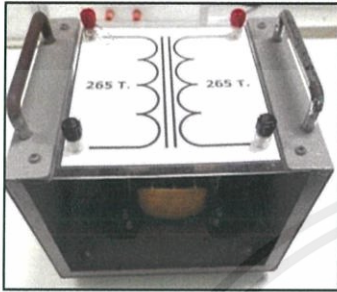
รูปที่ 3.2 วงจรที่ใช้กระตุ้นแม่เหล็ก

3.4 วงจรรูป E - I

เป็นวงจรที่ใช้ในการวัดสมรรถนะของแม่เหล็กถาวรทดสอบโดยเป็นการวัดค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งสามารถปรับช่องว่างอากาศของวงจรแม่เหล็กได้โดยนำ Gauss's meter ไปวัดตรงช่องว่าง

3.5 ออกแบบวงจรแม่เหล็กที่ใช้คำนวณค่าความต้านทานภายในแม่เหล็ก

โดยการทดลองจะนำแม่เหล็กถาวรทดสอบไปใส่ในวงจรแม่เหล็กดังรูปที่ 3.3 และทำการหาค่าความเหนี่ยวนำ (L) และทำการหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กโดยการหักลบค่าความต้านทานของช่องว่างอากาศจากค่าความต้านภายในแม่เหล็ก



รูปที่ 3.3 วงจรแม่เหล็ก

3.6 การทดลองหาความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กโดยการปรับระยะช่องอากาศ

เป็นการทดลองเพื่อหาว่าระยะของช่องว่างอากาศส่งผลต่อค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรอย่างไร โดยใช้แม่เหล็กขนาด 20 × 24 × 7 mm. ทดลอง จากนั้นเพิ่มระยะช่องว่างอากาศเท่ากับ 1, 1.5 และ 2 mm. ตามลำดับ

3.5.4 การทดลองหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กโดยการปรับอำนาจความเป็นแม่เหล็ก

เป็นการทดลองเพื่อหาผลของอำนาจความเป็นแม่เหล็กว่ามีผลต่อค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรอย่างไร โดยใช้แม่เหล็กขนาด 20 × 24 × 7 mm. ทดลองและปรับระยะช่องว่างอากาศให้คงที่ จากนั้นปรับอำนาจความเป็นแม่เหล็กเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3.5.5 การทดลองหาค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กโดยการเปลี่ยนขนาดแม่เหล็ก

เป็นการทดลองเพื่อหาว่าขนาดของแม่เหล็กส่งผลต่อค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรอย่างไร โดยการเปลี่ยนขนาดแม่เหล็กเป็นขนาด 30 × 24 × 10 mm. และปรับอำนาจความเป็นแม่เหล็กเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 0 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3.6 เตาอบ

ใช้ปรับความร้อนเพื่อลดอำนาจความเป็นแม่เหล็กของสารแม่เหล็กเพื่อนำไปทดสอบสมรรถนะในวงจรแม่เหล็ก ดังรูปที่

3.4

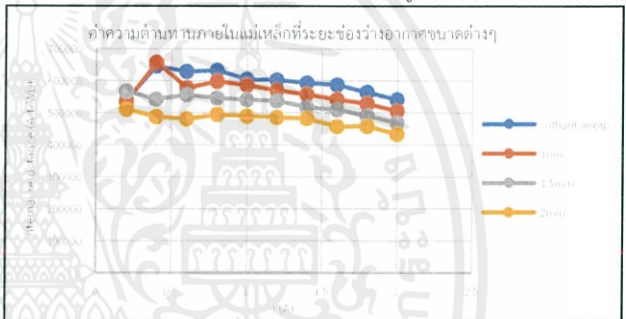
4. การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การหาการหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบ

ทำการหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรขนาด 20 × 24 × 7 mm. โดยทำการทดลองวัดค่าต้านทานแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศ 3.5 mm. เพื่อกำจัดค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศของวงจรแม่เหล็กที่มีแม่เหล็กถาวรทดสอบ

4.2 การหาผลของระยะช่องว่างอากาศส่งผลต่อความต้านทานภายในแม่เหล็กอย่างไร

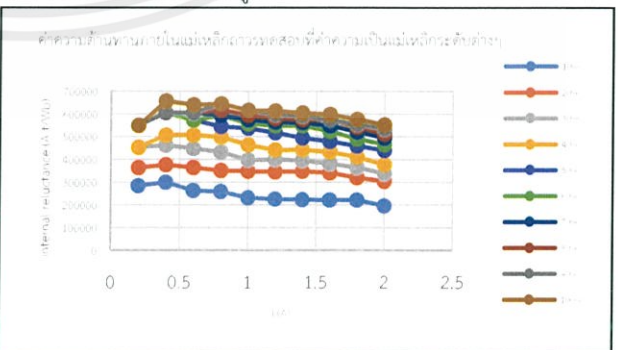
ทำการหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรขนาด 20 × 24 × 7 mm. โดยทำการทดลองวัดค่าต้านทานแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศ 3.5, 4.5, 5 และ 5.5 mm เพื่อกำจัดค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศของวงจรแม่เหล็กที่มีแม่เหล็กถาวรทดสอบและมีระยะช่องว่างอากาศเท่ากับ 0, 1, 1.5, และ 2 mm โดยแสดงค่าความต้านทานภายในได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กที่ระยะช่องว่างอากาศต่างๆ

4.3 การหาผลค่าความเป็นแม่เหล็กส่งผลต่อค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กอย่างไร

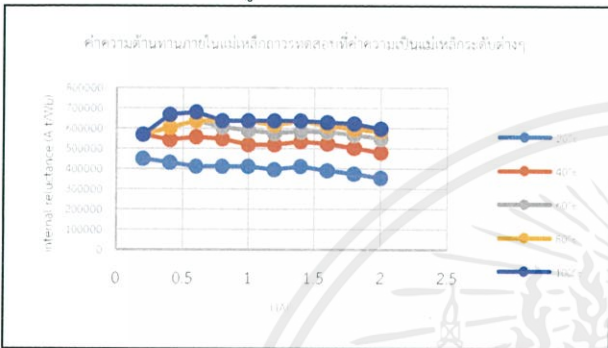
ทำการหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรขนาด 20 × 24 × 7 mm. โดยให้มีอำนาจความเป็นแม่เหล็กเท่ากับ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 โดยการให้ความร้อนจากเตาอบ และทำการคำนวณหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กโดยแสดงค่าความต้านทานภายในได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กที่ค่าความเป็นแม่เหล็กระดับต่างๆ

4.4 การหาผลของขนาดแม่เหล็กส่งผลกับค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กอย่างไร

การหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรขนาด 24 × 30 × 10 mm. โดยให้มีอำนาจความเป็นแม่เหล็กเท่ากับ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 โดยการวัดความต้านทานจากเตาอบและทำการคำนวณหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กโดยแสดงค่าความต้านทานภายในได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.5 2 กราฟแสดงค่าความต้านทานภายในของแม่เหล็กขนาด 24 × 30 × 10 mm. ที่ค่าความเป็นแม่เหล็กระดับต่างๆ

5.สรุปผลการดำเนินโครงการ

5.1 การหาค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบ

จากการทดลองพบว่าแม่เหล็กถาวรทดสอบมีความต้านทานแม่เหล็กภายใน เพราะค่าความต้านทานแม่เหล็กของวงจรที่มีช่องว่างอากาศและวงจรที่แม่เหล็กถาวรทดสอบแทนที่ช่องว่างอากาศซึ่งมีระยะช่องว่างอากาศของทั้ง 2 วงจรเท่ากัน แต่ได้ค่าความต้านทานแม่เหล็กออกมาแตกต่างกัน จึงสรุปได้ว่าค่าที่ทำให้ผลการทดสอบของทั้ง 2 วงจรแตกต่างกันเป็นผลมาจากค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบนั่นเอง

5.2 ผลของช่องว่างอากาศที่มีต่อค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบ

จากการทดลองพบว่าค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะของช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งเนื่องมาจากผลมาจากฟลักซ์แม่เหล็กที่รั่วไหลในวงจรเมื่อมีการเพิ่มระยะช่องว่างอากาศส่งผลให้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าไม่คงที่ จึงทำให้ฟลักซ์นั้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบมีค่าลดลงตามการเพิ่มของระยะช่องว่างอากาศ

5.3 ผลของค่าความเป็นแม่เหล็กที่มีต่อค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบ

จากการทดลองพบว่าเมื่อค่าความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทดสอบมีค่าลดลงส่งผลให้การเรียงตัวของโดเมน-

แม่เหล็กในสารแม่เหล็กมีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ และค่าความต้านทานแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบมีแนวโน้มลดลงตามการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นแม่เหล็ก

5.4 ผลของขนาดของแม่เหล็กถาวรทดสอบที่มีต่อค่าความต้านทานภายในแม่เหล็กถาวรทดสอบ

จากการทดลองพบว่าเมื่อขนาดของแม่เหล็กเปลี่ยนไปจะส่งผลให้ค่าความต้านทานของแม่เหล็กถาวรทดสอบมีค่าประมาณเดิม ตามสมการ $R = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A}$ จากที่ $\frac{l}{\mu_r A}$ มีอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กมีค่าประมาณเดิม

กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกษ์ฤกษ์ และรองศาสตราจารย์ พิชิต ลายอง อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ตลอดจนบุคคลอื่นๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] A brief history of magnetism. J.M.D. COEY. (2553). (หน้าที่ 1-10). Cambridge University
 [2] Multistatic Reluctance Network Modeling for the Design of Permanent-Magnet Synchronous Machines

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ - นามสกุล นาย พิชิต ญจันทร์ดา
 การศึกษาระดับปริญญาตรี: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ - นามสกุล นาย ภาวัต เพชรหาญ
 การศึกษาระดับปริญญาตรี: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ - นามสกุล นาย ภูวิช เตชะศรีอุดม
 การศึกษาระดับปริญญาตรี: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ - นามสกุล นางสาว มนัสมนต์ ออกบัว
 การศึกษาระดับปริญญาตรี: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ - นามสกุล นาย พิจิตร ณจันทร์ตา

วัน เดือน ปี เกิด 2 กุมภาพันธ์ 2540

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2561 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อนที่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แม่เมาะ



ชื่อ - นามสกุล นาย ภาวัต เพชรหาญ

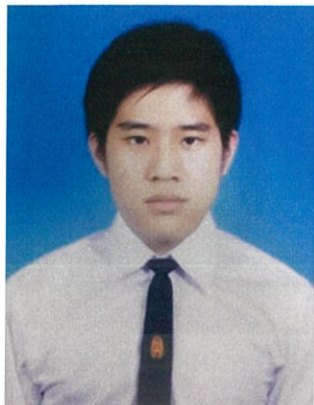
วัน เดือน ปี เกิด 18 ตุลาคม 2539

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2561 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อนที่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แม่เมาะ



ชื่อ - นามสกุล นาย ภูวิศ เตชะศรีอุดม

วัน เดือน ปี เกิด 26 ธันวาคม 2539

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2561 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อนที่ PTTEP



ชื่อ - นามสกุล นางสาว มนัสมนต์ ออกบัว

วัน เดือน ปี เกิด 24 มกราคม 2540

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2561 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อนที่ Thai Toray Synthetic Co., Ltd โรงงานอยุธยา