



เทคนิคการจัดอำนาจแม่เหล็กในแม่เหล็กไฟฟ้า

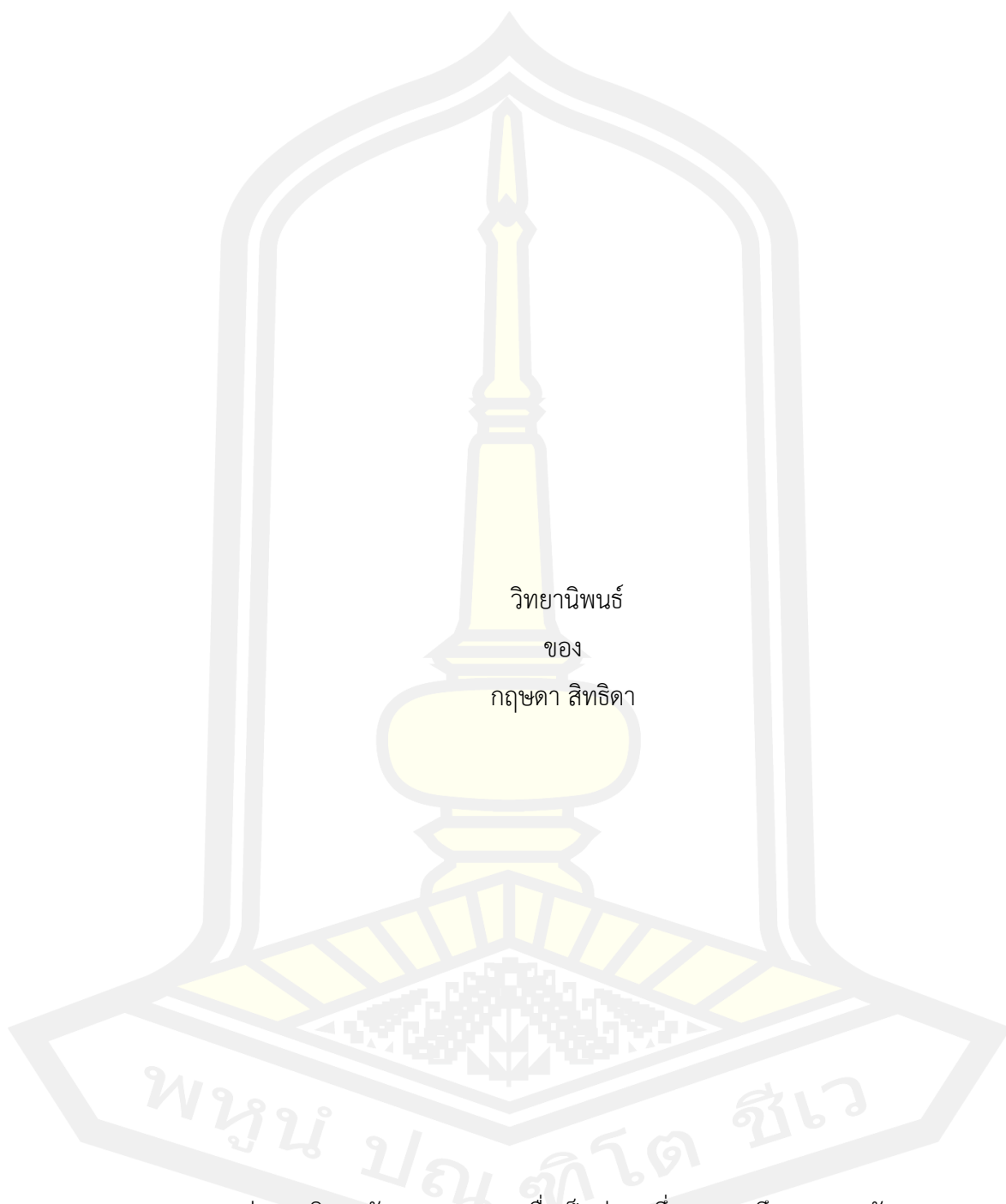
วิทยานิพนธ์  
ของ  
กฤษฎา สิริธิดา

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มีนาคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เทคนิคการจัดอำนาจแม่เหล็กในแม่เหล็กไฟฟ้า



เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มีนาคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

# Demagnetization Techniques in the EI-core Electrol Lifting Magnet Head

Kitsada Sittida

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Master of Engineering (Electrical and Computer Engineering)

March 2022

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายฤชดา สิทธิดา แล้ว  
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร )

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. นิวัตร อังควิเศษฐพันธ์ )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยยงค์ เสริมผล )

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย  
มหาสารคาม

.....

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป )

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง                   เทคนิคการจัดอำนาจแม่เหล็กในแม่เหล็กไฟฟ้า  
 ผู้วิจัย                   กฤษดา สิทธิดา  
 อาจารย์ที่ปรึกษา       รองศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล  
 ปริญญา                   วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต   สาขาวิชา   วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
 มหาวิทยาลัย           มหาวิทยาลัยมหาสารคาม                   ปีที่พิมพ์       2565

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบวงจรควบคุมสนามแม่เหล็กที่ใช้กับหัวแม่ไฟฟ้ายกชนิดแกน E เพื่อวิเคราะห์การเกิดสนามแม่เหล็กตกค้างภายในหัวแม่เหล็กไฟฟ้าและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเคลื่อนของหัวแม่เหล็กไฟฟ้ายกชนิดแกน E ที่มีผลต่อการยึดเกาะของวัสดุโลหะชนิดต่างๆ เพื่อการพัฒนาและประยุกต์ใช้วงจรควบคุมสนามแม่เหล็กของหัวแม่เหล็กที่ใช้ในการดูดโลหะในอุตสาหกรรมรีไซเคิล

โดยเลือกใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมการทำงาน ประกอบด้วย รีจิสเตอร์ วาริสเตอร์ และคาปาซิเตอร์ และเลือกใช้วัสดุโลหะในการทดลองได้แก่ เหล็กคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS 304 และเหล็กชุบซิงค์ ขนาดความกว้างxยาวxหนา 25.4x25.4x2 มิลลิเมตร และทำการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านวงจรด้วยมัลติมิเตอร์และค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตกค้างเพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของวงจรควบคุมสนามแม่เหล็ก

จากผลการทดสอบ พบว่าคาปาซิเตอร์มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการจัดสนามแม่เหล็ก เนื่องจากคาปาซิเตอร์สามารถทำการคายประจุและการจัดสนามแม่เหล็กได้ดี ซึ่งส่งผลให้ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับศูนย์ และเมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานและวาริสเตอร์พบการจัดสนามแม่เหล็กได้ดี แต่ยังมีการตกค้างของสนามไฟฟ้าภายในชิ้นทดสอบ

คำสำคัญ : สนามแม่เหล็ก, สนามไฟฟ้า, การจัดสนามแม่เหล็ก

|                   |                                                                        |              |                                     |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------|
| <b>TITLE</b>      | Demagnetization Techniques in the EI-core Electrol Lifting Magnet Head |              |                                     |
| <b>AUTHOR</b>     | Kitsada Sittida                                                        |              |                                     |
| <b>ADVISORS</b>   | Associate Professor Worawat Sa-Ngiamvibool , Ph.D.                     |              |                                     |
| <b>DEGREE</b>     | Master of Engineering                                                  | <b>MAJOR</b> | Electrical and Computer Engineering |
| <b>UNIVERSITY</b> | Maharakham University                                                  | <b>YEAR</b>  | 2022                                |

### ABSTRACT

The purpose of this research is to design magnetic control circuit used for the Electromagnetic lift type E. For to analyze the occurrence of residual magnetic fields within the Electromagnetic lift and the study of relationship between the magnetic force of Electromagnetic lift type E. Also the effects on the adhesion of various metal materials, for development and application magnetic head control circuit used to metal suction in the recycling industry.

The Electronic equipment and Materials used for the experiment to control circuit consists of Resistor, Varistor and Capacitor, and Low Carbon Steel, Stainless steel SUS 304 and Electro galvanization steel, square plates sized 25.4 x 25.4 x 2 millimeters. To measure the current flowing through the circuit with a meter and residual electromagnetic field values. To compare performance of the magnetic field control circuit.

From the findings of the test results the capacitor had the best efficiency in removing magnetic fields. Because the capacitor discharged and eliminating magnetic fields to greater effect. Which results in the electric field and the magnetic field is equal to zero and in the compare with resistance and varistor, The magnetic field elimination was good, but there is still a residual electric field inside the test piece.

Keyword : Magnetic field, Electric field, Demagnetization



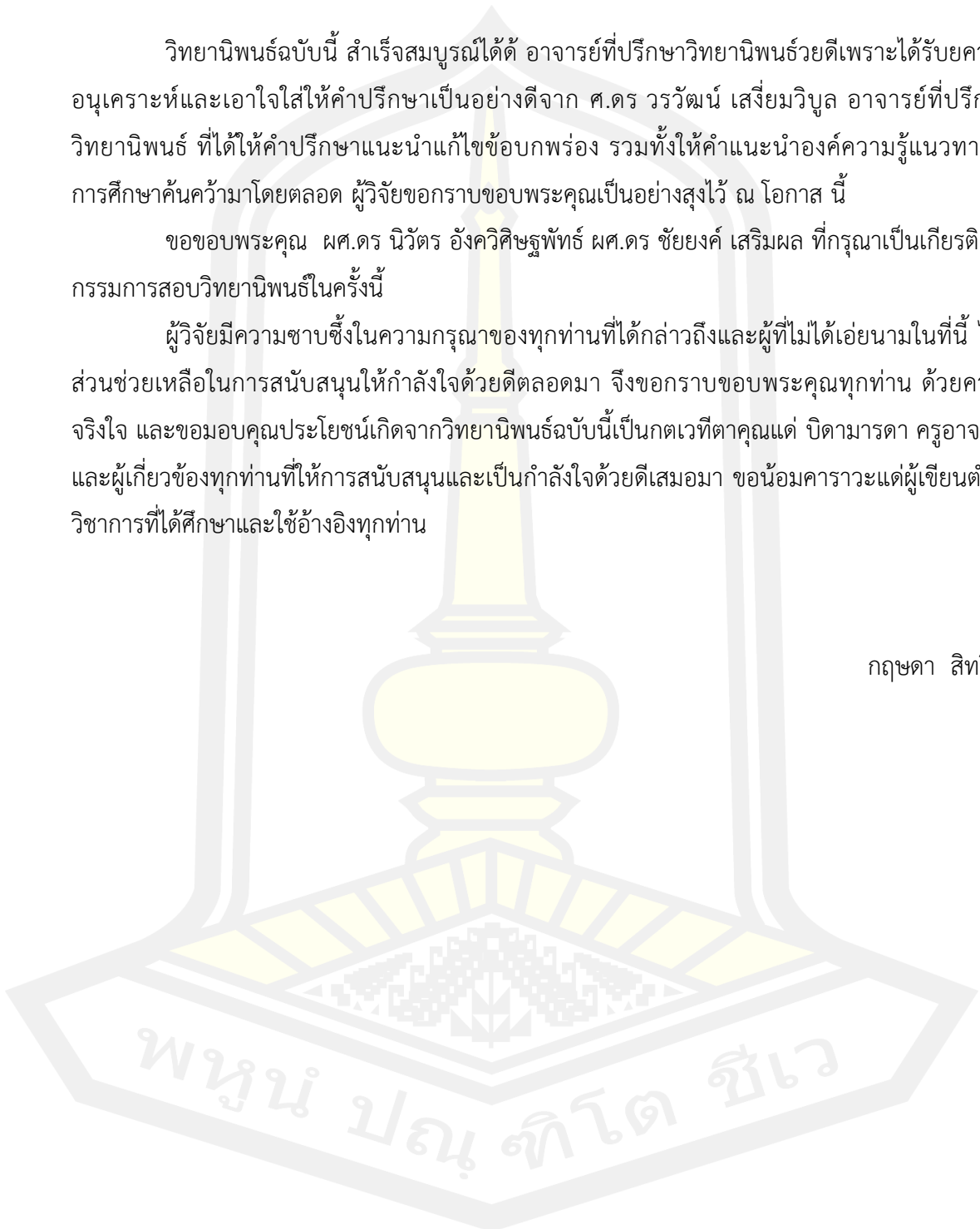
## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จสมบูรณ์ได้ดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ช่วยดีเพราะได้รับคำแนะนำและเอาใจใส่ให้คำปรึกษาเป็นอย่างดีจาก ศ.ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำแก้ไขข้อบกพร่อง รวมทั้งให้คำแนะนำองค์ความรู้แนวทางในการศึกษาค้นคว้ามาโดยตลอด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. นิวัตร อังควิสิษฐพัทธ์ ผศ.ดร. ชัยยงค์ เสริมผล ที่กรุณาเป็นเกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความกรุณาของทุกท่านที่ได้กล่าวถึงและผู้ที่ไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้ ได้มีส่วนช่วยเหลือในการสนับสนุนให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา จึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่าน ด้วยความจริงใจ และขอมอบคุณประโยชน์เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นกตเวทิตาคุณแด่ บิดามารดา ครูอาจารย์ และผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา ขอน้อมคาราวะแด่ผู้เขียนตำราวิชาการที่ได้ศึกษาและใช้อ้างอิงทุกท่าน

กฤษฎา สิทธิตา



## สารบัญ

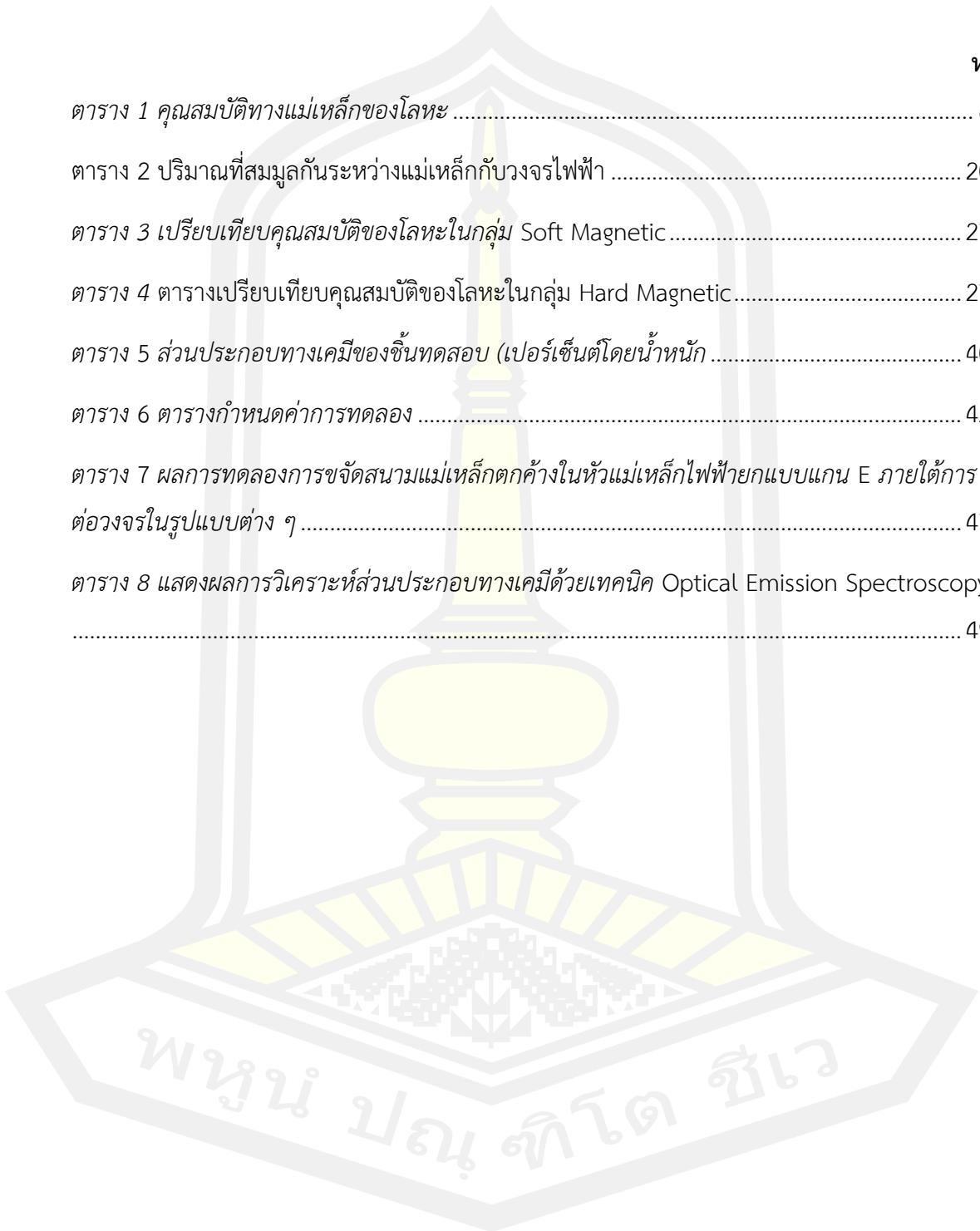
|                                                            | หน้า |
|------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                       | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                    | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                       | ซ    |
| สารบัญ.....                                                | ซ    |
| สารบัญตาราง.....                                           | ฅ    |
| สารบัญรูปภาพ.....                                          | ฅ    |
| บทที่ 1 .....                                              | 1    |
| บทนำ.....                                                  | 1    |
| 1.1 หลักการและเหตุผล .....                                 | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....                          | 3    |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....                                | 3    |
| 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับของการวิจัย .....                   | 4    |
| 1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ .....                                  | 4    |
| บทที่ 2 .....                                              | 5    |
| ปรีทัศน์เอกสารข้อมูล .....                                 | 5    |
| 2.1 ทฤษฎี.....                                             | 5    |
| 2.1.1 แม่เหล็ก (Magnet).....                               | 5    |
| 2.1.2 แม่เหล็กและอำนาจแม่เหล็ก (Magnet and Magnetism)..... | 5    |
| 2.1.2 คุณสมบัติของแม่เหล็ก.....                            | 5    |
| 2.1.3 ขั้วแม่เหล็กโลก (Geomagnetic Poles).....             | 6    |
| 2.1.4 สนามแม่เหล็ก .....                                   | 6    |

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1.5 การแบ่งชนิดของสารแม่เหล็ก.....                                                                         | 8  |
| 2.2 ทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้องกับแม่เหล็กไฟฟ้า.....                                                          | 12 |
| 2.2.1 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ .....                                                                        | 12 |
| 2.2.2 กฎมือขวา.....                                                                                          | 12 |
| 2.2.3 กฎของแอมแปร์.....                                                                                      | 13 |
| 2.2.4 กฎของเกาส์ (Gauss Law).....                                                                            | 14 |
| 2.2.5 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า.....                                                               | 15 |
| 2.2.6 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กหรือความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Induction or Magnetic Flux Density) ..... | 17 |
| 2.3 วงจรแม่เหล็กพื้นฐาน .....                                                                                | 18 |
| 2.3.1 หลักการคำนวณวงจรแม่เหล็ก .....                                                                         | 20 |
| 2.3.2 วงจรแม่เหล็กแบบไม่เชิงเส้น.....                                                                        | 21 |
| 2.3.3 หน่วยและขนาดของแม่เหล็ก .....                                                                          | 24 |
| 2.3.4 ความเข้มสนามแม่เหล็กและแมกนีโตเซชัน .....                                                              | 24 |
| 2.3.5 ความเข้มสนามแม่เหล็ก.....                                                                              | 24 |
| 2.3.6 ความสัมพันธ์ของค่าสภาพรับไว้ได้และสภาพให้ซึมได้ .....                                                  | 25 |
| 2.3.7 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติแม่เหล็ก (The Influence of Temperature on Magnetic Behavior) .....     | 25 |
| 2.3.8 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis).....                                                                          | 26 |
| 2.3.9 Magnetic Domains.....                                                                                  | 28 |
| 2.3.10 การล้างอำนาจพลั๊กซ์แม่เหล็กที่ตกค้าง (Demagnetizations) .....                                         | 30 |
| 2.4 การประยุกต์ใช้งาน .....                                                                                  | 32 |
| 2.4.1 แม่เหล็กถาวร.....                                                                                      | 32 |
| 2.4.2 แม่เหล็กไฟฟ้า.....                                                                                     | 33 |

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                     | 34 |
| 2.5.1 งานวิจัยภายในประเทศ .....                    | 34 |
| 2.5.2 งานวิจัยต่างประเทศ .....                     | 35 |
| 2.6 สรุป .....                                     | 38 |
| บทที่ 3 .....                                      | 39 |
| วิธีดำเนินการวิจัย .....                           | 39 |
| 3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย..... | 40 |
| 3.2 ขั้นตอนการออกแบบ .....                         | 41 |
| 3.3 วิธีการทดลอง.....                              | 45 |
| 3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล .....                      | 46 |
| บทที่ 4 .....                                      | 48 |
| ผลการวิจัยและอภิปรายผล .....                       | 48 |
| 4.1 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการทดลอง.....         | 48 |
| 4.2 รายงานผลการทดลอง.....                          | 48 |
| บทที่ 5 .....                                      | 53 |
| สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....               | 53 |
| 5.1 สรุปผล.....                                    | 53 |
| 5.2 อภิปรายผล.....                                 | 54 |
| บรรณานุกรม.....                                    | 55 |
| ประวัติผู้เขียน.....                               | 58 |

## สารบัญตาราง

|                                                                                                                  | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตาราง 1 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของโลหะ .....                                                                        | 8    |
| ตาราง 2 ปริมาณที่สมมูลกันระหว่างแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้า .....                                                       | 20   |
| ตาราง 3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโลหะในกลุ่ม Soft Magnetic .....                                                   | 27   |
| ตาราง 4 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของโลหะในกลุ่ม Hard Magnetic .....                                              | 27   |
| ตาราง 5 ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นทดสอบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) .....                                              | 40   |
| ตาราง 6 ตารางกำหนดค่าการทดลอง .....                                                                              | 45   |
| ตาราง 7 ผลการทดลองการขจัดสนิมแม่เหล็กตกค้างในหัวแม่เหล็กไฟฟ้ายกแบบแกน E ภายใต้การ<br>ต่อวงจรในรูปแบบต่าง ๆ ..... | 47   |
| ตาราง 8 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค Optical Emission Spectroscopy<br>.....                     | 49   |



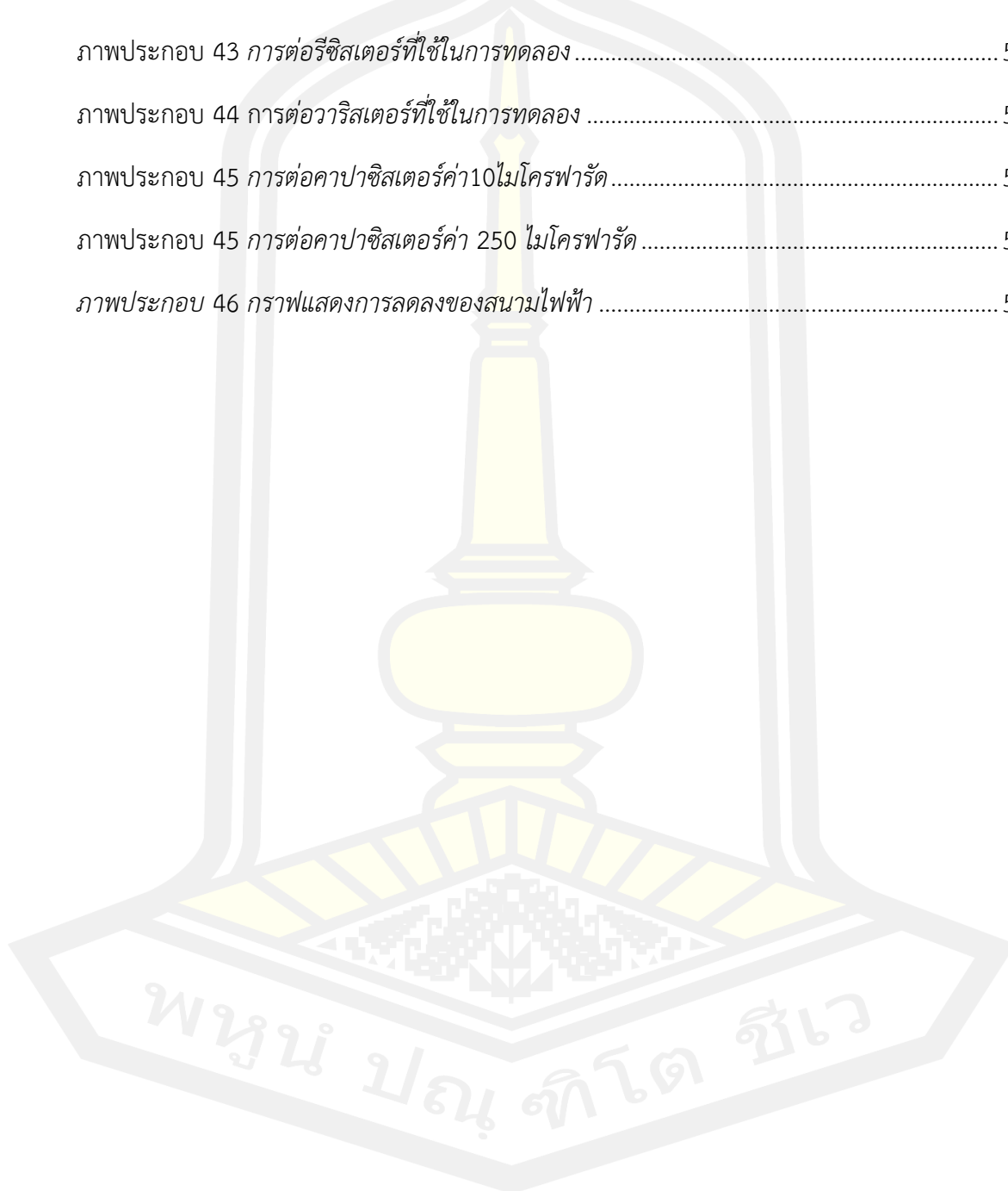
## สารบัญรูปภาพ

### หน้า

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพประกอบ 1 ทิศทางสนามแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 7  |
| ภาพประกอบ 2 เส้นแสดงสนามแม่เหล็กรอบ ๆ กระแสไฟฟ้าที่ไหลวนเป็นวงกับรอบแท่งแม่เหล็ก ...                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 7  |
| ภาพประกอบ 3 ลูกศรแสดงโมเมนต์แม่เหล็ก .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 8  |
| ภาพประกอบ 4 ( a ) การจัดเรียงไดโพลของอะตอมในวัสดุที่มีสภาพแม่เหล็กลักษณะไดโพลของอะตอมในสภาวะ <i>Diamagnetism</i> ในสภาพที่ภายนอก จะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก จะไม่มีไดโพลเกิดขึ้น แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็ก ไดโพลจะเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในทิศที่ตรงกันข้ามกับทิศของสนาม ( b ) การจัดเรียงไดโพลของอะตอมในวัสดุที่มีสภาพแม่เหล็กแบบ <i>Paramagnetism</i> ในสภาพที่มีและไม่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอก ..... | 9  |
| ภาพประกอบ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างต่อความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B กับความเข้มสนามแม่เหล็ก H ของวัสดุที่มีสภาพแม่เหล็กแบบ <i>Paramagnetic</i> และ <i>Diamagnetic</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                   | 10 |
| ภาพประกอบ 6 แสดงการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของไดโพลในอะตอมของวัสดุที่มีสภาพแม่เหล็กแบบ <i>Ferromagnetism</i> ที่เกิดได้แม้จะไม่มีสนามแม่เหล็กกระทำจากภายนอกก็ตาม .....                                                                                                                                                                                                                                                      | 11 |
| ภาพประกอบ 7 แสดงการเรียงตัวแบบสวนทางกันของโมเมนต์แม่เหล็กอันเกิดจากการหมุนรอบตัวเอง (ของอิเล็กตรอน) ในวัสดุแมกเนติกส์ที่สลับซึ่งมีสภาพแม่เหล็กแบบ <i>Antiferromagnetic</i> ...                                                                                                                                                                                                                                              | 11 |
| ภาพประกอบ 8 แสดงการเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กจากการหมุนรอบตัวของอิเล็กตรอนของไอออน $Fe^{2+}$ และ $Fe^{3+}$ ในลักษณะ $Fe_3O_4$ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 12 |
| ภาพประกอบ 9 กฎมือขวา.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 13 |
| ภาพประกอบ 10 ทิศทางสนามแม่เหล็กภายในลวดตัวนำ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 13 |
| ภาพประกอบ 11 สนามแม่เหล็กภายในและภายนอกลวดตัวนำ.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 14 |
| ภาพประกอบ 12 ผิวเกาส์เขียน .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 14 |
| ภาพประกอบ 13 ความสัมพันธ์เส้นแรงแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้า.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 16 |
| ภาพประกอบ 14 เส้นแรงแม่เหล็กเกิดจากขดลวด .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 16 |
| ภาพประกอบ 15 การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 17 |

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพประกอบ 16 โครงสร้างวงจรแม่เหล็ก.....                                                                                                                 | 18 |
| ภาพประกอบ 17 สูตรพื้นฐานวงจรแม่เหล็ก.....                                                                                                               | 20 |
| ภาพประกอบ 18 คุณสมบัติแกนเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น .....                                                                                                   | 21 |
| ภาพประกอบ 19 B-H Curve หรือ DC Magnetization Curve .....                                                                                                | 22 |
| ภาพประกอบ 20 กราฟแสดงจุดอิ่มตัว .....                                                                                                                   | 22 |
| ภาพประกอบ 21 กราฟค่าความซึมซาบฟลักซ์แม่เหล็กที่แปรตามความเข้มแม่เหล็ก .....                                                                             | 23 |
| ภาพประกอบ 22 การอิ่มตัวของแม่เหล็กจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ .....                                                                                       | 25 |
| ภาพประกอบ 23 ลักษณะของการเกิดฮิสเทอรีซิส.....                                                                                                           | 26 |
| ภาพประกอบ 24 ลักษณะของการเกิดฮิสเทอรีซิสของ Soft และ Hard Magnetic Materials.....                                                                       | 27 |
| ภาพประกอบ 25 ลักษณะการเกิดmagnetic domain .....                                                                                                         | 28 |
| ภาพประกอบ 26 ลักษณะการเกิดการเปลี่ยนแปลงเกรนใน Magnetic Dipole.....                                                                                     | 29 |
| ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงโดเมนระหว่างความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็กของโลหะกลุ่ม Ferromagnetic หรือ Ferrimagnetic..... | 29 |
| ภาพประกอบ 28.เรียงตัวของโดเมนในโลหะ .....                                                                                                               | 30 |
| ภาพประกอบ 29 การประยุกต์ใช้หัวแม่เหล็กยกในงานอุตสาหกรรม.....                                                                                            | 32 |
| ภาพประกอบ 30 โครงสร้างของหัวแม่เหล็กถาวรในงานอุตสาหกรรม .....                                                                                           | 32 |
| ภาพประกอบ 31 ภาพหัวแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม.....                                                                                              | 33 |
| ภาพประกอบ 32 ภาพการนำสนามแม่เหล็กไปใช้ในงานอุตสาหกรรม.....                                                                                              | 33 |
| ภาพประกอบ 33 แผนการดำเนินงานวิจัย.....                                                                                                                  | 39 |
| ภาพประกอบ 34 ชิ้นทดสอบที่ใช้ในการยกด้วยหัวแม่เหล็กไฟฟ้า.....                                                                                            | 40 |
| ภาพประกอบ 35 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....                                                                                                  | 41 |
| ภาพประกอบ 36 วงจรการทำงาน .....                                                                                                                         | 42 |
| ภาพประกอบ 37 ก) หลักการโครงสร้างหัวแม่เหล็ก และ ข) ชุดห้วยยกโลหะด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า .....                                                                 | 42 |
| ภาพประกอบ 38 สัดส่วนต่างๆ ของห้วยยกเหล็กด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า .....                                                                                         | 43 |

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพประกอบ 40 ขั้นตอนการทดลองงานวิจัย .....                        | 46 |
| ภาพประกอบ 41 แสดงพื้นผิวโลหะทดสอบด้วยจุลทรรศน์กำลังขยาย 20X ..... | 49 |
| ภาพประกอบ 42 การต่อแหล่งจ่ายตรงเข้ากับหัวแม่เหล็กไฟฟ้ายก .....    | 50 |
| ภาพประกอบ 43 การต่อรีซิสเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง .....               | 51 |
| ภาพประกอบ 44 การต่อวาริสเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง .....               | 51 |
| ภาพประกอบ 45 การต่อคาปาซิสเตอร์ค่า 10 ไมโครฟารัด .....            | 52 |
| ภาพประกอบ 45 การต่อคาปาซิสเตอร์ค่า 250 ไมโครฟารัด .....           | 52 |
| ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงการลดลงของสนามไฟฟ้า .....                    | 53 |



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 หลักการและเหตุผล

สนามแม่เหล็ก นั้นอาจเกิดขึ้นได้จากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า หรือในทางกลศาสตร์ควอนตัมนั้น การสปิน (การหมุนรอบตัวเอง) ของอนุภาคต่าง ๆ ก็ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเช่นกัน ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการ สปิน เป็นที่มาของสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรต่าง ๆ สนามแม่เหล็กคือปริมาณที่บ่งบอกแรงกระทำบนประจุที่กำลังเคลื่อนที่ สนามแม่เหล็กเป็นสนามเวกเตอร์และทิศของสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งใด ๆ คือทิศที่เข็มของเข็มทิศวางตัวอย่างสมดุล เรามักจะเขียนแทนสนามแม่เหล็กด้วยสัญลักษณ์  $B$  เดิมทีแล้ว สัญลักษณ์  $B$  นั้นถูกเรียกว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก หรือความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก ในขณะที่  $H = B/\mu$  ถูกเรียกว่า สนามแม่เหล็ก (หรือความแรงของสนามแม่เหล็ก) และคำเรียกนี้ก็ยังใช้กันติดปากในการแยกปริมาณทั้งสองนี้ เมื่อเราพิจารณาความตอบสนองต่อแม่เหล็กของวัสดุชนิดต่าง ๆ แต่ในกรณีทั่วไปแล้ว สองปริมาณนี้ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก และเรามักใช้คำแทนปริมาณทั้งสองชนิดว่าสนามแม่เหล็ก

ในระบบหน่วย SI  $B$  และ  $H$  มีหน่วยเป็นเทสลา (T) และ  $H$  มีหน่วยแอมแปร์/เมตร (A/m) ตามลำดับหรือในระบบหน่วย cgs หน่วยของทั้งสองคือ เกาส์ (G) และ oersted (Oe) ตามลำดับ

แม่เหล็กไฟฟ้ามาจากภาษาอังกฤษ Electromagnet คำนี้เป็นรูปแบบผสมของคำภาษากรีกสองคำได้แก่ ἤλεκτρον (ēlektron) หมายถึง อิเล็กตรอน และ μαγνητική λίθος (magnētis lithos) ซึ่งหมายถึง "หินแม่เหล็ก" ซึ่งเป็นแร่เหล็กชนิดหนึ่ง ปรากฏการณ์แม่เหล็กไฟฟ้าถูกนิยามในความหมายของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าบางครั้งถูกเรียกว่า แรงลอเรนซ์ ซึ่งประกอบด้วยทั้งไฟฟ้าและแม่เหล็กในฐานะที่เป็นสององค์ประกอบของปรากฏการณ์เดียวกัน แรงแม่เหล็กไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติภายในของวัสดุส่วนใหญ่ที่พบในชีวิตประจำวัน สารทั่วไปจะรับรู้ของมันจากผลของแรงระหว่างโมเลกุล (Intermolecular Force) ของโมเลกุลแต่ละตัวในสาร แรงแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างนิวเคลียสและอิเล็กตรอนยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนตามกลไกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้ากับวงโคจรรอบนิวเคลียส และยึดเหนี่ยวอะตอมไว้ด้วยกัน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของโมเลกุล แรงแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นตัวการให้เกิดพันธะเคมีระหว่างอะตอมทำให้เกิดโมเลกุลและแรงระหว่างโมเลกุล กระบวนการนี้จะควบคุมกระบวนการที่เกี่ยวข้องทั้งหลายในทางเคมี ซึ่งเกิดขึ้นจากการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมหนึ่งกับอิเล็กตรอนอื่นในวงโคจรของอะตอมที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งจะถูกกำหนดโดยการปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงแม่เหล็กไฟฟ้ากับโมเมนตัมของอิเล็กตรอนเหล่านั้น

สนามไฟฟ้า (Electric Field ) หมายถึง "บริเวณโดยรอบประจุไฟฟ้า ซึ่งประจุไฟฟ้าสามารถส่งอำนาจไปถึง" หรือ "บริเวณที่เมื่อนำประจุไฟฟ้าเข้าไปวางแล้วจะเกิดแรงกระทำบนประจุไฟฟ้านั้น" ตามจุดต่าง ๆ ในบริเวณสนามไฟฟ้า ย่อมมีความเข้มของสนามไฟฟ้าต่างกันจุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้า จะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่อยู่ห่างไกลออกไปนอกจากนั้น ณ จุดต่าง ๆ ในบริเวณสนามไฟฟ้าย่อมจะปรากฏศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่าง ๆ กันด้วยซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้า ชนิดเดียวกันกับศักย์ไฟฟ้า อันเกิดจากประจุไฟฟ้าที่เป็นเจ้าของสนามไฟฟ้าจุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้าจะมีศักย์สูงกว่าจุดที่อยู่ไกลออกไป เส้นแรงไฟฟ้า เรากำหนดเพื่อความสะดวกในการศึกษาไม่มีปรากฏอยู่จริง ๆ โดยกำหนดเป็นหลักให้เข้าใจตรงกันว่า เมื่อวางประจุไฟฟ้าบวกอิสระลงในสนามไฟฟ้าถ้าประจุไฟฟ้าบวกอิสระนั้นสามารถเคลื่อนที่ไปได้แนวทางที่ประจุไฟฟ้าบวกอิสระนี้จะเคลื่อนที่ไป กำหนดว่าเป็นเส้นแรงไฟฟ้า และทิศทางของเส้นสัมผัส ซึ่งสัมผัสเส้นแรงไฟฟ้าที่จุดใด ๆ ก็คือทิศทางของสนามไฟฟ้า ณ จุดนั้นปี ค.ศ 1820 ฮันส์ คริสเตียน เอร์สเตด (Hans Christian Oersted) ศาสตราจารย์ทางปรัชญา ธรรมชาติในกรุงโคเปนเฮเกน ประเทศเดนมาร์ก ค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้าและแม่เหล็กในตอนท้ายของชั่วโมงการบรรยายวิชาไฟฟ้าและแม่เหล็กเขาวางเข็มทิศไว้ใกล้ เส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้า ปรากฏว่าเข็มทิศชี้ไปทิศทางใหม่ เมื่อเข็มทิศเข้าไปใกล้เส้นลวด จะมีทอร์กกระทำต่อเข็มทิศมากขึ้น เขาพบว่าสนามแม่เหล็กมาจากเส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหล ดังนั้นเขาจึงเริ่มหาเส้นแรงแม่เหล็กพบว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเป็นวงกลมรอบเส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหล

เจมส์ เคลิร์ก แมกซ์เวลล์ ได้เสนอต่อไปว่าถ้ามีการเปลี่ยนแปลงทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าพร้อมกันและต่อเนื่องแล้ว จะเป็นผลให้การเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแผ่ออกไปเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง และแมกซ์เวลล์ สรุปว่าแสงคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าการแผ่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเปรียบเทียบได้กับการแผ่กระจายของคลื่นน้ำที่แผ่ออกจากจุดที่กระทบน้ำ โดยสมมติให้ลวดตัวนำ คู่หนึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่น ที่ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ สมมติว่ามีเพียงประจุเดียวอยู่ที่ลวดตัวนำแต่ละเส้น แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับทำให้ประจุบวกและลบเคลื่อนที่ในตัวเองกลับไปกลับมาเป็นผลให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกมาการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามหลักของแมกซ์เวลล์ อธิบายได้ว่า เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุที่ถูกเร่งทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกจากลวดตัวนำทุกทิศทาง ยกเว้นทิศที่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกับลวดตัวนำนั้น เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า จะพบว่ามี การเปลี่ยนแปลงพร้อมกัน กล่าวคือ สนามทั้งสองจะมีค่าสูงสุดพร้อมกันและต่ำสุดพร้อมกันนั้น คือทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีเฟสตรงกันโดยทิศของสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็ก และสนามทั้งสองมีทิศตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น

ปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลายและได้มีการประยุกต์ใช้กันในหลาย ๆ ด้านไม่ว่าจะเป็นทางด้านการขนส่งทั้งในเมืองและนอกเมือง อาทิเช่น การ

สร้างรถไฟฟ้าความเร็วสูงหรือในการเคลื่อนย้ายสินค้าในโรงงานโดยใช้ครนไฟฟ้าโดยใช้หลักการ  
ทำงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการเคลื่อนย้ายวัตถุ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับหัวแม่เหล็กไฟฟ้ายก  
ซึ่งเป็นการนำหลักการแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้ในการยกเหล็กหรือใช้ยกสินค้าในงานอุตสาหกรรม ปัจจุบัน  
เราได้นำเข้าหัวแม่เหล็กจากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมูลค่าสูงดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการ  
วิจัยเกี่ยวกับการ Demagnetize หัวแม่เหล็กไฟฟ้ายก เพื่อสามารถที่จะนำเทคโนโลยีไปต่อยอดในการ  
ผลิตและทดแทนการนำเข้าได้ในอนาคต

วิจัยนี้จะกล่าวถึงการ Demagnetize ของหัวแม่เหล็กไฟฟ้ายกที่ใช้หม้อแปลงแกน E เพื่อ  
ทดสอบการ Demagnetize ของหัวแม่เหล็กไฟฟ้าและประสิทธิภาพของวงจรและอุปกรณ์ที่เหมาะสม  
สำหรับหัวแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้หม้อแปลงแบบแกน E ซึ่งหัวแม่เหล็กดังกล่าวได้ถูกพัฒนาจากนักศึกษา  
ระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาลัยสารคามเพื่อศึกษาสภาวะ  
สนามแม่เหล็ก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษากการ Demagnetize ของหัวแม่เหล็ก

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการออกแบบวงจรควบคุมสนามแม่เหล็กที่ใช้กับหัวแม่เหล็กไฟฟ้ายกชนิด  
แกน E
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการเกิดสนามแม่เหล็กตกค้างภายในหัวแม่เหล็กไฟฟ้ายกชนิดแกน E
- 1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเคลื่อนของหัวแม่เหล็กไฟฟ้ายกชนิดแกน E  
ที่มีผลต่อการยึดเกาะของวัสดุโลหะ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบวงจรควบคุมสนามแม่เหล็กที่ใช้กับหัวแม่เหล็กไฟฟ้ายกชนิดแกน E ซึ่งมี  
รายละเอียดดังนี้
  - 1) การต่อแหล่งจ่ายตรงเข้ากับหัวแม่เหล็กไฟฟ้ายก
  - 2) การต่อรีซิสเตอร์ 1 โอห์ม 200 วัตต์, รีซิสเตอร์ 8 โอห์ม 200 วัตต์ และรีซิสเตอร์  
10 โอห์ม 400 วัตต์
  - 3) การต่อวาริสเตอร์
  - 4) การต่อคาปาซิเตอร์ค่า 10, 250, 1,500, 3,600, 10,000 และ 40,000 ไมโคร  
ฟารัด
- 1.3.2 ศึกษาการเกิดสนามแม่เหล็กตกค้างภายในหัวแม่เหล็กไฟฟ้ายกชนิดแกน E ที่มี  
ผลกระทบต่อวัสดุโลหะและน้ำหนักที่ใช้ในการทดลอง
- 1.3.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเคลื่อนของหัวแม่เหล็กไฟฟ้ายกชนิดแบบ E โดย  
กำหนดขอบเขตของงานวิจัยตามรายละเอียดดังนี้

1) วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ แผ่นแกนหม้อแปลง, เหล็กกล้าคาร์บอนสูง, เหล็กคาร์บอนต่ำ, เหล็กคาร์บอนต่ำ และเหล็กชุบซิงค์

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับของการวิจัย

1.4.1 สามารถนำเทคนิคการ Demagnetization ของหัวแม่เหล็กไฟฟ้าแกน E ไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4.2 ได้รับความรู้เกี่ยวกับการเกิด Magnetization ของหม้อแปลงแกน E และการ Demagnetization ของหม้อแปลงแกน E

1.4.3 สามารถนำวงจร Demagnetize ไปใช้งานได้จริง

1.4.4 เป็นกรณีศึกษาถึงแนวโน้มในการพัฒนาเทคโนโลยีการออกแบบวงจร Demagnetize เพื่อประโยชน์ในการเรียนการสอน

1.4.5 ศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ในการขจัดสนามแม่เหล็กตกค้างในหัวแม่เหล็ก

#### 1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

การขจัดสนามแม่เหล็กตกค้าง คุณสมบัติของอุปกรณ์ในการขจัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นโลหะ

## บทที่ 2

### ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

#### 2.1 ทฤษฎี

##### 2.1.1 แม่เหล็ก (Magnet)

แม่เหล็กถูกค้นพบครั้งแรก โดยชายเลี้ยงแกะในดินแดนแมกนีเซีย (Magnesia) พื้นที่ทางตอนเหนือของประเทศกรีซ เมื่อราว 5 พันปีก่อน แรงแม่เหล็กหรือแรงดึงดูดโลหะแปลกปลอมเข้าหานั้นถูกพบภายในก้อนหินสีดำใต้พื้นผิวโลกแม่เหล็กเป็นวัตถุใด ๆ ที่สร้างสนามแม่เหล็กของตัวเองที่มีปฏิสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กอื่น ๆ แม่เหล็กมีสองขั้ว คือขั้วเหนือและขั้วใต้ สนามแม่เหล็กจะแสดงด้วยเส้นสนามที่เริ่มต้นที่ขั้วเหนือของ แม่เหล็กและสิ้นสุดที่ขั้วใต้หินที่ถูกขนานนามว่า “แมกเน็ต” (Magnet) หรือ “แม่เหล็ก” หินแม่เหล็กในธรรมชาติเป็นสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) หรือ “แมกนีไทต์” (Magnetite) เป็นวัตถุที่มีคุณสมบัติในการดึงดูดโลหะบางชนิด โดยเฉพาะวัตถุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นเหล็ก (Fe) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) และนิกเกิล (Ni) หรือที่เรียกกันว่า “สารแม่เหล็ก” (Ferromagnetic Material) ในอดีตมนุษย์นำหินสีดำนี้มาใช้ประโยชน์มากมายทั้งการใช้เป็นหินนำทาง (Lodestone) ของชาวกรีกและโรมัน รวมถึงการนำมาใช้ประดิษฐ์เข็มทิศเพื่อนำทางและใช้ในศาสตร์พยากรณ์ของชาวจีนโบราณ โดยเข็มทิศเรือนแรกของโลกถูกสร้างขึ้นในสมัยราชวงศ์ฮั่นของจีนเมื่อหลายพันปีมาแล้ว ก่อนได้รับการพัฒนาเรื่อยมาจนเป็นเข็มทิศในยุคปัจจุบัน

##### 2.1.2 แม่เหล็กและอำนาจแม่เหล็ก (Magnet and Magnetism)

แม่เหล็กมีแรงดึงดูดและแรงผลักต่อโลหะบางชนิด ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าภายในโครงสร้างของแม่เหล็กที่แตกต่างจากวัตถุทั่วไปในจักรวาลของเรา ทุกสารและวัตถุธาตุเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็กที่เรียกว่า “อะตอม” (Atom) ซึ่งประกอบไปด้วยอิเล็กตรอน (Electron) ที่โคจรรอบนิวเคลียส (Nucleus) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลให้อิเล็กตรอนทุกตัว มีคุณสมบัติคล้ายเป็นแม่เหล็กขนาดเล็ก (Microscopic Magnet) ในวัตถุทั่วไป ทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เกิดขึ้นอย่างไม่เป็นระเบียบมากนัก โดยมีทิศทางการหมุนไร้แบบแผนและหมุนไปในทิศทางตรงกันข้าม ส่งผลให้เกิดการลบล้างแรงแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้น แต่โครงสร้างภายในแม่เหล็กนั้น ทุกโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ในทุกอะตอมมีอิเล็กตรอน ซึ่งเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมด ก่อให้เกิดขั้วทั้ง 2 ขั้วภายในแม่เหล็ก คือ ขั้วมุ่งทิศเหนือ (North Seeking Pole) หรือ “ขั้วเหนือ” (North) และขั้วมุ่งทิศใต้ (South Seeking Pole) หรือ “ขั้วใต้” (South)

##### 2.1.2 คุณสมบัติของแม่เหล็ก

วางตัวในแนวทิศเหนือและใต้ขั้วแม่เหล็กชนิดเดียวกันจะเกิดการผลักกัน ในขณะที่ขั้วต่างชนิดกันเกิดแรงดึงดูดเข้าหากันแรงแม่เหล็ก (Magnetic Force) จะเคลื่อนที่จากขั้วเหนือไปขั้วใต้

ซึ่งก่อให้เกิดสนามพลังที่เรียกว่า “สนามแม่เหล็ก” (Magnetic Field) แม่เหล็กส่งอำนาจหรือแรงแม่เหล็กจากขั้วทั้ง 2 ในลักษณะ 3 มิติ โดยที่บริเวณขั้วทั้งสองจะมีอำนาจแม่เหล็กสูงสุด ขณะที่ตรงกึ่งกลางจะไม่ปรากฏแรงแม่เหล็กใด ๆ สารแม่เหล็ก เช่น เหล็ก (Fe) โคบอลต์ (Co) นิกเกิล (Ni) และสารประกอบของโลหะเหล่านี้ สามารถกลายเป็นแม่เหล็กได้ง่าย หากเข้าไปอยู่ภายใต้อำนาจสนามแม่เหล็กหรือถูกกระตุ้นให้เกิดการเรียงตัวโมเลกุลแม่เหล็ก (Magnetic Domain) ขึ้นใหม่จนเป็นไปในทิศทางเดียวกันเพื่อให้สามารถแสดงอำนาจแม่เหล็กออกมาได้เช่นเดียวกับแม่เหล็กอื่น ๆ

### 2.1.3 ขั้วแม่เหล็กโลก (Geomagnetic Poles)

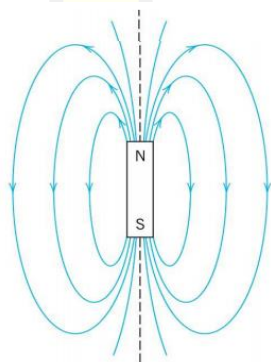
นั้นแตกต่างจากขั้วโลกทางภูมิศาสตร์ โดยที่ขั้วใต้ของแม่เหล็กโลกจะอยู่ทางขั้วโลกเหนือ ในขณะที่ขั้วเหนือแม่เหล็กโลกนั้นจะอยู่ทางขั้วโลกใต้ (ส่งผลให้ขั้วเหนือของแม่เหล็กในเข็มทิศชี้ไปยังทางเหนือของโลก) รวมถึงตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กโลกที่อยู่ห่างจากขั้วทางภูมิศาสตร์ประมาณ 11.5 องศา เนื่องจากขั้วแม่เหล็กโลกมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาหรือราว 11 กิโลเมตรต่อปีตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน นักวิทยาศาสตร์ยังคงทำการศึกษาหินอัคนี (Igneous Rock) หรือหินที่เกิดจากการแข็งตัวของหินหลอมเหลวบนแผ่นเปลือกโลก ซึ่งนำพาองค์ประกอบของโลหะภายในชั้นแก่นโลกขึ้นมา ขณะที่หินเย็นตัวลง องค์ประกอบของโลหะเหล่านี้ มักวางตัวตามแนวเส้นแรงแม่เหล็ก แสดงให้เห็นถึงทิศทางของสนามแม่เหล็กโลกในช่วงเวลานั้นจากการสำรวจ “ฟอสซิลแม่เหล็ก” (Magnetic Fossils)ทั้งหลาย ทำให้นักวิทยาศาสตร์พบว่า ในช่วงเวลาหลายล้านปีที่ผ่านมา แนวเส้นแรงที่เกิดขึ้นบนหินบ่งชี้ทิศทางของขั้วแม่เหล็กโลกซึ่งแตกต่างกันออกไปถึงแม้ทฤษฎีธรณีแปรสัณฐาน (Plate Tectonics Theory) จะสามารถอธิบายถึงการเปลี่ยนตำแหน่งของหินแม่เหล็กเหล่านี้ได้ แต่จากหลักฐานทางธรณีวิทยามากมายเปิดเผยเรื่องราวที่น่าประหลาดใจกว่าการค้นพบเส้นแรงแม่เหล็กบนตำแหน่งที่แปลกๆ นี้ เพราะนักวิทยาศาสตร์สามารถยืนยันได้ว่า ในช่วง 20 ล้านปีที่ผ่านมา เกิดเหตุการณ์การสลับทิศกันของขั้วเหนือและใต้ของขั้วแม่เหล็กโลก (Geomagnetic Reversal) หลายครั้ง เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในทุก 2 ถึง 3 แสนปี ทำให้สนามแม่เหล็กโลกอ่อนลงและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งสาเหตุที่แท้จริงเบื้องหลังการสลับขั้วกันของแม่เหล็กโลกยังคงเป็นปริศนามาจนถึงทุกวันนี้

### 2.1.4 สนามแม่เหล็ก

แรงแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันเป็นแรงที่กระทำระหว่างโมเลกุลต่อโมเลกุล ในสารอิเล็กทรอนิกส์ถูกดึงดูดอยู่ในวงโคจรรอบนิวเคลียสของอะตอมด้วยกลไกของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอะตอมหลายอะตอมรวมตัวกันเป็นโมเลกุล ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ของอะตอมหลายอะตอมที่อยู่ใกล้กัน มีผลทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเหล่านั้น มีสูตรทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายความหมายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสาขาดั้งเดิมของอิเล็กโทรไดนามิกส์ สนามไฟฟ้าถูกอธิบายว่า เป็นศักย์ทางไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้วยกฎของโอห์ม สนามแม่เหล็กถูกนำไปรวมกับการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้าและสภาวะแม่เหล็กและสมการของแมกซ์เวลล์ อธิบายถึง การที่ไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถูกสร้างมาได้อย่างไร ถูกเปลี่ยนแปลงโดยกัน

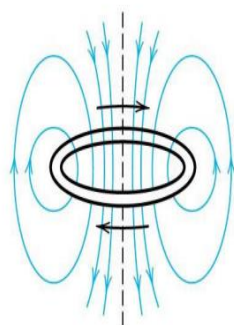
และกันได้อย่างไร และเกิดขึ้นหรือเปลี่ยนแปลง โดยการประจุและกระแสได้อย่างไรแต่เดิมไฟฟ้า และแม่เหล็กถูกคิดว่าเป็นสองแรงแยกออกจากกันความคิดนี้เปลี่ยนไปเมื่อหนังสือของ เจมส์ เคลิร์ก แมกซ์เวลล์ พิมพ์ขึ้นในปี ค.ศ.1873 บ่งบอกว่า ปฏิสัมพันธ์ของประจุบวกและประจุลบถูกควบคุมโดยแรงเดียวผลของการปฏิสัมพันธ์ทำให้เกิดผลกระทบสี่เรื่องหลักๆ ผลกระทบเหล่านี้สามารถสาธิตให้ได้จากการทดลอง ดังนี้

- 1) ประจุไฟฟ้าดูดหรือผลักกันด้วยแรงที่เป็นสัดส่วนผกผันกับระยะทางกำลังสองระหว่างประจุนั้นประจุต่างกันดูดกัน ประจุเหมือนกันผลักกันขั้วแม่เหล็ก (หรือสภาวะการวางตัวที่จุดใด ๆ) ดูดและผลักกันในทำนองเดียวกัน และ ขั้วแม่เหล็กมาเป็นคู่ คือขั้วเหนือและขั้วใต้
- 2) ไฟฟ้าที่ไหลในเส้นลวดสร้างสนามแม่เหล็กเป็นวงกลมรอบเส้นลวดนั้น ทิศทางของสนามแม่เหล็ก (ตามเข็มหรือทวนเข็มนาฬิกา) ขึ้นอยู่กับกระแส
- 3) กระแสจะถูกเหนี่ยวนำในขดลวด เมื่อขดลวดเคลื่อนที่เข้าหรือออกจากสนามแม่เหล็ก หรือแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าหรือออกจากขดลวด ทิศทางของกระแสขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่



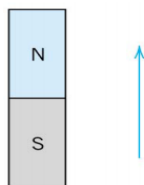
**ภาพประกอบ 1** ทิศทางสนามแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก

ที่มา : William D. Callister (2010)



**ภาพประกอบ 2** เส้นแสดงสนามแม่เหล็กรอบ ๆ กระแสไฟฟ้าที่ไหลวนเป็นวงกับรอบแท่งแม่เหล็ก

ที่มา : (William D. Callister, 2010)



ภาพประกอบ 3 ลูกศรแสดงโมเมนต์แม่เหล็ก

ที่มา : (William D. Callister, 2010)

### 2.1.5 การแบ่งชนิดของสารแม่เหล็ก

เราอาจแบ่งชนิดของสารแม่เหล็กได้โดยการเปรียบเทียบค่าสภาพให้ซึมของสารกับค่าสภาพแม่เหล็กได้ของสุญญากาศ ( $\mu_0$ )

สารพาราแมกเนติก (Paramagnetic) :  $\mu_m > \mu_0$  (2.1)  
(เมื่อนำไปใกล้แม่เหล็กจะถูกดูดอย่างอ่อน เช่น อะลูมิเนียม พลาตินัม)

สารไดอะแมกเนติก (Diamagnetic) :  $\mu_m > \mu_0$  (2.2)  
(เมื่อนำไปใกล้แม่เหล็กจะถูกผลักอย่างอ่อน เช่น ทองคำ เงิน ทองแดง)

สารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) :  $\mu_m \gg \mu_0$  (2.3)  
(เมื่อนำไปใกล้แม่เหล็กจะถูกดูดอย่างแรง เช่น เหล็ก โคบอล

ตาราง 1 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของโลหะ

| Material                                  | Classification       | Relative Permeability, $\mu$ |
|-------------------------------------------|----------------------|------------------------------|
| Bismuth                                   | diamagnetic          | 0.99983                      |
| Silver                                    | diamagnetic          | 0.99998                      |
| Lead                                      | diamagnetic          | 0.999983                     |
| Copper                                    | diamagnetic          | 0.999991                     |
| Water                                     | diamagnetic          | 0.999991                     |
| Vacuum                                    | nonmagnetic          | 1                            |
| Air                                       | Paramagnetic         | 1.0000004                    |
| Aluminum                                  | Paramagnetic         | 1.00002                      |
| Palladium                                 | Paramagnetic         | 1.0008                       |
| 2-81 Permalloy powder (20 Mo 81 Ni, Iron) | Super - Paramagnetic | 130                          |
| Cobalt                                    | ferromagnetic        | 250                          |
| Nickel                                    | ferromagnetic        | 600                          |
| Ferroxcube 3 (Ma-Zn-ferrite podwer)       | ferromagnetic        | 1,500                        |
| Ferrites                                  | ferromagnetic        | 160 – 10,000                 |
| Mild steel (0.2)                          | ferromagnetic        | 2,000                        |
| Iron (0.2 impurity)                       | ferromagnetic        | 5,000                        |
| Silicon iron (4 Si)                       | ferromagnetic        | 7,000                        |
| 78 Permalloy (78.5)                       | ferromagnetic        | 100,000                      |
| Mumetal (75 Ni, 5 Cu, 2 Cr)               | ferromagnetic        | 100,000                      |
| Purified iron (0.05 impurity)             | ferromagnetic        | 200,000                      |
| Superalloy (0.5 Mo, 79 Ni)                | ferromagnetic        | 1,000,000                    |

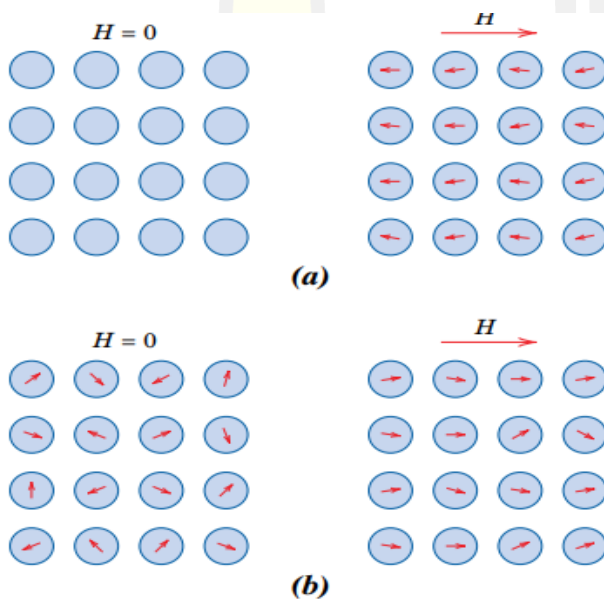
ที่มา : (William D. Callister, 2010)

### 2.1.5.1 Diamagnetism

เป็นคุณสมบัติของแม่เหล็กที่อ่อนแอที่สุด ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปแบบที่ไม่ถาวร (Nonpermanent) หรือถาวร (Permanent) ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำต่ออะตอมของวัสดุ จะทำให้อิเล็กตรอนที่หมุนรอบนิวเคลียสของอะตอมเกิดการเสียสมดุลเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเล็ก ๆ ขึ้นในอะตอม ซึ่งค่าของ Magnetic Moment มีค่าน้อยมากและอยู่ในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอก จึงมีผลทำให้เกิดผลของแม่เหล็กในทางลบ ซึ่งเรียกว่า Diamagnetism โดยค่าของ Volume Susceptibility,  $\chi_m$  มีค่าน้อยมากประมาณ  $10^{-5}$

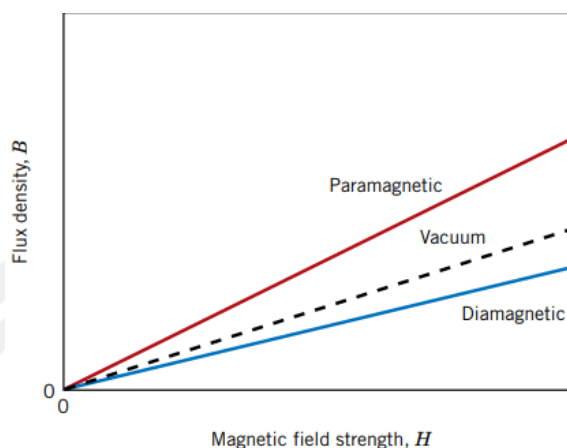
### 2.1.5.2 Paramagnetism

วัสดุสามารถแสดง Magnetic Susceptibility ในเชิงบวกเล็กน้อย เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กจะเรียกว่า Paramagnetism และสถานะแม่เหล็กนี้จะหายไป เมื่อวัสดุนั้นถูกนำออกจากสนามแม่เหล็ก วัสดุที่มีสถานะแม่เหล็กแบบ Paramagnetism นี้มักมีค่าความไวต่อสนามแม่เหล็กอยู่ในช่วง  $10^{-6} - 10^{-2}$  ซึ่งสถานะแม่เหล็กแบบนี้จะเกิดได้ เนื่องจากการเรียงตัวของ Magnetic Dipole Moment ของอะตอมเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ทิศทางการเรียงตัวจะเกิดความไม่เป็นระเบียบมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็นผลทำให้สถานะแม่เหล็กแบบ Paramagnetism นี้ลดลง



ภาพประกอบ 4 ( a ) การจัดเรียงไดโพลของอะตอมในวัสดุที่มีสภาพแม่เหล็กลักษณะไดโพลของอะตอมในสถานะ *Diamagnetism* ในสภาพที่ภายนอก จะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก จะไม่มีไดโพลเกิดขึ้น แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็ก ไดโพลจะเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในทิศที่ตรงกันข้ามกับทิศของสนาม ( b ) การจัดเรียงไดโพลของอะตอมในวัสดุที่มีสภาพแม่เหล็กแบบ *Paramagnetism* ในสภาพที่มีและไม่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอก

ที่มา : (William D. Callister, 2010)



ภาพประกอบ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างต่อความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  กับความเข้มสนามแม่เหล็ก  $H$  ของวัสดุที่มีสภาพแม่เหล็กแบบ Paramagnetic และ Diamagnetic  
ที่มา : (William D. Callister, 2010)

ตาราง 2 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่าง Diamagnetism และ Paramagnetics

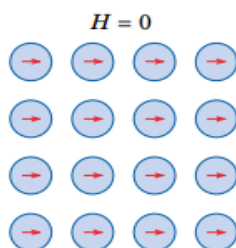
| <i>Diamagnetism</i> |                                                               | <i>Paramagnetics</i> |                                                               |
|---------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------|
| <i>Material</i>     | <i>Susceptibility <math>\chi_m</math> (Volume) (SI Units)</i> | <i>Material</i>      | <i>Susceptibility <math>\chi_m</math> (Volume) (SI Units)</i> |
| Aluminum oxide      | $-1.81 \times 10^{-5}$                                        | Aluminum             | $2.07 \times 10^{-5}$                                         |
| Copper              | $-0.96 \times 10^{-5}$                                        | Chromium             | $3.13 \times 10^{-4}$                                         |
| Gold                | $-3.44 \times 10^{-5}$                                        | Chromium chloride    | $1.51 \times 10^{-3}$                                         |
| Mercury             | $-2.85 \times 10^{-5}$                                        | Manganese sulfate    | $3.70 \times 10^{-3}$                                         |
| Silicon             | $-0.41 \times 10^{-5}$                                        | Molybdenum           | $1.19 \times 10^{-4}$                                         |
| Silver              | $-2.38 \times 10^{-5}$                                        | Sodium               | $8.48 \times 10^{-6}$                                         |
| Sodium chloride     | $-1.41 \times 10^{-5}$                                        | Titanium             | $1.81 \times 10^{-4}$                                         |
| Zinc                | $-1.56 \times 10^{-5}$                                        | Zirconium            | $1.09 \times 10^{-4}$                                         |

ที่มา : (William D. Callister, 2010)

### 2.1.5.3 Ferromagnetism

เป็นสภาวะแม่เหล็กที่สามารถคงอยู่ได้แม้ว่าจะไม่มีสนามแม่เหล็ก หรือทำให้หมดสภาพไปได้ตามต้องการ สภาวะแม่เหล็กแบบนี้ จึงมีความสำคัญต่องานด้านวิศวกรรมวัสดุที่สามารถแสดงสภาวะแม่เหล็กแบบนี้ได้ เช่น เหล็ก (BCC  $\alpha$  Ferrite) โคบอลต์ นิกเกิล และธาตุจำพวก Rare Earth เช่น Gadolinium (Gd) เป็นต้น ค่า Magnetic Susceptibility มีค่าสูงถึง  $10^6$  ใน Ferromagnetism ค่า  $H \ll M$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

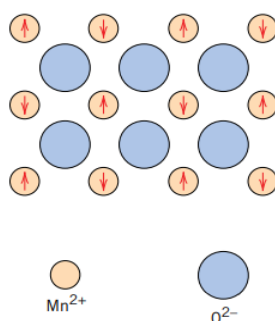
$$B = \mu_o M \quad (2.4)$$



ภาพประกอบ 6 แสดงการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของไดโพลในอะตอมของวัสดุที่มีสภาพแม่เหล็กแบบ Ferromagnetism ที่เกิดได้แม้จะไม่มีสนามแม่เหล็กกระทำจากภายนอกก็ตาม  
ที่มา: (William D. Callister, 2010)

#### 2.1.5.4 Antiferromagnetism

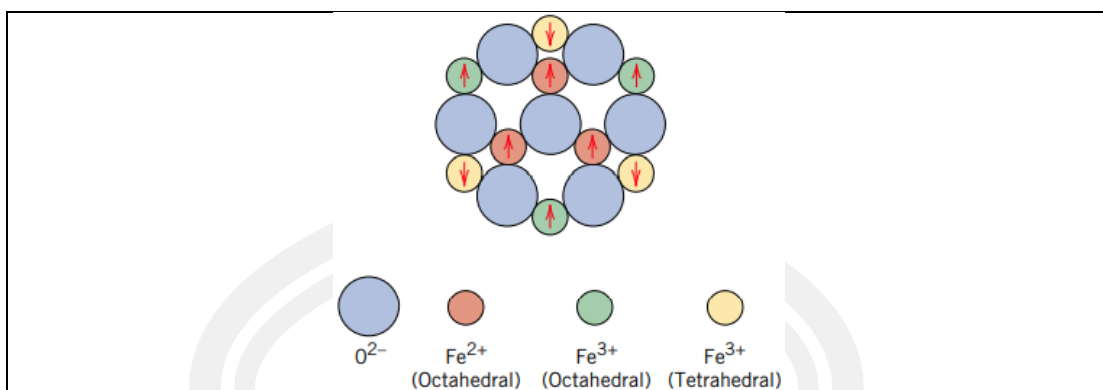
เป็นสภาวะแม่เหล็กอีกชนิดหนึ่ง ที่เกิดขึ้นกับวัสดุบางชนิด กล่าวคือ Magnetic Dipoles ของอะตอมของวัสดุที่มีคุณสมบัติเช่นนี้จะเรียงตัวในทิศทางที่ตรงข้ามกัน เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ซึ่ง Manganese Oxide ( $MnO$ ) เป็นหนึ่งในวัสดุเซรามิกที่แสดงคุณสมบัติเช่นนี้



ภาพประกอบ 7 แสดงการเรียงตัวแบบสวนทางกันของโมเมนต์แม่เหล็กอันเกิดจากการหมุนรอบตัวเอง (ของอิเล็กตรอน) ในวัสดุแมงกานีสออกไซด์ซึ่งมีสภาพแม่เหล็กแบบ Antiferromagnetic  
ที่มา: (William D. Callister, 2010)

#### 2.1.5.5 Ferrimagnetism

วัสดุเซรามิกบางชนิดจะประกอบไปด้วยไอออนต่างชนิดกันซึ่งมี Magnetic Moment มากน้อยแตกต่างกัน ดังนั้น เมื่อ Magnetic Moment เหล่านั้นมีการ จัดเรียงตัวในทิศทางตรงข้ามกัน Magnetic Moment เหล่านั้นจะไม่หักล้างกันหมดแต่จะยังคงมีค่า Magnetic Moment สุทธิในทิศทางหนึ่ง จึงทำให้วัสดุเหล่านี้สามารถแสดงสมบัติสภาวะแม่เหล็กได้เราเรียกวัดูลเหล่านี้ว่า Cubic Ferrite อาทิเช่น Magnetite;  $Fe_3O_4$



ภาพประกอบ 8 แสดงการเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กจากการหมุนรอบตัวของอิเล็กตรอนของไอออน  $Fe^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  ในลักษณะ  $Fe_3O_4$

ที่มา: (William D. Callister, 2010)

## 2.2 ทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้องกับแม่เหล็กไฟฟ้า

แม่เหล็กไฟฟ้าแตกต่างจากแม่เหล็กถาวร แม่เหล็กไฟฟ้าทำจากขดลวดที่มี กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะสร้างสนามแม่เหล็ก ดังนั้นเมื่อขดลวดของแม่เหล็กไฟฟ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านพวกขดลวดทำตัวเหมือนแม่เหล็ก เมื่อกระแสไฟฟ้าหยุดไหลขดลวดไม่ทำหน้าที่เหมือนเป็นแม่เหล็กอีกต่อไป

### 2.2.1 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดเป็นส่วนสำคัญกับอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดนั้น เมื่อเทียบกับเวลาของเลนซ์มีความว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดจะทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำในทิศทางที่จำทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กใหม่ขึ้นมา ด้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ขณะหมุนจะมีฟลักซ์แม่เหล็กเปลี่ยนแปลงผ่านขดลวดทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีทิศทางตรงข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเดิม เรียกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับในกรณีมอเตอร์ติดขัดหรือหมุนช้ากว่าปกติแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับจะมีค่าน้อยทำให้กระแสไฟฟ้าในขดลวดมีค่ามากอาจทำให้ขดลวดร้อนจนไหม้ได้จึงจำเป็นต้องตัดสวิตช์ เพื่อหยุดการทำงานของมอเตอร์ทุกครั้งค่าของปริมาณที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้ากระแสสลับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนค่าตามเวลาในรูปฟังก์ชันไซน์ดังสมการ  $e = E_m \sin \omega t$  เมื่อ  $e$  เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เวลา  $t$  ใดๆ  $E_m$  เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงสุด  $\omega$  เป็นความถี่เชิงมุมซึ่งมีค่าเท่ากับ  $2\pi f$  (โดย  $f$  เป็นความถี่ในการเปลี่ยนค่าซ้ำเดิมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า)

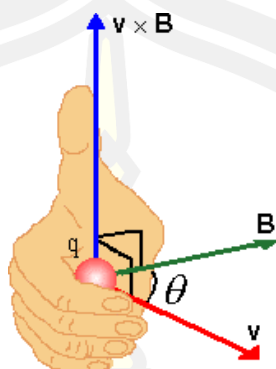
### 2.2.2 กฎมือขวา

คือ เมื่อทำการเคลื่อนที่ลวดตัวนำผ่านสนามแม่เหล็ก เราสามารถหาทิศทางของกระแสไฟฟ้าได้ โดยใช้กฎมือขวาของเฟรมมิ่ง

โดยยกมือขวาขึ้นมา แล้วให้นิ้วหัวแม่มือ นิ้วชี้ และนิ้วกลางของมือขวา วางตั้งฉากซึ่งกันและกัน ตามรูปกำหนดให้

- นิ้วหัวแม่มือแทนทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำในสนามแม่เหล็ก

- นิ้วชี้แทนทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก
- นิ้วกลางแทนทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำหรือทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด



ภาพประกอบ 9 กฎมือขวา

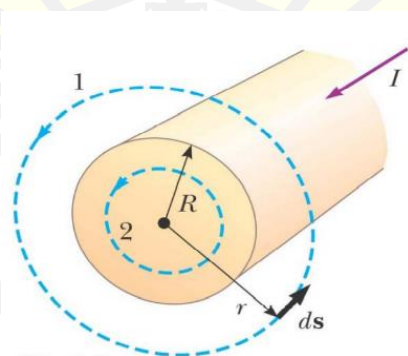
ที่มา: (William D. Callister, 2010)

### 2.2.3 กฎของแอมแปร์

กฎของแอมแปร์ กล่าวว่าค่าปริพันธ์เชิงเส้น (Line Integral) ของ  $\vec{B} \cdot d\vec{s}$  รอบวงปิดแอมแปร์ (Amperean Loop) จะมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างค่า สภาพให้ซึมผ่านได้กับกระแสที่ล้อมรอบด้วยวงปิดสมการทางคณิตศาสตร์ของกฎของแอมป์คือ

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I \quad (2.5)$$

ทิศทางของสนามแม่เหล็กจะเป็นไปตามกฎมือขวา ถ้าลวดตัวนำกระแส  $I$  ดังภาพประกอบที่ 2.3 มุมมีรัศมี  $R$  สนามแม่เหล็ก ณ จุดภายนอกตัวนำ ( $r > R$ ) จะหาค่าได้โดยการประยุกต์กฎของแอมแปร์ภายในวงปิดแอมแปร์



ภาพประกอบ 10 ทิศทางสนามแม่เหล็กภายในลวดตัวนำ

ที่มา (William D. Callister, 2010)

ทิศทางของ  $\vec{B} // d\vec{s}$  ในทุกจุด

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I \quad (2.6)$$

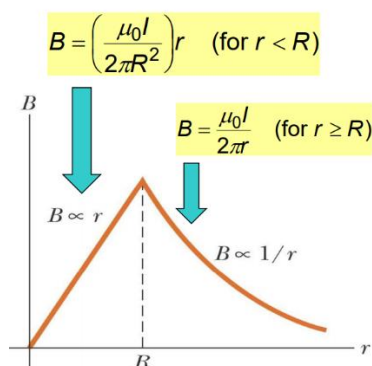
$$= B(2\pi r) = \mu_0 I \Rightarrow B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (2.7)$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (\text{for } r \geq R) \quad (2.8)$$

ณ จุดภายในลวดตัวนำ ( $r < R$ ) เราจะได้  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = B(2\pi r) = \mu_0 I' \rightarrow$   
 $I' = \frac{r^2}{R^2} \cdot I$

$$B = \left( \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2} \right) r \quad (2.9)$$

เมื่อ  $I' = \frac{r^2}{R^2} I$  คือกระแสที่อยู่ในวงจรรูปแอมแปร์

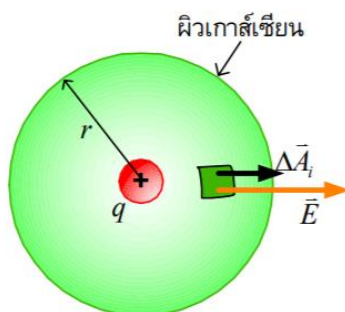


ภาพประกอบ 11 สนามแม่เหล็กภายในและภายนอกลวดตัวนำ

ที่มา : (William D. Callister, 2010)

#### 2.2.4 กฎของเกาส์ (Gauss Law)

จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ไฟฟ้าที่ผ่านผิวปิดกับประจุใดๆ ที่อยู่ภายในผิวปิดนั้นๆ เรียกผิวปิดนั้นว่า ผิวเกาส์เซียน (Gauss Surface) พิจารณาฟลักซ์ไฟฟ้าเนื่องจากประจุ +q ที่ผ่านพื้นที่ผิวทรงกลมที่ล้อมรอบประจุ +q ไว้



ภาพประกอบ 12 ผิวเกาส์เซียน

ที่มา : (William D. Callister, 2010)

ผิวเกาส์เซียนที่ล้อมประจุ  $+q$  สนาม  $\vec{E}$  กับตั้งฉากกับ  $\Delta A_1$

$$\vec{E} \cdot \vec{\Delta A}_i = E \Delta A_i \quad (2.10)$$

ฟลักซ์ไฟฟ้าทั้งหมดที่ผ่านผิวทรงกลมคือ

$$\Phi E = \oint_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = \oint E dA = E \oint dA \quad (2.11)$$

แทนค่าเมื่อ  $\oint dA$  คือ พื้นที่ผิวทั้งหมด  $\oint dA = 4\pi r^2$  (2.12)

และ  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$  (2.13)

$$\Phi_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (2.14)$$

ดังนั้น  $\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0}$

กฎของเกาส์กล่าวว่า “ฟลักซ์ไฟฟ้าที่ผ่านผิวปิดใดๆ มีค่าแปรตามประจุที่อยู่ภายในผิวปิดนั้น”

$$\text{เขียนสมการได้เป็น } \Phi_E = \oint_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0} \quad (2.15)$$

คือ  $q_{in}$  คือประจุสุทธิภายในผิวปิด

#### 1) การเคลื่อนที่ของประจุในสนามแม่เหล็ก

ถ้าประจุเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ประจุจะเคลื่อนที่เป็นวงกลมดังรูป  
 ทั้งนี้เพราะแรงแม่เหล็ก  $F_B$  จะกระทำในทิศเข้าสู่ศูนย์กลางของวงโคจรเสมอ ถ้าประจุ  $q$  มีมวล  $m$   
 เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v$  เราจะหารัศมีของวงโคจรได้จาก

$$F_B = qvB = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow \frac{mv}{qB} \quad (2.16)$$

อัตราเชิงมุมจะมีค่าเป็น  $\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$  (2.17)

คาบของการเคลื่อนที่  $T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$  (2.18)

#### 2) การนำกฎของเกาส์ไปหาสนามไฟฟ้ามีดังนี้

(1) ต้องรู้ทิศทางของสนามไฟฟ้ามาก่อน กฎของเกาส์ใช้หาเฉพาะขนาดของสนามไฟฟ้าเท่านั้น

(2) ต้องให้ตำแหน่งที่ต้องการหาสนามเป็นจุด ๆ หนึ่งบนผิวปิดนั้น

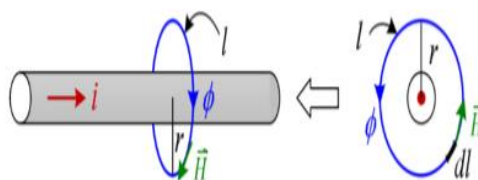
(3) ผิวปิดควรมีรูปทรงเป็นเรขาคณิตและเส้นสนามที่ผ่านผิวปิดควรตั้งได้ฉากหรือขนานกับผิวปิดและขนาดของ  $\vec{E}$  ควรมีค่าคงตัว

(4) ผิวปิดควรมีลักษณะสมมาตร

#### 2.2.5 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux,  $\Phi$ ) ขึ้นรอบ ๆ ตัวนำและทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเป็นไปตามกฎมือขวาของตัวนำ คือใช้มือขวากำรอบตัวนำให้นิ้วหัวแม่มือชี้ตามทิศทางกระแสไฟฟ้า นิ้วทั้งสี่ที่เหลือจะบอกทิศทางแม่เหล็ก

แม่เหล็ก ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้า เป็นไปกฎของแอมแปร์ (Ampere 'Law) โดยกฎของแอมแปร์กล่าวว่ดั่งสมการทางคณิตศาสตร์ของกฎแอมแปร์



ภาพประกอบ 13 ความสัมพันธ์เส้นแรงแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้า

ที่มา : (สุวัฒน์ รอดผล, 2547)

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = i \quad (2.19)$$

เมื่อ  $i$  คือ กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ

$\vec{H}$  คือ เวกเตอร์ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity)

$l$  คือ ระยะทางที่สนามแม่เหล็กไหลผ่าน

เนื่องจาก  $\vec{H}$  กับ  $d\vec{l}$  มีทิศทางเดียวกัน สมการที่ 2.1 เขียนใหม่ได้เป็น

$$\oint H dl = i \quad (2.20)$$

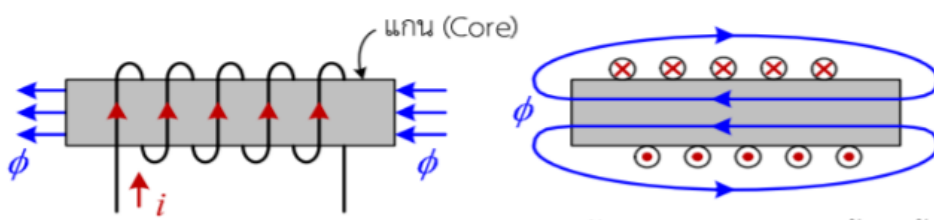
พิจารณาเส้นแรงแม่เหล็กที่ตำแหน่งรัศมี  $r$  จะได้ระยะทาง  $l$  เท่ากับ  $2\pi r$  และ  $H$  คงที่ทุกตำแหน่งบนเส้นทาง  $l$  ดังนั้นจากภาพประกอบ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก  $H$  กับกระแสไฟฟ้า  $i$  มีสมการดังนี้

$$H(2\pi r) = i \quad (2.21)$$

หรือ

$$H = i/2\pi r \quad (2.22)$$

ถ้านำตัวนำไฟฟ้ามาพันรอบแกนเป็นขดลวดดังภาพประกอบ 4 ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของขดลวด ถ้าหาทิศทางเส้นแรงแม่เหล็ก  $\Phi$  จะใช้กฎมือขวาของขดลวด โดยใช้มือกำรอบขดลวด ให้นิ้วทั้งสี่ชี้ตามทิศทางกระแส นิ้วหัวแม่มือจะบอกทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก



ภาพประกอบ 14 เส้นแรงแม่เหล็กเกิดจากขดลวด

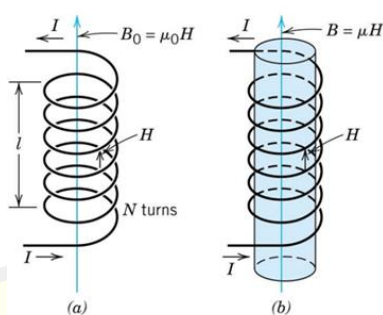
ที่มา : (สุวัฒน์ รอดผล, 2547)

จากภาพประกอบที่ 2.12 เส้นแรงแม่เหล็กพุ่งออกจากปลายด้านซ้ายของแกน และพุ่งเข้าปลายด้านขวาของแกน ด้านที่มีเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งออกเรียกว่าขั้ว N และด้านที่มีเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งเข้าเรียกว่าขั้ว S ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขดลวด  $i$  และจำนวนขดลวด  $N$  ผลคูณระหว่าง  $N$  กับ  $i$  เรียกว่า แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force; mmf,  $F$ )

$$(mmf = Ni \text{ Amp.turn})$$

## 2.2.6 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กหรือความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Induction or Magnetic Flux Density)

ถ้านำแท่งเหล็กธรรมดาใส่ลงในขดลวด จะพบว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ภายนอกขดลวด Solenoid จะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเนื่องจาก แท่งเหล็กนั้นถูกทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กภายในขดลวดด้วย ความเข้มใหม่ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น จะเท่ากับผลรวมของ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวด Solenoid :  $H$  กับที่ เกิดขึ้น เนื่องจากแท่งเหล็กที่ถูกทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กภายในขดลวดนั้น โดย สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นใหม่นี้เราเรียกว่า Magnetic Induction :  $B$  โดยมีหน่วยเป็น Teslas หรือ Webers Per Square Meter ( $\text{Wb/m}^2$ ) โดยทั้ง  $H$  และ  $B$  เป็นสนามเวกเตอร์เส้นทางของสนามแม่เหล็ก



ภาพประกอบ 15 การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก

ที่มา : (Turowski, 1987)

สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) รอบ ๆ แท่งแม่เหล็ก จะประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux) หลายๆ เส้น ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กแต่ละเส้นจะไหลออกจากขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็ก และไหลเข้าทางขั้วใต้แล้วไหลกลับไปยังขั้วเหนือครบวงจร (Closed Loop) ของมันแม่เหล็กที่มีแรงดึงดูดหรือแรงผลักรวมก็หมายความว่ามันมีปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กมากนั่นเอง

ค่าโมเมนต์ของแม่เหล็กต่อหน่วยปริมาตรที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นเนื่องจากแท่งเหล็กที่ถูกทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กภายในขดลวด จะเรียกว่า Magnetization : สภาพแม่เหล็ก (Intensity of Magnetizations) ซึ่ง แทนด้วยค่า

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (2.22)$$

$\mu_0$  = ค่า Permeability ในสภาวะสุญญากาศ =  $4\pi \times 10^{-7} (\text{T.m/A})$  (ค่าความสามารถซึมซับแม่เหล็กของสุญญากาศ)

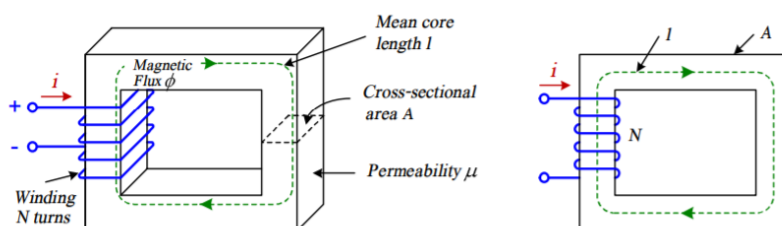
$B$  = Magnetic Induction (Teslas : T)

$H$  = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (A/m)

$M$  = Magnetization (A/m)

### 2.3 วงจรแม่เหล็กพื้นฐาน

วงจรแม่เหล็กพื้นฐานประกอบด้วยขดลวด (Coil) ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านทำหน้าที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า และแกน (Core) ซึ่งเป็นสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic Material) ทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมี 2 ส่วน คือส่วนที่เกิดรอบๆ ขดลวด เรียกว่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว (Leakage Flux ;  $\Phi_L$ ) และส่วนที่ไหลไปในแกนเรียกว่า Magnetizing Flux ;  $\Phi_m$  เส้นแรงแม่เหล็กรั่วจะมีค่าน้อยกว่า Magnetizing Flux มาก ๆ ( $\Phi_L < \Phi_m$ ) ในที่นี่จะไม่คิดผลเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว และจะเรียกว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลในแกนว่า Magnetic Flux ( $\Phi$ ) ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $\Phi$ ) เป็นไปตามกฎมือขวาของขดลวดและระยะเส้นแรงแม่เหล็กไหลในแกน ( $l$ ) จะเท่ากับความยาวเฉลี่ยของแกน โดยคิดที่ความยาวที่กึ่งกลางของแกน



ภาพประกอบ 16 โครงสร้างวงจรแม่เหล็ก

ที่มา : (สุวัฒน์ รอดผล, 2547)

ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบขดลวด ( $N$ ) กระแสไฟฟ้า ( $i$ ) ชนิดของสารที่นำมาทำแกน ความยาวเฉลี่ยของแกน ( $l$ ) และพื้นที่หน้าตัดของแกน ( $A$ ) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า  $i$  ให้ขดลวดจำนวน  $N$  รอบ จะทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กตามสมการที่ 2.1 ความเข้มสนามแม่เหล็ก ( $H$ ) ที่เกิดขึ้นเป็นไปตามกฎของแอมแปร์

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = iN \quad (2.23)$$

เนื่องจาก  $\vec{H}$  และ  $d\vec{l}$  มีทิศทางเดียวกันและความเข้มของสนามแม่เหล็ก ( $H$ ) มีค่าคงที่ทุกตำแหน่งของระยะ  $l$  จะได้

$$HL = Ni \quad (2.24)$$

$$Hl = \frac{Ni}{l} = mmf/l \text{ Amp.turn/m, Amp/m} \quad (2.25)$$

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density ;  $B$ ) ที่เกิดขึ้นในแกน จะมี ความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก ( $H$ ) ดังสมการ

$$B = \mu H \quad \text{Weber/m}^2, \text{Tesla} \quad (2.26)$$

$$\text{เมื่อ } \mu = \mu_0 \mu_r$$

$\mu_0$  คือค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability)  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  (Weber/Amp-turn-m, Henry/m)  $\mu_r$  คือค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ (Relative Permeability) ของแกนหรือสาร ตัวกลางสุญญากาศ วัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า (ทองแดง อลูมิเนียม) และวัสดุเป็นฉนวนไฟฟ้ามีค่า  $\mu_r$  เท่ากับหนึ่ง เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux ;  $\Phi$ ) ที่เกิดขึ้นในแกน จะมีความสัมพันธ์กับความ หนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density ;  $B$ ) ตามสมการข้างล่าง

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2.27)$$

จากภาพประกอบ 5 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก  $B$  ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด  $A$  ดังนั้น  $\vec{B}$  กับ  $d\vec{A}$  จึงมีทิศทางเดียวกัน (เวกเตอร์ของพื้นที่จะมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่นั้น และ  $B$  มีค่า เท่ากันทุกตำแหน่งบนพื้นที่  $A$  จะได้เส้นแรงแม่เหล็กตามสมการ

$$\Phi = BA \quad (\text{weber; Wb}) \quad (2.28)$$

เส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลในแกนจะตัดผ่านขดลวด ผลคูณระหว่างเส้นแรงแม่เหล็ก  $\Phi$  กับ จำนวนขดลวด  $N$  จะเรียกว่า (Flux Linkage,  $\lambda$ )

$$\lambda = N\Phi \quad (\text{Wb.turn, Wb}) \quad (2.29)$$

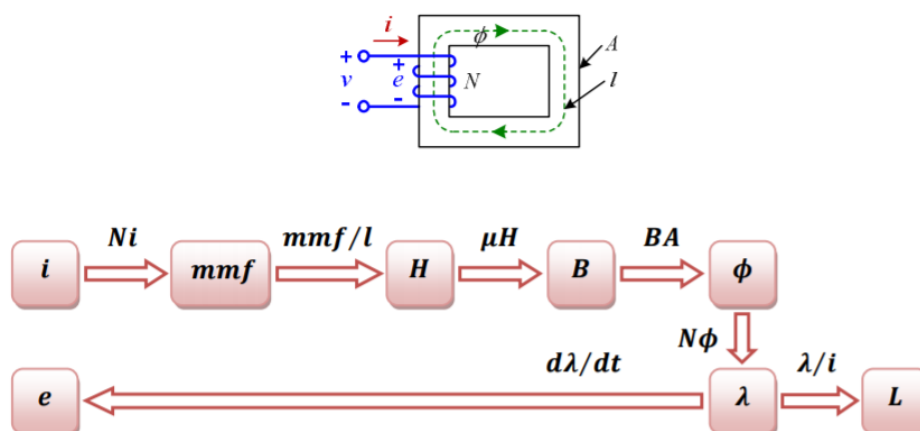
อัตราส่วนระหว่าง Flux Linkage, ( $\lambda$ ) กับกระแสที่ไหลผ่านขดลวด ( $i$ ) เรียกว่าค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance ;  $L$ )

$$L = \lambda/i \quad (\text{Wb.turn/Amp, Henry}) \quad (2.30)$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงของ Flux Linkage ( $\lambda$ ) ต่อเวลา ( $t$ ) เรียกว่าค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced Voltage,  $e$ )

$$e = d\lambda/dt \quad (\text{volt})dt \quad (2.31)$$

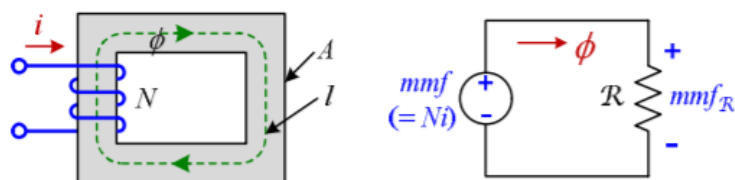
จากสมการแทนค่า  $\lambda$  แทนด้วย  $N\Phi$  จะได้  $e = Nd\Phi/dt$  เรียกว่า กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law)



ภาพประกอบ 17 สูตรพื้นฐานวงจรแม่เหล็ก  
ที่มา : (สวพัฒน์ รอดผล, 2547)

### 2.3.1 หลักการคำนวณวงจรแม่เหล็ก

การคำนวณวงจรแม่เหล็ก จะใช้วิธีแปลงเป็นวงจรสมมูลกับวงจรไฟฟ้า ปริมาณที่สมมูลกันแสดงดังตาราง 1



ที่มา : (สวพัฒน์ รอดผล, 2547)

#### 2.3.1.1 การแปลงวงจรสมมูล

ตาราง 2 ปริมาณที่สมมูลกันระหว่างแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้า

| ไฟฟ้า        |            |                   | แม่เหล็ก            |               |                  |
|--------------|------------|-------------------|---------------------|---------------|------------------|
| ชื่อ         | สัญลักษณ์  | หน่วย             | ชื่อ                | สัญลักษณ์     | หน่วย            |
| Voltage      | $V$        | Volt              | Magnetomotive Force | $mmf$         | $A \cdot t$      |
| Current      | $I$        | Amp               | Magnetic Flux       | $\phi$        | Wb               |
| Resistance   | $R$        | Ohm ( $\Omega$ )  | Reluctance          | $\mathcal{R}$ | $A \cdot t / Wb$ |
| Conductance  | $G$        | Siemen (S)        | Permeance           | $\mathcal{P}$ | $Wb / A \cdot t$ |
| Permittivity | $\epsilon$ | $C / N \cdot m^2$ | Permeability        | $\mu$         | H/m              |

|                                                                                                  |                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| $R = \frac{l}{\sigma A} = 1/G$ $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C/N} \cdot \text{m}^2$ | $\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} = 1/\mathcal{P}$ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|

ที่มา : (สวพัฒน์ รอดผล, 2547)

จากวงจรแม่เหล็กภาพประกอบ 3 แปลงเป็นวงจรสมมูลกับวงจรไฟฟ้าโดยแทนขดลวด  $mmf$  และแทนแกนด้วยรีลักแตนซ์ (Reluctance, )

$$\text{เมื่อ } \mathcal{R} = l/\mu A \quad (2.32)$$

ขั้วของ  $mmf$  ในวงจรสมมูล กำหนดจากทิศทางของ  $\phi$  โดยมีหลักเกณฑ์ดังนี้

- ขั้วของ  $mmf$  ที่มี  $\phi$  ไหลออก กำหนดเป็นขั้วบวก ( + )
- ขั้วของ  $mmf$  ที่มี  $\phi$  ไหลเข้า กำหนดเป็นขั้วลบ ( - )

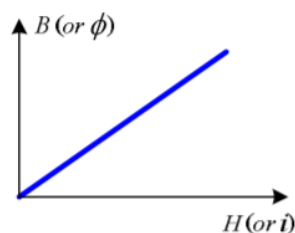
คุณสมบัติ Reluctance ( $\mathcal{R}$ ) จะเหมือนกับตัวต้านทานในวงจรไฟฟ้า การกำหนดขั้ว  $mmf$  ต่อก่อรวม  $\mathcal{R}$  จะกำหนดให้ทางด้านที่  $\phi$  ไหลเข้าเป็นขั้วบวก ( + ) สูตรหาค่าเหนี่ยวนำ ( $L$ ) สามารถดัดแปลงไปอยู่ในรูปค่ารีลักแตนซ์ ( $\mathcal{R}$ ) ได้ดังนี้

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} = \frac{N^2\phi}{Ni} = \frac{N^2}{Ni/\phi} = \frac{N^2}{\mathcal{R}} = N^2 p \quad (2.33)$$

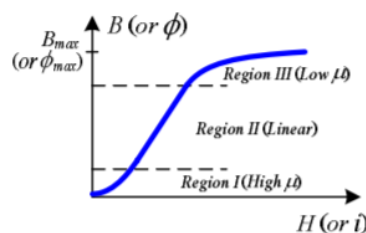
### 2.3.2 วงจรแม่เหล็กแบบไม่เชิงเส้น

จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก  $B = \mu H$  กรณี  $\mu$  มีค่าคงที่ จะได้เป็นกราฟเส้นตรง มีความชัน (slope) เท่ากับ  $\mu$  ดังภาพประกอบ 8 ก กรณีนี้เรียกว่าเป็นแบบเชิงเส้น (linear) เมื่อตัวกลางเป็นอากาศหรือแกนที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก

กรณีแกนสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic Material) ดังภาพประกอบ 8 กราฟจะประมาณเป็นเส้นตรง ( $\mu$  ประมาณคงที่) บางช่วงเท่านั้น คือช่วง Region II ในบางช่วงกราฟจะเป็นเส้นโค้ง ( $\mu$  ไม่คงที่) คือช่วง Region I และช่วง Region III เรียกกรณีนี้เป็นแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear)



ก. กราฟเชิงเส้น



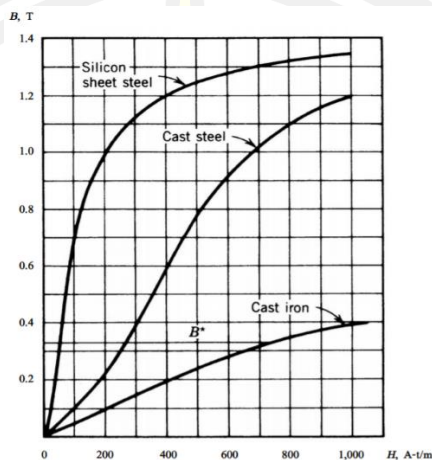
ข. กราฟไม่เชิงเส้น

ภาพประกอบ 18 คุณสมบัติแกนเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น

ที่มา : (Janocha, 2004 )

แกนตั้งของกราฟเป็นค่า  $B$  หรือ  $\phi$  แกนนอนของกราฟเป็นค่า  $H$  หรือ  $i$  เรียกกราฟนี้ว่า B-H Curve หรือ DC Magnetization Curve จากกราฟรูป ข ในช่วง Region III เมื่อเพิ่มค่า  $H$  ทำให้  $B$  เพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มน้อยกว่าช่วงอื่น จนถึงจุดหนึ่งถึงแม้จะเพิ่มค่า  $H$  แต่ค่า  $B$  จะคงที่

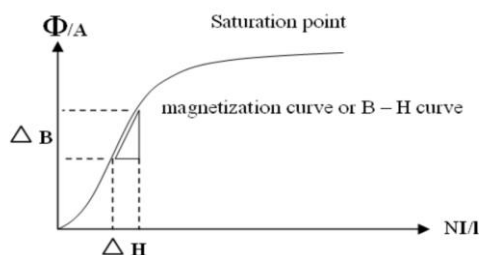
เนื่องจากแกนถึง จุดอิ่มตัว (Saturate) คือจุด  $B_{max}$  สารแม่เหล็กแต่ละชนิดจะมีจุดอิ่มตัวเสมอ แต่จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารแต่ละชนิด การคำนวณวงจรแม่เหล็กแบบไม่เชิงเส้น จะใช้กราฟ B-H Curve หาความสัมพันธ์ระหว่าง  $B$  กับ  $H$  โดยภาพประกอบที่ 2.10 เป็นกราฟ B-H Curve ของสารแม่เหล็ก 3 ชนิด คือ เหล็กเหนียวผสมซิลิกอน (Silicon Sheet Steel) เหล็กเหนียวหล่อ (Cast Steel) และเหล็กหล่อ (Cast Iron)



ภาพประกอบ 19 B-H Curve หรือ DC Magnetization Curve

ที่มา : (สุวัฒน์ รอดผล, 2547)

สารทั้ง 3 ชนิด มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กแตกต่างกัน ถ้าต้องการให้ได้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เท่ากัน ต้องใช้ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ต่างกัน จากภาพประกอบ 9 ถ้าต้องการให้เกิดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก เท่ากับ  $B^*$  แกน Silicon Sheet Steel ใช้  $H$  น้อยสุด แกน Cast Steel ต้องใช้  $H$  มากขึ้น และแกน Cast Iron ต้องใช้  $H$  มากที่สุด



ภาพประกอบ 20 กราฟแสดงจุดอิ่มตัว

ที่มา : (สุวัฒน์ รอดผล, 2547)

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นแม่เหล็กความชัน  
กราฟ  $= \Delta B / \Delta H$

$= B / H$  (ความชันเส้นตรงที่ชันที่สุด)

พิจารณาว่า ค่าความชันของกราฟจะบอกเกี่ยวกับอะไร

จาก  $B = \Phi/A$  (2.33)

$$= \frac{NI}{\mathcal{R}A} = \frac{NI\mu_0\mu_r A}{1A} = \frac{NI\mu_0\mu_r}{1} \quad (2.34)$$

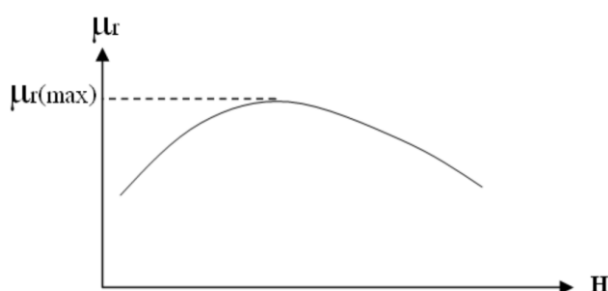
จะพบว่า  $B = \mu_0\mu_r H$  (2.36)

หรือ  $B = \mu H$  (2.37)

และ  $\mu = \frac{B}{H}$  (2.38)

ค่า  $B/H$  คือความชันของกราฟหรือค่า  $\mu$  ของวัสดุที่ใช้ทำแกนหากชันแสดงว่า  $\mu$  ของแกนมีค่ามาก หมายถึงการป้อนความเข้มปริมาณหนึ่งแล้วได้ค่าความหนาแน่นแม่เหล็กนั่นเอง

ค่าความซึมซาบฟลักซ์ของวัสดุจะมีค่าไม่คงที่เนื่องจากช่วงเริ่มต้นต้องสูญเสียพลังงานไปกับการกลับตัวของโมเมนต์แม่เหล็ก (*Magnetic Moment*) และช่วงท้ายๆ วัสดุเกิดสภาพอิ่มตัว (*Saturation*) คือไม่สามารถสร้างฟลักซ์ในแกนต่อไป



**ภาพประกอบ 21** กราฟค่าความซึมซาบฟลักซ์แม่เหล็กที่แปรตามความเข้มแม่เหล็ก

ที่มา : (สุวัฒน์ รอดผล, 2547)

ปริมาณค่าความสามารถในการซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ relative permeability,  $\mu_r$  คืออัตราส่วนระหว่าง  $\mu$  และ  $\mu_0$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.40)$$

ขนาดของแรงแม่เหล็กจะแปรผันโดยตรงกับประจุและความเร็วของประจุ

$$F_B \propto qv \quad (2.41)$$

ถ้าอนุภาคเคลื่อนที่ทำมุม  $\theta$  กับทิศทางของสนามแม่เหล็ก แรงแม่เหล็กจะแปรผันกับ  $\sin \theta$  ด้วย หรือ

$$F_B = qv \sin \theta \quad (2.42)$$

แรงแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วย ดังนั้นจะได้

$$F_B = qvB \sin \theta \quad (2.43)$$

สมการเวกเตอร์ของแรงแม่เหล็กจะมีค่าเป็น

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.44)$$

ขนาดของแรงแม่เหล็กเราอาจเขียนขนาดของแรงแม่เหล็กได้เป็น

$$F_B = |q|vB \sin \theta \quad (2.45)$$

โดย  $\theta$  เป็นมุมที่เล็กที่สุดระหว่างทิศของ  $\vec{v}$  และ  $\vec{B}$

$F_B$  จะเป็นศูนย์ถ้า  $\vec{v}$  และ  $\vec{B}$  ขนานกันหรือตรงกันข้าม ( $\theta = 0$  หรือ  $180^\circ$ )

$F_B$  จะมีค่าสูงสุดถ้า  $\vec{v} \perp \vec{B}$  ( $\theta = 90^\circ$ )

แรงแม่เหล็กจะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากแรงไฟฟ้าที่เกิดแม่ในขณะประจุหยุดนิ่งทิศทางของแรงแม่เหล็กจะตั้งฉากกับทิศสนามแม่เหล็ก ขณะที่ทิศของแรงไฟฟ้าจะขนานกับทิศสนามไฟฟ้า

### 2.3.3 หน่วยและขนาดของแม่เหล็ก

หน่วยของสนามแม่เหล็กในระบบ SI คือ เทสลา (Tesla, T) โดย

$$T = \frac{Wb}{m^2} = \frac{N}{C \cdot (\frac{m}{s})} = \frac{N}{A \cdot m} \quad 1T = 10^4 G \quad (2.46)$$

### 2.3.4 ความเข้มสนามแม่เหล็กและแมกนีโตเซชัน

เนื่องจากสสารประกอบด้วยอะตอมซึ่งมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่รอบอะตอมจึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าอะตอม (Atomic Current) ดังนั้นในตัวนำจึงมีกระแสไฟฟ้า 2 ชนิดคือ กระแสเนื่องจากการเคลื่อนที่ของประจุอิสระและกระแสเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมกระแสทั้ง 2 ชนิดนี้จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กทั้งคู่ โดยกระแสไฟฟ้าอะตอมจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเนื่องจากแมกนีโตเซชัน

$$M = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \sum \frac{\mu}{\Delta V} = \frac{d\mu_i}{dv} \quad (2.47)$$

จะเห็นว่าเวกเตอร์แมกนีโตเซชัน คือโมเมนต์แม่เหล็กต่อหน่วยปริมาตร

### 2.3.5 ความเข้มสนามแม่เหล็ก

การเกิดแมกนีโตเซชันจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กมีค่าเป็น

$$B_m = \mu_o M \quad (2.48)$$

ดังนั้นถ้าวางสารในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอกจะเกิดสนามแม่เหล็กรวมมีค่าเป็น

$$B = B_o + \mu_o M \quad (2.49)$$

ถ้าให้ความเข้มสนามแม่เหล็กคือ  $H = B_o/\mu_o$  จะได้สนามแม่เหล็กรวม

$$B = \mu_o(H + M) \quad (2.50)$$

หน่วยของ H และ M คือ A/m

### 2.3.6 ความสัมพันธ์ของค่าสภาพรับไว้ได้และสภาพให้ซึมได้

ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic Susceptibility) เป็นปริมาณที่บอกให้ทราบว่าสสารจะสามารถทำให้เป็นแม่เหล็กได้ดีแค่ไหนค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก  $\chi$  จะสัมพันธ์กับ H และ M ดังนี้

$$M = \chi H \quad (2.51)$$

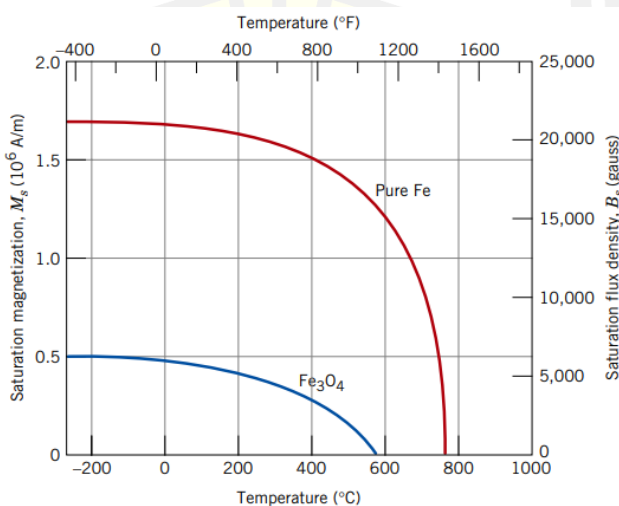
ดังนั้นเราจะเขียนได้ว่า

$$B = \mu_o(H + M) = \mu_o(1 + \chi)H = \mu_m H \quad (2.52)$$

เราเรียก  $\mu_m$  ว่าค่าสภาพให้ซึมได้ทางแม่เหล็ก ซึ่งมีค่าเป็น  $\mu_m = \mu_o(1 + \chi)$  (2.53)

### 2.3.7 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติแม่เหล็ก (The Influence of Temperature on Magnetic Behavior)

อุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็ก เช่น การเพิ่มอุณหภูมิ ที่สูงขึ้นทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของอะตอม ที่อุณหภูมิสูงกว่า 0 K พลังงานความร้อนจะเป็นสาเหตุทำให้วัสดุจำพวก Ferromagnetic มีการจัดเรียงตัวเกิดการเปลี่ยนแปลง ถ้าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ Curie,  $T_c$  ก็จะมีทำให้สภาวะแม่เหล็กหมดสภาพไปอย่างสิ้นเชิง และจะเปลี่ยนสภาพกลายเป็น Paramagnetism แทนแต่เมื่อถูกนำมาทำให้เย็นตัวลงต่ำกว่าอุณหภูมิ Curie ตัว Magnetic Domains จะเรียงตัวใหม่และกลับมาเป็นสภาวะแม่เหล็กอีกครั้ง

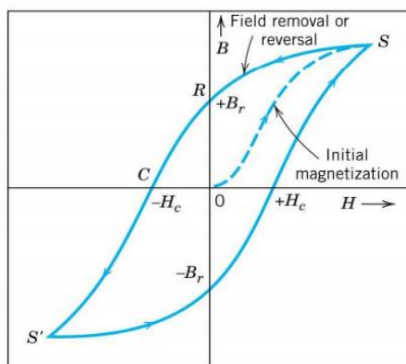


ภาพประกอบ 22 การอิมตัวของแม่เหล็กจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ที่มา : (Janocha, 2004 )

### 2.3.8 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

เมื่อใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในโลหะจำพวก Ferromagnetic เพิ่มขึ้น จะทำให้ ค่า Magnetic Induction เพิ่มขึ้น (ตามเส้นโค้ง O - S) จนกระทั่งจนถึงจุดอิ่มตัวที่จุด S และเมื่อลดสนามแม่เหล็กภายนอกลงถึงศูนย์ เส้นโค้งตามปริมาณ Magnetic Induction จะไม่กลับมาในแนวเส้นโค้งเดิม แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามเส้นโค้ง S - R ซึ่งสังเกตได้ว่า โลหะจะยังคงแสดงสถานะแม่เหล็กอยู่ แม้จะเอาสนามแม่เหล็ก ภายนอกออกก็ตาม โดยแสดงค่า Magnetic Induction เท่ากับ  $B_r$  ที่จุด R จึงถูกเรียกว่า Remanent Induction ค่า Magnetic Induction ของโลหะจะลดลงเป็นศูนย์หรือหมดสถานะแม่เหล็กอีกครั้ง เมื่อใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้าม ในปริมาณความเข้มเท่ากับ  $H_c$  ที่จุด C ซึ่งเรียกว่า Coercive Force ถ้าให้สนามแม่เหล็กกลับทิศหรือติดลบมากขึ้น ก็จะทำให้โลหะมีค่า Magnetic Induction เพิ่มขึ้นตามเส้นโค้ง C-S ในทิศทางตรงกันข้ามจากเดิม ซึ่งการได้ Loop ที่สมบูรณ์ 1 รอบ เรียกว่า Hysteresis



ภาพประกอบ 23 ลักษณะของการเกิดฮิสเทอรีซิส

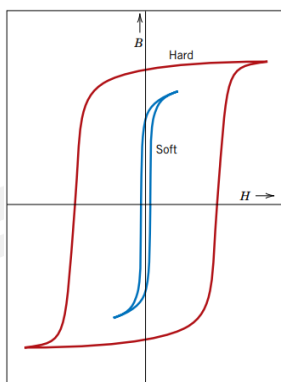
ที่มา : (Janocha, 2004 )

#### 2.3.8.1 Soft Magnetic Materials

เป็นวัสดุที่สามารถทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กหรือหมดสถานะแม่เหล็กได้ง่าย ซึ่งจะมีค่า hysteresis loop ที่เรียวและแคบ ซึ่งมีค่า coercive ค่อนข้างต่ำ ส่วนมากจะ ใช้ในการทำแกนหม้อแปลงมอเตอร์และเครื่องปั่นไฟฟ้า

#### 2.3.8.2 Hard Magnetic Materials

หรือแม่เหล็กแบบถาวร เป็นวัสดุที่ทำให้เป็นแม่เหล็กหรือหมดสภาพแม่เหล็กได้ยาก ซึ่งจะมีค่า remanent magnetic induction ( $B_r$ ) สูง และค่า coercive force ( $H_c$ ) มาก



ภาพประกอบ 24 ลักษณะของการเกิดฮิสเทอรีซิสของ Soft และ Hard Magnetic Materials  
ที่มา : (Janocha, 2004 )

ตาราง 3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโลหะในกลุ่ม Soft Magnetic

| Typical Properties for Several Soft Magnetic Materials |                                                                         |                                       |                                               |                                           |                                      |             |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|-------------|
| Materials                                              | Composition (wt %)                                                      | Initial Relative Permeability $\mu_i$ | Saturation Flux Density $B_s$ (tesla (gauss)) | (J/m <sup>3</sup> (erg/cm <sup>3</sup> )) | Hysteresis Loss/Cycle ( $\Omega$ -m) | Resistivity |
| Commercial iron ingot                                  | 99.95Fe                                                                 | 150                                   | 2.14<br>(21,400)                              | 270<br>(2700)                             | $1.0 \times 10^7$                    |             |
| Silicon – iron (oriented)                              | 97Fe, 3Si                                                               | 1,400                                 | 2.01<br>(20,100)                              | 40<br>(400)                               | $4.7 \times 10^7$                    |             |
| 45 Permalloy                                           | 55Fe, 45Ni                                                              | 2,500                                 | 1.60<br>(16,000)                              | 120<br>(12,000)                           | $4.5 \times 10^7$                    |             |
| Supermalloy                                            | 79Ni, 15Fe, 5Mo, 0.5Mn                                                  | 75,000                                | 0.80<br>(8,000)                               | -                                         | $6.0 \times 10^7$                    |             |
| Ferroxcube A                                           | 48MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , 52ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | 1,400                                 | 0.33<br>(3,300)                               | ~40<br>(400)                              | 2,000                                |             |
| Ferroxcube B                                           | 36NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , 64ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | 650                                   | 0.36<br>(3,600)                               | ~35<br>(350)                              | $10^7$                               |             |

ตาราง 4 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของโลหะในกลุ่ม Hard Magnetic

| Typical Properties for Several Hard Magnetic Materials |                                       |                                 |                                    |                                     |                                   |                                   |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Materials                                              | Composition (wt %)                    | Remanence $B_r$ (tesla (gauss)) | Coercivity $H_c$ (amp-turn/m (Oe)) | (BH) max (kJ/m <sup>3</sup> (MGOe)) | Curie Temperature $T_c$ (°C (°F)) | Resistivity $\rho$ ( $\Omega$ -m) |
| Tungsten Steel                                         | 92.8 Fe, 6W, 0.5 Cr, 0.7 C            | 0.95<br>(9,500)                 | 5900<br>(74)                       | 2.6<br>(0.33)                       | 760<br>(1,400)                    | $3.0 \times 10^7$                 |
| Cunife                                                 | 20 Fe, 20 Ni, 60 Cu                   | 0.54<br>(5,400)                 | 44,000<br>(550)                    | 12<br>(1.5)                         | 410<br>(770)                      | $1.8 \times 10^7$                 |
| Sintered alnico 8                                      | 34 Fe, 7 Al, 15 Ni, 35 Co, 4 Cu, 5 Ti | 0.76<br>(7,600)                 | 125,00<br>(1550)                   | 36<br>(4.5)                         | 860<br>(1580)                     | -                                 |

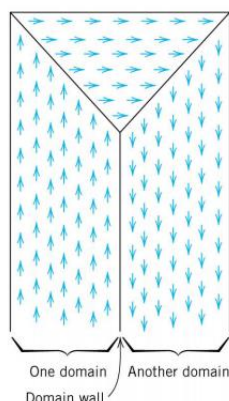
| Typical Properties for Several Hard Magnetic Materials |                                     |                            |                                 |                                     |                                |                     |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| Materials                                              | Composition (wt %)                  | Remance Br (tesla (gauss)) | Coercivity Hc (amp-turn/m (Oe)) | (BH) max (kJ/m <sup>3</sup> (MGOe)) | Curie Temperature Tc (°C (°F)) | Resistivity p (Ω-m) |
| Sintered Ferrite 3                                     | BaO-6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.32 (3,200)               | 240,000 (3,000)                 | 20 (2.5)                            | 450 (840)                      | ~10 <sup>4</sup>    |
| Cobalt rare earth 1                                    | SmCo <sub>5</sub>                   | 0.92 (9,200)               | 720,000 (9,000)                 | 170 (21)                            | 725 (1,340)                    | 5.0×10 <sup>7</sup> |
| Sintered neodymium-iron - boron                        | Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B  | 1.16 (11,600)              | 848,000 (10,600)                | 255 (32)                            | 310 (590)                      | 1.6×10 <sup>6</sup> |

ที่มา : (Adapted from ASM Handbook, Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.

Copyright © 1990 by ASM International. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH)

### 2.3.9 Magnetic Domains

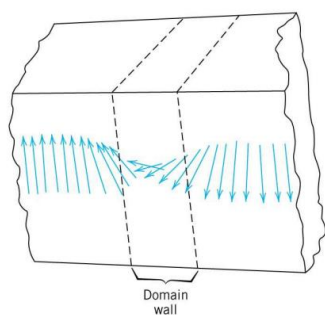
สำหรับวัสดุ Ferromagnetic หรือ Ferrimagnetic ที่อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิ Curie นั้น Magnetic Dipole Moment จะมีการจัดเรียง ตัวอย่างเป็นระเบียบและมีทิศทางที่ขนานกันในบริเวณเล็กๆ หนึ่งเรียกว่า Magnetic Domains



ภาพประกอบ 25 ลักษณะการเกิดmagnetic domain

ที่มา : (Papachristou, 2020)

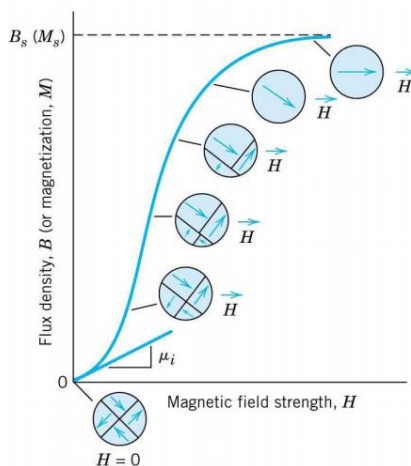
ในบางครั้งวัสดุนั้นอาจจะยังไม่สามารถแสดงสภาพแม่เหล็กได้ เนื่องจากแต่ละ Domains ยังมีการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ไม่เป็นระเบียบ ทำให้ผลรวมสุทธิของ Magnetic Moment ของวัสดุทั้งชิ้นมีค่าน้อยหรือ เป็นศูนย์



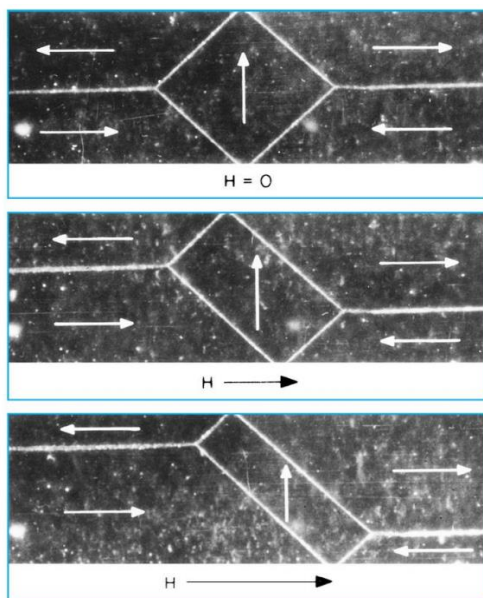
ภาพประกอบ 26 ลักษณะการเกิดการเปลี่ยนแปลงเกรนใน Magnetic Dipole  
ที่มา : (Papachristou, 2020)

เมื่อใส่สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไป Magnetic Domains จะพยายามจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอกได้โดย

- 1) การเคลื่อนที่และการหมุนของผนัง Domains



ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงโดเมนระหว่างความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็กของโลหะกลุ่ม Ferromagnetic หรือ Ferrimagnetic  
ที่มา : (Papachristou, 2020):



ภาพประกอบ 28.เรียงตัวของโดเมนในโลหะ

ที่มา : (Ghalamestani, 2014)

### 2.3.10 การล้างอำนาจแม่เหล็กแม่เหล็กที่ตกค้าง (Demagnetizations)

- 1) การล้างอำนาจแม่เหล็กจะสู่การวางแนวของไดโพลแม่เหล็ก
- 2) กระบวนการล้างแม่เหล็กรวมถึงการให้ความร้อนที่ผ่านจุด Curie การใช้สนามแม่เหล็กแรงสูง
- 3) การใช้กระแสสลับหรือการตอกโลหะ
- 4) การล้างอำนาจแม่เหล็กเกิดขึ้นตามธรรมชาติเมื่อเวลาผ่านไปความเร็วของ

กระบวนการขึ้นอยู่กับวัสดุอุณหภูมิและปัจจัยอื่นๆ

ในขณะที่การล้างแม่เหล็กอาจเกิดขึ้นโดยบังเอิญ แต่ก็มักจะดำเนินการโดยเจตนาเมื่อชิ้นส่วนโลหะกลายเป็นแม่เหล็กหรือเพื่อทำลายข้อมูลที่เข้ารหัสด้วยแม่เหล็กทำลายแม่เหล็ก โดยการให้ความร้อนหรือการตอกหากคุณให้ความร้อนแม่เหล็กเกินอุณหภูมิที่เรียกว่าจุด Curie พลังงานจะปลดปล่อยไดโพลแม่เหล็กจากการวางแนวที่สั่งคำสั่งซึ่งระยะไกลถูกทำลายและวัสดุจะมีการดึงดูดเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย อุณหภูมิที่ต้องการเพื่อให้ได้ผลเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเฉพาะคุณจะได้รับเอฟเฟกต์เดียวกันนี้โดยการตอกแม่เหล็ก: ใช้แรงกดหรือวางลงบนพื้นแข็งการหยุดชะงักทางกายภาพและการสั่นสะเทือนทำให้คำสั่งซึ่งออกจากวัสดุและทำการล้างอำนาจแม่เหล็ก

#### 2.3.10.1 การล้างอำนาจแม่เหล็กด้วยตนเอง

เมื่อเวลาผ่านไปแม่เหล็กส่วนใหญ่จะสูญเสียความแข็งแรงตามธรรมชาติ เนื่องจากการสั่งซึ่งระยะไกลจะลดลง แม่เหล็กบางตัวอยู่ได้ไม่นานนักในขณะที่การล้างแม่เหล็กตามธรรมชาติเป็นกระบวนการที่ช้ามากสำหรับคนอื่นๆ หากคุณเก็บแม่เหล็กจำนวนหนึ่งไว้ด้วยกันหรือสุมแม่เหล็กซึ่งกันและกันแต่ละชิ้นจะส่งผลกระทบต่ออีกอันหนึ่งเปลี่ยนการวางแนวของไดโพลแม่เหล็ก

และลดความแรงของสนามแม่เหล็กสุทธิ แม่เหล็กแรงสูงสามารถใช้ในการปลดแม่เหล็กของแม่เหล็กที่อ่อนแอกว่า ซึ่งมีสนามบีบบังคับต่ำกว่า

#### 2.3.10.2 การล้างโดยใช้ตัวต้านทานกำลังวัตต์สูง

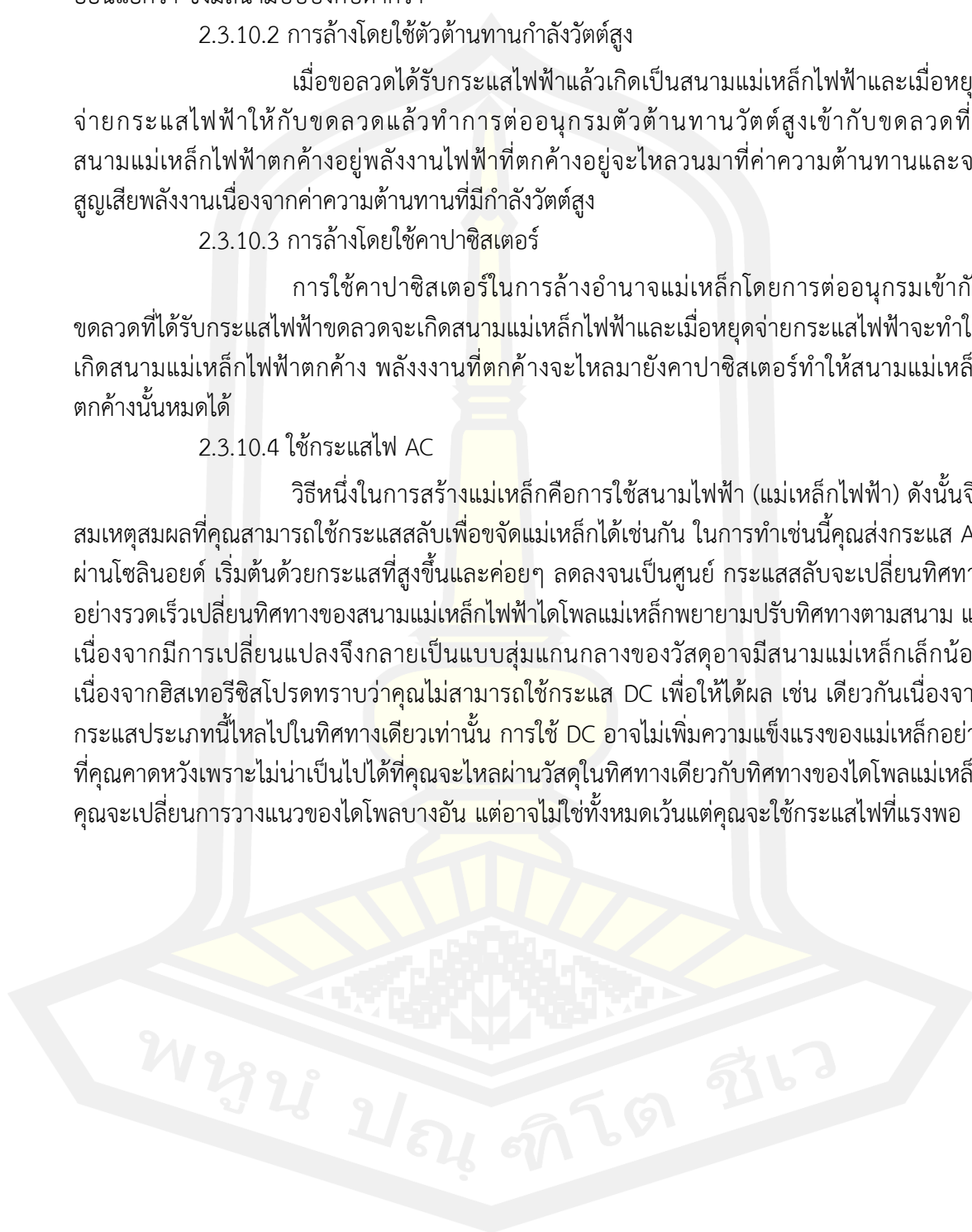
เมื่อขอลวดได้รับกระแสไฟฟ้าแล้วเกิดเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเมื่อหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขลวดแล้วทำการต่ออนุกรมตัวต้านทานวัตต์สูงเข้ากับขลวดที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตกค้างอยู่พลังงานไฟฟ้าที่ตกค้างอยู่จะไหลวนมาที่ค่าความต้านทานและจะสูญเสียพลังงานเนื่องจากค่าความต้านทานที่มีกำลังวัตต์สูง

#### 2.3.10.3 การล้างโดยใช้คาปาซิเตอร์

การใช้คาปาซิเตอร์ในการล้างอำนาจแม่เหล็กโดยการต่ออนุกรมเข้ากับขลวดที่ได้รับกระแสไฟฟ้าขลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเมื่อหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตกค้าง พลังงานที่ตกค้างจะไหลมายังคาปาซิเตอร์ทำให้สนามแม่เหล็กตกค้างนั้นหมดได้

#### 2.3.10.4 ใช้กระแสไฟ AC

วิธีหนึ่งในการสร้างแม่เหล็กคือการใช้สนามไฟฟ้า (แม่เหล็กไฟฟ้า) ดังนั้นจึงสมเหตุสมผลที่คุณสามารถใช้กระแสสลับเพื่อจัดแม่เหล็กได้เช่นกัน ในการทำเช่นนี้คุณส่งกระแส AC ผ่านโซลินอยด์ เริ่มต้นด้วยกระแสที่สูงขึ้นและค่อยๆ ลดลงจนเป็นศูนย์ กระแสสลับจะเปลี่ยนทิศทางอย่างรวดเร็วเปลี่ยนทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไดโพลแม่เหล็กพยายามปรับทิศทางตามสนาม แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงจึงกลายเป็นแบบสุ่มแกนกลางของวัสดุอาจมีสนามแม่เหล็กเล็กน้อย เนื่องจากฮิสเทอรีซิสโปรดทราบว่าที่คุณไม่สามารถใช้กระแส DC เพื่อให้ได้ผล เช่น เดียวกันเนื่องจากกระแสประเภนี้ไหลไปในทิศทางเดียวเท่านั้น การใช้ DC อาจไม่เพิ่มความแข็งแรงของแม่เหล็กอย่างที่คุณคาดหวังเพราะไม่น่าเป็นไปได้ที่คุณจะไหลผ่านวัสดุในทิศทางเดียวกับทิศทางของไดโพลแม่เหล็ก คุณจะเปลี่ยนการวางแนวของไดโพลบางอัน แต่อาจไม่ใช่ทั้งหมดเว้นแต่คุณจะใช้กระแสไฟที่แรงพอ



## 2.4 การประยุกต์ใช้งาน

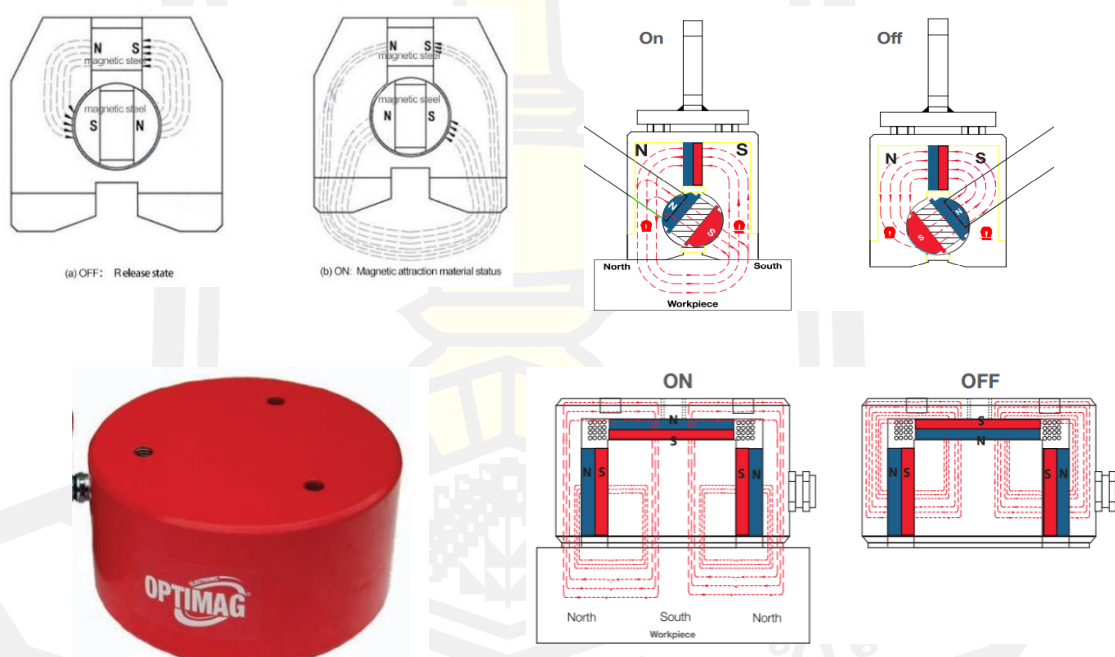
เราสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักได้แก่ 1) แม่เหล็กถาวร 2) แม่เหล็กไฟฟ้า

### 2.4.1 แม่เหล็กถาวร



ภาพประกอบ 29 การประยุกต์ใช้หัวแม่เหล็กยกในงานอุตสาหกรรม

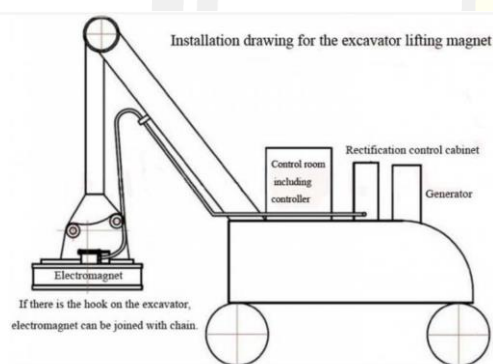
ที่มา : (<https://www.eclipsemagnetics.com/products/lifting-and-handling/>)



ภาพประกอบ 30 โครงสร้างของหัวแม่เหล็กถาวรในงานอุตสาหกรรม

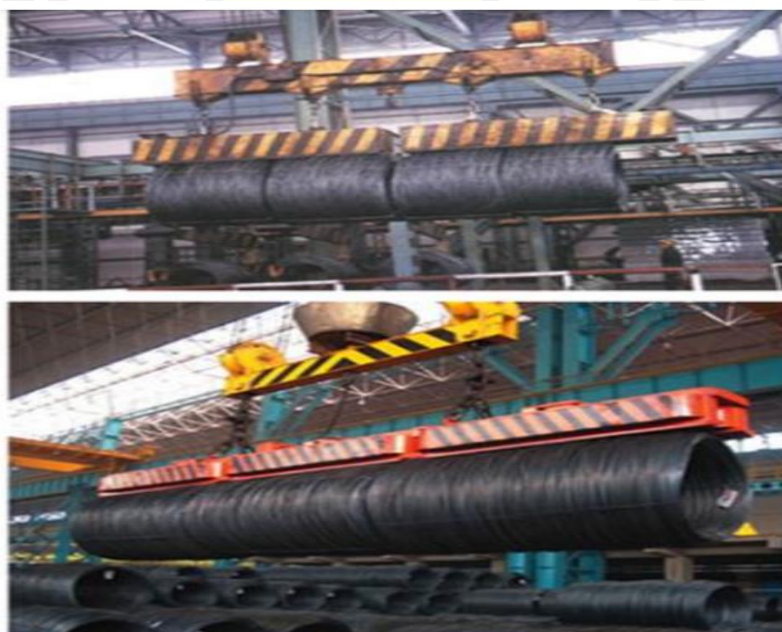
ที่มา: (<https://www.eclipsemagnetics.com/products/lifting-and-handling/>)

## 2.4.2 แม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพประกอบ 31 ภาพหัวแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม

ที่มา : (<https://www.eclipsemagnetics.com/products/lifting-and-handling/>)



ภาพประกอบ 32 ภาพการนำสนามแม่เหล็กไปใช้ในงานอุตสาหกรรม

ที่มา (<https://www.eclipsemagnetics.com/products/lifting-and-handling/>)

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลังจากได้มีการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเบื้องต้นอย่างละเอียดไปแล้ว ในส่วนนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการขจัดสนามแม่เหล็กและการประยุกต์การใช้งานการขจัดสนามแม่เหล็ก

### 2.5.1 งานวิจัยภายในประเทศ

ชลิต ทองศรี(Thongsri, 2016)ได้ศึกษาและวิเคราะห์ ระบบการควบคุมการยกตัวด้วยสนามแม่เหล็กให้ระบบเกิดการสมดุลของแรงยกตัวโดยทำการออกแบบระบบควบคุมการลอยตัวเพื่อปรับระบบแผ่นระนาบให้สมดุลจำนวนจุด โดยใช้ตัวควบคุม พีไอดี ควบคุมการลอยตัวของแต่ละแกน ซึ่งแต่ละแกนจะสร้างขั้วแม่เหล็ก และชุดลอยจะเป็นแม่เหล็กถาวร ขั้วแม่เหล็กที่สร้างขึ้น กับแม่เหล็กถาวรจะเป็นขั้วเดียวกัน ทำให้เกิดการผลักกันแล้วสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ให้วัตถุลอยตัวอย่างสมดุล

นวพงศ์ นูตาดี(นวพงศ์ นูตาดี, 2556)ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย เพื่อศึกษาแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และไฟไนเอลิเมนต์ มาเปรียบเทียบในขณะที่หม้อแปลงทำงานในสภาวะปกติ และขณะที่เกิดการลัดวงจรแบบสมมาตรโดยใช้โปรแกรมMATLAB/Simulink นั้น เป็นการสร้างแบบจำลองภาพโครงสร้างแบบจำลองวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์ เป็นการจำลองภาพโครงสร้างของหม้อแปลง จากนั้นนำไปหาค่าความหนาแน่นของเส้นรสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อนำไปคำนวณค่าแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ผลการศึกษาพบว่า ทั้งในสภาวะปกติ และลัดวงจรแบบสมมาตรการจำลองหาแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยโปรแกรมMATLAB/Simulink และไฟไนเอลิเมนต์ ให้ค่าแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกันในส่วนองแรงตามแนวแกนเหล็ก

จิระศักดิ์ วงศา ได้ศึกษาวิจัยการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำอาศัยหลักการเหนี่ยวนำโดยการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้ขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำกับวัสดุที่เป็นสารFerromagnetic ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในวัสดุที่เป็นเส้นทางปิด และเกิดความร้อนขึ้นในที่สุด การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งในส่วนของวงจรกำลังได้แก่ วงจรแบบฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ วงจรแบบฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ วงจรแบบสามระดับ และวงจรแบบสวิตช์ตัวเดียว นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาการสับสวิตช์เพื่อลดการสูญเสียในตัวอุปกรณ์อื่นได้แก่ การสวิตช์ขณะแรงดันและกระแสเป็นศูนย์(ZVZCS) โหลดที่ใช้มีคุณลักษณะที่แตกต่างกันทั้งโหลดเรโซแนนท์แบบอนุกรม โหลดเรโซแนนท์แบบขนานและโหลดแบบกึ่งเรโซแนนท์ การควบคุมกำลังทางไฟฟ้าในแต่ละวงจรสามารถทำได้หลากหลายวิธีได้แก่ การควบคุมด้วยความถี่ การปรับมุมเฟสและการควบคุมด้วยจำนวนไซเคิลของคลื่นสแควร์

อริยศักดิ์ จิตธรรมสาร ได้ศึกษาการคำนวณกำลังการสูญเสียในแกนเหล็ก พร้อมทั้งออกแบบแกนเหล็กเพื่อลดกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กอันเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็ก โดยที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดตัวนำไฟฟ้าแรงสูงของหม้อแปลงจำหน่ายแสดงอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง โดยอาศัยการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่ซับซ้อน การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนเอลิเมนต์(FEM) เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ได้รับความนิยมสูงทั้งนี้เพราะสามารถใช้ได้กับปัญหาที่มีความซับซ้อนในหลากหลายรูปแบบ

กิตติภัทร พูลเอน ได้ศึกษาการออกแบบตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่องสำหรับระบบไม่เสถียร เพื่อนำไปใช้ตามโครงสร้างของระบบควบคุมแบบ 2-DOF ที่เชื่อมต่อกับฟังก์ชันของ Posicast เพื่อคงเสถียรภาพของพลานต์อันดับสามหรือสูงกว่า โดยเริ่มจากการออกแบบตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่อง ซึ่งประกอบไปด้วยตัวควบคุมแบบ Proportional-Integral-Derivative (PID)(n-2) Stage Cascade กับตัวควบคุมแบบ Proportionl-Derivative(PD) และตัวควบคุมไปข้างหน้า ออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีการของ Kitti's Method โดยฟังก์ชันของPosicast ถูกใช้เพื่อขจัดค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองของระบบ จากการออกแบบตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่องในโดเมน  $s$  นำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่องในโดเมน

อาภรณ์ ตีวิธมไหศุรย์ (2001) ได้ทำการวิจัยการกำจัดไอออนจากน้ำบาดาลโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าสถิตเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดไอออนในน้ำบาดาล เช่น ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า, ปริมาณความเข้มข้นของไอออนในน้ำ และอุณหภูมิที่เหมาะสม และศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องมือเปรียบเทียบกับระหว่างการใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า, การใช้สนามไฟฟ้าสถิตและการใช้ทั้งสองวิธีร่วมกันโดยทำการทดลองภายใต้สภาวะใกล้เคียงกับสภาวะจริง'

## 2.5.2 งานวิจัยต่างประเทศ

Xie Lixing Lin Wei , Wang Lixiang ,c, Ding Yan,(2020)ได้ศึกษาเกี่ยวกับ Electromagnetic Lifting Control System Based on BAS+PID Algorithm หลักการได้นำเสนอการทำงาน LGBT มาใช้ในลดทอนอำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าตกค้าง ซึ่งผลจากการทดลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการทดสอบผลปรากฏว่าสามารถออกแบบวงจรคอลโทรลที่มีขนาดเล็กและทนกระแสน้อยกลับได้ดีและตอบสนองต่อการใช้งานได้ดีขึ้นโดยใช้ LGBT เพื่อลดการเกิดโซแนน

Stefan Sjökvist Demagnetization Studies on Permanent Magnetsซึ่งได้ศึกษาการลดอำนาจแม่เหล็กใน Rotor ของกังหันลมซึ่งในทำการออกแบบโรเตอร์ของกังหันลมที่เป็น ferrite permanent magnets เพื่อลดการสูญเสียของพื้นผิวของโรเตอร์ที่ใช้ NdFeB rotor

Kent Davey (2004) ได้ศึกษาเกี่ยวกับ New Electromagnetic Lift Control Method for Magnetic Levitation Systems and Magnetic Bearings โดยการใช้ขั้นตอนวิธีโพรเบนีอุสเพื่อพยากรณ์การควบคุมกระแสและแรงดันเพื่อใช้ควบคุมและคำนวณช่องว่างของการลอยตัวของระบบmagnetic levitation (maglev) ให้แม่นยำมากที่สุดซึ่งแตกต่างจากวิธีการทั่วไปที่ใช้วิธีหา (pid) เพื่อควบคุมกระแสและแรงดันซึ่งมีความซับซ้อนมาก

Hyung-Kyu Kim<sup>1</sup> and Jin Hur<sup>2</sup> (2015: บทคัดย่อ) ได้ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องMagnetic Field Analysis of Irreversible Demagnetization in Brushless DC Motor According to the Dynamic and Static Characteristic เกี่ยวกับการพัฒนาอัลกอริธึมการวิเคราะห์คุณลักษณะแบบไดนามิกสำหรับการล้างแม่เหล็กแบบย้อนกลับไม่ได้ในแบบไม่ใช้แปรงมอเตอร์กระแสตรง โดยทั่วไปในการวิเคราะห์ลักษณะคงที่ของการล้างแม่เหล็กแบบย้อนกลับไม่ได้จะมีเพียงส่วนประกอบของฟลักซ์แม่เหล็กแกน  $d$  เท่านั้นพิจารณา ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถใช้การวิเคราะห์ประเภทนี้เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของการล้างอำนาจแม่เหล็กที่ไม่สามารถย้อนกลับได้อย่างถูกต้องในขณะที่มอเตอร์กำลังขับเคลื่อนจริงๆ ดังนั้นจึงพัฒนาอัลกอริธึมการวิเคราะห์คุณลักษณะแบบไดนามิกที่เราใช้ในการ

เปรียบเทียบการวิเคราะห์ลักษณะคงที่และแบบไดนามิกของการล้าอำนาจแม่เหล็กแบบย้อนกลับไม่ได้ ดังนั้นจึงเสนอกระแสไฟฟ้าสูงสุดขีดจำกัด สำหรับการออกแบบมอเตอร์ที่ช่วยลดผลกระทบของการล้าอำนาจแม่เหล็กที่ไม่สามารถย้อนกลับได้

Li Gang<sup>1</sup> , Wang Ke<sup>1,a)</sup>, Zhang Shuqi<sup>1</sup> , Liu Xueli<sup>1</sup> , Li Jinzhong<sup>2</sup> , Yu Xinru<sup>1</sup> ,Ding Guocheng<sup>3</sup> (2019:บทคัดย่อ) ได้ทำการทดสอบคุณลักษณะการทำให้เป็นแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรงมีการสร้างแพลตฟอร์มตามลำดับโดยการวิเคราะห์กลไกของกระบวนการทำให้เป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าความแตกต่างระหว่างลักษณะการดึงดูด AC และ DC ของหม้อแปลงสี่เฟสเดี่ยวถูกเปรียบเทียบกัน พบว่าลักษณะการดึงดูด AC และ DC ของหม้อแปลงสี่เฟสเดี่ยวมีกฎเกณฑ์ที่คล้ายคลึงกันที่ระดับความแรงของสนามแม่เหล็กเดียวกันเส้นโค้งการดึงดูดมีระดับตรงกันที่ดีในส่วนเชิงเส้นระดับของการดึงดูดไฟฟ้ากระแสสลับในส่วนที่ knee-point เล็กน้อยสูงกว่าใน DC magnetization ในขณะเดียวกัน AC การดึงดูดของส่วนอ้อมตัวคือคล้ายกับลักษณะการดึงดูดของ DC แต่อยู่ภายใต้ DC เงื่อนไขมันง่ายกว่าที่จะทำให้แกนมีความอ้อมตัวเล็ก

Yue Zhang<sup>1</sup>, Seán McLoone<sup>1</sup>, and Wenping Cao<sup>2</sup> (2018:บทคัดย่อ) เอกสารของเขานำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองการสูญเสียแม่เหล็กไฟฟ้าและการวิเคราะห์การจัดแม่เหล็กสำหรับเครื่องแม่เหล็กถาวรความเร็วสูง (HSPMM) การสูญเสียเหล็กประมาณโดยการปรับปรุงแบบจำลองโดยพิจารณาจากฮาร์โมนิกส์และเอฟเฟกต์สนามแม่เหล็กแบบหมุนเพื่อให้ได้ความแม่นยำสูงการสูญเสียกระแสหมุนของใบพัดได้รับการวิจัยและตรวจสอบอย่างละเอียดโดยใช้วิธีการจำกัดองค์ประกอบ(FEM)นอกจากนี้ยังมีการเสนอสลอตเสริมและ PM beveling เพื่อลดการสูญเสียกระแสหมุนของใบพัดสำหรับเครื่องที่ทำงานด้วยความเร็วสูง การสร้างแบบจำลองการล้าแม่เหล็กแบบขึ้นอยู่กับอุณหภูมิถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์HSPMM FEM เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในขณะที่โครงสร้างโรเตอร์ที่ได้รับการปรับให้เหมาะสมนั้นได้รับการเสนอและวิจัยเปรียบเทียบโดย FEM เพื่อปรับปรุงความสามารถในการต่อต้านการล้าอำนาจแม่เหล็กของเครื่องในสถานะที่ไม่เอื้ออำนวย อุณหภูมิ HSPMM ประมาณตามผลการสูญเสียที่คำนวณได้และการสร้างแบบจำลองไดนามิกของไหลเชิงคำนวณของเครื่องจักร การทดสอบการวัดบนเครื่องต้นแบบตรวจสอบประสิทธิภาพของการสร้างแบบจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าและความร้อนของเครื่อง

David L. Atherton and A.R. East (1974) นำเสนอการคำนวณ "กรณีที่ดีที่สุด"ของอัตราส่วนกำลังและน้ำหนักยกสำหรับเหล็กคอร์ระบบการลอยตัวแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้แรงดึงดูดระหว่างแม่เหล็กไฟฟ้าควบคุมและรางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแรงผลักดันระหว่าง a.c. แม่เหล็กไฟฟ้าและตัวนำ guidewayแม้ว่าอัตราส่วน powerlift จะต่ำ แต่ก็ใช้งานได้จริง ซึ่งมีข้อจำกัดทางวิศวกรรมของความหนาแน่นกระแสของตัวนำและความหนาแน่นของฟลักซ์เหล็กและขนาดแม่เหล็กส่งผลให้ยกไม่ดี/อัตราส่วนน้ำหนัก และจำกัดการควบคุมการลอยตัวสูงต่ำ โดยปกติเทคนิคการควบคุมแม่เหล็กที่ใช้กันทั่วไปจะมี 4 ประเภทหลักๆได้แก่ 1.แรงผลักดันระหว่างแม่เหล็กถาวรที่ติดตั้งอยู่ยานพาหนะและบน guideway เทคนิคนี้คือไม่เป็นที่ชื่นชอบเนื่องจากแรงกันกระเทือน และมีช่องว่างการลอยตัวต่ำทำให้เกิดความชื้นและมีต้นทุนและน้ำหนักของแม่เหล็กสูง 2.เทคนิคการควบคุมแรงดึงดูดระหว่างแม่เหล็กไฟฟ้าและรางแม่เหล็ก ซึ่งเทคนิคนี้สามารถนำไปใช้ได้ทั้งความเร็วต่ำและความเร็วสูง ซึ่งถูก

พัฒนาโดยประเทศเยอรมัน 3.แรงพลักระหว่างแกนแม่เหล็ก a.c และตัวนำอูมิเนียมซึ่งเทคนิคนี้ถูกพัฒนาโดยประเทศอังกฤษ 4.แรงพลักระหว่างแม่เหล็ก d.c และการเกิด eddy current ในตัวนำ guideway ซึ่งในทางปฏิบัติแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวดที่มีความแข็งแรงสูงซึ่งพอจะเป็นค่าได้จากช่องว่างของ guideway และแกนแม่เหล็ก d.c ซึ่งเทคนิคนี้ถูกพัฒนาในหลายประเทศ ซึ่งจากการทดลองจะเห็นความต่างระหว่างอูมิเนียมและทองแดงและเหล็กซึ่งจะมีผลต่อการลอยตัวและการสั่นสะเทือนในทางปฏิบัติทางวิศวกรรมสิ่งที่มีเป็นข้อจำกัดได้แก่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า, ความหนาแน่นของฟลักซ์เหล็กและฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งมีผลต่อการลอยตัวต่อน้ำหนักที่เคลื่อนที่

Han Xiong, (2016:บทคัดย่อ) เอกสารนี้จะตรวจสอบการล้าอำนาจแม่เหล็กลักษณะของแม่เหล็กถาวรหายากที่ใช้ในระบบไฟฟ้าเครื่องจักร อุปกรณ์ทดสอบได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อกระตุ้นการล้าอำนาจแม่เหล็กในพื้นที่ที่ควบคุมได้ในตัวอย่างแม่เหล็กภายใต้ทดสอบ. ช่วงของแรงเคลื่อนจากแม่เหล็ก (MMF) คือนำไปใช้เพื่อบังคับให้ตัวอย่างแม่เหล็กทำงานในจุดต่างๆตามเส้นโค้ง B-H ระดับของการล้าอำนาจแม่เหล็กในตรวจวัดตัวอย่างแม่เหล็กด้วยอุปกรณ์ทำแผนที่ฟลักซ์ 2 มิติที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ การวัดคือเปรียบเทียบกับผลการจำลองการวิเคราะห์องค์ประกอบ จำกัด 3 มิติ (FEA) นี้ผลการศึกษาทำให้เข้าใจถึงความสามารถของแม่เหล็กได้มากขึ้นทนต่อแรงขัดแม่เหล็กต่างๆและวิธีการเชิงพื้นที่คุณสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกันมีผลต่อความสามารถนี้ความเข้าใจที่ได้รับจากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้กับการทดสอบได้และการตรวจสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรแม่เหล็กที่ใช้ในเครื่องจักรไฟฟ้า

Sami Ruoho, Jere Kolehmainen, Jouni Ikäheimo, and Antero Arkk (2010:บทคัดย่อ) ได้ศึกษาการล้าอำนาจแม่เหล็กควบคู่ไปกับการโหลดและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของมอเตอร์และวิธีการจำลองการเชื่อมต่อนี้ ในบทความนี้เราจำลองพลวัตของการขัดแม่เหล็กของมอเตอร์ภายใต้แรงบิดโหลดคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดลความร้อนควรรวมอยู่ในการคำนวณการขัดแม่เหล็ก การทำลายแม่เหล็กจะทำให้สูญเสียทองแดงเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของเครื่องสูงขึ้น สิ่งนี้จะทำให้เกิดการล้าอำนาจแม่เหล็กมากขึ้นและอาจนำไปสู่การหยุดชะงักในสถานการณ์ในแบบจำลองที่ละเลยผลกระทบด้านความร้อนคาดการณ์การทำงานที่เสถียรโดยไม่ต้องล้าอำนาจแม่เหล็กเพิ่มเติม

P. Zhou, D. Lin, Y. Xiao, N. Lambert, and M. A. Ra (2012 :บทคัดย่อ) บทความนี้นำเสนอแบบจำลองการขัดแม่เหล็กเชิงเส้นโดยคำนึงถึงการขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัสดุแม่เหล็กแข็งในขณะเดียวกันอัลกอริทึมการค้นหาที่มีประสิทธิภาพจะถูกเสนอเพื่อระบุจุดทำงานที่แย่ที่สุดได้อย่างถูกต้องและอัปเดตเส้นการหัดตัวในระหว่างกระบวนการแก้ปัญหา transient ทั้งหมดหากพบจุดทำงานที่ต่ำกว่าจุด knee point ของเส้นกระแสหัดตัวปัจจุบัน โมเดลนี้คือขยายเพิ่มเติมเพื่อคำนึงถึงการพึ่งพาอุณหภูมิของพฤติกรรมกำลังอำนาจแม่เหล็กที่ไม่สามารถย้อนกลับได้

Ki-Chan Kim, Kwangsoo Kim, Hee Jun Kim, and Ju Le(2009) ได้ศึกษาเกี่ยวกับเรื่อง Demagnetization Analysis of Permanent Magnets According to Rotor Types of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor บทความนี้แสดงการศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการขัดแม่เหล็กถาวรของแม่เหล็กถาวรตามประเภทโรเตอร์สามชนิดของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรภายใน (IPMSM) เป็นสิ่งสำคัญมากที่จะต้องพิจารณาถึงประสิทธิภาพ

ในการจัดแม่เหล็กและประสิทธิภาพของมอเตอร์เช่นแรงบิดพักกระแสไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพเมื่อออกแบบ IPMSM ประสิทธิภาพของโรเตอร์สามชนิดตามการจัดเรียงแม่เหล็กถาวร โดยทั่วไปจะใช้ประเภทชั้นเดียวประเภทรูปตัววีและประเภทสองขั้วสำหรับ IPMSM ในงานวิจัยมีการ เสนอวงจรที่เทียบเท่าแม่เหล็กตามโรเตอร์แต่ละประเภทเพื่อออกแบบความหนาของแม่เหล็กถาวรใน เบื้องต้นพิจารณาการล้าอำนาจแม่เหล็กโดยค่าคงที่เป็นก่อนที่เกี่ยวข้องกับวงจรแม่เหล็ก ปริมาตร ของแม่เหล็กถาวรต่อเสาและ EMF ด้านหลังของโรเตอร์แต่ละประเภทจะถือว่าเท่ากันสำหรับการ เปรียบเทียบการล้าอำนาจแม่เหล็กของ IPMSM ที่มีประสิทธิภาพเดียวกันซึ่งกันและกัน ต่อไปการ กระจายของการล้าอำนาจแม่เหล็กในแม่เหล็กถาวรจะวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) สำหรับการตรวจสอบผลลัพธ์โดยวงจรเทียบเท่าแม่เหล็ก

## 2.6 สรุป

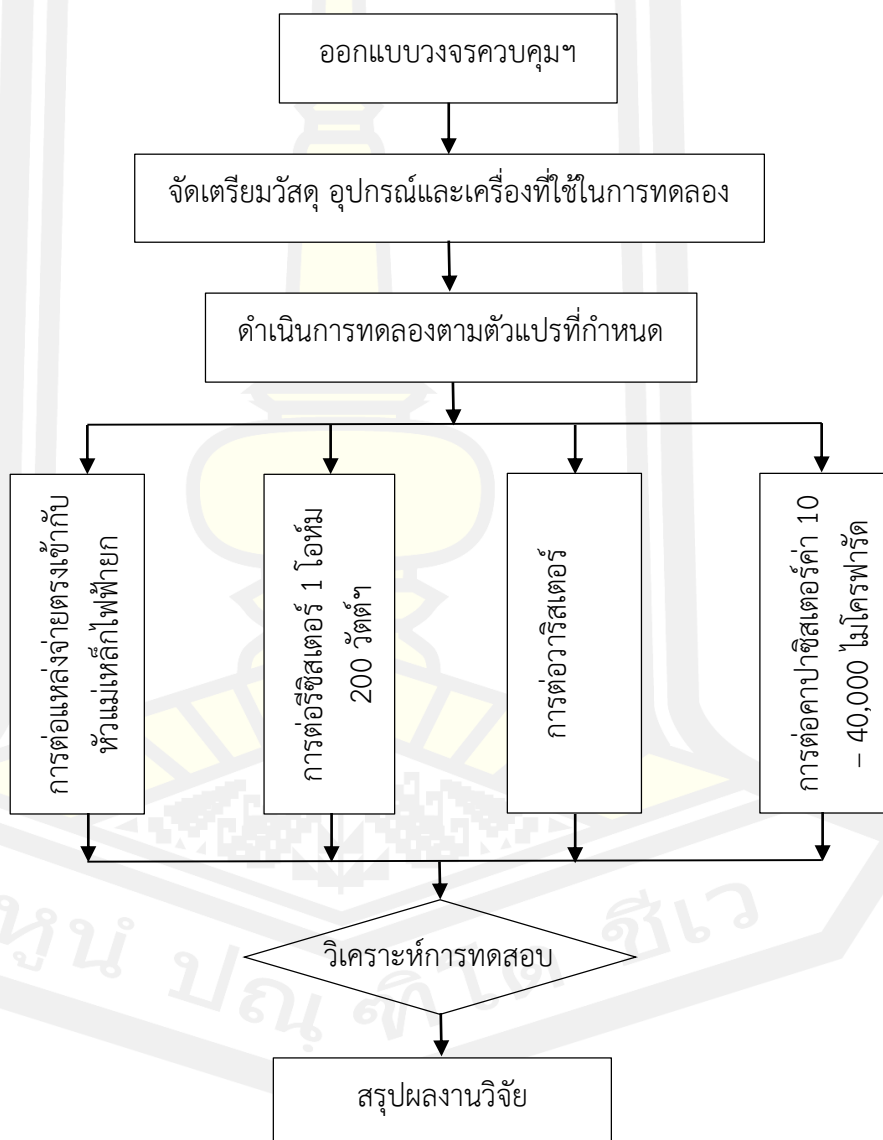
จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการ Demagnetizations นั้นได้ทำการ วิจัยโดยใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่นการผสมโลหะจำพวก Ferrimagnetism เพื่อสร้างrotorและทำการ เปรียบเทียบคุณสมบัติกับแกนโลหะชนิดอื่นและเทคนิคการปรับแต่งสล๊อตและช่องว่างระหว่างโรเตอร์ หรือการนำเทคนิคการเกิดสนามแม่เหล็กไปใช้ในการจัดอิออนธาตุจำพวกโลหะในน้ำประปาและการ หาเทคนิคการควบคุมการเกิด Magnetization และการ Demagnetization ในระบบการลอยตัว

แม่เหล็กไฟฟ้าหรือการศึกษาการดูดกลืนสนามแม่เหล็กในสมองเพื่อสร้างภาพจำลองสมอง จะเห็นจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านเทคนิคการ Demagnetization จะคุณสมบัติของโลหะและการ ควบคุมกระแสไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้คุณสมบัติของตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อศึกษาการเกิด Magnetization และ Demagnetization ในหัวยกแม่เหล็กไฟฟ้าและศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นและ หาประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการ Demagnetization ในหัวแม่เหล็กยกไฟฟ้าซึ่งใน งานวิจัยนี้จะใช้อุปกรณ์เช่นคาปาซิเตอร์, รีซิสเตอร์ และวาริสเตอร์ ในงานทำวิจัยนี้

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ทางผู้ทำวิจัยได้ทำการศึกษาการออกแบบวงจรควบคุมสนามแม่เหล็กที่ใช้กับหัวแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดแกน E เพื่อศึกษาการเกิดสนามแม่เหล็กตกค้างและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเคลื่อนของหัวแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดแกน E ที่มีผลต่อการยึดเกาะของวัสดุโลหะ โดยมีวิธีการดำเนินงานดังนี้ 1) แผนการดำเนินงาน 2) วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 3) ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย และ 4) ตารางบันทึกผลการทดลอง



ภาพประกอบ 33 แผนการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

#### 3.1.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบวงจรสนามแม่เหล็ก ได้แก่ ชุดโลหะที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย เหล็กคาร์บอนต่ำ เหล็กชุบซิงค์ และเหล็กกล้าไร้สนิม มีขนาดความกว้างxยาวxหนา 25.4 x 25.4 x 3 มิลลิเมตร และมีส่วนประกอบทางเคมี ดังแสดงผลในตาราง 6



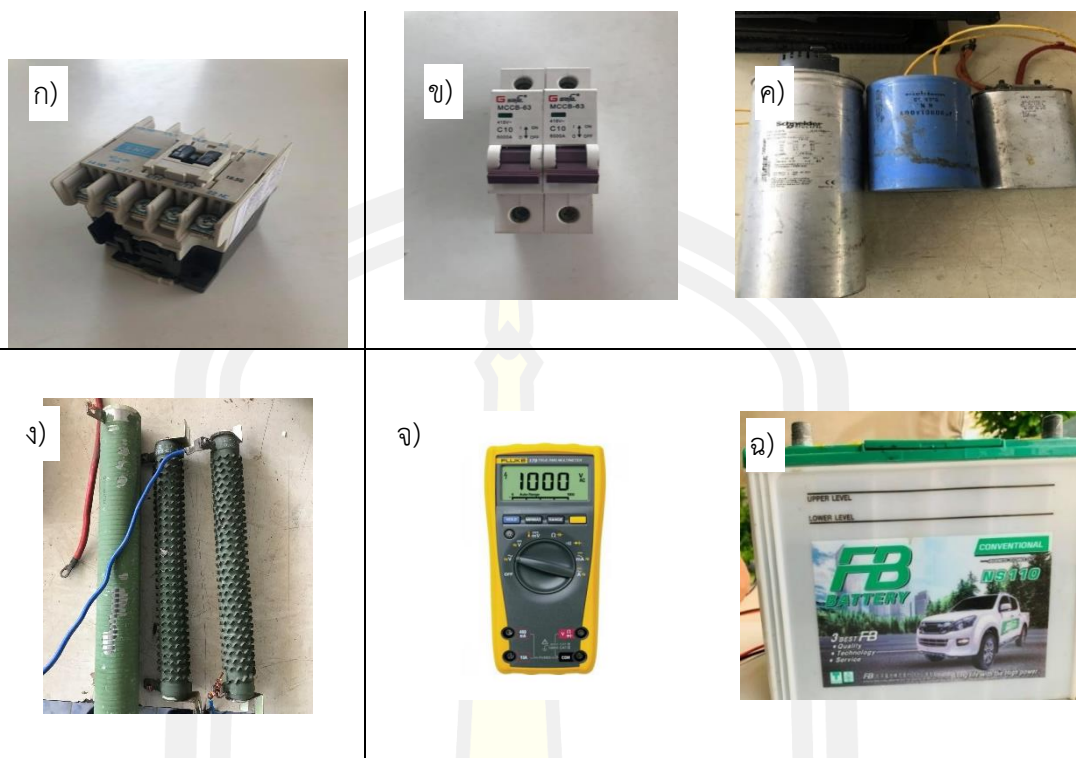
ภาพประกอบ 34 ชิ้นทดสอบที่ใช้ในการยกด้วยหัวแม่เหล็กไฟฟ้า

ตาราง 5 ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นทดสอบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

| วัสดุ | ส่วนประกอบทางเคมี (%) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------|-----------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|       |                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|       |                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|       |                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|       |                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

#### 3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) แมกเนติกคอนแทกเตอร์ (Magnetic Contactor)
- 2) แบตเตอรี่ 12 โวลต์ จำนวน 2 ชุด
- 3) คาปาซิเตอร์ที่มีค่าเก็บประจุ ประกอบด้วย 10, 250, 1,500, 3,600, 10,000 และ 40,000 ไมโครฟารัด
- 4) รีซิสเตอร์ที่มีค่าความต้านทาน ได้แก่ 10 โอห์ม 400 วัตต์, 8 โอห์ม 200 วัตต์ และ 1 โอห์ม 200 วัตต์
- 5) ฟิวส์ ขนาดค่าฟักัดกระแส 30 A
- 6) เซอร์กิตเบรกเกอร์ 50 A
- 7) มัลติมิเตอร์ของ FLUKE
- 8) เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบดิจิตอล Dosimeter
- 9) เวอร์เนียร์คาลิเปอร์แบบดิจิตอลของ Sylvac
- 10) เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่งของ Matter Toledo รุ่นAB204
- 11) เครื่องวัดความหยาบผิวของ Surface Roughness tester รุ่น RST-6100
- 12) เครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของ SPECTROLAB



ภาพประกอบ 35 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

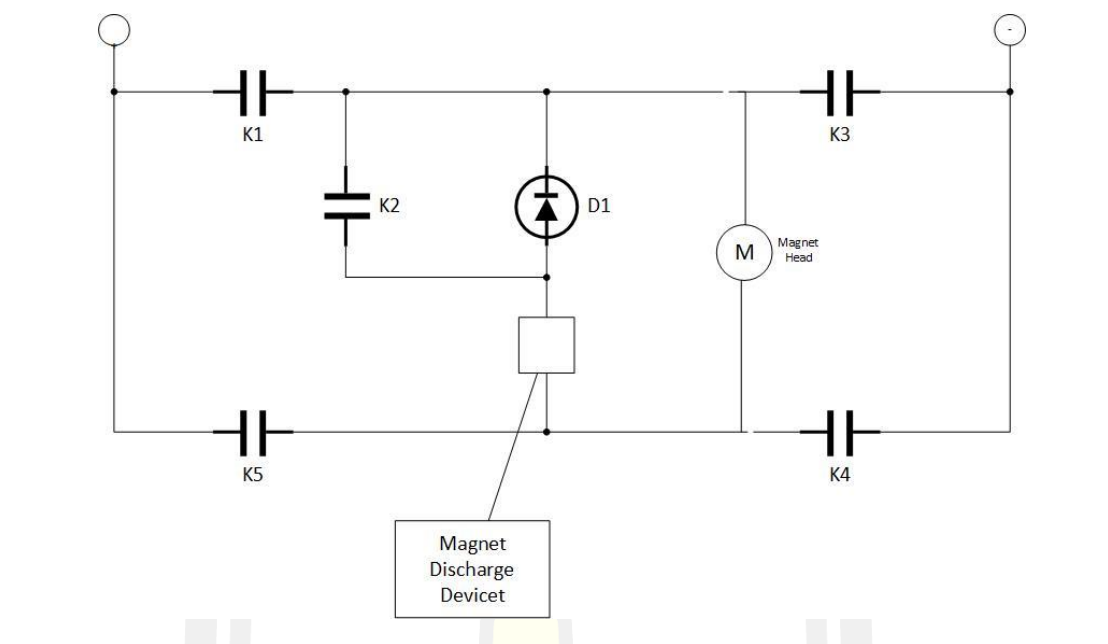
ก) แมคเนติกคอนแทก ข) เซอร์กิตเบรกเกอร์ ค) คาปาซิเตอร์ ง) รีซิสเตอร์ จ) เครื่องวัดแรงดันและกระแส (Digital Multimeter) และ ฉ) แบตเตอรี่ 12 โวลท์

### 3.2 ขั้นตอนการออกแบบ

จากบล็อกไดอะแกรมสามารถอธิบายได้ดังนี้เมื่อกดปุ่ม ON กระแสไฟฟ้าไหลไปยังหัวแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และเมื่อกดปุ่ม OFF ทำให้ไม่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าไหลไปยังแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตกค้างไหลไปยังวงจร Demagnetize Circuit เพื่อทำการขจัดสนามแม่เหล็กตกค้างในหัวแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจร ได้แก่ 2L (Lift Contactor), 1L (Lift Contactor), RFU (Drop Fuse), D1 (Diode), Rect (Rectifier), และ CFU (Control Fuse)

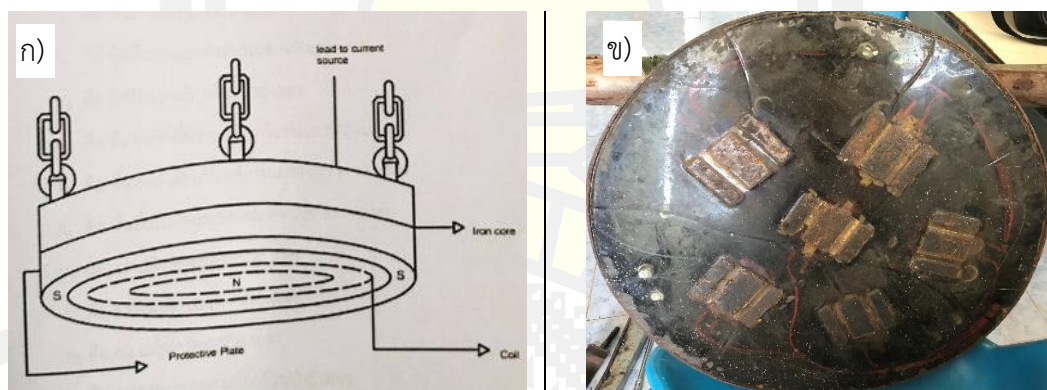


บล็อกไดอะแกรม หลักการทำงานของวงจร

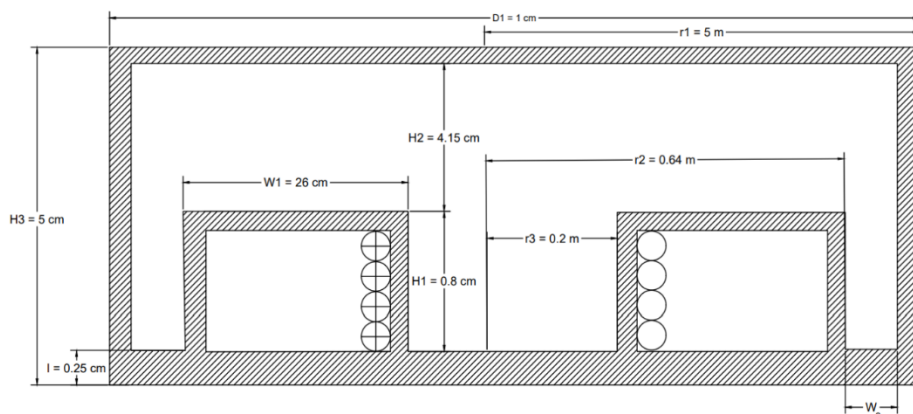


ภาพประกอบ 36 วงจรการทำงาน

สำหรับขั้นตอนในการออกแบบโดยวิธีการศึกษา จะศึกษาข้อมูลจากบทความวิทยานิพนธ์ งานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวกับงานออกแบบการ Demagnetize สนามแม่เหล็กตกค้าง แล้วนำมาประยุกต์ และออกแบบโดยลำดับขั้น



ภาพประกอบ 37 ก) หลักการโครงสร้างหัวแม่เหล็ก และ ข) ชุดหัวยกโลหะด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพประกอบ 38 สัดส่วนต่างๆ ของห้วยกเหล็กด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า

D1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องหน่วย เมตร

r1 คือ รัศมีของเครื่องหน่วย เมตร

r2 คือ รัศมีในของแกนเหล็กวงนอกหน่วย เมตร

r3 คือ รัศมีแกนเหล็กวงในหน่วย เมตร

A1 คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในหน่วย ตารางเมตร

A2 คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอกหน่วย ตารางเมตร

A3 คือ พื้นที่หน้าตัดส่วนร่องสลอตหน่วย ตารางเมตร

H1 คือ ความลึกร่องสลอตหน่วย เมตร

H2 คือ ความสูงแกนเหล็กหน่วย เมตร

H3 คือ ความสูงเครื่องหน่วย เมตร

l คือ ความหนาของแผ่นป้องกันหน่วย เมตร

W1 คือ ความกว้างร่องสลอตหน่วย เมตร

W2 คือ ความกว้างของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก (0.04) เมตร

การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งสามารถคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง } D1 &= \sqrt{\text{น้ำหนักที่ต้องการ (ton)}} \\ &= \sqrt{(1)(\text{ton})} \\ &= 1 \text{ m}\end{aligned}$$

การคำนวณหาขนาดพื้นที่หน้าตัดวงใน A1 และวงนอก A2 ของเครื่องยกของหนัก ด้วยตัวห้วยกแม่เหล็กสนามไฟฟ้า ซึ่งจะต้องมีพื้นที่หน้าตัดที่ใกล้เคียงกัน จะสามารถหาได้จาก สมการดังนี้

$$\text{รัศมีนอกของแกนเหล็กวงนอก } r1 = (D1/2) = (D2/2) = 0.5 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}\text{รัศมีนอกของแกนเหล็กวงนอก } r2 &= r1 - w2 \\ &= 0.5 - 0.04\end{aligned}$$

สามารถคำนวณหารัศมีนอกแกนเหล็กวงใน  $r_3$  ได้จากการหาค่าพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก  $A_2$  โดยใช้ความสัมพันธ์พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในต้องเท่ากับพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก  $A_1$  เท่ากับ  $A_2$  ดังนั้นสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{พื้นที่หน้าตัดรวม } A_5 &= \pi \times (r)^2 \\ &= \pi \times 0.5^2 \\ &= 0.785 \text{ m}^2\end{aligned}$$

พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในรวมพื้นที่หน้าตัดร่องสลอต

$$\begin{aligned}A_4 &= \pi (r_2)^2 \\ &= \pi \times 0.46^2 \\ &= 0.665 \text{ m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก } A_2 &= A_5 - A_4 \\ &= 0.785 - 0.665 \\ &= 0.12 \text{ m}^2\end{aligned}$$

$$\text{รัศมีแกนเหล็กวงใน } r^3 = \sqrt{\frac{A_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{0.12}{\pi}} = 0.2 \text{ m}$$

การคำนวณหาค่า Magnetomotive Force เมื่อได้ค่าของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในและวงนอกแล้วสามารถนำค่าดังกล่าวมาหาค่า Magnetomotive Force (Ni) ได้โดยกำหนดให้ระยะช่องว่างอากาศ  $l_g$  ให้มีค่าเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอวกาศ (Free Space) ( $\mu_0$ ) =  $4 \times \pi \times 10^{-7}$  ดังนั้นสามารถหาค่าความซึมซาบแม่เหล็กได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{ความซึมซาบแม่เหล็ก } \mu_0 &= 4 \times \pi \times 10^{-7} \\ &= 1.25 \times 10^{-6}\end{aligned}$$

. การคำนวณหาขนาดร่องสลอต จำนวนรอบที่พันขดลวดและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ห้วยกเหล็กด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใช้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ (1-1.5 A)

$$\begin{aligned}\text{จำนวนรอบขดลวด } N &= \frac{1593.75}{1} = 1593.75 \approx 1600 \text{ turns} \\ \text{ขนาดลวดตัวนำ} &= \frac{I}{CD} (\text{mm}^2) = 0.5 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

ดังนั้นจากการคำนวณค่าต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาสามารถนำมาออกแบบห้วยกแม่เหล็กสนามไฟฟ้าเพื่อใช้ในการทดสอบได้ดังรูป

ตาราง 6 ตารางกำหนดค่าการทดลอง

| เวลาที่ใช้ในจ่ายแรงดันการทดลอง(นาทื)    | 1, 2, 3, 4, 5 (นาทื)                                                                           |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ค่ารีซิสเตอร์และกำลังวัตต์              | 1 โอห์ม 200 วัตต์, 8 โอห์ม 200 วัตต์, 10 โอห์ม 400 วัตต์                                       |
| ค่าคาปาซิสเตอร์                         | 10 ไมโครฟารัด, 250 ไมโครฟารัด, 1500 ไมโครฟารัด 3600 โวลท์, 10,000 ไมโครฟารัด, 40000 ไมโครฟารัด |
| ค่าวารีสเตอร์                           | เบอร์ 20D821K                                                                                  |
| ประเภทของวัสดุ                          | แผ่นแกนหม้อแปลง, เหล็กกล้าคาร์บอนสูง, เหล็กคาร์บอนต่ำ, เหล็กชุบซิงค์                           |
| น้ำหนักวัตถุที่ใช้ในการทดลอง (กิโลกรัม) | 0.052, 0.069, 0.301, 0.624 และ 1.175 กิโลกรัม                                                  |

### 3.3 วิธีการทดลอง

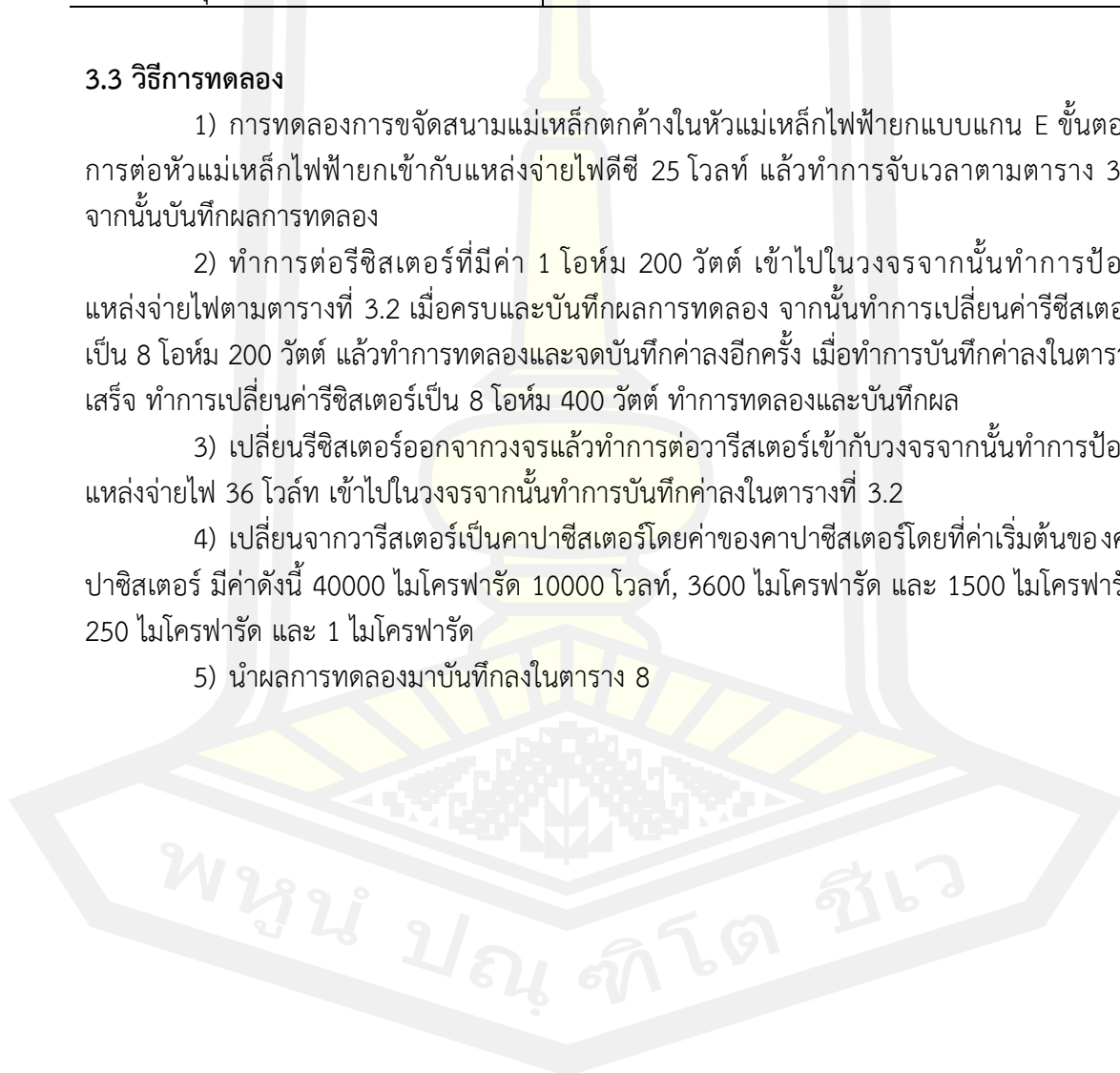
1) การทดลองการขจัดสนามแม่เหล็กตกค้างในหัวแม่เหล็กไฟฟ้ายกแบบแกน E ขั้นตอนการต่อหัวแม่เหล็กไฟฟ้ายกเข้ากับแหล่งจ่ายไฟดีซี 25 โวลท์ แล้วทำการจับเวลาตามตาราง 3.2 จากนั้นบันทึกผลการทดลอง

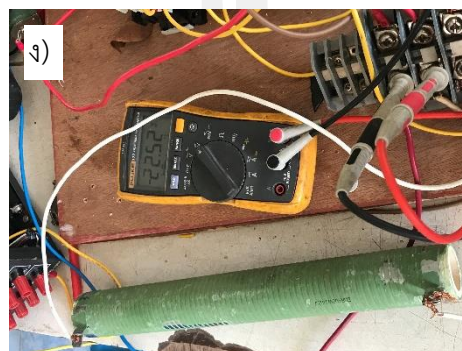
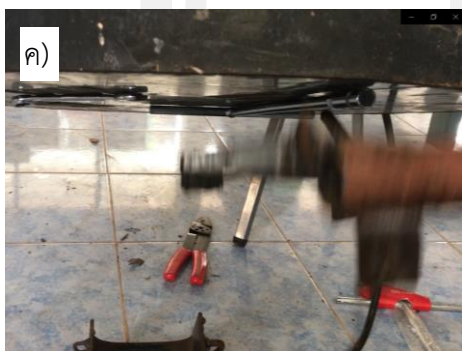
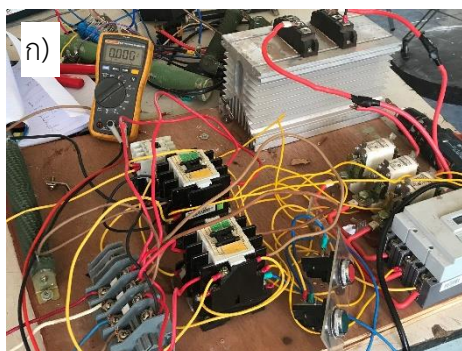
2) ทำการต่อรีซิสเตอร์ที่มีค่า 1 โอห์ม 200 วัตต์ เข้าไปในวงจรจากนั้นทำการป้อนแหล่งจ่ายไฟตามตารางที่ 3.2 เมื่อครบและบันทึกผลการทดลอง จากนั้นทำการเปลี่ยนค่ารีซิสเตอร์เป็น 8 โอห์ม 200 วัตต์ แล้วทำการทดลองและจดบันทึกค่าลงอีกครั้ง เมื่อทำการบันทึกค่าลงในตารางเสร็จ ทำการเปลี่ยนค่ารีซิสเตอร์เป็น 8 โอห์ม 400 วัตต์ ทำการทดลองและบันทึกผล

3) เปลี่ยนรีซิสเตอร์ออกจากวงจรแล้วทำการต่อวารีสเตอร์เข้ากับวงจรจากนั้นทำการป้อนแหล่งจ่ายไฟ 36 โวลท์ เข้าไปในวงจรจากนั้นทำการบันทึกค่าลงในตารางที่ 3.2

4) เปลี่ยนจากวารีสเตอร์เป็นคาปาซิสเตอร์โดยค่าของคาปาซิสเตอร์โดยที่ค่าเริ่มต้นของคาปาซิสเตอร์ มีค่าดังนี้ 40000 ไมโครฟารัด 10000 โวลท์, 3600 ไมโครฟารัด และ 1500 ไมโครฟารัด 250 ไมโครฟารัด และ 1 ไมโครฟารัด

5) นำผลการทดลองมาบันทึกลงในตาราง 8





ภาพประกอบ 39 ขั้นตอนการทดลองงานวิจัย

ก) การต่อวงจรควบคุมสนามแม่เหล็ก ข) ชุดหัวแม่เหล็กไฟฟ้า ค) ลักษณะการคายตัวของสนามแม่เหล็ก เมื่อกดปุ่มหยุด ทำให้ขึ้นทดสอบหลุดออกจากชุดหัวแม่เหล็กไฟฟ้า ง) การวัดค่าแรงดันขณะที่ชุดหัวแม่เหล็กทำงาน

### 3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลโดยทำการทดลอง โดยการออกแบบวงจร Demagnetization โดยการปรับค่าตัวแปรดังต่อไปนี้

1) ผู้วิจัยทำการหาข้อมูลงานวิจัย บทความ วิทยานิพนธ์ ในเรื่องการ Demagnetization จากฐานข้อมูลออนไลน์ ห้องสมุดฐานข้อมูลมหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยมุ่งเน้นในเรื่อง Demagnetization ในหัวแม่เหล็กไฟฟ้าแบบแกน E โดยหัวแม่เหล็กชุดนี้ได้ถูกออกแบบโดยนักศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

2) ผู้วิจัยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลตรวจสอบความถูกต้องของงานทดลอง เพื่อนำผลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลองต่อไป

ตาราง 7 ผลการทดลองการจัดสนามแม่เหล็กตกค้างในหัวแม่เหล็กไฟฟ้าแบบแกน E ภายใต้การต่อวงจรในรูปแบบต่าง ๆ

| ลำดับ<br>ที่ | ตัวแปรในการ<br>ทดลอง                              | น้ำหนักที่ใช้<br>ในการ<br>ทดลอง (Kg.) | ช่วงเวลาที่ใช้ในการเกิด<br>Magnetizations (min) |   |   |   |   |           | หมายเหตุ |
|--------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------|---|---|---|---|-----------|----------|
|              |                                                   |                                       | 1                                               | 2 | 3 | 4 | 5 | $\bar{X}$ |          |
| $S_1$        | การต่อแหล่งจ่าย<br>ตรงเข้ากับหัว<br>แม่เหล็กไฟฟ้า | A                                     |                                                 |   |   |   |   |           |          |
| $S_2$        |                                                   | B                                     |                                                 |   |   |   |   |           |          |
| $S_3$        |                                                   | C                                     |                                                 |   |   |   |   |           |          |
| $S_4$        |                                                   | D                                     |                                                 |   |   |   |   |           |          |
| $S_5$        |                                                   | E                                     |                                                 |   |   |   |   |           |          |

หมายเหตุ ตัวแปรในการทดลอง มีการต่อวงจรควบคุมสนามแม่เหล็ก ดังนี้

- 1) การต่อแหล่งจ่ายตรงเข้ากับหัวแม่เหล็กไฟฟ้า
  - 2) การต่อรีซิสเตอร์ 1 โอห์ม 200 วัตต์
  - 3) การต่อรีซิสเตอร์ 8 โอห์ม 200 วัตต์
  - 4) การต่อรีซิสเตอร์ 10 โอห์ม 400 วัตต์
  - 5) การต่อวาลิสเตอร์
  - 6) การต่อคาปาซิเตอร์ค่า 10, 250, 1,500, 3,600, 10,000 และ 40,000 ไมโครฟารัด
  - 7) การต่อคาปาซิเตอร์ค่า 10 โครฟารัดกับรีซิสเตอร์ค่า 1 โอห์ม 200 วัตต์
- A = แผ่นแกนหม้อแปลง (Laminated Sheet Steel) น้ำหนัก. 0.052 กิโลกรัม  
 B = เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (high carbon steel) น้ำหนัก. 0.069 กิโลกรัม  
 C = เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (high carbon steel) น้ำหนัก. 0.301 กิโลกรัม  
 D = เหล็กคาร์บอนต่ำ (low carbon steel) น้ำหนัก. 0.624 กิโลกรัม  
 E = เหล็กชุบซิงค์ น้ำหนัก. 1.175 กิโลกรัม

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

สำหรับรายละเอียดในบทนี้จะแสดงถึงลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลหลังจากที่ได้วิธีดำเนินการวิจัยแล้วนำไปออกแบบวงจร Demagnetization โดยการปรับค่าตัวแปรตามขั้นตอนที่สร้างขึ้นเป็นลำดับจนได้ผลการทดลองข้อมูลออกมา ซึ่งต้องเป็นไปตามขอบเขตที่กำหนดไว้ซึ่งขั้นตอนที่ทำให้เกิดผลวิเคราะห์ข้อมูลมีดังต่อไปนี้

4.1 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการทดลอง

4.2 ผลการทดลอง

#### 4.1 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการทดลอง

- 1) ยึดตัวห้อยแม่เหล็กด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแขวนกับตัวรับน้ำหนัก
- 2) ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับตัวห้อยแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้า
- 3) ต่อวงจรควบคุมห้อยแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีไฟฟ้ากระแสสลับ
- 4) วางตัวห้อยแม่เหล็กไฟฟ้าให้ดูดชุดโลหะที่ใช้ทำการทดลองก่อนที่จะทำการทดสอบ
- 5) ทำการจับเวลาในการ Demagnetization ของแต่ละช่วงเวลาที่ใช้ในการทดลอง
- 6) บันทึกผลการทดลอง

#### 4.2 รายงานผลการทดลอง

สำหรับผลการทดลองการทำงานของวงจรควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับชุดห้อยแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

4.2.1 จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค Optical Emission Spectroscopy ของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองการคายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถอธิบายผลการทดสอบได้ดังนี้

1) ชิ้นทดสอบที่ 1 เป็นวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 ซึ่งมีส่วนประกอบธาตุดังนี้ เหล็ก(Fe) 71.05%, โครเมียม (Cr) 18.4412%, นิกเกิล (Ni) 8.3292%, และยังมีส่วนผสมอื่น ๆ ดังแสดงในตาราง 6

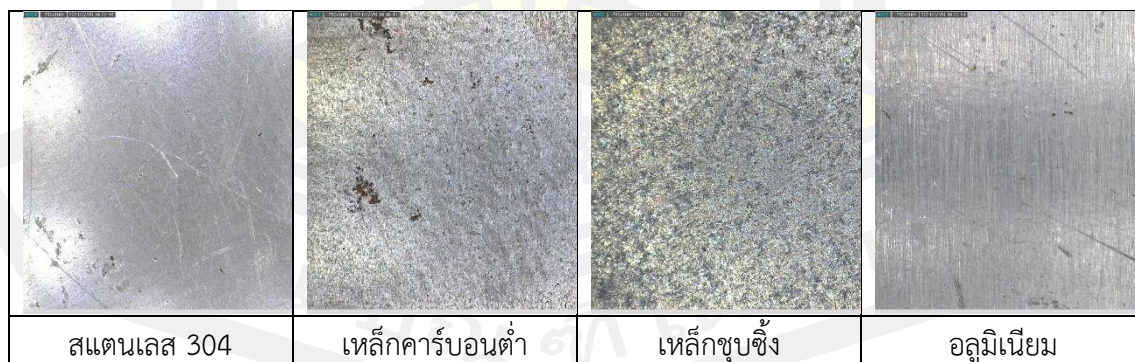
2) ชิ้นทดสอบที่ 2 เป็นวัสดุเหล็กคาร์บอนต่ำ ซึ่งมีส่วนประกอบธาตุดังนี้ เหล็ก (Fe) 99.6746%, คาร์บอน (C) 0.0486%, แมงกานีส (Mn) 0.1361%, ฟอสฟอรัส (P) 0.0062%, ซัลเฟอร์ (S) 0.0054%, และยังมีส่วนผสมอื่น ๆ ดังแสดงในตาราง 6

3) ชิ้นทดสอบที่ 3 เป็นวัสดุเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง เนื่องจากมีส่วนประกอบทางเคมีดังนี้ เหล็ก (Fe) 98.4759%, คาร์บอน (C) 0.1111%, แมงกานีส (Mn) 1.2228%, ฟอสฟอรัส (P) 0.0134%, ซัลเฟอร์ (S) 0.0093%, ซีเรียม (Ce) 0.3249, (C+Mn/6) 0.3149 และยังมีส่วนผสมอื่น ๆ ดังแสดงในตาราง 6

ตาราง 8 แสดงผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค Optical Emission Spectroscopy

| ชิ้นทดสอบ | ส่วนประกอบทางเคมี (%) |        |                |               |               |                |        |         |
|-----------|-----------------------|--------|----------------|---------------|---------------|----------------|--------|---------|
|           | C                     | Si     | Mn             | P             | S             | Cr             | Mo     | Ni      |
| Simple 1  | 0.0346                | 0.4894 | 1.0232         | 0.0448        | 0.0086        | <b>18.4412</b> | 0.0788 | 8.3292  |
| Simple 2  | 0.0486                | 0.0048 | 0.1361         | 0.0062        | 0.0054        | 0.0201         | 0.0018 | 0.0157  |
| Simple 3  | 0.1111                | 0.0077 | 1.2228         | 0.0134        | 0.0093        | 0.0325         | 0.0015 | 0.0142  |
|           | Al                    | Co     | Cu             | Nb            | Ti            | V              | W      | Pb      |
| Simple 1  | 0.0026                | 0.2337 | 0.1583         | 0.0002        | 0.0038        | 0.0404         | 0.0072 | 0.00026 |
| Simple 2  | 0.0374                | 0.0065 | 0.0175         | 0.0012        | 0.0009        | 0.0004         | 0.001  | 0.0002  |
| Simple 3  | 0.0477                | 0.0068 | 0.0305         | 0.0014        | 0.001         | 0.001          | 0.001  | 0.0002  |
|           | Sn                    | Mg     | Zn             | As            | Ca            | Sb             | Ta     | B       |
| Simple 1  | -                     | -      | -              | 0.0023        | 0.0011        | 0.00074        | 0.001  | 0.0001  |
| Simple 2  | 0.0015                | 0.0001 | 0.0163         | -             | -             | -              | -      | 0.0025  |
| Simple 3  | 0.0076                | 0.0001 | 0.0126         | -             | -             | -              | -      | 0.0002  |
|           | N                     | O      | Fe             | CE            | C+Mn/6        | Mn/6           |        |         |
| Simple 1  | 0.0410                | 0.010  | 71.05          | -             | -             | -              |        |         |
| Simple 2  | 0.0022                | -      | <b>99.6746</b> | 0.078         | 0.0713        | 0.023          |        |         |
| Simple 3  | 0.0027                | -      | <b>98.4759</b> | <b>0.3246</b> | <b>0.3149</b> | 0.204          |        |         |

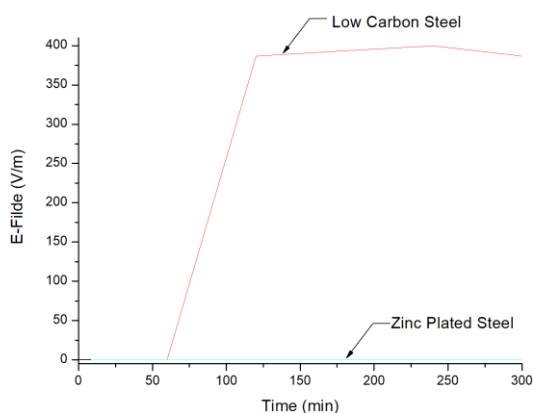
ลักษณะพื้นผิวดิบของชิ้นทดสอบต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองการขจัดสนิมแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกค้าง ซึ่งประกอบด้วย เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบซิงค์ และอลูมิเนียม พบว่ามีค่าความหยาบผิวประมาณ  $Ra = 0.3694 \pm 0.0210$  ไมโครเมตร,  $1.2444 \pm 0.1704$  ไมโครเมตร,  $0.599 \pm 0.0542$  ไมโครเมตร ตามลำดับ และมีลักษณะพื้นผิวชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 46



ภาพประกอบ 40 แสดงพื้นผิวโลหะทดสอบด้วยจุลทรรศน์กำลังขยาย 20X

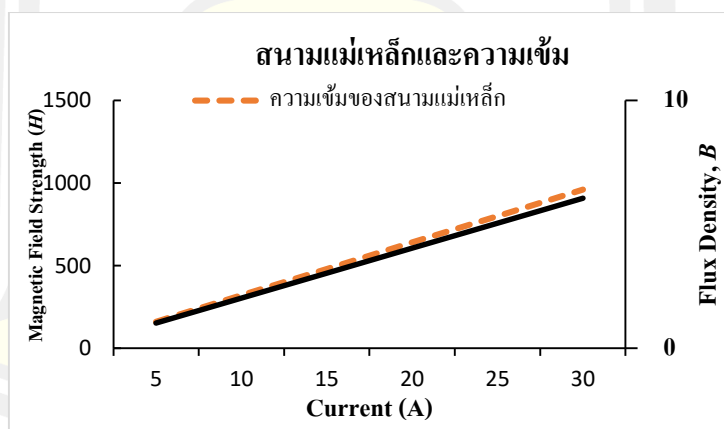
4.2.2 จากการทดลองต่อวงจรควบคุมสนิมแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยการต่อตรงเข้ากับหัวแม่เหล็กไฟฟ้ายก พบว่าชิ้นทดสอบที่เป็นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (เส้นสีแดง) ดังแสดงภาพประกอบที่ภาพ 41 นั้นมีเกิดสถานะสนิมแม่เหล็กไฟฟ้าตกค้างที่มากกว่าเหล็กผ่านการชุบซิงค์ เนื่องจากส่วนประกอบทางเคมีซึ่งมีส่วนประกอบธาตุดังนี้ เหล็ก (Fe) 99.6746%, คาร์บอน (C) 0.0486%,

แมงกานีส (Mn) 0.1361%, ฟอสฟอรัส (P) 0.0062%, ซัลเฟอร์ (S) 0.0054%, ดังแสดงในตาราง 6 เมื่อเทียบกับเหล็กชุบซิงค์ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีเนื่องจากมีส่วนประกอบทางเคมีดังนี้ เหล็ก (Fe) 98.4759%, คาร์บอน (C) 0.1111%, แมงกานีส (Mn) 1.2228%, ฟอสฟอรัส (P) 0.0134%, ซัลเฟอร์ (S) 0.0093%, ซีเรียม (Ce) 0.3249, (C+Mn/6) 0.3149 ดังแสดงในตาราง 6 มีการคายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ชุดหัวแม่เหล็กไฟฟ้าได้ง่ายและดีกว่า ดังแสดงภาพประกอบที่ 4.1

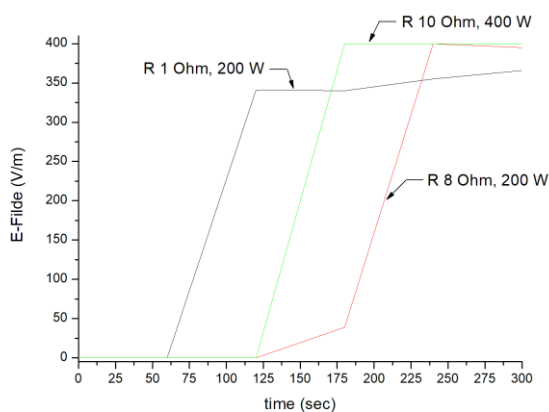


ภาพประกอบ 41 การต่อแหล่งจ่ายตรงเข้ากับหัวแม่เหล็กไฟฟ้ายก

จากการทดลองต่อวงจรควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้เกิดค่าความเข้มข้นแม่เหล็กและค่าฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งแสดงในภาพประกอบที่ 43

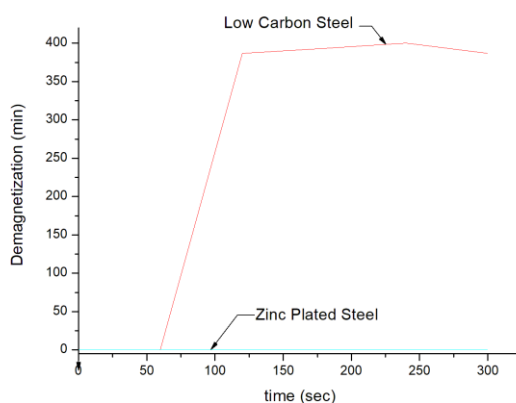


4.2.2 จากการทดลองต่อวงจรควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยรีซิสเตอร์ พบว่าค่าความต้านทาน 1 โอห์ม 200 วัตต์ (เส้นสีดำ) มีการคายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีกว่าค่าความต้านทาน 8 โอห์ม 200 วัตต์ (เส้นสีแดง) และ 10 โอห์ม 400 วัตต์ (เส้นสีเขียว) ดังแสดงภาพประกอบที่ 4.2 เนื่องจากมีค่าความต้านทานที่น้อยกว่าค่าความต้านทานทั้ง 2 ค่า ส่งผลทำให้ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตกค้างภายในชุดหัวแม่เหล็กไฟฟ้าคายตัวได้ดี



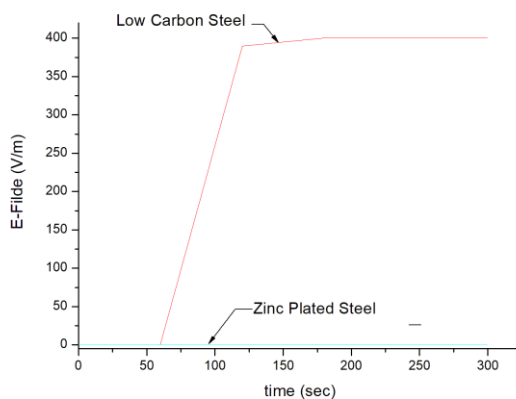
ภาพประกอบ 42 การต่อรีซิสเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

4.2.3 จากการทดลองต่อวงจรควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยการต่อวารีสเตอร์ พบว่าการคายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตกค้างภายในหัวแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อวัสดุเหล็กคาร์บอนต่ำ (เส้นสีแดง) มีผลทดสอบคล้ายกับผลการทดสอบของรีซิสเตอร์ค่า 10 โอห์ม 400 วัตต์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.2 เนื่องจากวารีสเตอร์เป็นค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงค่าตามกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านช่วงขณะ



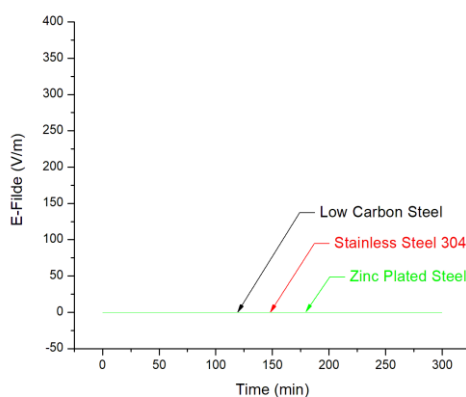
ภาพประกอบ 43 การต่อวารีซิสเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

4.2.4 จากการทดลองต่อวงจรควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยการการต่อคาปาซิสเตอร์ พบว่าการทดลองคาปาซิสเตอร์ที่มีผลต่อการขจัดสนามเหล็กตกค้างที่ต่ำคือค่าที่ 10 ไมโครฟารัด เนื่องจากมีค่าการเก็บประจุที่น้อยทำให้การคายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตกค้างภายในหัวแม่เหล็กไฟฟ้า และคาปาซิสเตอร์ค่าตั้งแต่ 250 ไมโครฟารัดขึ้นไปนั้นสามารถขจัดสนามแม่เหล็กตกค้างในดีค่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตกค้างจึงเป็นศูนย์



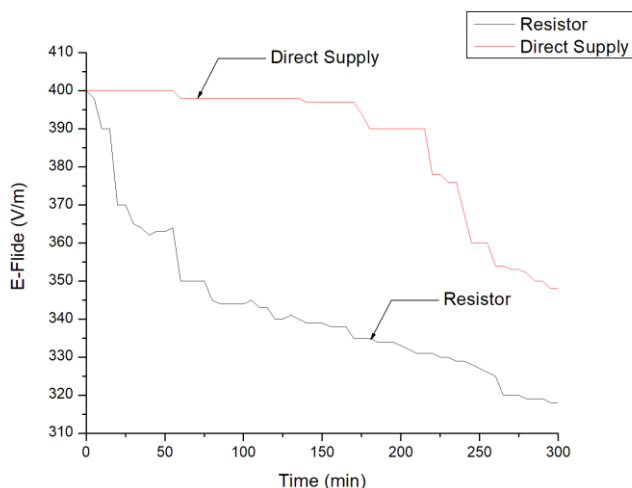
ภาพประกอบ 44 การต่อคาปาซิเตอร์ค่า 10 ไมโครฟารัด

4.2.5 จากการทดลองต่อวงจรควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยการการต่อคาปาซิเตอร์ พบว่าการทดลองคาปาซิเตอร์ที่มีผลต่อการขจัดสนามเหล็กไฟฟ้าตกค้างภายในหัวแม่เหล็กไฟฟ้า นั้นคือคาปาซิเตอร์ค่าตั้งแต่ 250 ไมโครฟารัดขึ้นไปนั้นสามารถขจัดสนามแม่เหล็กตกค้างในดีค่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตกค้างจึงเป็นศูนย์ ซึ่งแสดงให้เห็นจากภาพประกอบ 46



ภาพประกอบ 45 การต่อคาปาซิเตอร์ค่า 250 ไมโครฟารัด

ภาพประกอบ 45 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบการเวลาที่ใช้ในการลดลงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกค้างภายในหัวแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้เหล็กคาร์บอนต่ำที่มีส่วนประกอบทางเคมีเหล็ก (Fe) 99.6746%, คาร์บอน (C) 0.0486%, แมงกานีส (Mn) 0.1361%, ฟอสฟอรัส (P) 0.0062%, ซัลเฟอร์ (S) 0.0054%, จะเห็นได้ว่าการต่อตรงเข้ากับแหล่งจ่ายจะมีสภาวะแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูงและใช้เวลาในการลดลงนาน เมื่อเทียบกับรีซิสเตอร์ค่าต่างๆ



ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงการลดลงของสนามไฟฟ้า

ภาพประกอบ 46 แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาในการลดลงของอำนาจสนามไฟฟ้าตกค้างระหว่างการต่อหัวแม่เหล็กไฟฟ้าเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและการต่อตัวต้านทานเข้ากับหัวแม่เหล็กไฟฟ้า จากภาพจะเห็นได้ว่าการตกค้างของอำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าในการต่อหัวแม่เหล็กไฟฟ้าตรงกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงนั้นต้องใช้ระยะเวลานานกว่าการต่อวงจรด้วยตัวต้านทาน

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการออกแบบวงจรควบคุมสนามแม่เหล็กที่ใช้กับหัวแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดแกน E เพื่อศึกษาการเกิดสนามแม่เหล็กตกค้างภายในหัวแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดแกน E และศึกษาการเกิดสนามแม่เหล็กตกค้างภายในหัวแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดแกน E สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

1) วงจรที่ใช้คาปาซิเตอร์นั้น มีประสิทธิภาพที่ดีในการขจัดสนามไฟฟ้าตกค้างที่ดี เมื่อเทียบกับรีซิสเตอร์และวารีสเตอร์ เพราะสามารถทำให้ค่า Electric field และ Magnetic field เป็นศูนย์ ที่แสดงในผลการทดลองการขจัดสนามแม่เหล็กตกค้าง

2) ชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นวัสดุโลหะประเภทเหล็กคาร์บอนต่ำ ซึ่งเป็นโลหะที่มีส่วนประกอบทางเคมีดังนี้ เหล็ก (Fe) 99.6746%, คาร์บอน (C) 0.0486%, แมงกานีส (Mn) 0.1361%, ฟอสฟอรัส (P) 0.0062%, ซัลเฟอร์ (S) 0.0054%, ซึ่งเป็นกลุ่มของสารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic):ซึ่งมีความเป็นแม่เหล็กค่อนข้างสูง แต่เมื่อเทียบกับเหล็กที่ผ่านการชุบแข็ง ซึ่งมี

ส่วนประกอบทางเคมีดังนี้เป็นวัสดุเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบซึ่ง เนื่องจากมีส่วนประกอบทางเคมีดังนี้ เหล็ก (Fe) 98.4759%, คาร์บอน (C) 0.1111%, แมงกานีส (Mn) 1.2228%, ฟอสฟอรัส (P) 0.0134%, ซัลเฟอร์ (S) 0.0093%, ซีเรียม (Ce) 0.3249, (C+Mn/6) 0.3149 แต่เหล็กชุบซึ่งค้ถึงจะเป็นกลุ่มสารเฟอร์โรแมกเนติก(Ferromagnetic): แต่มีส่วนประกอบที่แตกต่างคือ (C+Mn/6) 0.3149 ทำให้เกิดชั้นระหว่างหัวแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตกค้างที่ชิ้นงานได้น้อย ส่วนชิ้นโลหะทดสอบที่เป็นเป็นวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 ซึ่งมีส่วนประกอบธาตุดังนี้ เหล็ก(Fe) 71.05%, โครเมียม (Cr) 18.4412%, นิกเกิล (Ni) 8.3292%, และยังมีส่วนผสมอื่นๆ ดังแสดงในตาราง 6 นั้นเกิดสภาวะสนามแม่เหล็กได้น้อยกว่าโลหะทดสอบทั้ง 2 ชนิด เนื่องจากมีส่วนประกอบเคมีที่แตกต่างจากชิ้นทดสอบทั้ง 2 ชนิด และยังเป็นโลหะในกลุ่มสารพาราแมกเนติก (Paramagnetic) ได้มีการนำมาทดสอบ ปรากฏว่าไม่สามารถดูดติดกับหัวแม่เหล็กไฟฟ้าได้

## 5.2 อภิปรายผล

5.2.1 หัวแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายไฟให้กับวงจรหัวแม่เหล็กไฟฟ้าในด้านเดียวจะทำให้เกิดความร้อนสูงที่หัวแม่เหล็กไฟฟ้าควรทำการสลับแหล่งจ่าย เพื่อกลับโดเมนของขดลวดและแกนของหัวแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อลดการเกิดความร้อนจากการได้รับพลังงาน

5.2.2 ค่าความต้านทานที่เหมาะสมสำหรับหัวแม่เหล็กไฟฟ้าชุดนี้คือค่า 1 โอห์ม และควรมีวัตต์ที่สูงเพื่อสามารถขจัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตกค้างที่ดี

5.2.3 ค่าคาปาซิเตอร์ที่สามารถทำการที่ดีคือค่าตั้งแต่ 250 ไมโครฟารัด ซึ่งจากการทดลองสามารถทำให้ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นศูนย์

บรรณานุกรม



พูน ปณ จิต ชีเว

## บรรณานุกรม

- กิตติภัทร พลุเอม. (2561). DISCRETE TIME POSICAST PIDx( 2) n – STAGE PD CASCADE
- จิระศักดิ์ วงศา. (2557). INNOVATIVE OF INDUCTION HEATING.วารสารวิชาการมหาวิทยาลัย  
ธนบุรี, 111
- นพวงศ์ นุตาคี. (2556). *Analysis of Electromagnetic Forces in Distribution Transformer  
Caused by External Fault.* (Master of Engineering EngineeringMaster of  
Engineering). Rajamangala University of Technology Thanyaburi,
- สุวัฒน์ รอดผล. (2547). หลักการจักรกลไฟฟ้า เล่ม 1. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระ  
นครเหนือ.
- อริยศักดิ์ จิตธรรมสาร. (2555). *DISTRIBUTION TRANSFORMER CORE DESIGN  
TO REDUCE CORE LOSS BY USING 3-D FINITE ELEMENT METHOD.* (Master of  
Engineering in Electrical Engineering). Suranaree University of Technology
- Davey, K. (2004). New Electromagnetic Lift Control Method for  
Magnetic Levitation Systems and Magnetic Bearings. *IEEE TRANSACTIONS ON  
MAGNETICS*, , NO. 3, MAY 2004, VOL. 40,, 1617.
- Eastha, D. L. A. a. A. R. (19'74). LIMITATIONS OF LEVITATION BY IRON-CORED  
ELECTROMAGNETS\*. *Manuscript received by IEEE, April 6th, 1974*, 410.
- Ghalamestani, L. V. a. S. G. (2014). Magnetic forces and stresses in ferromagnetic  
material. *Electrical Energy Laboratory (EELAB), Department of Electrical  
Energy, Systems and Automation.*
- <https://www.eclipsemagnetics.com/products/lifting-and-handling/>.
- Janocha, P. D.-I. h. H. ( 2004 ). *Actuators Basics and Applications*
- Kim, H.-K. (2015). Magnetic Field Analysis of Irreversible Demagnetization  
in Brushless DC Motor According to the  
Dynamic and Static Characteristic. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 51, NO.  
11, NOVEMBER 2015.

- Li Gang, W. K., Zhang Shuqi, Liu Xueli, Li Jinzhong, Yu Xinru, Ding Guocheng. (2019). Comparisons of the AC and DC Magnetization Characteristics of Transformer Models with Single-Phase Four-Limb Core Composed of Different Grades of Steel Sheets. *2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 2084-2089.
- Papachristou, C. J. (2020). *Introduction to Electromagnetic Theory and the Physics of Conducting Solids*: Springer.
- Sjökvis, S. (2014). *Demagnetization Studies on Permanent Magnets*. Uppsala University,
- Thongsri, M. C. (2016). *four Point Magnetic Levitation for Stabilization of plane*. (Master of Engineering Engineering). Rajamangala University of Technology Thanyaburi),
- Tiwitmahaisoon, A. (2001). *REMOVAL OF IONS FROM WELL WATER BY USING ELECTROMAGNETIC AND ELECTROSTATIC FIELDS*. (Master of Engineering Engineering). Suranaree University of Technology,
- Turowski, A. S. (1987). *Electromagnetic Fields in Electrical Engineering*.  
doi:<https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0721-1>
- William D. Callister, J., David G. Rethwisch. (2010). *Materials science and engineering: an introduction -8th ed.* (Vol. 8). United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Yue Zhang 1, S. M. ( 2018). Electromagnetic Loss Modeling and Demagnetization Analysis for High Speed Permanent Magnet Machine. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 54, NO. 3, MARCH 2018.
- CONTROLLERS FOR UNSTABLE SYSTEM. KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG,

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ กฤษดา สิริธิดา

วันเกิด 19 กันยายน 2526

สถานที่เกิด อำเภอเมือง จังหวัด นครพนม

สถานที่อยู่ปัจจุบัน 39 หมู่ 8 ตำบลดงขวาง อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม 48000

ตำแหน่งหน้าที่การงาน -

สถานที่ทำงานปัจจุบัน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม 214 หมู่ 12 ตำบลหนองญาติ อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม 48000

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2539 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนบ้านนาคอกควาย  
จังหวัดนครพนม

พ.ศ. 2544 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นต้น (ปวช.) สาขาอิเล็กทรอนิกส์  
วิทยาลัยเทคนิคนครพนม จังหวัดนครพนม

พ.ศ. 2547 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาเทคนิค  
คอมพิวเตอร์ วิทยาลัยเทคนิค จังหวัดนครพนม

พ.ศ. 2549 ปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (อศ.บ.)  
สาขาไฟฟ้ากำลัง  
มหาวิทยาลัยสยาม กรุงเทพมหานคร

พ.ศ. 2564 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.)  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์มหาวิทยาลัย  
มหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม

พูน ปณ จิต ชีวะ