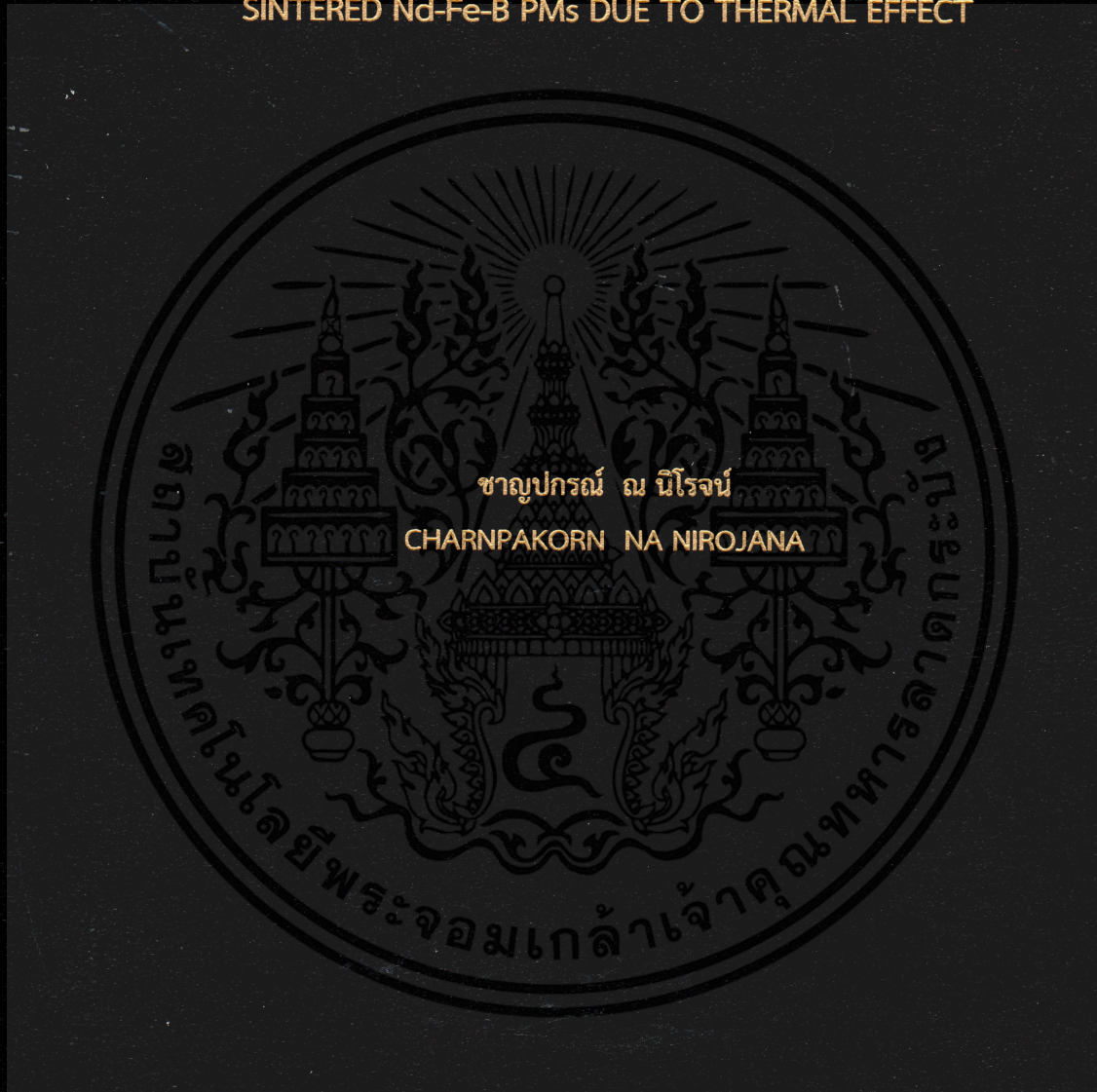


การศึกษาคูณลักษณะการลดและกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร
ชนิด Sintered Nd-Fe-B เนื่องจากผลของความร้อน

A STUDY OF DEMAGNETIZING AND MAGNETIZING CHARACTERISTICS OF
SINTERED Nd-Fe-B PMs DUE TO THERMAL EFFECT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-020-172

การศึกษาคุณลักษณะการลดและกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร
ชนิด Sintered Nd-Fe-B เนื่องจากผลของความร้อน

A Study of Demagnetizing and Magnetizing Characteristics of Sintered
Nd-Fe-B PMs due to Thermal Effect



ชาญปกรณ์ ณ นิโรจน์
CHARNPAKORN NA NIROJANA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-020-172

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study of Demagnetizing and Magnetizing Characteristics of Sintered
Nd-Fe-B PMs due to Thermal Effect



CHANPAKORN NA NIROJANA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018
KMITL-2018-EN-M-020-172

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณลักษณะการลดและกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B เนื่องจากผลของความร้อน
นักศึกษา	นายชาญปกรณ์ ณ นิโรจน์
รหัสประจำตัว	59601160
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกษ์พฤษ

บทคัดย่อ

การนำแม่เหล็กถาวรมาใช้งานในเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้รับความแพร่หลายในปัจจุบัน เพราะจะทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามแม่เหล็กถาวรยังมีข้อเสียคือสามารถถูกลดคุณลักษณะความเป็นแม่เหล็กได้เนื่องจากผลกระทบจากการใช้งาน ซึ่งผลกระทบที่สำคัญที่สุดคือผลจากความร้อน เพื่อให้การนำแม่เหล็กถาวรมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาคุณลักษณะการลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH ที่เกิดจากความร้อน และการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรที่ถูกลดความเป็นแม่เหล็กเหล่านี้ ในการศึกษาการลดความเป็นแม่เหล็กด้วยผลของความร้อนจะทำการจำลองการลดความเป็นแม่เหล็กด้วยเครื่องอบร้อน ณ อุณหภูมิต่าง ๆ โดยพิจารณาจากอุณหภูมิใช้งานสูงสุดและอุณหภูมิควีรีของแม่เหล็กถาวร จากนั้นนำมาวัดความเป็นแม่เหล็กที่หลงเหลือด้วยวงจรมแม่เหล็กที่สามารถปรับช่องว่างอากาศได้ ผลของการศึกษาแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ทำการทดสอบ และการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กมากที่สุดที่เกิดขึ้นได้ คือจะหลงเหลือความเป็นแม่เหล็กประมาณร้อยละ 2 จากค่าตั้งต้น ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียส สำหรับการศึกษาการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร ได้ทำการออกแบบและสร้างวงจรรกระตุ้นอย่างง่ายที่สามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟเป็นตามกราฟคุณลักษณะแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH ที่ต้องการได้ เมื่อทำการกระตุ้นแม่เหล็กถาวรด้วยวงจรรกระตุ้นอย่างง่ายที่ได้นำเสนอนี้ให้กับแม่เหล็กถาวรที่ถูกลดสภาพความเป็นแม่เหล็กจะพบว่า เมื่อแม่เหล็กถาวรเกิดการเสื่อมสภาพความเป็นแม่เหล็กจะสามารถนำมาทำการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความเป็นแม่เหล็กได้ และการกระตุ้นจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อกระตุ้นแม่เหล็กถาวรที่มีความสูญเสียแม่เหล็กมากที่สุดด้วยความเข้มสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่เป็นไปตามที่ต้องการ จะทำให้มีคุณลักษณะความเป็นแม่เหล็กกลับมาเหมือนดังค่าความเป็นแม่เหล็กตั้งต้นได้

Thesis	A Study of Demagnetizing and Magnetizing Characteristics of Sintered Nd-Fe-B PMs due to Thermal Effect
Student	Mr. Champakorn Na Nirojana
Student ID	59601160
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Piampoom Sarikprueck

Abstracts

Using Permanent Magnets (PMs) in electrical machines has been paid more attention over the past few years. This is because using PMs effectively helps improve the electrical machines efficiency. However, these PMs have a disadvantage which is a demagnetization issue. One of the most significant demagnetization issues is a thermal effect. In order to use the PMs in electrical machines effectively, this thesis therefore proposes the study of demagnetizing and magnetizing characteristics of sintered Nd-Fe-B PM due to thermal effect. As for the demagnetizing part, an electric oven is employed for heating the tested PM in various temperatures considering its maximum working and curie temperatures. After that, the tested PM is measured the residual magnetic flux density in an adjustable air-gap magnetic circuit. According to the result, it can be clearly found that the demagnetizing PM is based on the tested temperature and time. The most demagnetized PM can be reduced to 2 % compared to the initial characteristics tested at more than 300 degree Celsius. For the magnetizing part, a simple magnetizing circuit is designed and built. This proposed magnetizing circuit is able to simply magnetize the sintered Nd-Fe-B PM at the requirement level based on its characteristics. As applying the magnetization to the abovementioned demagnetized PMs, it can be obviously found that these demagnetized PMs can be regained their PM characteristics. In addition and very importantly, only the most demagnetized PM is able to regain its initial characteristics magnetized with the magnetic field intensity as its requirement level.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ และ รศ. พิชิต ล้ายอง อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ด้วยการชี้แนะ คำปรึกษาและการเอาใจใส่ช่วยเหลือแก้ปัญหาให้อุปสรรคที่เกิดขึ้นคลี่คลายผ่านไปได้อย่างราบรื่น ทำให้การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี นอกจากนี้ทางด้านวิชาการแล้วยังได้แนะแนวทางการใช้ชีวิตอย่างไรให้มีความสุขต่อไป

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Electrical Machine Research Laboratory : EMRL) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นสถานที่ในการทำงานวิจัย เรียนรู้ และฝึกฝนทักษะที่สามารถนำไปต่อยอดได้ต่อไปในอนาคตได้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ชาญปกรณ์ ณ นิโรจน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	5
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.2.1 สารแม่เหล็ก.....	10
2.2.2 โดเมนแม่เหล็ก.....	12
2.2.3 การกระตุ้นความเป็นแม่เหล็ก.....	13
2.2.4 การสูญเสียความเป็นแม่เหล็ก.....	14
2.2.5 วงจรแม่เหล็ก.....	15
2.2.6 กฎของแอมแปร์.....	17
2.2.7 กฎของเลนซ์.....	18
บทที่ 3 การศึกษาคุณลักษณะการลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร ชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH เนื่องจากผลของความร้อน.....	20
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	21
3.1.1 การทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน.....	21

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.2 การทดสอบบวจรแม่เหล็กที่นำมาใช้ในการทดสอบ.....	23
3.2 การสอบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3.3 การทดสอบบวจรแม่เหล็กที่นำมาใช้ในการทดสอบ.....	27
3.4 การทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน.....	28
3.5 สรุปผลการทดลอง.....	29
บทที่ 4 การออกแบบและจัดสร้างวงจรกระตุ้นแม่เหล็กอย่างง่าย.....	31
4.1 การออกแบบวงจรกระตุ้น.....	31
4.1.1 รูปแบบวงจรที่ใช้ในการออกแบบ.....	31
4.1.2 วิธีการวัดผลลัพธ์ของการกระตุ้น.....	32
4.1.3 การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการกระตุ้นด้วยโปรแกรม MATLAB.....	33
4.1.4 การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุภายในวงจร.....	34
4.1.4.1 การคำนวณหาค่าพลังงานของแม่เหล็กถาวร.....	34
4.1.4.2 การคำนวณหาขนาดของตัวเก็บประจุ.....	34
4.2 การสร้างวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็ก.....	35
4.2.1 การสร้างขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1.....	36
4.2.2 การทดสอบบวจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1.....	37
4.3 การสร้างและทดสอบขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2.....	45
4.3.1 การสร้างขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2.....	45
4.3.2 การทดสอบบวจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2.....	48
4.4 สรุป.....	51
บทที่ 5 การศึกษาคุณลักษณะการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กให้แก่แม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH ที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน.....	54
5.1 การออกแบบการทดลอง.....	54
5.2 การลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กตัวอย่าง.....	56

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.3 การทดลองการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กให้แก่แม่เหล็กถาวรที่สูญเสียความ เป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน.....	57
5.4 สรุปผลการทดลอง.....	60
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	61
6.1 การศึกษาคุณลักษณะการลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรเนื่องจากผล ของความร้อน.....	61
6.2 การออกแบบและจัดสร้างวงจรกระตุ้นแม่เหล็กอย่างง่าย.....	63
6.3 การศึกษาคุณลักษณะการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กให้แก่แม่เหล็กถาวรที่ สูญเสียความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน.....	64
6.4 ข้อเสนอแนะของงานวิจัย.....	65
เอกสารอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ก.....	69
ภาคผนวก ข.....	82
ประวัติผู้เขียน.....	87

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 Curie temperature ของสารแม่เหล็กต่าง ๆ.....	15
3.1 ค่าของอุณหภูมิเครื่องอบร้อนที่ได้จากหน้าจอดิจิทัลและเครื่องวัดอุณหภูมิ.....	26
4.1 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของวงจรถะตุ้น ความเป็นแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ที่มีตัวเก็บประจุขนาด 40 มิลลิฟาร์ัดและใช้ระดับแรงดันกระตุ้น 300 โวลต์.....	39
4.2 ตารางค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากวงจรถะ ตุ้นสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ที่มีขนาดของตัวเก็บประจุที่แตกต่างกัน โดยที่ใช้ระดับแรงดันกระตุ้น 300 โวลต์.....	42
4.3 ผลการลดระดับแรงดันในการกระตุ้นด้วยการเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุ โดยที่ สนามแม่เหล็กกระตุ้นมีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงกว่า 2000 kA/m.....	43
4.4 ตารางค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากวงจรถะ ตุ้นความเป็นแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ด้วยระดับแรงดัน กระตุ้นที่แตกต่างกัน.....	44
4.5 ตารางค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากวงจรถะ ตุ้นความเป็นแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 ด้วยระดับแรงดัน กระตุ้นที่แตกต่างกัน.....	50
4.6 ข้อดี-ข้อเสียของวิธีกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กที่ได้นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ กระตุ้นความเป็นแม่เหล็กต่าง ๆ ที่ได้ทำการศึกษา.....	52

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปร่างกราฟคุณลักษณะทางแม่เหล็กของสารแม่เหล็กกลุ่ม Ferromagnetic.....	11
2.2 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นแม่เหล็กโคเออซีฟ (H_c) ของสารแม่เหล็กที่มีตั้งแต่เริ่มมีการใช้งานแม่เหล็กจนถึงช่วงศตวรรษที่ 20	11
2.3 โมเดลการเกิดโมเมนต์แม่เหล็กที่ได้จากทฤษฎีควอนตัม.....	12
2.4 (บน) ก้อนแม่เหล็กที่มีโดเมนแม่เหล็กกระจายตัวเป็นผลให้แม่เหล็กไม่แสดงอำนาจทางแม่เหล็กออกมา (ล่าง) ก้อนแม่เหล็กที่มีโดเมนแม่เหล็กภายในเรียงตัวไปในทางเดียวกันเป็นผลให้แม่เหล็กแสดงอำนาจทางแม่เหล็กออกมาได้สูงสุด.....	13
2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรและความเข้มข้นแม่เหล็กกระตุ้น.....	14
2.6 (ซ้าย) วงจรแม่เหล็กแบบอนุกรม (ขวา) วงจรสมมูลของวงจรแม่เหล็กแบบอนุกรม....	16
2.7 ขดลวดตัวนำที่มีความสูง d เมตร พันจำนวน N รอบถูกป้อนด้วยกระแสไฟฟ้า I ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้ม H	18
2.8 วงจรแม่เหล็กที่มีสนามแม่เหล็กไม่คงที่.....	19
3.1 แม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH.....	20
3.2 คุณลักษณะความสัมพันธ์ของ B-H ของแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH.....	20
3.3 กระบวนการในการทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน.....	21
3.4 วงจรแม่เหล็กที่ใช้แกนเหล็กแบบปรับความกว้างของช่องว่างอากาศได้.....	22
3.5 (ซ้าย) การปรับตั้งศูนย์ (ขวา) การสอบเทียบแม่เหล็กมาตรฐาน 1000G.....	22
3.6 (ซ้าย) เครื่องอบร้อนที่ควบคุมความร้อนด้วยระบบ PI (ขวา) เครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐาน Fluke 65 Infrared Thermometer	23
3.7 ผลการสอบเทียบอุณหภูมิระหว่างเครื่องอบร้อนและเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐานที่อุณหภูมิปรับตั้ง 100 องศาเซลเซียส.....	24
3.8 ผลการสอบเทียบอุณหภูมิระหว่างเครื่องอบร้อนและเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐานที่อุณหภูมิปรับตั้ง 140 องศาเซลเซียส.....	24
3.9 ผลการสอบเทียบอุณหภูมิระหว่างเครื่องอบร้อนและเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐานที่อุณหภูมิปรับตั้ง 180 องศาเซลเซียส.....	25
3.10 ผลการสอบเทียบอุณหภูมิระหว่างเครื่องอบร้อนและเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐานที่อุณหภูมิปรับตั้ง 220 องศาเซลเซียส.....	25

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 ผลการสอบเทียบอุณหภูมิระหว่างเครื่องอบร้อนและเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐาน ที่อุณหภูมิปรับตั้ง 260 องศาเซลเซียส.....	25
3.12 ผลการสอบเทียบอุณหภูมิระหว่างเครื่องอบร้อนและเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐาน ที่อุณหภูมิปรับตั้ง 300 องศาเซลเซียส.....	26
3.13 ผลการสอบเทียบอุณหภูมิระหว่างเครื่องอบร้อนและเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐาน ที่อุณหภูมิปรับตั้ง 340 องศาเซลเซียส.....	26
3.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะช่องว่างอากาศกับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ ช่องว่างอากาศ.....	27
3.15 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ.....	29
4.1 รูปแบบของวงจรกระตุ้นแม่เหล็กอย่างง่าย.....	31
4.2 รูปแบบการวัดค่าสำหรับวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็ก.....	32
4.3 ขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 แกนอากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว การพัน 25 รอบ และมีความสูง 8 เซนติเมตร.....	37
4.4 ผลลัพธ์ของการกระตุ้นขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ด้วยตัวเก็บประจุขนาด 40 มิลลิ ฟาร์รัต ณ ระดับแรงดัน 300 โวลต์.....	38
4.5 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB ของการกระตุ้นขดลวดกระตุ้น รูปแบบที่ 1 ด้วยตัวเก็บประจุขนาด 40 มิลลิฟาร์รัต ณ ระดับแรงดัน 300 โวลต์.....	39
4.6 ผลลัพธ์ของการกระตุ้นขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ด้วยตัวเก็บประจุขนาด 280 มิลลิ ฟาร์รัต ณ ระดับแรงดัน 300 โวลต์.....	41
4.7 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB ของการกระตุ้นขดลวดกระตุ้น รูปแบบที่ 1 ด้วยตัวเก็บประจุขนาด 280 มิลลิฟาร์รัต ณ ระดับแรงดัน 300 โวลต์.....	42
4.8 ค่าความต้านทานของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ที่มีค่า 91.4 มิลลิโอห์ม.....	45
4.9 ขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 แกนอากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว การพัน 25 รอบ และมีความสูง 4 เซนติเมตร.....	47
4.10 ค่าความต้านทานของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 มีค่า 75.1 มิลลิโอห์ม.....	48
4.11 ผลของการกระตุ้นขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 ด้วยตัวเก็บประจุขนาด 470 มิลลิฟาร์ รัต ณ ระดับแรงดัน 200 โวลต์.....	49
4.12 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การกระตุ้นขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 ด้วยตัวเก็บ ประจุขนาด 470 มิลลิฟาร์รัต ณ ระดับแรงดัน 200 โวลต์.....	49

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 วงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง.....	55
5.2 กราฟความสัมพันธ์ของความเป็นแม่เหล็กที่หลงเหลือกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ โดยที่ ใช้เวลา 1 ชั่วโมงในการอบแม่เหล็กถาวร.....	56
5.3 ผลลัพธ์การเพิ่มความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กตัวอย่างที่มีความเป็นแม่เหล็กตั้งต้น ร้อยละ 2 ด้วยสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่ความเข้มต่าง ๆ.....	57
5.4 กราฟผลลัพธ์ของการเพิ่มความเป็นแม่เหล็กที่ได้จากการกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็ก กระตุ้นที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กกระตุ้นแตกต่างกัน.....	58



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องจักรกลไฟฟ้าถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าสำรอง มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนสายพานมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนโพล์คลิฟท์ และมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้า เป็นต้น สำหรับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าสำรองในอดีตจะนิยมใช้งาน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขดลวดกระตุ้นแยก ซึ่งจะต้องมีชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดกระตุ้นสนามแม่เหล็กนี้ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหล่านี้ ในปัจจุบันได้มีความนิยมนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Generator : PMSG) มาใช้งานอย่างแพร่หลายมากยิ่งขึ้น โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จะใช้แม่เหล็กถาวรเข้ามาใช้งานในการสร้างสนามแม่เหล็กของฝั่งโรเตอร์แทนการใช้ขดลวดในการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ทำให้การสูญเสียที่เกิดจากขดลวดนี้หายไป ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จึงสูงขึ้น

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในปัจจุบัน คือ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction motor) และ มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous motor) โดยจุดเด่นของการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อนของพาหนะ คือ ในการใช้งานพาหนะนั้นจะปลอดภัยที่เกิดจากการเผาไหม้ทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่การใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อนพาหนะนั้นมีข้อจำกัดจากพลังงานที่แบตเตอรี่เก็บได้นั้นจะน้อยเมื่อเทียบกับขนาดของแบตเตอรี่ที่นำมาใช้งาน ทำให้ในการใช้งานจำเป็นต้องใช้พลังงานที่อยู่อย่างจำกัดนี้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด หนึ่งในวิธีการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด คือ การเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบประสิทธิภาพสูง

หนึ่งในมอเตอร์ไฟฟ้าแบบประสิทธิภาพสูงที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานเป็นตัวขับเคลื่อนพาหนะ คือ มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motor : PMSM) ซึ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ

สำหรับแม่เหล็กที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานใน PMSG และ PMSM นั้นจะเป็นสารแม่เหล็กในกลุ่ม Hard Magnet ซึ่งเป็นแม่เหล็กที่มี BH curve ที่มีรูปร่างใกล้เคียงสี่เหลี่ยม ทำให้เมื่อได้รับการกระตุ้นจากสนามแม่เหล็กภายนอกแล้วจะทำให้เกิดความเป็นแม่เหล็กขึ้น ถึงแม้สนามแม่เหล็กกระตุ้น

ภายนอกจะหายไปแต่ความเป็นแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะยังคงอยู่ต่อไป ปัจจุบันสารแม่เหล็กในกลุ่ม Hard Magnet ที่มีค่าพลังงานต่อปริมาตรสูงสุด คือ Nd-Fe-B ซึ่งมีค่าพลังงานต่อปริมาตรอยู่ที่ $400-500 \text{ kJ/m}^3$

ปัญหาสำคัญของการนำแม่เหล็กถาวรมาใช้งานในมอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องจักรกลไฟฟ้าคือการลดความเป็นแม่เหล็กที่สามารถเกิดขึ้นได้จากหลาย ๆ สาเหตุ แต่สาเหตุหลักที่เกิดขึ้นจากการใช้งานเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นจะเกิดจากความร้อนของการใช้งาน เนื่องจากอุณหภูมิภายในขณะใช้งานที่พิกัดโหลดนั้นจะสูงถึง 120-140 องศาเซลเซียส เมื่อเกิดการลดความเป็นแม่เหล็กจะทำให้ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและกำลังขาออกของเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นลดลง และเมื่อเกิดอุบัติเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายจากการเผาไหม้ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิของแม่เหล็กถาวรสูงเกินกว่า Curie Temperature จะทำให้แม่เหล็กสูญเสียความเป็นแม่เหล็กไป

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นจึงได้เกิดคำถามตามมาที่ว่า อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการใช้งานหรือสภาพแวดล้อมที่สูงเกินกว่าอุณหภูมิใช้งานสูงสุดแต่น้อยกว่า Curie Temperature ของแม่เหล็กถาวรชนิด Nd-Fe-B จะส่งผลกระทบต่อสภาพความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรและถ้าอยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูงนั้น ๆ เป็นเวลานานจะส่งผลกระทบต่อความเป็นแม่เหล็กหรือไม่อย่างไร อีกคำถามที่ตามมาคือ เมื่อแม่เหล็กถาวรที่เกิดการลดหรือสูญเสียความเป็นแม่เหล็กไปแล้วจะสามารถนำมากระตุ้นเพื่อให้คืนค่าความเป็นแม่เหล็กให้ป็นดังเดิมเพื่อนำกลับมาใช้งานอีกครั้ง ได้หรือไม่

โดยทีมงานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับแม่เหล็กถาวรตัวอย่าง ณ ระยะเวลาต่าง ๆ เพื่อความเข้าใจรูปแบบการลดหรือสูญเสียความเป็นแม่เหล็กที่เป็นผลมาจากความร้อน และการศึกษาการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรที่เกิดการลดหรือสูญเสียความเป็นแม่เหล็ก อันได้รับผลกระทบจากความร้อน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นเป้าหมายของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ คือการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH ที่ใช้งานจริงอยู่ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ณ ระยะเวลาต่าง ๆ เพื่อความเข้าใจรูปแบบการลดหรือสูญเสียความเป็นแม่เหล็กที่เป็นผลมาจากความร้อนโดยที่เริ่มจากอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 340 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่า Curie Temperature (312 องศาเซลเซียส) ของแม่เหล็กถาวรชนิด Nd-Fe-B และในการศึกษาการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรที่เกิดการลดหรือสูญเสียความเป็นแม่เหล็กอันได้รับผลกระทบจากความร้อน นั้นนอกจากเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำแม่เหล็กถาวรที่เสื่อมสภาพความเป็นแม่เหล็กแล้วให้นำกลับมาใช้งานได้อีกครั้งหนึ่ง อีกทั้งยังเป็นการนำเสนอวงจรกระตุ้นสนามแม่เหล็กอย่างง่ายโดยใช้ขดลวดกระตุ้นแบบแกนอากาศให้มีประสิทธิภาพ

เพียงพอสำหรับกระตุ้นเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโค่นันต์ตามมาตรฐานประเทศจีน (GB/T 13560 : 1992-2017) ซึ่งมีค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตกค้าง (B_r) อยู่ที่ 1.2 T และความเข้มสนามแม่เหล็กกระตุ้นจากภายนอก (H_d) อยู่ที่ 1989 kA/m

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

โดยทั่วไปการเกิดการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กที่ขึ้นอยู่กับความร้อนนั้นจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของตัวแม่เหล็กถาวรมีค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับ Curie Temperature ซึ่งสาเหตุหลักของการเกิดการลดหรือสูญเสียความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรที่ใช้งานกับเครื่องจักรกลไฟฟ้า อุณหภูมิภายในที่เกิดขึ้นระหว่างใช้งานเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นเอง ทำให้เมื่ออุณหภูมิภายในของเครื่องจักรกลไฟฟ้า เพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิใช้งานสูงสุดของแม่เหล็กถาวรจะส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดการลดหรือสูญเสียความเป็นแม่เหล็กมากขึ้น และเมื่อแม่เหล็กถาวรเกิดการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กไป โดยที่ไม่เกิดความเสียหายกับตัวแม่เหล็กถาวร เช่น ไม่เกิดการแตกหัก ไม่เกิดการกัดกร่อน หรือเกิดการทำปฏิกิริยาให้เกิดสนิม เป็นต้น จะยังคงสามารถนำกลับมากระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กเพื่อคืนค่าความเป็นแม่เหล็กให้กับแม่เหล็กถาวรได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนจากปัญหาที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยในส่วนแรกจะเป็นการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH สำหรับใช้งานในเครื่องจักรกลไฟฟ้า ณ ระยะเวลาต่าง ๆ นั้นจะใช้แนวคิดที่ว่า หากแม่เหล็กถาวรที่ได้รับอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิใช้งานสูงสุดแต่ไม่ถึงอุณหภูมิที่เป็น Curie Temperature นั้นการเกิดการลดความเป็นแม่เหล็กจะเกิดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิที่เป็น Curie Temperature มากขึ้น ซึ่งตามทฤษฎีของโดเมนแม่เหล็กแล้วแม่เหล็กถาวรจะแสดงอำนาจทางแม่เหล็กเมื่อโดเมนแม่เหล็กภายในตัวแม่เหล็กถาวรเกิดการเรียงตัวและมีทิศทางเดียวกัน แต่หากได้รับพลังงานจากภายนอกจนทำให้สมดุลในการเรียงตัวของโดเมนแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรเปลี่ยนไปจะทำให้ความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเช่นเดียวกันสมดุลที่เปลี่ยนไป และในส่วนที่สองจะเป็นการศึกษากการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรที่เกิดการลดหรือสูญเสียความเป็นแม่เหล็กอันได้รับผลกระทบจากความร้อนนั้นเริ่มต้นจากแนวคิดที่ว่า หากแม่เหล็กถาวรเกิดการสูญเสีย

ความเป็นแม่เหล็กไปโดยที่ไม่มี ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวเนื้อสารหรือเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้ โครงสร้างเปลี่ยนไป ก็จะสามารถใช้สนามแม่เหล็กภายนอกมากระตุ้นเพื่อให้โดเมนแม่เหล็กภายในตัว แม่เหล็กถาวรเกิดการเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันได้ ซึ่งเป็นไปทฤษฎีโดเมนแม่เหล็กที่ได้กล่าวมาข้างต้น การออกแบบวงจรกระตุ้นสนามแม่เหล็กอย่างง่ายโดยใช้ขดลวดกระตุ้นแบบแกนอากาศจะออกแบบโดยใช้ หลักการของวงจรไฟฟ้าอนุพันธ์อันดับที่สองซึ่งเป็นวงจรที่ง่ายและไม่ซับซ้อน โดยที่จะประกอบด้วยตัวเก็บ ประจุและขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศเป็นองค์ประกอบหลักเท่านั้น

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ตลอดงานวิจัยภายในวิทยานิพนธ์จะใช้แม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH ตามมาตรฐานประเทศจีน (GB/T 13560 : 1992-2017) เป็นแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในการทดลองเนื่องจาก มาตรฐานประเทศจีน (GB/T 13560 : 1992-2017) เป็นมาตรฐานที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการ ผลิตแม่เหล็กถาวรที่ใช้ Nd-Fe-B เป็นเนื้อสาร ส่งผลทำให้ผู้ออกแบบหรือพัฒนาเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร นิยมนำมาใช้งานเพราะหาได้ง่ายในท้องตลาด แต่ด้วยราคาต้นทุนของเนื้อ สารทำให้แม่เหล็กถาวรที่ใช้เนื้อสารเป็น Nd-Fe-B ยังคงมีราคาที่สูงอยู่นั่นเอง

ในการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH ที่ใช้งานจริงอยู่ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร ณ ระยะเวลาต่าง ๆ จะทำการให้ความร้อนต่อแม่เหล็กถาวรโดยเริ่มจากอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 340 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิ Curie Temperature ของแม่เหล็กถาวรชนิด Nd-Fe-B ที่ประมาณ 312 องศาเซลเซียส ในการทดลองจะทำการนำแม่เหล็กถาวรที่ให้ความร้อนออกมาวัดความหนาแน่นของเส้น แรงแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่ทุก ๆ 15 นาที จนกระทั่งความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กแม่เหล็กที่ หลงเหลืออยู่มีค่าคงที่ เนื่องจากเป็นเวลาที่เหมาะที่จะทำให้ตัวแม่เหล็กถาวรเพิ่มอุณหภูมิของตัวเองขึ้นไป ถึงอุณหภูมิที่จะใช้ทดสอบ

การศึกษาการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรที่เกิดการลดหรือสูญเสียความเป็น แม่เหล็กอันได้รับผลกระทบจากความร้อน จะใช้วงจรไฟฟ้าอนุพันธ์อันดับที่สองในการกระตุ้นโดยจะอัด ประจุเพื่อสะสมพลังงานให้กับตัวเก็บประจุแล้วคายพลังงานที่เก็บสะสมไว้ให้กับขดลวดเหนี่ยวนำแกน อากาศเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการกระตุ้น

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้มีการดำเนินการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของแม่เหล็กถาวร ทำให้มีการนำคำศัพท์เฉพาะทางด้านแม่เหล็กมาใช้งาน ดังต่อไปนี้

- แม่เหล็กทดสอบ หมายถึง แม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH ตามมาตรฐานประเทศจีน (GB/T 13560 : 1992-2017)
- ความเป็นแม่เหล็ก หมายถึง ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างภายในแม่เหล็กทดสอบ
- อุณหภูมิคูรี (Curie Temperature) หมายถึง ระดับอุณหภูมิที่ทำให้แม่เหล็กถาวรเกิดการลดความเป็นแม่เหล็กสูงสุดอันส่งผลทำให้แม่เหล็กไม่แสดงอำนาจความเป็นแม่เหล็กออกมา
- การกระตุ้นความเป็นแม่เหล็ก หมายถึง การเพิ่มความเป็นแม่เหล็กให้แก่แม่เหล็กถาวร โดยการนำแม่เหล็กที่ต้องการไปติดตั้งในพื้นที่ที่มีสนามแม่เหล็กที่ได้สร้างขึ้น
- การลดความเป็นแม่เหล็ก หมายถึง การแม่เหล็กถาวรมีอำนาจแม่เหล็กลดลงด้วยการเกิดปฏิกิริยาเคมี หรือการสร้างเสียหายทางกายภาพ หรือการเพิ่มความร้อนของแม่เหล็กถาวร อย่างใดอย่างหนึ่ง
- วงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็ก หมายถึง วงจรไฟฟ้าสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็ก
- ขดลวดกระตุ้น หมายถึง ขดลวดตัวนำไฟฟ้าที่มีหน้าที่ในการแปลงรูปพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าไปยังพลังงานสนามแม่เหล็ก เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็ก
- สนามแม่เหล็กกระตุ้น หมายถึง สนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นเพื่อทำให้แม่เหล็กถาวรเกิดการเปลี่ยนแปลงความเป็นแม่เหล็ก
- ความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟ (Coercive Magnetic Field Intensity: H_c) หมายถึง ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่ทำให้แม่เหล็กถาวรเกิดการอิ่มตัวและเกิดความเป็นแม่เหล็กสูงสุด
- ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (Remanence Flux density: B_r) หมายถึง ปริมาณความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่ในวัสดุ ซึ่งหากมีปริมาณมากจะทำให้วัสดุนั้นมีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กถาวร

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้มีการดำเนินการศึกษาแบบเป็นขั้นตอน โดยรายละเอียดของภาคศึกษาแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งหมดของทุกงานวิจัยภายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ โดยที่ทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ วัสดุแม่เหล็ก โดเมนแม่เหล็ก วงจรแม่เหล็ก การเกิดความเป็นแม่เหล็ก การลดความเป็นแม่เหล็กที่เกิดจากความร้อน และวงจรไฟฟ้าอนุพันธ์ลำดับที่สอง แบบ LC

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH ที่ใช้งานจริงอยู่ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร ณ ระยะเวลาต่าง ๆ โดยที่จะอธิบายการปรับตั้งและสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน ขั้นตอนในการทำการศึกษากำหนดอุณหภูมิในการให้ความร้อนอยู่ในช่วง 100 ถึง 340 องศาเซลเซียส และผลการทดสอบรวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงการออกแบบและจัดสร้างวงจรกระตุ้นอย่างง่ายตามที่ได้อ้างมาข้างต้น โดยที่จะมีการอธิบายกระบวนการในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในวงจร การเลือกใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ และอธิบายผลลัพธ์ในการสร้างวงจรกระตุ้นอย่างง่าย

บทที่ 5 เป็นกล่าวถึงการศึกษาการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรที่เกิดการลดหรือสูญเสียความเป็นแม่เหล็กอันได้รับผลกระทบจากความร้อน โดยใช้วงจรกระตุ้นอย่างง่ายที่ได้จัดสร้างขึ้นมาใช้ในการศึกษานี้ ในบทนี้จะอธิบายตั้งแต่การเตรียมแม่เหล็กตัวอย่างเพื่อนำไปทดสอบด้วยการกระตุ้นที่ระดับความเข้มของสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่แตกต่างกัน นำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบและวิเคราะห์เพื่อยืนยันรูปแบบการคืนสภาพความเป็นแม่เหล็ก และทำการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำแม่เหล็กถาวรที่ถูกลดหรือเสื่อมสภาพความเป็นแม่เหล็กแล้วให้นำกลับมาใช้งานอีกครั้งหนึ่ง

บทที่ 6 กล่าวถึงสรุปผลของงานวิจัยภายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นั่นคือ การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH ณ ระยะเวลาต่าง ๆ และการศึกษาการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรที่เกิดการลดหรือสูญเสียความเป็นแม่เหล็กอันได้รับผลกระทบจากความร้อน พร้อมทั้งได้นำเสนอข้อเสนอแนะในการศึกษาทั้ง 2 ประเด็น เพื่อเป็นแนวทางของการวิจัยด้านแม่เหล็กถาวรต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประวัติศาสตร์ของการนำแม่เหล็กถาวรมาประยุกต์ใช้งาน[1]มีมาอย่างยาวนาน โดยหนึ่งในอุปกรณ์เก่าแก่ที่สุดมีการใช้งานแม่เหล็กถาวรเป็นองค์ประกอบสำคัญเพื่อใช้ในการบ่งบอกทิศทาง คือ เข็มทิศ ซึ่งอาศัยการเรียงตัวของเส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรกับสนามแม่เหล็กโลกนั่นเอง โดยที่วัสดุแม่เหล็กที่นำมาสร้างเป็นวัสดุแม่เหล็กตามธรรมชาติ

ในปี ค.ศ. 1820 เป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาแม่เหล็กไฟฟ้า Electromagnetic โดยเริ่มจาก Hans-Christian Oersted นักวิทยาศาสตร์เดนมาร์ก ค้นพบความเชื่อมโยงของกระแสไฟฟ้าและความเป็นแม่เหล็กโดยบังเอิญ จึงได้ทำการทดลองโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ลวดตัวนำแล้วใช้เข็มทิศเป็นตัวชี้วัดในการเกิดสนามแม่เหล็ก เมื่อการค้นพบที่เกิดขึ้นเริ่มแพร่หลายออกไปทำให้มีผู้สนใจในสิ่งที่เกิดขึ้น หนึ่งในนั้นคือ Andre-Marie Ampere และ Dominique-Francois Arago นักวิทยาศาสตร์ฝรั่งเศส ได้ทำการปรับปรุงการทดลองโดยนำลวดตัวนำในการทดลองเดิมมาพันเป็นขดลวดซึ่งเมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดจะทำให้เกิดสถานะความเป็นแม่เหล็กเกิดขึ้น จากสิ่งที่เกิดขึ้นถือเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นในปี ค.ศ. 1821 ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่ที่ได้เปลี่ยนแปลงโลกไปตลอดกาล นั่นคือ Michael Faraday ได้ค้นพบแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำและได้ทำการทดลองทฤษฎีของมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยแม่เหล็ก ลวดตัวนำกระแสไฟฟ้า และจานปรอท อันเป็นต้นแบบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีอยู่ในปัจจุบัน อีกทั้งในปี ค.ศ. 1845 ได้ค้นพบ ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและแสงด้วย magneto-optic Faraday effect

จากการค้นพบที่ได้กล่าวมาข้างต้นทำให้มีการศึกษาสารแม่เหล็กโดยใช้อุปกรณ์สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่มีรูปร่างเป็นเกือกม้าเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1881 การศึกษาการเกิดความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กกลุ่ม ferromagnetic ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดย James Ewing นักวิทยาศาสตร์สกอตแลนด์ ผลลัพธ์ที่ได้ก็นำไปสู่กราฟคุณลักษณะของสารแม่เหล็ก หรือ Hysteresis loops ที่ถูกใช้งานมาจนถึงในปัจจุบัน กราฟคุณลักษณะของสารแม่เหล็กนี้จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นแม่เหล็กที่เกิดและสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการกระตุ้น โดยที่กราฟคุณลักษณะของสารแม่เหล็กแข็งจะมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่หักล้างความเป็นแม่เหล็กได้นั้นมีค่าสูงกว่าค่าความเป็นแม่เหล็ก ณ จุดอิ่มตัว ทำให้รูปกราฟของสารแม่เหล็กแข็งจะมีรูปร่างใกล้เคียงสี่เหลี่ยม ส่วนกราฟคุณลักษณะของสารแม่เหล็กอ่อนนั้นความเป็นแม่เหล็กของสารแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่นำมากระตุ้น นั่นคือ เมื่อความ

เข้มสนามแม่เหล็กกระตุ้นหายไปค่าความเป็นแม่เหล็กจะหายไปด้วย ทำให้รูปร่างกราฟคุณลักษณะที่ได้มีรูปร่างที่แคบอย่างมาก การพลคุณลักษณะของสารแม่เหล็กที่ถูกค้นพบขึ้นถือเป็นข้อมูลที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการนำแม่เหล็กถาวรไปใช้งานในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

โดยทั่วไปแล้วได้มีการนำแม่เหล็กถาวรมาใช้งานในมอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงอย่างแพร่หลาย หน้าที่ของแม่เหล็กถาวรในมอเตอร์ไฟฟ้าได้ถูกใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์ จุดเด่นของการนำแม่เหล็กถาวรไปใช้งานในการสร้างสนามแม่เหล็กคือ ไม่มีการสูญเสียที่เกิดจากการสร้างสนามแม่เหล็กภายในตัวมอเตอร์ แต่การสร้างสนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์ด้วยขดลวดนั้นจะทำให้เกิดความสูญเสียในรูปแบบของความร้อนภายในมอเตอร์ อย่างไรก็ตามแม่เหล็กถาวรยังมีข้อดีอยู่ในการใช้งานที่สำคัญอยู่ คือ อุณหภูมิของมอเตอร์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้า และเมื่อแม่เหล็กถาวรได้รับความร้อนจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิใช้งานของแม่เหล็ก จะส่งผลให้เกิดการลดความเป็นแม่เหล็ก (Demagnetization) อันจะส่งผลให้ ประสิทธิภาพและสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าจะลดลงตามด้วย[2]

ในปัจจุบันสารแม่เหล็กที่ให้พลังงานในรูปของสนามแม่เหล็กสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของสารแม่เหล็กที่เท่ากัน คือ แม่เหล็กถาวรแข็งที่มีองค์ประกอบของเนื้อสารแม่เหล็กเป็นธาตุแรร์เอิร์ทซึ่งประกอบด้วย นีโอดีเนียม (Nd) ไอรอน (Fe) และโบรอน (B) ทำให้ในทางอุตสาหกรรมจำเป็นต้องกำหนดมาตรฐานที่ใช้การผลิตแม่เหล็กถาวร Nd-Fe-B เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของการผลิตที่สามารถนำไปใช้งานได้ โดยที่มาตรฐานของแม่เหล็กที่มีอยู่ในปัจจุบันนั้นจะแบ่งออกตามกลุ่มประเทศผู้ผลิตหลักอันได้แก่ มาตรฐานสหรัฐอเมริกา มาตรฐานยุโรป และมาตรฐานประเทศจีน แต่มาตรฐานที่ได้ความนิยมอย่างแพร่หลาย คือ มาตรฐานประเทศจีน เนื่องจากมาตรฐานของประเทศจีนที่ระบุไว้ นั้น ค่าความเป็นแม่เหล็กจะมีค่าน้อยกว่ามาตรฐานอื่น ทำให้สัดส่วนของเนื้อสารนีโอดีเนียม (Nd) ที่กำหนดให้ใช้ในการผลิตนั้นมีค่าลดลง ส่งผลให้ต้นทุนของการผลิตนั้นลดลงตามไปด้วย หมายเลขมาตรฐานการผลิตแม่เหล็กถาวร Nd-Fe-B ของมาตรฐานประเทศจีนคือ GB/T 13560 : 1992-2017 ซึ่งภายในได้กำหนดสัดส่วนของการผสมเนื้อสารแม่เหล็ก ขนาดและรูปร่างของแม่เหล็กถาวร อีกทั้งยังรวมไปถึงค่าอุณหภูมิใช้งานสูงสุดที่สามารถนำไปใช้งานได้โดยที่แม่เหล็กยังคงมีความเป็นแม่เหล็กเป็นไปตามมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้

ในการวิจัยเรื่องแม่เหล็กถาวรเริ่มเป็นที่แพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องมาจากเทคโนโลยีที่มีการใช้งานแม่เหล็กถาวรมีการใช้งานที่แพร่หลายมากขึ้น หนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันคือ พานะที่เคลื่อนที่ด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบหลักในการขับเคลื่อน นั่นคือหากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้าที่เป็นองค์ประกอบหลักได้ก็จะทำให้พานะนั้น ๆ มีประสิทธิภาพสูงขึ้นไปด้วยเช่นเดียวกัน อีกทั้งยังมีผลมาจากราคาที่ถูกลงของวัสดุทำให้การนำแม่เหล็กถาวรมาใช้งานเป็นที่น่าสนใจมากยิ่งขึ้น การวิจัยเกี่ยวกับแม่เหล็กถาวรที่เคยได้ปรากฏออกมานั้นมีหลากหลายแนวทางวิจัย

โดยเริ่มจากการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิต ซึ่งจากงานวิจัย[3-5] ได้มีการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรที่มีกรรมวิธีการผลิตและองค์ประกอบที่แตกต่างกันซึ่งทำให้เห็นได้ว่า แม่เหล็กถาวรชนิด Nd-Fe-B ที่ผ่านกระบวนการในการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนก่อนนำไปกระตุ้นให้เกิดเป็นแม่เหล็กถาวร (Sintered) ผลของการขึ้นรูปด้วยวิธีการนี้จะส่งผลทำให้แม่เหล็กที่ผ่านกระตุ้นแล้วมีความเป็นแม่เหล็กหลงเหลืออยู่มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดและชนิดขององค์ประกอบของแม่เหล็กที่มีสัดส่วนเช่นเดียวกัน อีกทั้งยังมีการศึกษาผลกระทบของแรงการอัดผงและทิศทางการกระตุ้นแม่เหล็กของสารแม่เหล็กแข็งสำหรับการผลิตแม่เหล็กถาวร [6] นอกเหนือจากแนวทางวิจัยทางด้านอุตสาหกรรมแล้วยังมีแนวทางวิจัยทางการศึกษาแม่เหล็กคุณสมบัติของแม่เหล็กที่จะนำไปใช้งาน ซึ่งได้มีการศึกษาผลกระทบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานแม่เหล็กถาวร อาทิเช่น ผลของอุณหภูมิ ผลของความดัน ผลของทิศทางการลบล้างความเป็นแม่เหล็ก ผลของความถี่ เป็นต้น [7-11] แต่การศึกษาที่ได้กล่าวมาข้างต้นเหล่านี้ก็ยังไม่ได้อธิบายถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ที่สำคัญของแม่เหล็กถาวรอย่างครบถ้วน นอกจากการศึกษาผลกระทบในการใช้งานแม่เหล็กถาวรที่ได้กล่าวนี้ยังการศึกษาก็ได้รับความสนใจอยู่เป็นการศึกษาการกระตุ้นสนามแม่เหล็กและการลบล้างความเป็นแม่เหล็กด้วยวิธีการต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการใช้ Superconducting Solenoid, Pulsed Field Magnetometer [6, 12, 13] แต่จุดด้อยของงานวิจัยที่ได้กล่าวมานั้น คือ ในการทดสอบมีกรรมวิธีมีความยุ่งยากซับซ้อนทำให้การนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้งานจริงเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ยาก ในการศึกษาคุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรนั้นไม่ได้มีเพียงการทำทดลองภาคปฏิบัติเท่านั้นแต่ยังมีการสร้างโปรแกรมเพื่อจำลองการกระตุ้นสนามแม่เหล็กสำหรับแม่เหล็กถาวร [14] โดยไม่มีการทำการทดลองจริงอีกด้วย จะเห็นได้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาจะมีการศึกษาคุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรอยู่บ้าง แต่ยังไม่ครบถ้วน อีกทั้งกรรมวิธีหรือเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบมีความยุ่งยากซับซ้อนจึงเป็นไปได้ยากในการนำมาใช้งานจริง

งานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบโดยอ้างอิงจากการใช้งานจริงของแม่เหล็กตัวอย่าง โดยที่แม่เหล็กตัวอย่างที่ใช้ศึกษาภายในงานวิจัยนี้ได้ใช้แม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH ตามมาตรฐานประเทศจีน อีกทั้งยังทำการนำเสนอการสร้างชุดทดสอบที่ไม่ซับซ้อนสำหรับการศึกษาคูสมบัติของแม่เหล็กถาวรเพื่อทำการศึกษาการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก การลบล้างความเป็นแม่เหล็กถาวร และการกระตุ้นเพื่อเพิ่มค่าความเป็นแม่เหล็กให้แก่แม่เหล็กที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กได้อย่างครบถ้วน

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 สารแม่เหล็ก

โดยทั่วไปแล้วสารแม่เหล็ก[15]นั้นได้ถูกจำแนกตามค่าซึมซาบสนามแม่เหล็กซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มได้แก่ Paramagnetic Ferromagnetic และDiamagnetic ซึ่งค่าความซึมซาบแม่เหล็กที่ต่างกันทำให้คุณสมบัติทางด้านความเป็นแม่เหล็กต่างกันไปด้วย

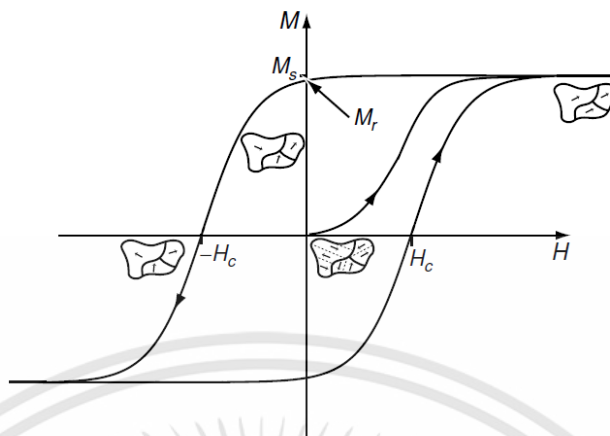
-Diamagnetic เป็นสารที่มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กที่น้อยมากเมื่อเทียบกับอากาศ ทำให้สารจำพวกนี้ไม่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่เข้ามากระทำต่อสาร

-Paramagnetic เป็นสารที่มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กที่ใกล้เคียงกับอากาศ ทำให้สารจำพวกนี้มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นทำให้ตัวสารสามารถแสดงอำนาจทางแม่เหล็กได้เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก แต่หากสนามแม่เหล็กภายนอกนั้นหมดไปอำนาจทางแม่เหล็กของสารประเภทนี้จะหมดตามไปด้วย

-Ferromagnetic เป็นสารที่มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กที่สูงกว่าอากาศ 100 เท่าเป็นต้นไป ทำให้สารจำพวกนี้มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นทำให้ตัวสารสามารถแสดงอำนาจทางแม่เหล็กได้เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกออกมาได้ อีกทั้งสารแม่เหล็กในกลุ่มนี้มีความสามารถในการแสดงอำนาจทางแม่เหล็กออกมาต่อไปได้ถึงแม้ว่าสนามแม่เหล็กภายนอกนั้นหมดไป

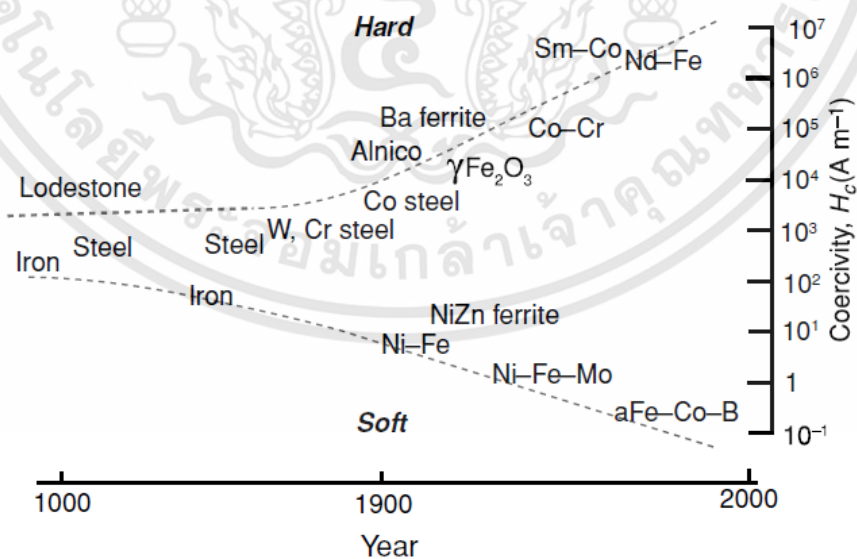
เมื่อทำการนำสารแม่เหล็กในกลุ่ม Ferromagnetic มาผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้วกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กทำให้เกิดความเป็นแม่เหล็กขึ้นมาจะถูกเรียกว่า แม่เหล็กถาวร โดยที่สารแม่เหล็กที่นำมาขึ้นรูปเป็นแม่เหล็กถาวรได้แบ่งออกเป็น สารแม่เหล็กแข็ง และสารแม่เหล็กอ่อน โดยแบ่งตามความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟ หรือ Coercive Magnetic Field Intensity (H_c) ที่ได้จากรูปคุณลักษณะของเนื้อสารแม่เหล็ก

ในรูปที่ 2.1 แสดงรูปร่างของกราฟคุณลักษณะของสารแม่เหล็กกลุ่ม Ferromagnetic ในแกนนอนได้แสดงถึงความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ที่ใช้ในการกระตุ้นแม่เหล็กและแกนตั้งเป็นค่าความเป็นแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก (M) ค่าความเป็นแม่เหล็กสูงสุดของสารแม่เหล็กที่ได้จากการกระตุ้นถูกแทนด้วยตัวแปร M_s ค่าความเป็นแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่เมื่อสนามแม่เหล็กกระตุ้นหมดไปของสารแม่เหล็กถูกแทนด้วยตัวแปร M_r และความเข้มของสนามแม่เหล็กที่หักล้างความเป็นแม่เหล็กของสารแม่เหล็กได้หมดนั้นคือ H_c



รูปที่ 2.1 รูปร่างกราฟคุณลักษณะทางแม่เหล็กของสารแม่เหล็กกลุ่ม Ferromagnetic [16]

ในทางอุดมคติแล้ว กราฟของคุณลักษณะสารแม่เหล็กแข็งจะมี M_r เท่ากับค่า M_s ทำให้รูปร่างที่ได้นั้นมีรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีความกว้างตั้งแต่ $-H_c$ ถึง H_c และมีความสูงตั้งแต่ $-M_s$ ถึง M_s ส่วนกราฟคุณลักษณะของสารแม่เหล็กอ่อนจะมี M_r เท่ากับ 0 ทำให้รูปร่างที่ได้นั้นมีรูปร่างเป็นเส้นการที่มีการลู่เข้าหา M_s เมื่อ H ค่าเป็นบวกและลู่เข้าหา $-M_s$ เมื่อ H ค่าเป็นลบ แต่ในทางปฏิบัติแล้วกราฟของคุณลักษณะสารแม่เหล็กแข็งจะมี M_r มีค่าน้อยกว่า M_s ทำให้รูปร่างที่ได้นั้นมีรูปร่างเป็นตามรูปที่ 2.1 ส่วนกราฟคุณลักษณะของสารแม่เหล็กอ่อนจะมี M_r มีค่ามากกว่า 0 ทำให้รูปร่างที่ได้นั้นมีรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีลักษณะแคบ

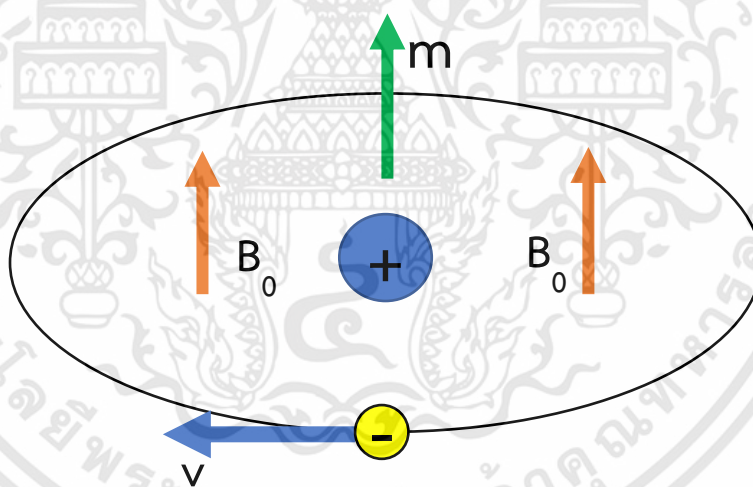


รูปที่ 2.2 กราฟแสดงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟ (H_c) ของสารแม่เหล็กที่มีตั้งแต่เริ่มมีการใช้งานแม่เหล็กจนถึงช่วงศตวรรษที่ 20 [16]

จากรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟ (H_c) ของสารแม่เหล็กที่มีการนำมาใช้ตั้งแต่อดีตจนถึงช่วงศตวรรษที่ 20 ซึ่งค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟของสารแม่เหล็กแข็งจะค่ามากกว่า 1,000 A/m และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟของสารแม่เหล็กอ่อนจะมีค่าต่ำกว่า 100 A/m นั้นเอง

2.2.2 โดเมนแม่เหล็ก

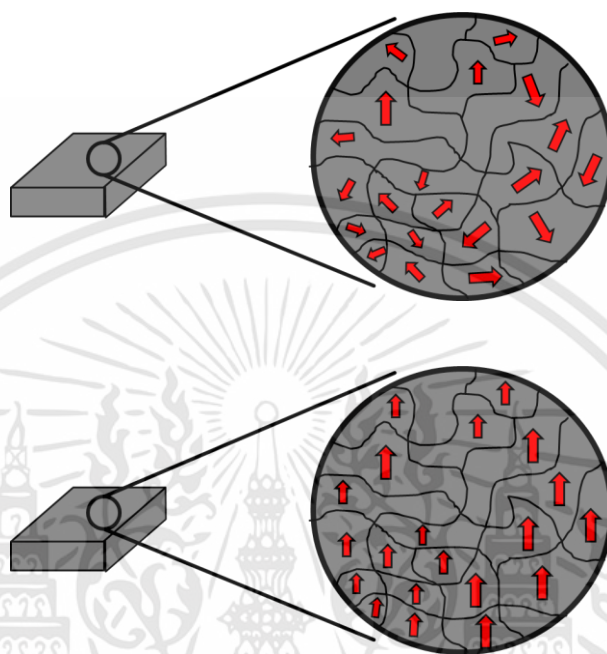
ทฤษฎีโดเมนแม่เหล็ก[15]เป็นทฤษฎีที่ใช้การอ้างอิงจากทฤษฎีควอนตัมที่มีโมเดลเป็นแบบอะตอมอย่างง่าย ภายในโมเดลจะประกอบไปด้วย โปรตรอน(+)เป็นศูนย์กลางและมีอิเล็กตรอน(-)โคจรรอบโปรตรอนด้วยความเร็วเป็นไปตามเวกเตอร์ V เมื่อวงโคจรของอิเล็กตรอนมีขนาดเล็กมากจะทำให้เกิดการหมุนของโปรตรอนซึ่งเกิดจากแรงบิดที่ได้จากสนามแม่เหล็กระหว่างโปรตรอนและอิเล็กตรอน ปรัชญาการณีนี้อาจเกิดขึ้นเมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_0 เป็นตัวกระตุ้นจากภายนอก ผลลัพธ์ที่ได้จากการหมุนของโปรตรอนทำให้เกิด โมเมนตัมแม่เหล็ก(m) เป็นดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โมเดลการเกิดโมเมนต์แม่เหล็กที่ได้จากทฤษฎีควอนตัม

ทฤษฎีโดเมนแม่เหล็กจะมองว่า ก้อนแม่เหล็กเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคเนื้อสารแม่เหล็ก ซึ่งโมเมนต์แม่เหล็กที่ได้กล่าวมานั้นเกิดขึ้นในระดับอนุภาค ทำให้ความเป็นแม่เหล็กของก้อนแม่เหล็กเกิดจากผลรวมของโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นแต่ละอนุภาค รูปแบบของการรวมโมเมนต์แม่เหล็กจะเป็นแบบเวกเตอร์ ความเป็นแม่เหล็กของก้อนแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับขนาดของโมเมนต์แม่เหล็กลัพธ์และความเป็นขั้วแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กลัพธ์ แต่หากโมเมนต์ลัพธ์ที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับศูนย์ ก้อน

แม่เหล็กถาวรจะไม่แสดงอำนาจทางแม่เหล็กออกมาซึ่งตัวอย่างการจัดเรียงตัวของโดเมนแม่เหล็กเป็นไปตามรูปที่ 2.4



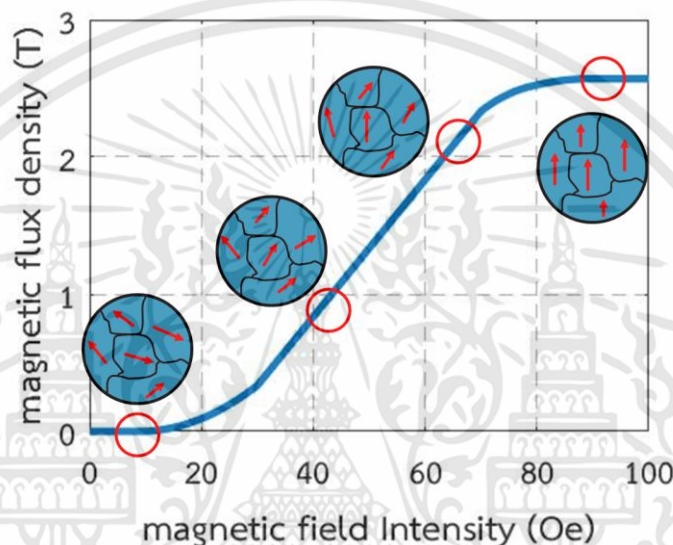
รูปที่ 2.4 (บน) ก้อนแม่เหล็กที่มีโดเมนแม่เหล็กกระจายตัวเป็นผลให้แม่เหล็กไม่แสดงอำนาจทางแม่เหล็กออกมา (ล่าง) ก้อนแม่เหล็กที่มีโดเมนแม่เหล็กภายในเรียงตัวไปในทางเดียวกันเป็นผลให้แม่เหล็กแสดงอำนาจทางแม่เหล็กออกมาได้สูงสุด

ในรูปที่ 2.4 ได้ทำการแบ่งพื้นที่ของก้อนแม่เหล็กออกเป็นส่วนเล็ก ๆ ตามทฤษฎีโดเมนแม่เหล็กและแสดงโดเมนแม่เหล็กแต่ละพื้นที่จะถูกแสดงด้วยลูกศรสีแดงที่มีขนาดที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปแล้วเมื่อทำการขึ้นรูปผงแม่เหล็กให้เป็นรูปร่างตามที่ต้องการ ก้อนแม่เหล็กที่ได้จะยังไม่แสดงอำนาจทางแม่เหล็กเนื่องจากโดเมนแม่เหล็กเป็นดังในรูป 2.4 (บน) หากต้องการให้ก้อนแม่เหล็กแสดงอำนาจทางแม่เหล็กออกมาจะต้องทำให้โดเมนแม่เหล็กภายในเกิดการเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันดังในรูป 2.4 (ล่าง)

2.2.3 การกระตุ้นความเป็นแม่เหล็ก

การกระตุ้นความเป็นแม่เหล็ก[15] คือ การทำให้โดเมนแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรเกิดการเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน ส่งผลทำให้เกิดอำนาจความเป็นแม่เหล็กเกิดขึ้นหรือก็คือการเกิดความเป็นแม่เหล็ก ในการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กจะอาศัยสนามแม่เหล็กจากภายนอกที่มีทิศทางของสนามแม่เหล็กที่แน่นอนมาบังคับให้ทิศทางของโดเมนแม่เหล็กเปลี่ยนไปในทิศทางเดียวกัน ผลลัพธ์ของ

การกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแม่เหล็กถาวรนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กกระตุ้น โดยที่เมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าขึ้นจะทำให้ค่าความเป็นแม่เหล็กที่ได้จะมีค่าสูงขึ้น เช่นเดียวกัน แต่ค่าความเป็นแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีข้อจำกัดที่เกิดการอิ่มตัวของสารแม่เหล็ก ทำให้เมื่อเกิดการอิ่มตัวของสารแม่เหล็ก ค่าความเป็นแม่เหล็กจะไม่เพิ่มขึ้นอีกถึงแม้จะทำการเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กกระตุ้น



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรและความเข้มสนามแม่เหล็กกระตุ้น

2.2.4 การสูญเสียความเป็นแม่เหล็ก

การสูญเสียความเป็นแม่เหล็กคือ สิ่งที่ทำให้แม่เหล็กมีความเป็นแม่เหล็กลดลง โดยการเกิดการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กเกิดขึ้นได้ 3 กรณี ได้แก่ การสูญเสียความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน การสูญเสียความเป็นแม่เหล็กที่เกิดจากการเสียหายทางกายภาพ และการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อนจากการใช้งานมอเตอร์ โดยการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อนนั้นเกิดขึ้นเมื่อแม่เหล็กถาวรได้รับพลังงานความร้อนจนทำให้อิเล็กตรอนที่โคจรรอบโปรตรอนย้ายระดับพลังงานอยู่ในชั้นที่สูงขึ้นทำให้ขนาดของโมเมนต์แม่เหล็กนั้นลดลง หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิของแม่เหล็กลดลงอิเล็กตรอนที่ถูกย้ายระดับพลังงานไปค่อยๆคายพลังงานออกแล้วกลับเข้าสู่ระดับพลังงานตั้งต้นทำให้โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมค่อยๆกลับมาเป็นดังเดิม ในขณะที่โมเมนต์แม่เหล็กกลับมาดังเดิมได้เกิดการเรียงตัวใหม่ของโดเมนแม่เหล็กซึ่งทำให้เกิด

ความเป็นแม่เหล็กโดยรวมที่ลดลงไปนั่นเอง โดยอุณหภูมิที่ทำให้ความเป็นแม่เหล็กสูญหายไป นั้นเรียกว่า Curie Temperature โดย Curie temperature ของสารแม่เหล็กต่าง ๆ มีค่าดังตารางที่ 2.1 โดยสารแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่นำมาเป็นตัวอย่างในงานวิจัยมี Curie temperature อยู่ที่ 312 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.1 Curie temperature ของสารแม่เหล็กต่าง ๆ [17]

Material	Curie Temperature (°C)	Material	Curie Temperature (°C)
Gadolinium	16	Iron	771
Nd ₂ Fe ₁₂ B	312	Alnico 1	780
Nickel	358	Cunico	855
BaO 6Fe ₂ O ₃	469	Alnico 5	900
Co ₅ Sm	747	Cobalt	1117

2.2.5 วงจรแม่เหล็ก[15]

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density ; B) กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity ; H) ของสารแม่เหล็กเป็นไปตามสมการที่ 2.1

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (2.1)$$

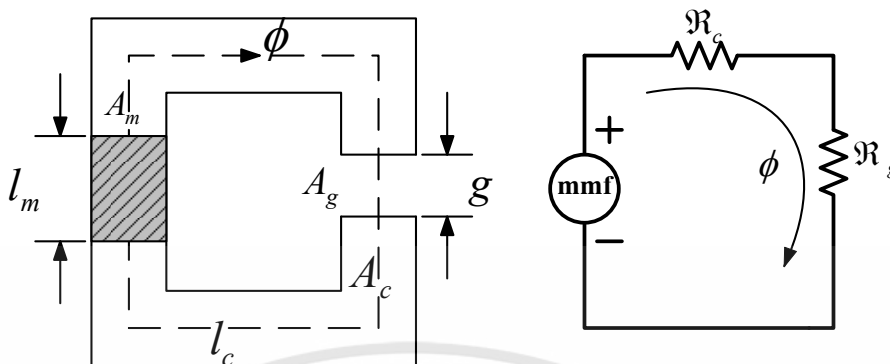
โดยที่ B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Wb/m² หรือ T)

μ_0 คือ Permeability of free space ซึ่งมีค่าเป็น $4\pi \times 10^{-7}$ Wb/At.m

μ_r คือ ความซึมซาบสัมพัทธ์

H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (At/m)

ในการศึกษานี้วงจรแม่เหล็กที่ใช้ในการวัดค่าความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรนั้นเป็น วงจรแม่เหล็กแบบอนุกรม ตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 (ซ้าย) วงจรแม่เหล็กแบบอนุกรม (ขวา) วงจรสมมูลของวงจรแม่เหล็กแบบอนุกรม

จากรูปที่ 2.6 (ขวา) เห็นได้ว่า เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) ของวงจรแม่เหล็กตลอดทั้งวงจรมีค่าเท่ากัน เส้นแรงแม่เหล็กของวงจรมันจะเป็นความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf.) และค่าความต้านทานแม่เหล็กของวงจรแม่เหล็ก ดังสมการที่ 2.2

$$(\text{mmf})_m = (\mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_g) \times \phi \quad (2.2)$$

โดยที่ $(\text{mmf})_m$ คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแม่เหล็กถาวร (Ampere-turn)

\mathfrak{R}_c คือ ค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็ก (A.t/Wb)

\mathfrak{R}_g คือ ค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ (A.t/Wb)

ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็กของวงจรแม่เหล็ก (Wb)

\mathfrak{R}_c และ \mathfrak{R}_g สามารถหาได้จากสมการที่ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ

$$\mathfrak{R}_c = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_c}, \quad \mathfrak{R}_g = \frac{g}{\mu_0 A_g} \quad (2.3), (2.4)$$

เมื่อ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (m^2)

A_g คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศ (m^2)

l_c คือ ความยาวของแกนเหล็กที่ใช้ในวงจรแม่เหล็ก (m)

g คือ ระยะของความกว้างช่องว่างอากาศ (m)

จากสมการที่ (2.3) ในงานการศึกษานี้ วัสดุแม่เหล็กสำหรับแกนเหล็กคือ Iron(0.2 impurity) ที่มีค่า μ_r ประมาณ 6000 ส่งผลให้ค่า \mathfrak{R}_c ในวงจรแม่เหล็กมีค่าน้อยกว่า \mathfrak{R}_g มาก ๆ ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรจึงไปเกิดขึ้นที่ช่องว่างอากาศเพียงอย่างเดียว

เมื่อพิจารณา ϕ ของวงจรแม่เหล็กแบบอนุกรมที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ของความหนาแน่น
เส้นแรงแม่เหล็กกับพื้นที่หน้าตัด อีกทั้งผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กภายในวงจรมีค่าเป็น 0 ดังสมการที่
2.5 และ 2.6 ตามลำดับ

$$\phi = B_m A_m = B_g A_g \quad (2.5)$$

$$H_m l_m + H_g l_g + H_c l_c = 0 \quad (2.6)$$

โดยที่ B_g คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ(T)

B_m คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร(T)

H_g คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กของอากาศ (At/m)

H_m คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร (At/m)

A_m คือ พื้นที่หน้าตัดของแม่เหล็กถาวร (m^2)

l_m คือ ความหนาของแม่เหล็กถาวร (m)

จากสมการที่ 2.5 และ 2.6 สามารถจัดรูปสมการของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่าง
อากาศในที่ไม่คิดผลของแกนเหล็กได้ดังสมการที่ 2.7

$$B_g = \mu_0 \times \frac{A_m}{A_g} \times \frac{l_m}{g} \times H_m \quad (2.7)$$

2.2.6 กฎของแอมแปร์

กฎของแอมแปร์[15]เป็นการกล่าวถึง ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวนำ
ไฟฟ้ากับความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำ โดยที่สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนั้นจะตั้งฉากกับทิศ
ทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า สมการความสัมพันธ์ของกฎของแอมแปร์เป็นไปตามสมการที่ 2.8

$$I = \oint H \cdot dL \quad (2.8)$$

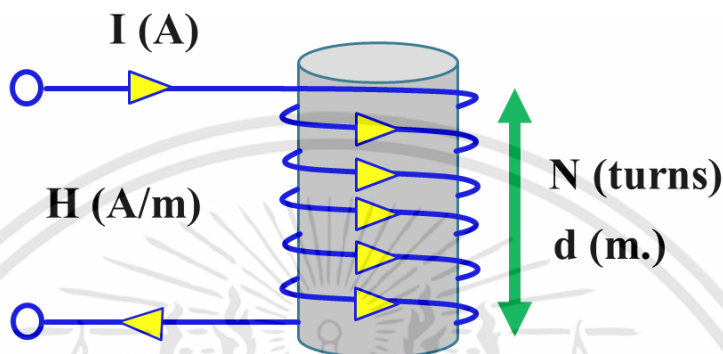
โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ตัวนำ (A)

H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำ (At/m)

dL คือ ระยะทางรอบตัวนำที่เกิดสนามแม่เหล็ก (m)

ในทางอุดมคติ เมื่อนำลวดตัวนำมาพันให้เกิดเป็นขดลวดแกนอากาศ ความเข้มสนามแม่เหล็กที่
เกิดภายนอกขดลวดแกนอากาศมีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้ระยะทางที่เกิดสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับความยาว

ของขดลวดแกนอากาศ และความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบในการพันขดลวดด้วยเนื่องจากแต่ละรอบจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเท่ากัน ทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็กแต่ละรอบมีค่าเท่ากันตามไปด้วย



รูปที่ 2.7 ขดลวดตัวนำที่มีความสูง d เมตร พันจำนวน N รอบถูกป้อนด้วยกระแสไฟฟ้า I ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้ม H

จากรูปที่ 2.7 สามารถเขียนนสมการความสัมพันธ์ของความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดภายในขดลวดตัวนำได้ดังสมการที่ 2.9

$$H = \frac{N \times I}{d} \quad (2.9)$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ตัวนำ (A)

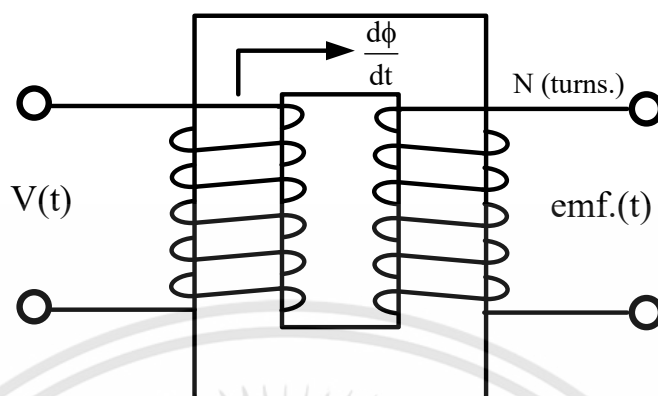
H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำ (A/m)

d คือ ความยาวของขดลวดแกนอากาศ (m)

N คือ จำนวนรอบในการพันตัวนำ (turns)

2.2.7 กฎของเลนซ์

กฎของเลนซ์[15]เป็นการกล่าวถึง ความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (electromotive force : emf) กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดตัวนำ โดยความสัมพันธ์นี้มีพื้นฐานมาจากกฎของฟาราเดย์ ที่ว่า สนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นอยู่กับเวลาจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ซึ่งเป็นการสร้างกระแสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าแบบปิด แต่ในความเป็นจริงนอกจากการสร้างสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นอยู่กับเวลาแล้วยังสามารถนำตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กคงที่เพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กได้เช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.8 วงจรแม่เหล็กที่มีสนามแม่เหล็กไม่คงที่

จากรูปที่ 2.8 สามารถเขียนสมการตามกฎของเลนซ์เป็นไปตามสมการที่ 2.10

$$\text{emf} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.10)$$

โดยที่ emf คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (V)

$d\phi$ คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนไป (Wb)

dt คือ ระยะเวลาที่ใช้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก (s)

N คือ จำนวนรอบในการพันตัวนำ (turns)

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. M. D. COEY, *Magnetism and Magnetic Materials*. the United States of America , New York: Cambridge University Press, 2010.
- [2] T. Sebastian, "Temperature effects on torque production and efficiency of PM motors using NdFeB magnets," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, pp. 353-357, 1995.
- [3] M. Taha and D. Greenwood, "PM material selection guide for IPMSM," in *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016, pp. 1989-1994.
- [4] B. Bochenkov and S. Lutz, "A review of modern materials of permanent magnets," in *Proceedings. The 8th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, 2004. KORUS 2004.*, 2004, pp. 201-203 vol. 1.
- [5] T. Gundogdu and G. Komurgoz, "The Impact of the Selection of Permanent Magnets on the Design of Permanent Magnet Machines – a Case Study: Permanent Magnet Synchronous Machine Design with High Efficiency " *Przełqd Elektrotechniczny*, vol. R. 89, nr 3a, pp. 103-108 2013.
- [6] T. M. Mulcahy and J. R. Hull, "A superconducting solenoid and press for permanent magnet fabrication," *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, vol. 13, pp. 1668-1671, 2003.
- [7] A. G. Clegg, I. M. Coulson, G. Hilton, and H. Y. Wong, "The temperature stability of NdFeB and NdFeBCo magnets," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 1942-1944, 1990.
- [8] P. A. Withey, H. M. Kennett, P. Bowen, and I. R. Harris, "The magnetic and mechanical properties of NdFeB type permanent magnets and the effect of quenching," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 2619-2621, 1990.
- [9] L. Jahn, R. Schumann, and V. Ivanov, "Investigation of the thermal remagnetization in sintered hard magnets," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 37, pp. 2506-2508, 2001.
- [10] M. Katter, "Angular dependence of the demagnetization stability of sintered Nd-Fe-B magnets," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 41, pp. 3853-3855, 2005.

- [11] F. Akagi and Y. Honkura, "Analysis of NdFeB Bonded Magnet Behaviors Within High-Frequency Field and High Temperature Using Micromagnetic Simulator," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 51, pp. 1-4, 2015.
- [12] H. Nishio, "Accurate Measurement of Magnetic Properties of Nd-Fe-B Sintered Magnets With High Coercivity," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 48, pp. 4779-4785, 2012.
- [13] K. Seiichi and K. Giyuu, "Pulsed field magnetometer for low-temperature study of high-performance permanent magnets," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 36, pp. 3634-3636, 2000.
- [14] Y. Nakahata, T. Todaka, and M. Enokizono, "Magnetization Process Simulation of Nd-Fe-B Magnets Taking the Demagnetization Phenomenon Into Account," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 47, pp. 1102-1105, 2011.
- [15] J. a. J. A. B. William H. Hayt, *Engineering Electromagnetics*, 8 ed.: Mc Graw Hill Education, 2012.
- [16] J. M. D. COEY, *Magnetism and Magnetic Materials*: Cambridge University Press, 2010.
- [17] D. R. Askeland and W. J. Wright, *Science and Engineering of Materials, SI Edition*: Cengage Learning, 2015.

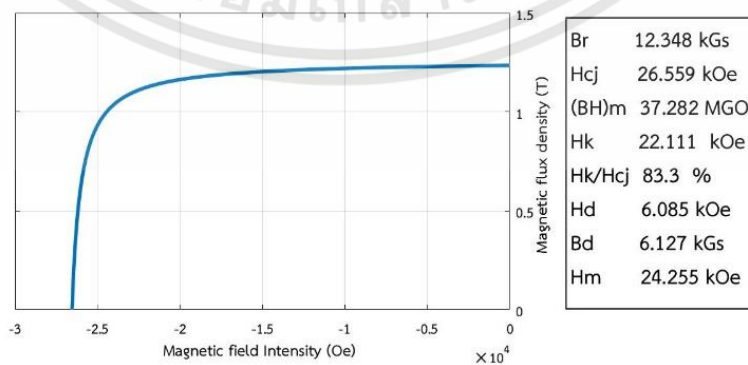
บทที่ 3

การศึกษาคุณลักษณะการลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH เนื่องจากผลของความร้อน

ในการศึกษานี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การทดลองการเกิดการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน และการทดสอบวงจรแม่เหล็กที่ใช้ในการวัดค่าความเป็นแม่เหล็กที่หลงเหลือ โดยที่แม่เหล็กทดสอบที่ใช้ในการทดลองมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (Remanence Flux density: B_r) ตั้งต้นอยู่ที่ 1.23 T อุณหภูมิใช้งานสูงสุดอยู่ที่ 180 องศาเซลเซียส ขนาดของแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 24x20x7 มม. ดังรูปที่ 3.1 และมีคุณลักษณะความสัมพันธ์ของ B-H เป็นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH



รูปที่ 3.2 คุณลักษณะความสัมพันธ์ของ B-H ของแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH

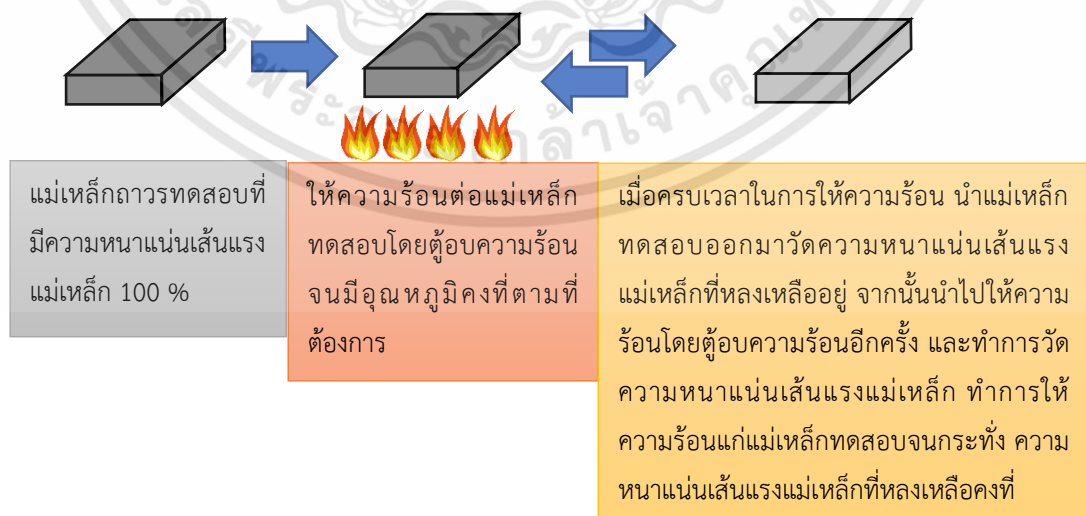
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองของการทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน เพื่อหารูปแบบการเกิดการลดความเป็นแม่เหล็กที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลาที่ได้รับความร้อน โดยจะใช้การอบร้อนในการจำลองสภาวะของการใช้งาน โดยที่เครื่องอบเป็นการอบระบบปิดและมีการควบคุมความร้อนด้วยการควบคุมแบบ PI ทำให้สภาวะที่เกิดขึ้นมีความใกล้เคียงกับภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้าขณะใช้งานมากที่สุด ในส่วนของการทดสอบวงจรแม่เหล็กที่นำมาใช้ในการวัดความเป็นแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่นั้น ได้ใช้วงจรแม่เหล็กที่สามารถปรับความกว้างช่องว่างอากาศได้ในการวัดความเป็นแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่ และเป็นวงจรแม่เหล็กที่ใช้ในการวัดความเป็นแม่เหล็กของงานวิจัยทั้งหมดภายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ด้วย

3.1.1 การทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน

ก่อนเริ่มทำการทดลองจำเป็นต้องมีการปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องอบให้ได้ตามที่ต้องการ เพื่อให้สภาวะที่จำลองขึ้นใกล้เคียงกับสภาวะที่ต้องการมากที่สุด เมื่อทำการปรับตั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการอบร้อนแล้วปล่อยให้อุณหภูมิภายในเครื่องอบมีค่าใกล้เคียงกันและคงที่โดยใช้เวลาประมาณ 10-30 นาทีซึ่งในขั้นตอนนี้แต่ละอุณหภูมิที่ต้องการจะใช้เวลาไม่เท่ากันเนื่องจากในการเปิดอุณหภูมิจะเริ่มตั้งที่อุณหภูมิห้องเสมอ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบเริ่มตั้งแต่ 100 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นครั้งละ 40 องศาเซลเซียส จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่า Curie temperature ของสาร Nd-Fe-B ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยการเลือกอุณหภูมิในการทดสอบนั้นได้พิจารณาจากอุณหภูมิสูงสุดในการใช้งานของแม่เหล็กที่กล่าวมาข้างต้น โดยจะทำการวัดความเป็นแม่เหล็กจากค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่ กระบวนการในการทำการทดลองแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กระบวนการในการทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเก็บค่าความเป็นแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่ในการทดลองได้ทำการเก็บผลทุก ๆ 15 นาที จนกระทั่งความเป็นแม่เหล็กมีค่าคงที่ โดยในการวัดค่าความเป็นแม่เหล็กจะใช้เครื่องวัดเกาส์ (Gauss Meter) ร่วมกับวงจรมแม่เหล็กที่สามารถปรับความกว้างของช่องว่างอากาศได้ โดยการนำแม่เหล็กถาวรไปติดตั้งในวงจรมแม่เหล็กที่สามารถปรับช่องว่างอากาศได้ ที่ช่องว่างอากาศคงที่ที่ความกว้าง 4 มม. ดังรูปที่ 3.4 เพื่อการวัดความเป็นแม่เหล็กที่แม่นยำโดยเครื่องวัดเกาส์จะต้องทำการปรับตั้งค่าเพื่อให้ได้ค่าการวัดที่ถูกต้องแม่นยำ โดยทำการสอบเทียบสองจุด คือการปรับตั้งค่าศูนย์ดังรูปที่ 3.5 (ซ้าย) และการสอบเทียบด้วยแม่เหล็กมาตรฐาน 1000 G ดังรูปที่ 3.5 (ขวา) ทุกครั้งก่อนทำการวัดความเป็นแม่เหล็ก



รูปที่ 3.4 วงจรมแม่เหล็กที่ใช้แกนเหล็กแบบปรับความกว้างช่องว่างอากาศได้



รูปที่ 3.5 (ซ้าย) การปรับตั้งศูนย์ (ขวา) การสอบเทียบแม่เหล็กมาตรฐาน 1000G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การทดสอบวงจรแม่เหล็กที่นำมาใช้ในการทดสอบ

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบว่า วงจรแม่เหล็กที่ปรับช่องว่างอากาศนำมาใช้นี้มีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานหรือไม่ โดยในการทำการทดสอบจะใช้แม่เหล็กทดสอบที่มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่แตกต่างกันเพื่อเป็นตัวกำหนดเส้นแรงแม่เหล็กให้กับวงจรแม่เหล็กแบบปรับความกว้างช่องว่างอากาศได้ จากนั้นจะทำการปรับขนาดของช่องว่างอากาศให้มีขนาดที่แตกต่างกันโดยที่ความกว้างของช่องว่างอากาศที่จะใช้คือ ตั้งแต่ 2 ถึง 12 มม. โดยผลลัพธ์ของการทดสอบนี้จะพิจารณาจากแนวโน้มของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้

3.2 การสอบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

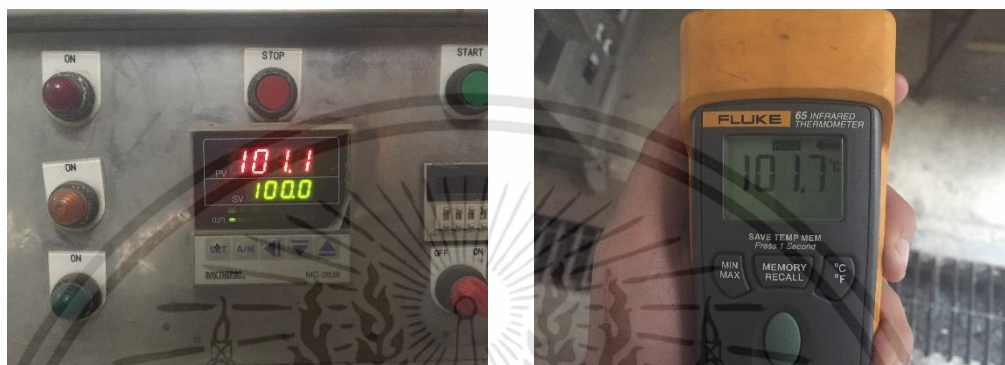
ในการทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน จำเป็นต้องมีการสอบเทียบอุณหภูมิที่ปรับตั้งของเครื่องอบร้อนที่ควบคุมความร้อนด้วยระบบ PI เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าระบบที่จำลองขึ้นนั้นมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยในการสอบเทียบอุณหภูมิจะใช้เครื่องมือสำหรับวัดอุณหภูมิมาตรฐานคือ Fluke 65 Infrared Thermometer ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -40 ถึง 500 องศาเซลเซียสได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ



รูปที่ 3.6 (ซ้าย) เครื่องอบร้อนที่ควบคุมความร้อนด้วยระบบ PI
(ขวา) เครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐาน Fluke 65 Infrared Thermometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเก็บค่าอุณหภูมิของเครื่องอบร้อนจะบันทึกค่าจากหน้าจอบนเครื่องที่แสดงถึงอุณหภูมิที่ปรับตั้งและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเครื่องอบ ดังรูปที่ 3.7-3.13 ผลลัพธ์ของการสอบเทียบอุณหภูมิระหว่างเครื่องอบร้อนและเครื่องวัดอุณหภูมิแบบมาตรฐานตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้ถูกแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.7 ผลการสอบเทียบอุณหภูมิระหว่างเครื่องอบร้อนและเครื่องวัดอุณหภูมิมาตรฐานที่อุณหภูมิปรับตั้ง 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.8 ผลการสอบเทียบอุณหภูมิระหว่างเครื่องอบร้อนและเครื่องวัดอุณหภูมิมาตรฐานที่อุณหภูมิปรับตั้ง 140 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ผลการสอบเทียบอุณหภูมิระหว่างเครื่องอบร้อนและเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐานที่อุณหภูมิปรับตั้ง 180 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.10 ผลการสอบเทียบอุณหภูมิระหว่างเครื่องอบร้อนและเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐานที่อุณหภูมิปรับตั้ง 220 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.11 ผลการสอบเทียบอุณหภูมิระหว่างเครื่องอบร้อนและเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐานที่อุณหภูมิปรับตั้ง 260 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ผลการสอบเทียบอุณหภูมิระหว่างเครื่องอบร้อนและเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐานที่อุณหภูมิปรับตั้ง 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.13 ผลการสอบเทียบอุณหภูมิระหว่างเครื่องอบร้อนและเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐานที่อุณหภูมิปรับตั้ง 340 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.1 ค่าของอุณหภูมิเครื่องอบร้อนที่ได้จากหน้าจอดิจิทัลและเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

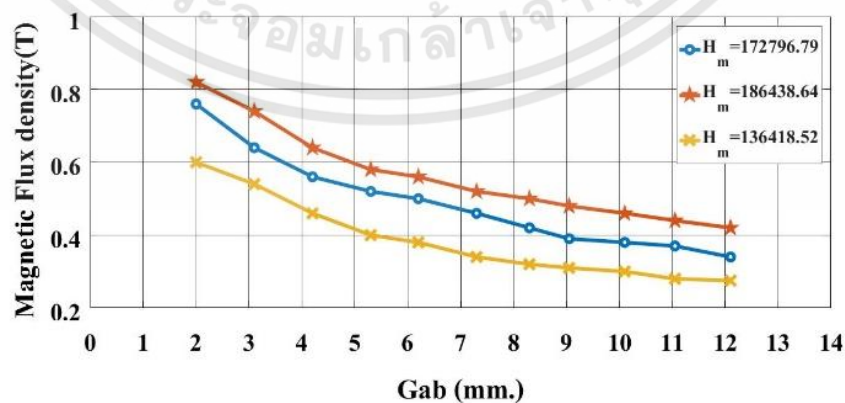
อุณหภูมิปรับตั้ง (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิภายในจากเครื่องอบร้อน (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิภายในจากเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
100	101.1	101.7
140	140.6	140.4
180	180.2	181.2
220	222.9	223
260	260.5	261
300	300.3	300
340	340.6	341

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของเครื่องอบร้อนมีค่าที่แตกต่างกันมากที่สุด 1 องศาเซลเซียส เนื่องจากในการทำงานของของเครื่องอบร้อนจะใช้ขดลวดร้อนในการให้กำเนิดความร้อนทำให้ในการรักษาอุณหภูมิทุกครั้งจะมีการอุ่นขดลวดนี้เมื่อต้องเพิ่มอุณหภูมิทำให้บางช่วงอุณหภูมิจะน้อยกว่าอุณหภูมิที่ปรับตั้งไว้เล็กน้อย อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึงจุดก่อนที่เป็นอุณหภูมิปรับตั้งเล็กน้อยแล้วระบบจะทำการตัดกระแสที่ป้อนให้ขดลวดร้อนแต่ความร้อนที่เกิดขึ้นบนขดลวดยังไม่สลายไปในทันทีส่งผลทำให้อุณหภูมิในบางช่วงเวลาอุณหภูมิภายในเครื่องนั้นมีความสูงกว่าอุณหภูมิที่ปรับตั้งไว้เล็กน้อย และจากการเปรียบเทียบเครื่องอบร้อนกับเครื่องมือวัดมาตรฐานนั้นทำให้เห็นว่าเครื่องอบร้อนนี้มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการทำการทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อนต่อไปได้

3.3 การทดสอบวงจรแม่เหล็กที่นำมาใช้ในการทดสอบ

จากสมการที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อพื้นที่หน้าตัดของแม่เหล็กถาวรและช่องว่างอากาศมีขนาดเท่ากันและขนาดของแม่เหล็กถาวรมีค่าคงที่ จะทำให้เหลือเพียงปัจจัยความกว้างของช่องว่างอากาศเท่านั้นที่มีผลต่อความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้เท่านั้น ในการทดสอบจะใช้ฉนวนไฟฟ้าในการเพิ่มความกว้างของช่องว่างอากาศ โดยความกว้างของช่องว่างอากาศนั้นจะเริ่มที่ 2 มิลลิเมตรแล้วเพิ่มความกว้างไปจนถึง 12 มิลลิเมตร แม่เหล็กถาวรที่นำมาเป็นตัวกำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กให้กับวงจรสำหรับการทดสอบนี้จะกำหนดให้มีความเข้มสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกัน 3 ชนิดเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างในความเข้มของสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกัน ผลของการวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ระยะความกว้างของช่องว่างอากาศต่าง ๆ ได้แสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะช่องว่างอากาศกับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ

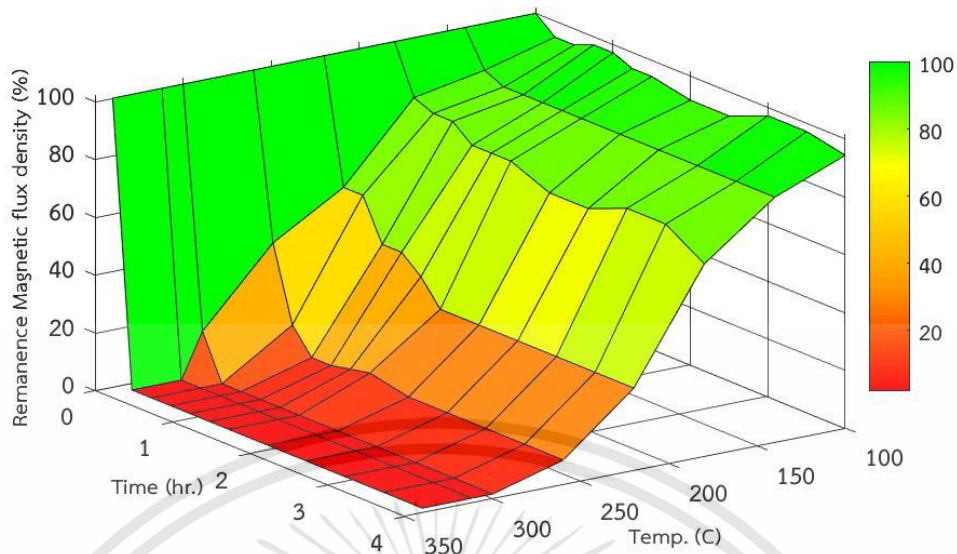
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.14 เห็นได้ว่าเมื่อความกว้างของช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้มีค่าลดลง ซึ่งแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงที่จะเป็นเชิงเส้น เมื่อพิจารณาจากความเข้มสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันโดยที่มีความกว้างช่องว่างอากาศเท่ากัน จะเห็นได้ว่า ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้นั้นจะได้ผลตามความเข้มสนามแม่เหล็กถาวรที่อยู่ในวงจรมแม่เหล็ก เมื่อเปลี่ยนตัวอย่างแม่เหล็กถาวรที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากขึ้นความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะมากขึ้นเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดของความกว้างช่องว่างอากาศเดียวกัน และถึงแม้ความเข้มสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรในวงจรมแม่เหล็กต่างกัน ค่าของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้ก็ยังคงลดลงเมื่อระยะช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์นี้เป็นไปตามสมการที่ 2.7 ซึ่งเห็นได้ว่า วงจรมแม่เหล็กนี้มีความเหมาะสมที่จะสามารถนำมาใช้ในการวัดความเป็นแม่เหล็กของงานวิจัยทั้งหมดภายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

3.4 การทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน

ในการทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อนจะเริ่มจากการอุ่นเครื่องอบให้ได้ตามที่ปรับตั้งก่อนเสมอ เมื่อเครื่องอบร้อนได้อุณหภูมิคงที่ตามที่ต้องการแล้วจึงนำแม่เหล็กถาวรตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเข้าไปอบแล้วเริ่มทำการจับเวลา โดยที่ อุณหภูมิของแม่เหล็กทดสอบก่อนทำการทดลองจะอยู่ที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส ในการเก็บผลของการทดลองนั้นจะนำแม่เหล็กทดสอบที่อบร้อนออกมาวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กทุก ๆ 15 นาที จนกระทั่งค่าความหนาแน่นแม่เหล็กที่หลงเหลือมีค่าคงที่เป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 4 ชั่วโมง

จากสมการที่ 2.7 เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแม่เหล็กและช่องว่างอากาศมีค่าเท่ากันและเส้นแรงแม่เหล็กภายในวงจรมแม่เหล็กมีค่าเท่ากันตลอดทั้งวงจรมแม่เหล็ก ทำให้ในการทดลองนี้สามารถวัดผลของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลือของแม่เหล็กทดสอบได้จากการวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ จากนั้นนำผลจากการวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการทดลองมาพล็อตกราฟ 3 แกนโดยที่ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่ในแกน Z ซึ่งมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตั้งต้น ณ ชั่วโมงที่ 0 อยู่ที่ 100% หรือ 8600 เกาส์ เมื่อวัดด้วยวงจรมแม่เหล็กที่มีความกว้างช่องว่างอากาศ 2 มิลลิเมตร อุณหภูมิที่ใช้ในการอบร้อนอยู่ในแกน X และระยะเวลาของการอบร้อนอยู่ในแกน Y ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

จากรูปที่ 3.15 เห็นได้ว่าปริมาณของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลือ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่แม่เหล็กทดสอบ เมื่อแม่เหล็กทดสอบถูกอบด้วยความร้อน ณ อุณหภูมิที่มากขึ้นจะมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่าลดลงมากขึ้น และเมื่อใช้เวลาในการอบความร้อนมากขึ้น ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กก็จะมีค่าลดลงมากยิ่งขึ้นด้วย โดยค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง โดยที่ค่าของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่สุดท้ายของแต่ละอุณหภูมินั้นมีค่าแตกต่างกันซึ่งจะแปรผกผันกับอุณหภูมิที่ใช้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย และการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กมากที่สุดที่เกิดขึ้นได้ คือจะหลงเหลือความเป็นแม่เหล็กประมาณร้อยละ 2 จากค่าตั้งต้น ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียส อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิของแม่เหล็กทดสอบมีค่าตั้งแต่ 312 องศาเซลเซียส (Curie temperature ของแม่เหล็กทดสอบนี้) ขึ้นไปจะทำให้การสูญเสียความเป็นแม่เหล็กมากที่สุดเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด

3.5 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาพฤติกรรมการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อนของแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH เนื่องจากผลของความร้อน เป็นการจำลองการเกิดการลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กทดสอบที่ถูกนำไปใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง โดยการจำลองเป็นการให้ความร้อนแก่แม่เหล็กถาวรตัวอย่างด้วยเครื่องอบร้อนที่มีการควบคุมอุณหภูมิภายในแบบ

PI ค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองนั้นได้พิจารณาจากอุณหภูมิใช้งานสูงสุดของแม่เหล็กถาวรชนิดนี้ การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดค่าความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กทดสอบในการทดลองนี้ได้นำเสนอวงจรแม่เหล็กแบบปรับความกว้างช่องว่างอากาศได้ในการวัดค่าความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กทดสอบที่หลงเหลืออยู่หลังเกิดการลดความเป็นแม่เหล็ก

ก่อนทำการทดสอบได้ทำการสอบเทียบเครื่องอบกับเครื่องวัดอุณหภูมิมาตรฐาน Fluke 65 Infrared Thermometer โดยผลของการสอบเทียบเครื่องอบแสดงให้เห็นว่า เครื่องอบสามารถรักษา ระดับของอุณหภูมิภายในให้มีค่าตามที่ต้องการได้ ทำให้เครื่องอบมีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้งาน ในการทดลองต่อไป อีกทั้งได้ทำการทดสอบวงจรแม่เหล็กแบบปรับความกว้างช่องว่างอากาศได้ โดยการนำแม่เหล็กที่มีอำนาจทางแม่เหล็กที่แตกต่างกันมาวัดด้วยวงจรแม่เหล็กแบบปรับความกว้างช่องว่างอากาศได้ ผลของการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อความกว้างของช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้มีค่าลดลง และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้ ณ ช่องว่างอากาศจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับความเข้มของแม่เหล็กถาวรที่อยู่ในวงจรแม่เหล็ก ทำให้วงจรแม่เหล็กนี้มีความเหมาะสมที่จะสามารถนำมาใช้ในการวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลือในการทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน

จากผลการทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อนของแม่เหล็กทดสอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการใช้งานแม่เหล็กทดสอบที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 100 องศาเซลเซียส จะเริ่มมีการสูญเสียเกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิใช้งานสูงขึ้นการลดความเป็นแม่เหล็กก็จะมากขึ้น อีกทั้งในการทดลองนี้มีการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กมากที่สุดที่เกิดขึ้นได้ คือจะหลงเหลือความเป็นแม่เหล็กประมาณร้อยละ 2 จากค่าตั้งต้น ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียส อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิของแม่เหล็กทดสอบมีค่าตั้งแต่ 312 องศาเซลเซียสขึ้นไปจะทำให้การสูญเสียความเป็นแม่เหล็กมากที่สุดเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และสำหรับทุก ๆ อุณหภูมิที่เกิดการลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กทดสอบนั้น เมื่อการลดความเป็นแม่เหล็กลดลงถึงค่า ๆ หนึ่งจะไม่มีเกิดการลดความเป็นแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอีก หากแม่เหล็กทดสอบนั้นยังมีอุณหภูมิที่ไม่สูงเกินกว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นแล้ว จากผลการศึกษาเบื้องต้นนี้จะเห็นได้ว่า หากเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรที่ใช้แม่เหล็กทดสอบมีอุณหภูมิภายในขณะใช้งานสูงเกินกว่า 100 องศาเซลเซียส ก็จะทำให้แม่เหล็กถาวรชนิดนี้ที่ติดตั้งอยู่มีความเป็นแม่เหล็กลดลงอันจะส่งผลให้ประสิทธิภาพและสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าลดลง เนื่องจากการเกิดการลดความเป็นแม่เหล็กภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรลดลง ส่งผลให้แรงบิดที่ได้จากมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าลดลงและระดับแรงดันขาออกที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าลดลงอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบและจัดสร้างวงจรกระตุ้นแม่เหล็กอย่างง่าย

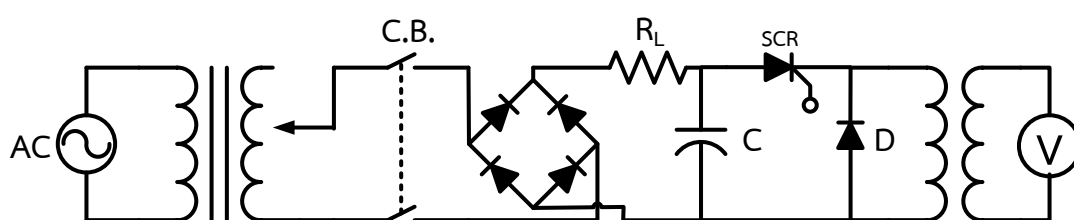
ในการศึกษาการศึกษาการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรที่เกิดการลดหรือสูญเสียความเป็นแม่เหล็กอันได้รับผลกระทบจากความร้อนจำเป็นต้องมีวงจรกระตุ้นที่สามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มเพียงพอสำหรับใช้ในการกระตุ้นแม่เหล็กทดสอบ โดยที่ตามกราฟคุณลักษณะของแม่เหล็กทดสอบแล้วต้องใช้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงกว่าความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟ 1,989 kA/m เพื่อใช้ในการกระตุ้นให้ก้อนแม่เหล็กทดสอบเกิดความเป็นแม่เหล็กโดยสมบูรณ์ วงจรสำหรับกระตุ้นนี้จะออกแบบโดยที่จะใช้รูปแบบวงจรอนุพันธ์ลำดับที่สองซึ่งเป็นวงจรรอง่าย อันประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักเป็นตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศ

4.1 การออกแบบวงจรกระตุ้น

ในการออกแบบวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กทดสอบนั้นจะอ้างอิงตามกราฟคุณลักษณะแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟ 1,989 kA/m เพื่อใช้ในการกระตุ้นให้เกิดความเป็นแม่เหล็ก อีกทั้งวงจรแม่เหล็กที่ทำการจะสร้างจะเป็นวงจรกระตุ้นอย่างง่ายที่ไม่ซับซ้อน

4.1.1 รูปแบบวงจรที่ใช้ในการออกแบบ

รูปแบบของวงจรตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น จะใช้วงจรอนุพันธ์ลำดับที่สองที่มีตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศเป็นอุปกรณ์หลักในการสร้าง องค์ประกอบของวงจรส่วนอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศนั้น ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงสำหรับอัดประจุเข้าตัวเก็บประจุ สวิตช์ ไดโอด และขดลวดเหนี่ยวนำ โดยที่รูปแบบของวงจรนี้จะเป็นไปตามรูปที่ 4.1



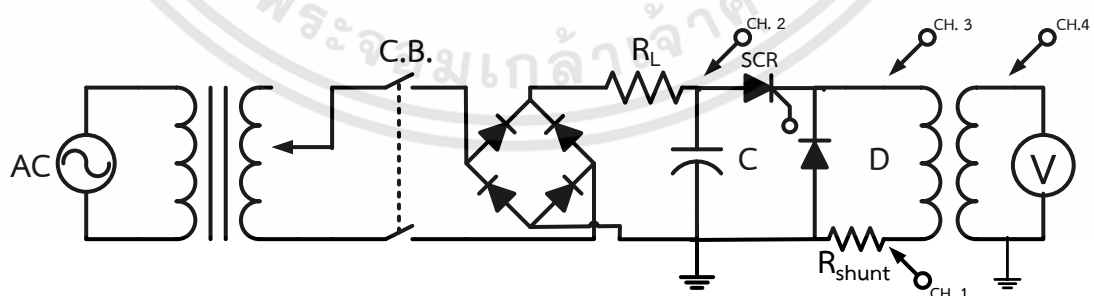
รูปที่ 4.1 รูปแบบของวงจรกระตุ้นแม่เหล็กอย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับระดับแรงดันได้ต่อกับอุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน(C.B.)แล้วต่อไปยังวงจรเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์เพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงในการอัดประจุของตัวเก็บประจุ ในการอัดประจุจะใช้ตัวต้านทาน(RL) เพื่อจำกัดกระแสของการอัดประจุเนื่องจากหากไม่มีตัวต้านทานนี้ในการจำกัดกระแสไว้อาจส่งผลทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ทั้งวงจรเรียงกระแสและตัวเก็บประจุได้ สำหรับการกระตุ้นจะอาศัย SCR เป็นอุปกรณ์ในการเปิดปิดเนื่องจากในการกระตุ้นที่เป็นการคายพลังงานจากตัวเก็บประจุไปยังตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศนั้นต้องการกระแสไฟฟ้ากระตุ้นที่สูงและหากการปิดวงจรที่ช้าเกินไปอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อผู้ทดลองและอุปกรณ์ได้ อีกทั้งยังมีไดโอด (D) ที่ทำหน้าที่สำหรับการสลายพลังงานที่เหลืออยู่ในขดลวดเพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายที่เกิดจากการคายพลังงานกลับของขดลวด

4.1.2 วิธีการวัดผลลัพธ์ของการกระตุ้น

การวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในตัวต้านทานเหนี่ยวนำแกนอากาศจะอาศัยการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำซึ่งไปตามสมการที่ 2.10 จากกฎของเลนซ์ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ ในการใช้งานจะเป็นการนำขดลวดแกนอากาศไปติดตั้งในตัวเหนี่ยวนำที่ใช้สำหรับการกระตุ้น และการอ่านค่าระดับกระแสกระตุ้นภายในวงจรจะใช้อ่านแรงดันจากตัวต้านทาน โดยที่ตัวต้านทานที่นำมาใช้อัตราส่วนเป็น 50mV:500A รูปแบบของการวัดที่ใช้งานนั้นเป็นไปตามรูปที่ 4.2 โดยที่ในการวัดจะใช้ออสซิลอโคปเป็นตัวอ่านค่าแล้วจึงนำข้อมูลที่ได้อ่านวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.2 รูปแบบการวัดค่าสำหรับวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็ก

4.1.3 การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการกระตุ้นด้วยโปรแกรม MATLAB

การวิเคราะห์ผลของการกระตุ้นนั้นจะใช้ชุดข้อมูลที่ได้จากออสซิลโลสโคปที่เป็นไฟล์ประเภท .CSV ซึ่งไฟล์ประเภทนี้เป็นการบันทึกค่าขนาดของระดับแรงดัน ณ ช่วงเวลาที่ทำการบันทึกค่า โดยที่ข้อมูลที่เก็บมาได้นั้นประกอบด้วยข้อมูล 4 ชุด อันได้แก่ กระแสของการกระตุ้น(CH.1) ระดับแรงดันของตัวเก็บประจุ(CH.2) ระดับแรงดันของขดลวดกระตุ้น(CH.3) และระดับแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น(CH.4)

ในการคำนวณหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการกระตุ้นนั้นจะอาศัยข้อมูลระดับแรงดันเหนี่ยวนำของขดลวดที่อยู่ภายในช่องว่างอากาศมาทำการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูล (Curve Fitting) โดยใช้รูปแบบ Polynomial regression สมการกำลัง 3 และ 4 เพื่อหาความสัมพันธ์ของระดับแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นให้อยู่ในรูปของเวลา ก่อนที่จะทำการนำรูปแบบสมการที่ได้มาวิเคราะห์จำเป็นต้องมีการหาค่าความคลาดเคลื่อนของสมการที่ได้เทียบกับชุดข้อมูลจริง วิธีการที่นำมาหาค่าความคลาดเคลื่อน คือ Least-squares Regression ซึ่งค่า r^2 ที่ได้จากวิธีการนี้เป็นตัวชี้วัดความคลาดเคลื่อน หากค่า r^2 ที่ได้มีค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้น จะแสดงถึงว่า สมการที่ได้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลได้ เมื่อได้ความสัมพันธ์ที่เกิดในรูปแบบของเวลาแล้วจึงนำมาคำนวณหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยที่เริ่มคำนวณหาปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นตามสมการที่ 2.10 กฎของเลนส์ แล้วจึงนำไปหาด้วยพื้นที่หน้าตัดของขดลวดเหนี่ยวนำภายในช่องว่างอากาศ โดยที่ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จะอยู่ในรูปสมการที่ขึ้นอยู่กับเวลาดังสมการที่ 4.1

$$\begin{aligned} \text{emf} &= -N \frac{d\phi}{dt} \\ \text{emf} &= -N \frac{dBA}{dt} \\ dB &= -\frac{1}{NA} (\text{emf}) dt \\ B &= -\frac{1}{NA} \int (\text{emf}) dt \end{aligned} \quad (4.1)$$

4.1.4 การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุภายในวงจร

วงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กจะอาศัยถ่ายเทพลังงานจากตัวเก็บประจุไปยังขดลวดกระตุ้นเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก ทำให้ในการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุภายในวงจรจะเริ่มจากการหาค่าพลังงานของสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กทดสอบ ซึ่งขนาดของตัวเก็บประจุจะขึ้นอยู่กับพลังงานของสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการกระตุ้นตามที่ได้คำนวณไว้

4.1.4.1 การคำนวณหาพลังงานของสนามแม่เหล็ก

ในการคำนวณหาพลังงานของสนามแม่เหล็กที่ต้องการในการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการที่ 4.2

$$W_H = \frac{1}{2} \oint_{\text{vol}} (\mathbf{B} \times \mathbf{H}) dV = \frac{1}{2\mu_0} \oint_{\text{vol}} (\mathbf{B}^2) dV = \frac{\mu_0}{2} \oint_{\text{vol}} (\mathbf{H}^2) dV \quad (4.2)$$

โดยที่ W_H คือ พลังงานของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น (J)

B คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในช่องว่างอากาศ (T)

H คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (kA/m)

dV คือ ปริมาตรของช่องว่างอากาศที่เกิดสนามแม่เหล็ก (m^3)

จากสมการที่ 4.2 ทำให้สามารถหาความหนาแน่นของพลังงานในสนามแม่เหล็กเป็นตามสมการความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$E = \frac{1}{2} (\mathbf{B} \times \mathbf{H}) = \frac{\mu_0 \mathbf{H}^2}{2} = \frac{\mathbf{B}^2}{2\mu_0} \quad (4.3)$$

โดยที่ E คือ ความหนาแน่นของพลังงานในสนามแม่เหล็ก (J/m^3)

4.1.4.2 การคำนวณหาขนาดของตัวเก็บประจุ

ในวงจรกระตุ้นความแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองภายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ใช้ตัวเก็บประจุแบบกระแสตรงเพิ่มเก็บพลังแล้วจ่ายพลังงานที่เก็บไว้ให้แก่ขดลวดกระตุ้นเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางที่แน่นอน พลังงานที่เก็บภายในตัวเก็บประจุสามารถหาได้จากสมการความสัมพันธ์ที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_H = \frac{1}{2} CV_0^2 \quad (4.4)$$

โดยที่ W_H คือ พลังงานที่เก็บภายในตัวเก็บประจุ (J)

C คือ ขนาดของตัวเก็บประจุ (F)

V_0 คือ ระดับแรงดันของตัวเก็บประจุ (V)

การหาขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรนั้นต้องอาศัยสมการความสัมพันธ์ที่ 4.3 และ 4.4 โดยกำหนดให้พลังงานของสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการกระตุ้นมีค่าเท่ากับพลังงานที่เก็บภายในตัวเก็บประจุ ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ของขนาดตัวเก็บประจุที่ต้องใช้ในวงจรกระตุ้นเป็นดังสมการที่ 4.5

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} CV_0^2 &= \frac{1}{2} \oint_{\text{vol}} (\mathbf{B} \times \mathbf{H}) dV = \frac{1}{2\mu_0} \oint_{\text{vol}} (B^2) dV = \frac{\mu_0}{2} \oint_{\text{vol}} (H^2) dV \\ C &= \frac{1}{V_0^2} \oint_{\text{vol}} (\mathbf{B} \times \mathbf{H}) dV = \frac{1}{\mu_0 V_0^2} \oint_{\text{vol}} (B^2) dV = \frac{\mu_0}{V_0^2} \oint_{\text{vol}} (H^2) dV \end{aligned} \quad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.5 ขนาดของตัวเก็บประจุที่ต้องการนั้นจะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กที่ต้องการ ปริมาตรช่องว่างอากาศ และระดับแรงดันเริ่มต้นของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น ทำให้ในการหาขนาดของตัวเก็บประจุนอกจากจะต้องกำหนดความเข้มสนามแม่เหล็กที่ต้องแล้วยังจำเป็นต้องกำหนดขนาดของช่องว่างอากาศที่จะนำไปใช้งาน และระดับแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุด้วยเช่นเดียวกัน

4.2 การสร้างวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็ก

วงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กที่จะทำการจัดสร้างขึ้นจะต้องสามารถสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นไปตามค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟ (H_c) ที่ได้จากการพลาสมาของแม่เหล็กทดสอบ โดยที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟที่ต้องการนั้นมีค่า 1,989 kA/m ทำให้ขั้นตอนในการสร้างวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กให้ได้ผลลัพธ์เป็นสนามแม่เหล็กตามที่ต้องการนั้นต้องทำการออกแบบขดลวดตัวนำที่จะนำไปใช้งานเป็นอันดับแรก เนื่องจากขนาดตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เก็บประจุที่ใช้ในวงจรนั้นจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่จะใช้ในการกระตุ้น สนามแม่เหล็กจะทำการสร้างและปริมาตรของช่องว่างอากาศ นอกเหนือจากการกำหนดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแล้วยังต้องกำหนดแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นอีกด้วย แรงดันกระตุ้นสูงสุดที่ใช้ในการกระตุ้นจะกำหนดไว้ที่ 300 โวลต์

4.2.1 การสร้างขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1

ขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 นี้จะใช้ท่อพีวีซีขนาด 4 นิ้วเป็นแกนเพื่อให้เกิดช่องว่างอากาศและกำหนดความสูงของขดลวดกระตุ้นนี้เป็น 8 เซนติเมตร และกำหนดจำนวนรอบของขดลวดที่ใช้ในการพันเป็น 25 รอบ โดยที่จะทำการลดความต้านทานของขดลวดให้มีค่าน้อยที่สุดแต่ยังคงสามารถทำการพันโดยไม่สร้างความเสียหายแก่ท่อพีวีซีที่นำมาใช้เป็นแกน

กระแสไฟฟ้าที่ใช้สำหรับกระตุ้นเพื่อให้ได้ความเข้มของสนามแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 สามารถหาได้จากสมการที่ 2.9 มีค่าดังต่อไปนี้

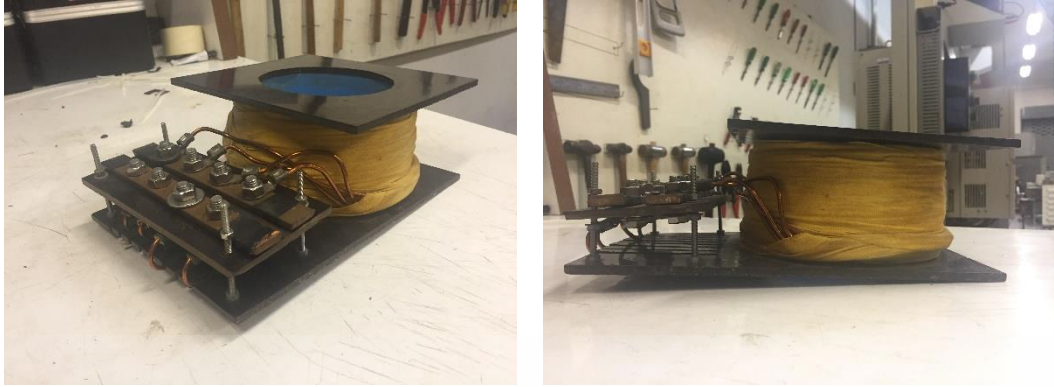
$$i = \frac{H \times l}{N}$$

$$i = \frac{1,989,000 \times 0.08}{25}$$

$$i = 6,364.8 \text{ A}$$

นั่นคือ สำหรับการกระตุ้นขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่มีความเข้มสนามแม่เหล็ก 1,989 kA/m จะต้องการกระแสไฟฟ้า 6,364.8 A ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดกระตุ้นต้องมีค่าที่ต่ำมากที่สุด โดยที่วิธีที่เลือกใช้สำหรับการลดความต้านทานของขดลวดกระตุ้นคือการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ

ขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 นั้นใช้ลวดตัวนำทองแดงเบอร์ SWG21 ขนานกัน 4 ชุดเพื่อให้ได้พื้นที่หน้าตัดที่เยอะที่สุดโดยที่ไม่สร้างความเสียหายแก่วัสดุที่นำมาทำแกนอากาศในขณะที่กำลังพัน โดยที่ ขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ที่ได้สร้างขึ้นจะถูกแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 แกนอากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว การพัน 25 รอบ และมีความสูง 8 เซนติเมตร

ทำการหาขนาดของตัวเก็บประจุภายในวงจรกระตุ้นตามสมการที่ 4.5 ในเบื้องต้นจะให้สนามแม่เหล็กที่กำหนดเกิดขึ้นโดยที่แรงดันที่ใช้ในการกระตุ้นอยู่ที่ 300 โวลต์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ได้กล่าวมาทำให้ขนาดของตัวเก็บประจุมีค่าดังต่อไปนี้

$$C = \frac{\mu_0}{V_0^2} \oint_{\text{vol}} (H^2) dV = \frac{\mu_0}{V_0^2} \times H^2 \times \text{vol}$$

$$C = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{(300)^2} \times (1,989,000)^2 \times (0.08 \times (0.052)^2 \times \pi)$$

$$C = 0.0375 \text{ F}$$

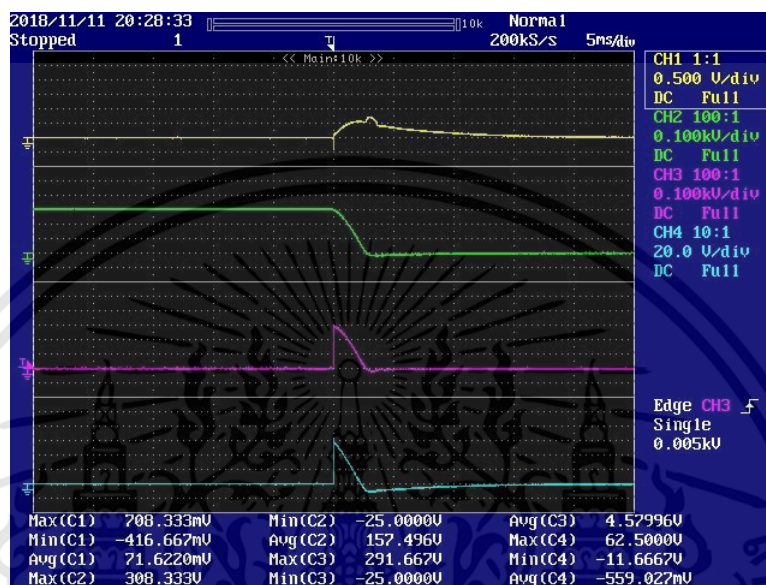
ขนาดของตัวเก็บประจุที่ต้องใช้ในวงจรกระตุ้นสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ต้องมีค่าไม่น้อยไปกว่า 0.0375 ฟาร์รัต หรือ 37.5 มิลลิฟาร์รัต และขนาดกระแสไฟฟ้ากระตุ้นที่ต้องการอยู่ที่ 6,364.8 แอมแปร์ ณ ระดับแรงดัน 300 โวลต์

4.2.2 การทดสอบวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1

การทดสอบวงจรนี้ทำเพื่อตรวจสอบความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการกระตุ้นขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ ในการวิเคราะห์จะใช้การวัดค่าแรงดัน ณ จุดต่าง ๆ ภายในวงจร ซึ่งเป็นไปตามรูปแบบในการวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในรูปที่ 4.2 ในการทดสอบนี้ค่าของตัวเก็บประจุที่นำมาใช้งานนั้นมีขนาด 40 มิลลิฟาร์รัต และจะทำการกระตุ้นที่ระดับ

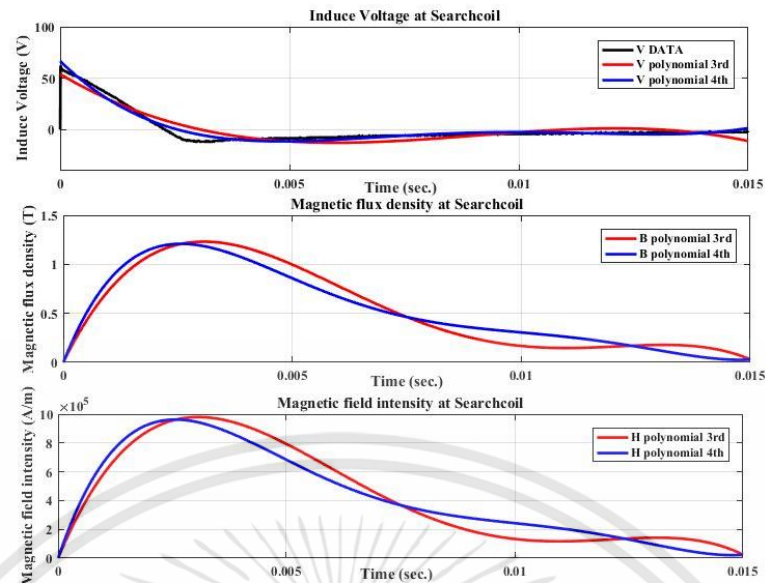
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้า 300 โวลต์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบเป็นไปดังรูปที่ 4.4 โดยที่ ข้อมูลใน CH.1 คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ขดลวดกระตุ้น CH.2 คือ แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ CH.3 คือ แรงดันไฟฟ้าของขดลวดกระตุ้น และ CH.4 คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.4 ผลลัพธ์ของการกระตุ้นขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ด้วยตัวเก็บประจุขนาด 40 มิลลิฟาร์รัต ณ ระดับแรงดัน 300 โวลต์ โดยที่กระแสกระตุ้นสูงสุดที่เกิดขึ้น(CH.1) คือ 7,083.33 แอมป์แปร์ และ แรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่วัดได้(CH.4) คือ 62.5 โวลต์

จากนั้นทำการนำข้อมูลแรงดันเหนี่ยวนำที่ได้มาทำการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูล (Curve Fitting) โดยใช้รูปแบบ Polynomial regression สมการกำลัง 3, 4, 5 และ 6 จากนั้นนำสมการความสัมพันธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดไปคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างอากาศ กราฟของผลลัพธ์ที่ได้จากการนำไปคำนวณด้วยเป็นไปตามรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB ของการกระตุ้นขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ด้วยตัวเก็บประจุขนาด 40 มิลลิฟารัด ณ ระดับแรงดัน 300 โวลต์ โดยที่ (บน) กราฟแรงดันเหนี่ยวนำที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 62.5 โวลต์ (กลาง) กราฟความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ค่าสูงสุดอยู่ที่ 1.209 เทสลา (ล่าง) กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ค่าสูงสุดอยู่ที่ 962.688 kA/m

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก และค่า r-square ที่แสดงถึงความแม่นยำของสมการแรงดันเหนี่ยวนำที่ได้จากการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูล (Curve Fitting) เป็นดังตารางที่ 4.1

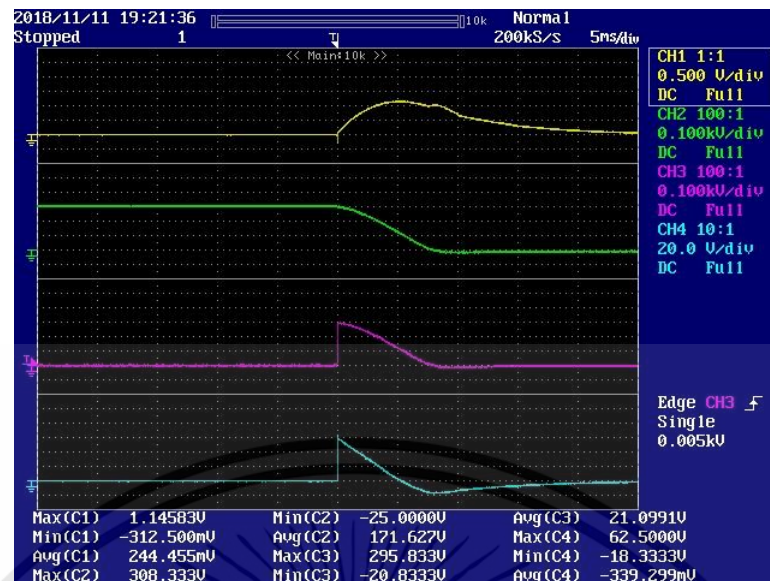
ตารางที่ 4.1 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ที่มีตัวเก็บประจุขนาด 40 มิลลิฟารัด และใช้ระดับแรงดันกระตุ้น 300 โวลต์

	B_{\max} (T)	H_{\max} (kA/m)	r^2
Polynomial 3 rd	1.232	980.124	0.881
Polynomial 4 th	1.21	962.689	0.96
Polynomial 5 th	-1.527	-1,214.887	0.964
Polynomial 6 th	-0.266	-211.919	0.97

จากตารางที่ 4.1 ผลลัพธ์ของการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูล (Curve Fitting) โดยใช้รูปแบบ Polynomial regression สมการกำลัง 3, 4, 5 และ 6 เห็นได้ สมการกำลัง 4, 5 และ 6 สามารถนำสมการที่ได้มาอธิบายรูปแบบของแรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้า(CH.4)ได้เป็นอย่างดีเมื่อดูจากค่า r-square แต่เมื่อนำสมการที่ได้ไปคำนวณหารูปสมการความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกลับพบว่า สมการแรงดันเหนี่ยวนำกำลัง 5 และ 6 ให้รูปร่างของสนามแม่เหล็กไม่สอดคล้องกันรูปร่างของการแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ขดลวดกระตุ้น(CH.1) ส่งผลให้สมการแรงดันเหนี่ยวนำกำลัง 5 และ 6 ไม่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการกระตุ้น ถึงแม้ค่า r-square ของสมการแรงดันเหนี่ยวนำกำลัง 3 มีค่าน้อยที่สุดแต่ก็ยังมีค่าเหมาะสมกว่าสมการแรงดันเหนี่ยวนำกำลัง 5 และ 6 เนื่องจากเมื่อนำสมการที่ได้ไปคำนวณหารูปสมการความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กยังคงมีรูปร่างของสนามแม่เหล็กสอดคล้องกันรูปร่างของการแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ขดลวดกระตุ้น(CH.1)อยู่ จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้สมการแรงดันเหนี่ยวนำกำลัง 4 มีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำไปใช้งานต่อไปสำหรับการคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กของวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ที่มีตัวเก็บประจุขนาด 40 มิลลิฟาร์ัดและใช้ระดับแรงดันกระตุ้น 300 โวลต์

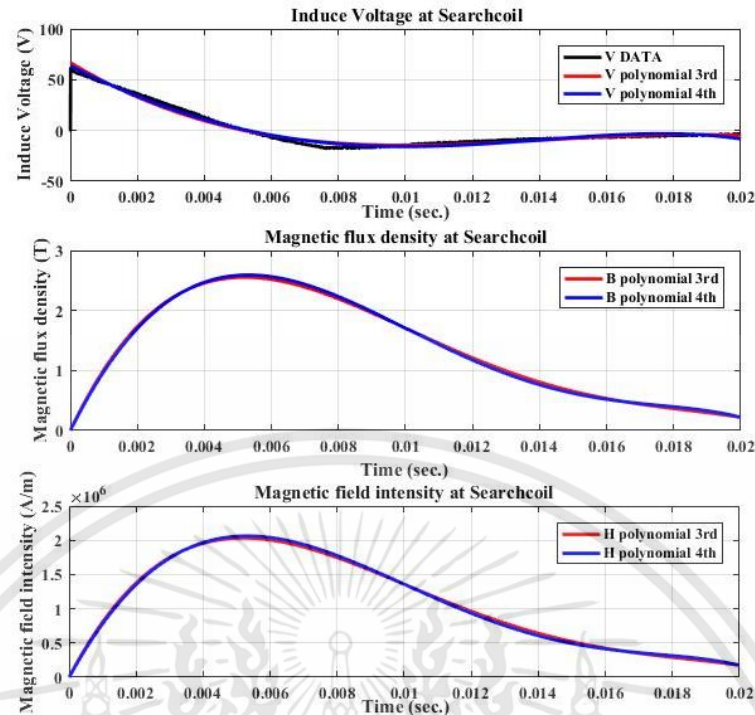
จากการคำนวณพบว่า เมื่อใช้ตัวเก็บประจุขนาด 40 มิลลิฟาร์ัด ในวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ได้จากการทดลอง ณ ระดับแรงดันกระตุ้น 300 โวลต์ มีค่า 962.688 kA/m ซึ่งค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ได้นี้เป็นค่าที่น้อยกว่าค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ให้สามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ข้างต้น

วิธีการปรับปรุงวงจรกระตุ้นทำได้โดยการเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุ เพื่อให้พลังงานที่ถ่ายเทไปยังปลายทางได้เพิ่มมากขึ้น จึงได้ทำการทดสอบโดยเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 แล้วทำการกระตุ้นเพื่อวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นอยู่ที่ 300 โวลต์ และขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 40 – 280 มิลลิฟาร์ัด ตัวอย่างของการหาความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นไปตามรูปที่ 4.6-4.7 และผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองเป็นตามตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.6 ผลลัพธ์ของการกระตุ้นขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ด้วยตัวเก็บประจุขนาด 280 มิลลิฟาร์ัด ณ ระดับแรงดัน 300 โวลต์ โดยที่กระแสกระตุ้นสูงสุดที่เกิดขึ้น(CH.1) คือ 11,458.3 แอมป์แปร์ และแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่วัดได้(CH.4) คือ 62.5 โวลต์

จากนั้นทำการนำข้อมูลแรงดันเหนี่ยวนำจากเครื่องวัดรูปคลื่นสัญญาณใน CH.4 เข้าสู่โปรแกรม MATLAB แล้วจึงทำการการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูล (Curve Fitting) โดยใช้รูปแบบ Polynomial regression สมการกำลัง 3 และ 4 จากนั้นนำสมการความสัมพันธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดไปคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างอากาศ กราฟของผลลัพธ์ที่ได้จากการนำไปคำนวณด้วยเป็นไปตามรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB ของการกระตุ้นขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ด้วยตัวเก็บประจุขนาด 280 มิลลิฟารัด ณ ระดับแรงดัน 300 โวลต์ โดยที่ (บน) กราฟแรงดันเหนี่ยวนำที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 62.5 โวลต์ (กลาง) กราฟความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ค่าสูงสุดอยู่ที่ 2.592 เทสลา (ล่าง) กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ค่าสูงสุดอยู่ที่ 2,063.222 kA/m

ตารางที่ 4.2 ตารางค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากวงจรกระตุ้นสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ที่มีขนาดของตัวเก็บประจุที่แตกต่างกัน โดยใช้ระดับแรงดันกระตุ้น 300 โวลต์

C (mF)	I_{\max} (A)	Polynomial 3 rd			Polynomial 4 th		
		H_{\max} (kA/m)	B_{\max} (T)	r^2	H_{\max} (kA/m)	B_{\max} (T)	r^2
40	7,083.33	980.124	1.231	0.881	962.688	1.209	0.960
80	8,541.67	1,322.548	1.662	0.955	1,301.817	1.635	0.962
120	8,752.67	1,391.434	1.748	0.966	1,378.986	1.732	0.968
160	9,375	1,624.314	2.041	0.954	1,597.390	2.007	0.967
200	10,208.3	1,841.062	2.313	0.970	1,827.889	2.296	0.971
240	10,833.3	1,951.074	2.451	0.976	1,958.020	2.460	0.976
280	11,458.3	2,033.809	2.555	0.975	2,063.222	2.592	0.994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการกระตุ้นขดลวดรูปแบบที่ 1 โดยใช้วงจรกระตุ้นที่มีขนาดของตัวเก็บประจุที่แตกต่างกัน โดยที่ใช้ระดับแรงดันกระตุ้น 300 โวลต์ แสดงให้เห็นว่าขนาดของตัวเก็บประจุจะมีผลต่อสนามแม่เหล็กที่ได้จากการกระตุ้นด้วยระดับแรงดันไฟฟ้าเดียวกัน โดยที่เมื่อเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุจะทำให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้น ตัวเก็บประจุขนาด 280 มิลลิฟาร์ัด สามารถทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดมีความเข้มเป็นไปตามที่ต้องการ แต่ระดับแรงดัน 300 โวลต์ที่ใช้เพื่อให้ได้สนามแม่เหล็กกระตุ้นตามที่ต้องการนั้นมีค่าสูงเกินกว่าที่จะนำมาใช้งาน ทำให้ต้องลดระดับแรงดันที่ใช้กระตุ้นโดยไม่กระทบต่อความเข้มสนามแม่เหล็กที่ต้องการ เบื้องต้นได้ทำการเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุให้สอดคล้องกับระดับแรงดันที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามตามที่ต้องการ โดยผลของการเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุมีค่าเป็นไปตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการลดระดับแรงดันในการกระตุ้นด้วยการเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุ โดยที่สนามแม่เหล็กกระตุ้นมีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงกว่า 2000 kA/m

V (V)	C (mF)
300	280
290	290
280	320
270	390
260	430
250	470

จากตารางที่ 4.3 การเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุเพื่อลดระดับแรงดันกระตุ้นนั้นสามารถทำได้เมื่อพิจารณาขนาดของตัวเก็บประจุที่เพิ่มขึ้น 230 มิลลิฟาร์ัดได้ส่งผลให้ระดับแรงดันกระตุ้นลดลง 50 โวลต์ หากต้องการให้แรงดันกระตุ้นลดลงมากกว่า 50 V ต้องเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุให้มีขนาดใหญ่กว่า 470 มิลลิฟาร์ัด ทำให้การเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุที่สูงขึ้นเกินกว่า 2 เท่านั้นเป็นการใช้ตัวเก็บประจุที่ใหญ่เกินความเหมาะสม ทำให้ขนาดตัวเก็บประจุที่เพิ่มขึ้นไปเพื่อลดระดับแรงดันกระตุ้นนั้นจะใช้ตัวเก็บประจุขนาด คือ 470 มิลลิฟาร์ัด เพื่อเป็นวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 จากนั้นจึงได้ทำการทดลองสร้างสนามแม่เหล็กโดยใช้วงจรกระตุ้นที่มีตัวเก็บประจุขนาด 470 มิลลิฟาร์ัด ด้วยแรงดันกระตุ้นที่ต่างกัน ระดับแรงดันที่ใช้ในการ

ทดลองมีค่า 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 โวลต์ตามลำดับ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าเป็นไปตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตารางค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ด้วยระดับแรงดันกระตุ้นที่แตกต่างกัน

V (V)	I_{\max} (A)	Polynomial 3 rd			Polynomial 4 th		
		H_{\max} (kA/m)	B_{\max} (T)	r^2	H_{\max} (kA/m)	B_{\max} (T)	r^2
50	2,083.33	368.689	0.463	0.966	373.592	0.469	0.969
100	4,291.67	771.823	0.969	0.988	781.242	0.982	0.991
150	6,500	1,138.865	1.431	0.986	1,153.864	1.45	0.989
200	8,750	1,538.495	1.933	0.986	1,558.773	1.958	0.989
250	11,041.70	1,982.808	2.492	0.986	2,007.479	2.522	0.989
300	13,125	2,422.45	3.044	0.986	2,453.351	3.083	0.989

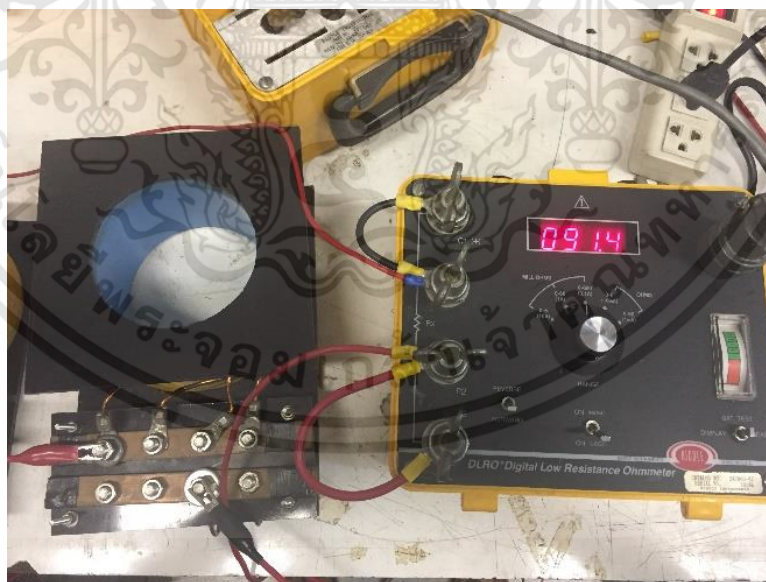
จากตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ด้วยระดับแรงดันกระตุ้นที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองของระดับแรงดันที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ณ ช่องว่างอากาศ เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้น ณ ช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อระดับแรงดันในการกระตุ้นมีค่าตั้งแต่ 250 โวลต์ขึ้นไป ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่า 2,007 kA/m ซึ่งค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นนี้มากกว่าค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่แม่เหล็กทดสอบต้องการ แต่อย่างไรก็ตามระดับแรงดันที่ใช้ในการกระตุ้นเพื่อให้ได้สนามแม่เหล็กตามที่ต้องการยังเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูง ทำให้ยังไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานจริงทำให้ต้องมีการพัฒนาขดลวดกระตุ้นที่ใช้ต่อไป

4.3 การสร้างและทดสอบขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2

ขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 นี้จะเป็นการปรับปรุงขดลวดรูปแบบที่ 1 เพื่อลดระดับแรงดันกระตุ้นที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามสูงกว่า 1,989 kA/m วิธีที่นำมาใช้ในการปรับปรุงเพื่อสร้างขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 คือ การลดความสูงและพื้นที่หน้าตัดของแกนอากาศ โดยที่การลดความสูงของแกนอากาศจะลดลงครึ่งหนึ่งจาก 8 เซนติเมตรลดลงเหลือ 4 เซนติเมตร และใช้ท่อพีวีซีขนาด 3 นิ้วเป็นแกนแทนการใช้ท่อพีวีซีขนาด 4 นิ้ว โดยที่ จำนวนรอบของขดลวดที่ใช้ในการพันเป็น 25 รอบ และความต้านทานของขดลวดกระตุ้นต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความต้านทานของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 เพื่อให้ค่ากระแสกระตุ้นสูงสุดเป็นไปตามขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ตามที่ได้ทำการทดสอบมาข้างต้น

4.3.1 การสร้างขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2

ค่าความต้านทานของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 สามารถวัดความต้านทานด้วยเครื่องวัดความต้านทานต่ำ (Low resistance meter) ค่าความต้านทานของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 เป็นไปตามรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ค่าความต้านทานของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ที่มีค่า 91.4 มิลลิโอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 ค่าความต้านทานของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 มีค่า 91.4 มิลลิโอห์ม ทำให้ขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 ที่กำลังจะจัดสร้างขึ้นมาจะต้องมีความต้านทานที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ ความต้านทานนี้ โดยทั่วไปแล้วค่าความต้านทานของขดลวดนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ และความยาวของตัวนำ ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 4.6

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (4.6)$$

โดยที่ R คือ ค่าความต้านทาน (โอห์ม)

ρ คือ สภาวะความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม-เมตร)

l คือ ความยาวของลวดตัวนำ (เมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ (ตารางเมตร)

จากสมการที่ 4.6 ทำการคำนวณเพื่อหาพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำที่ต้องใช้ในการสร้างขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 โดยที่ ความต้านทานที่ต้องการมีค่า 91.4 มิลลิโอห์ม ชนิดลวดตัวนำที่ใช้เป็นลวดทองแดงทำให้ ρ มีค่า 1.68×10^{-8} โอห์ม-เมตร และความยาวของลวดตัวนำนั้นหาได้จากความยาวเส้นรอบวงของแกนคูณด้วยจำนวนรอบที่ต้องการ นั่นคือ 25 รอบ การหาพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำที่ต้องการด้วยสมการที่ 4.6 เป็นดังต่อไปนี้

$$A = \frac{\rho \times (2 \times \pi \times r \times N)}{R}$$

$$A = \frac{(1.68 \times 10^{-8}) \times (25 \times 2 \times \pi \times 0.041275)}{91.4 \times 10^{-3}}$$

$$A = 1.1917 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

จากการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำที่ได้มีขนาด 1.1917 ตารางมิลลิเมตร ในการสร้างขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 นั้นค่าของพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำทองแดงต้องมีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าหรือเท่ากับ 1.1917 ตารางมิลลิเมตร ในการเลือกขนาดสายของลวดตัวนำทองแดงที่จะนำมาใช้ในการสร้างจะใช้ลวดตัวนำทองแดงเบอร์ SWG.21 ที่มีพื้นที่หน้าตัด 0.5189 ตารางมิลลิเมตร จำนวน 3 เส้นในการพันขดลวดกระตุ้นทำให้พื้นที่หน้าตัดโดยรวมของลวดตัวนำทองแดงที่นำมาใช้

งานมีขนาด 1.5567 ตารางมิลลิเมตร ค่าความต้านทานของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$R = \frac{\rho \times (2 \times \pi \times r \times N)}{A}$$

$$R = \frac{(1.68 \times 10^{-8}) \times (25 \times 2 \times \pi \times 0.041275)}{1.5567 \times 10^{-6}}$$

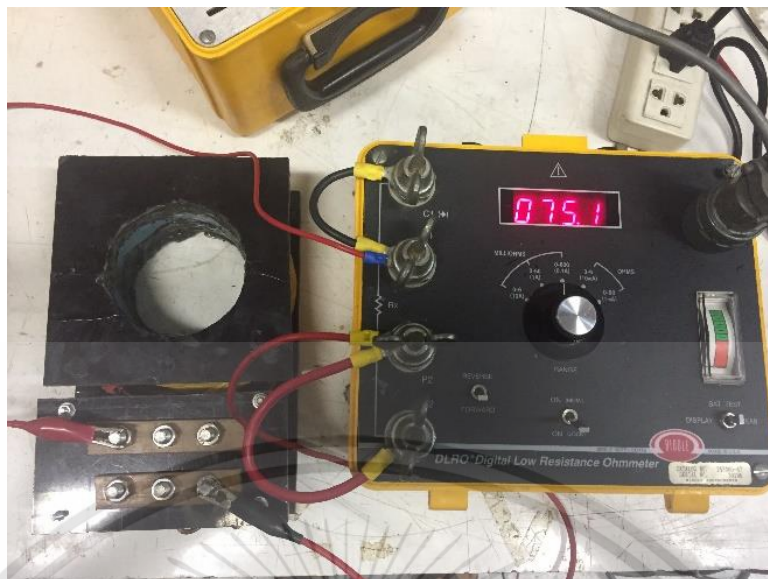
$$R = 69.96991 \times 10^{-3} \Omega$$

ทำการจัดสร้างขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 ตามที่ได้ออกแบบมาข้างต้นด้วยลวดตัวนำทองแดงเบอร์ SWG21 ขนานกัน 3 ชุด แกนอากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ความสูงของขดลวดกระตุ้นเป็น 4 เซนติเมตร และกำหนดจำนวนรอบของขดลวดที่ใช้ในการพันเป็น 25 รอบ โดยที่ขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 ที่ได้ถูกแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 แกนอากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว การพัน 25 รอบ และมีความสูง 4 เซนติเมตร

เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 สามารถวัดความต้านทานด้วยเครื่องวัดความต้านทานต่ำ หรือ มิลลิโอห์มมิเตอร์ ค่าความต้านทานของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 เป็นไปตามรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ค่าความต้านทานของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 มีค่า 75.1 มิลลิโอห์ม

จากรูปที่ 4.10 ค่าความต้านทานของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 มีค่า 75.1 มิลลิโอห์ม ค่าความต้านทานของขดลวดกระตุ้นที่ได้จากการวัดนี้มีค่าสูงกว่าค่าความต้านทานที่ได้คำนวณไว้เล็กน้อย แต่ความต้านทานของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 นี้มีค่าต่ำกว่าความต้านทานของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ซึ่งผลลัพธ์เป็นไปตามที่ตั้งเป้าหมายไว้

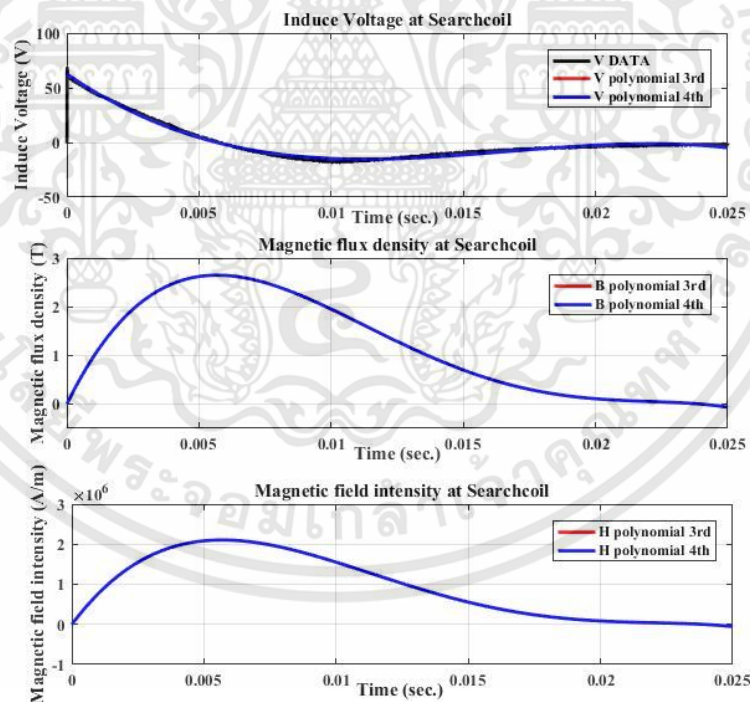
4.3.2 การทดลองวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กด้วยขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2

การทดลองวงจรกระตุ้นที่มีตัวเก็บประจุขนาด 470 มิลลิฟารัด โดยใช้ขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 ด้วยแรงดันกระตุ้นที่แตกต่างกัน ระดับแรงดันที่ใช้ในการทดลองมีค่า 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 โวลต์ตามลำดับ วิธีการวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเป็นไปตามรูปที่ 4.2

ผลลัพธ์ที่ได้จากทดสอบการกระตุ้นขดลวดด้วยแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ของแต่ละระดับแรงดันกระตุ้นนั้นเป็นไปตามรูปที่ 4.11 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อัปโหลดด้วยโปรแกรม MATLAB แล้วคำนวณหาสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างอากาศตามรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 ผลของการกระตุ้นขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 ด้วยตัวเก็บประจุขนาด 470 มิลลิฟารัด ณ ระดับแรงดัน 200 โวลต์ โดยกระแสกระตุ้นสูงสุดที่เกิดขึ้น คือ 9,166.67 แอมป์แปร์ และแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่วัดได้ คือ 69.1667 โวลต์



รูปที่ 4.12 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การกระตุ้นขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 ด้วยตัวเก็บประจุขนาด 470 มิลลิฟารัด ณ ระดับแรงดัน 200 โวลต์ โดยที่ (บน) กราฟแรงดันเหนี่ยวนำที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 69.1667 โวลต์ (กลาง) กราฟความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ค่าสูงสุดอยู่ที่ 2.649 เทสลา (ล่าง) กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ค่าสูงสุดอยู่ที่ 2,108.168 kA/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของคำนวณหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการกระตุ้นขดลวดรูปแบบที่ 2 ด้วยระดับแรงดันต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณเป็นไปตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.5 ตารางค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 ด้วยระดับแรงดันกระตุ้นที่แตกต่างกัน

V (V)	I_{\max} (A)	Polynomial 3 rd			Polynomial 4 th		
		H_{\max} (kA/m)	B_{\max} (T)	r^2	H_{\max} (kA/m)	B_{\max} (T)	r^2
50	2,145.83	505.529	0.635	0.992	503.791	0.633	0.993
100	4,458.33	1,037.4	1.304	0.990	1,036.76	1.303	0.990
150	6,833.33	1,582.068	1.988	0.989	1,581.559	1.987	0.989
200	9,166.67	2,107.291	2.648	0.986	2,108.168	2.649	0.986
250	11,333.33	2,634.929	3.311	0.987	2,635.658	3.312	0.987
300	13,750	3,173.318	3.987	0.989	3,172.754	3.987	0.989

จากตารางที่ 4.5 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้น ณ ช่องว่างอากาศของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 นั้นจะมีค่าที่สูงกว่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ณ ระดับแรงดันกระตุ้นเดียวกัน ซึ่งทำให้เห็นว่า เมื่อความสูงของขดลวดแกนอากาศลดลงจะทำให้สนามแม่เหล็กที่ได้มีความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ความเข้มของสนามแม่เหล็กได้จากการกระตุ้นจะมีค่าสูงกว่า 1,989 kA/m เมื่อใช้แรงดันในการกระตุ้นที่สูงกว่า 200 โวลต์ ซึ่งเป็นระดับแรงดันกระตุ้นที่ต่ำกว่าของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1

จากระดับแรงดันที่ใช้ในการกระตุ้นและความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ได้จากการกระตุ้นขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 เป็นผลลัพธ์ที่น่าพอใจและเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการศึกษาการศึกษาคุณลักษณะการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กให้แก่แม่เหล็กทดสอบที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อนต่อไป

4.4 สรุป

การกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กให้กับแม่เหล็กถาวรที่ไม่แสดงอำนาจทางแม่เหล็กนั้นต้องใช้สนามแม่เหล็กที่มีทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นทิศทางที่แน่นอน เพื่อให้ความเป็นแม่เหล็กที่อยู่ภายในแม่เหล็กถาวรจัดเรียงตัวได้ตามทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการกระตุ้น เมื่อต้องการสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางของสนามที่แน่นอน ทำให้ต้องใช้การจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบตรงเข้าสู่ขดลวดนั่นเอง ในการออกแบบและจัดสร้างวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กอย่างง่ายนั้นได้ใช้วงจรที่มีรูปแบบเป็นวงจรไฟฟ้าอนุพันธ์ลำดับที่ 2 ที่มีตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำภายในวงจร โดยที่จะใช้วิธีจ่ายกระแสไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุไปสูงขดลวดเหนี่ยวนำแล้วทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ในการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจะใช้สวิตช์ที่สามารถสั่งการเปิด-ปิดได้ด้วยสัญญาณไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานให้น้อยที่สุด อีกทั้งยังมีการใช้ไดโอดเพื่อให้การคายพลังงานของขดลวดกระตุ้นนั้นเกิดประโยชน์โดยการให้กระแสไหลวนในทิศทางเดียวกันกับตอนกระตุ้น ทำให้ไม่เกิดการไหลกลับทิศทางของกระแสเมื่อแรงดันของตัวเก็บประจุหมดไป

ในการออกแบบค่าต่าง ๆ ขององค์ประกอบที่นำมาใช้ภายในวงจรกระตุ้นจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟจากกราฟคุณลักษณะของแม่เหล็กทดสอบเป็นอันดับแรก เนื่องจากสนามแม่เหล็กนี้ถือเป็นเป้าหมายของการนำไปใช้กระตุ้นในงานวิจัยนี้ ซึ่งความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟของแม่เหล็กทดสอบมีค่า 1,989 kA/m เมื่อทราบถึงสนามแม่เหล็กที่ต้องการแล้วจากนั้นจึงทำการหาพลังงานของสนามแม่เหล็กที่ต้องการภายในช่องว่างอากาศ ค่าพลังงานสนามแม่เหล็กที่ทำการหาจะขึ้นอยู่กับขนาดของสนามแม่เหล็กและปริมาตรของช่องว่างอากาศที่เกิดสนามแม่เหล็ก นำค่าพลังงานที่ได้มาคำนวณหาขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรกระตุ้นต่อไป

ในบทนี้ได้ทำการสร้างและทดลองวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นจำนวน 2 รูปแบบด้วยกัน โดยเริ่มจากการสร้างขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ซึ่งจากผลการทดสอบได้ว่าวงจรกระตุ้นสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ต้องมีการใช้ตัวเก็บประจุขนาด 470 มิลลิฟารัดต์ โดยสามารถสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่มีความเข้มสูงกว่า 1,989 kA/m เมื่อกระตุ้นด้วยแรงดันตั้งแต่ 250 โวลต์ขึ้นไป แต่แรงดันกระตุ้นที่ใช้อย่างมีระดับที่สูงทำให้ไม่เหมาะกับการใช้งานทำให้ต้องสร้างขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 เพื่อลดระดับแรงดันกระตุ้นที่ทำให้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงกว่า 1,989 kA/m วิธีการในการปรับปรุงเพื่อสร้างขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 คือการลดความสูงของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ลงครึ่งหนึ่งและลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ผลที่ได้จากการสร้างขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 คือสามารถสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่มีความเข้มสูงกว่า 1,989 kA/m ซึ่งเป็นความเข้มสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม เมื่อกระตุ้นด้วยแรงดันตั้งแต่ 200 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นไป ซึ่งลดลงจากระดับแรงดันที่ขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ต้องการ วงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กสำหรับขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 ด้วยตัวเก็บประจุขนาด 470 มิลลิฟารัด เป็นวงจรที่มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานการศึกษาพฤติกรรมการเพิ่มค่าความเป็นแม่เหล็กให้แก่แม่เหล็กทดสอบที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน

ข้อดี-ข้อเสียของวิธีการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กที่ได้นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กต่าง ๆ ที่ได้ทำการศึกษาในเบื้องต้น เป็นดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.6 ข้อดี-ข้อเสียของวิธีการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กที่ได้นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กต่าง ๆ ที่ได้ทำการศึกษา

วิธีการกระตุ้น ความเป็นแม่เหล็ก	ข้อดี	ข้อเสีย
วงจรกระตุ้นขดลวดแกนเหล็ก	-ประสิทธิภาพสูง -กระตุ้นได้ง่าย	-ขาดความยืดหยุ่นในการใช้งาน -ต้นทุนสูง
วงจรกระตุ้นขดลวดแกนอากาศ แบบตัวนำยิ่งยวด (superconducting solenoid)	-สนามแม่เหล็กที่ได้มีค่าสูง -ประสิทธิภาพสูง -ไม่เกิดการอ้อมตัวของ สนามแม่เหล็ก	-ต้องใช้งานในพื้นที่อุณหภูมิต่ำ -ต้นทุนสูง -ใช้งานยาก
วงจรกระตุ้นขดลวดแกนอากาศ ที่ได้นำเสนอ	-มีความยืดหยุ่นสูงในการ ใช้งาน -กระตุ้นได้ง่าย -ต้นทุนต่ำ -สร้างได้ง่าย	-ประสิทธิภาพ

จากตารางข้อเปรียบเทียบที่ได้แสดงข้างต้น เห็นได้ว่า ข้อดีของวงจรกระตุ้นที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ คือ ความยืดหยุ่นของวงจรกระตุ้นแกนอากาศที่ได้นำเสนอนั้น สามารถเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กกระตุ้นได้โดยไม่เกิดการอ้อมตัวของสนามแม่เหล็กที่แกนกระตุ้นเนื่องจากแกนของขดลวดกระตุ้นที่ได้นำเสนอเป็นแกนอากาศทำให้เมื่อต้องการนำไปใช้งานในการกระตุ้นแม่เหล็กที่มีความต้องการสนามที่สูงได้ เมื่อเทียบกับวงจรกระตุ้นขดลวดแกนเหล็กที่มีข้อจำกัดจากการอ้อมตัวของสนามแม่เหล็กภายในแกนเหล็ก โดยค่าสนามแม่เหล็กที่ทำให้แกนเหล็กเกิดการอ้อมตัวเป็นค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่วงจรกระตุ้นสามารถสร้างได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสารแม่เหล็กที่นำมาสร้างแกนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลทำให้ขาดความยืดหยุ่นในการนำไปใช้งานในการกระตุ้นที่ต้องการสนามแม่เหล็กที่สูงได้ เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการในการกระตุ้นของขดลวดแกนอากาศกับการใช้ขดลวดกระตุ้นตัวนำยิ่งยวดนั้น วิธีการที่นำเสนอสามารถนำมาใช้งานจริงได้ง่ายกว่า เนื่องจากในการกระตุ้นจำเป็นต้องปฏิบัติภายในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิต่ำเพื่อป้องกันความเสียหายที่ขดลวดตัวนำยิ่งยวดจะได้รับจากการกระตุ้นจึงมีความยุ่งยากในการจัดเตรียมสภาพแวดล้อมในการใช้งาน อีกทั้งราคาของวิธีที่นำเสนอจะถูกกว่าเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์แบบ passive ยกเว้นชุดสวิทช์ที่ใช้ส่งการให้เกิดการกระตุ้นเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจรรยาบรรณกระตุ้นแกนอากาศที่ได้เสนอในงานวิจัยนี้จะมีข้อดีตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น แต่ข้อเสียที่ต้องได้รับการศึกษาและพัฒนาต่อไปคือ ประสิทธิภาพของวงจร เพื่อให้ประสิทธิภาพของวงจรเหมาะที่จะนำมาใช้งานจริงต่อไป



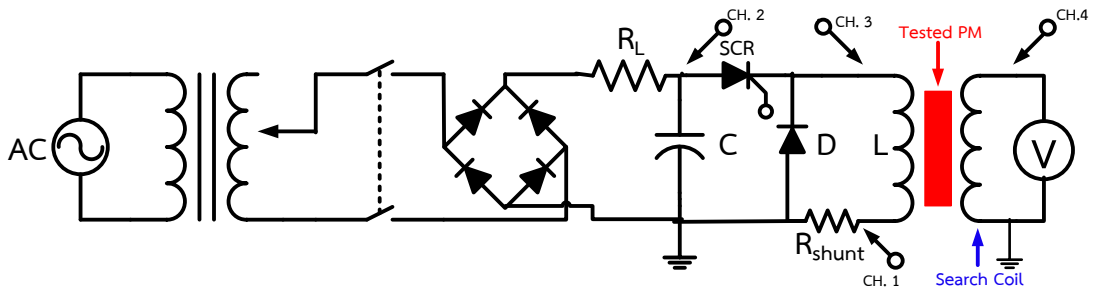
บทที่ 5

การศึกษาคุณลักษณะการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กให้แก่ แม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH ที่สูญเสีย ความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน

การศึกษานี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้และแนวทางในการจัดการกับแม่เหล็กทดสอบที่เกิดการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน โดยทำการกระตุ้นแม่เหล็กที่มีความเป็นแม่เหล็กหลงเหลือที่แตกต่างกันด้วยวงจรกระตุ้นแม่เหล็กที่ได้จัดสร้างขึ้นในบทที่ 4 วงจรที่นำมาใช้ในการกระตุ้นจะใช้วงจรกระตุ้นที่มีตัวเก็บประจุขนาด 470 มิลลิฟาร์ต และใช้ขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กในการทดลองนี้ แม่เหล็กตัวอย่างที่นำมากระตุ้นนั้นเกิดจากการจำลองการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กที่เป็นผลจากความร้อน ซึ่งใช้ข้อมูลจากการทดลองในบทที่ 3 เป็นข้อมูลอ้างอิง

5.1 การออกแบบการทดลอง

ในการทดลองการเพิ่มค่าความเป็นแม่เหล็กให้แม่เหล็กทดสอบจะเริ่มโดยการเตรียมชุดตัวอย่างของแม่เหล็กทดสอบที่ใช้ในการศึกษาให้มีค่าความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กทดสอบตั้งต้นที่แตกต่างกัน โดยที่ค่าตั้งต้นแต่ละชุดตัวอย่างจะมีค่า ร้อยละ 2, 10, 20, 40, 60 และ 80 ของความเป็นแม่เหล็กตามค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตั้งต้นที่ได้จากการวัดด้วยวงจรมแม่เหล็กแบบปรับความกว้างช่องว่างอากาศได้ ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 8600 เกาส์ โดยที่สนามแม่เหล็กที่นำมาใช้ในการกระตุ้นนั้นจะใช้สนามแม่เหล็กที่มีค่าความเข้มที่แตกต่างกัน เพื่อให้เห็นคุณลักษณะความเป็นแม่เหล็กที่เกิดขึ้นของแม่เหล็กทดสอบที่มีความเป็นแม่เหล็กตั้งต้นเท่ากันเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กที่ความเข้มสนามแม่เหล็กแตกต่างกัน ในการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กจะต้องกระตุ้นให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กกระตุ้นและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างมีทิศทางเดียวกัน เพื่อให้สนามแม่เหล็กที่เกิดภายในแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างมีค่าสูงขึ้น หากสนามแม่เหล็กกระตุ้นมีทิศทางที่ตรงข้ามกันจะทำให้เกิดการหักล้างของสนามแม่เหล็กภายในแม่เหล็กทดสอบตัวอย่าง รูปแบบวงจรที่ใช้ในการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 วงจรกระตุ้นความเป็นความเป็นแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง

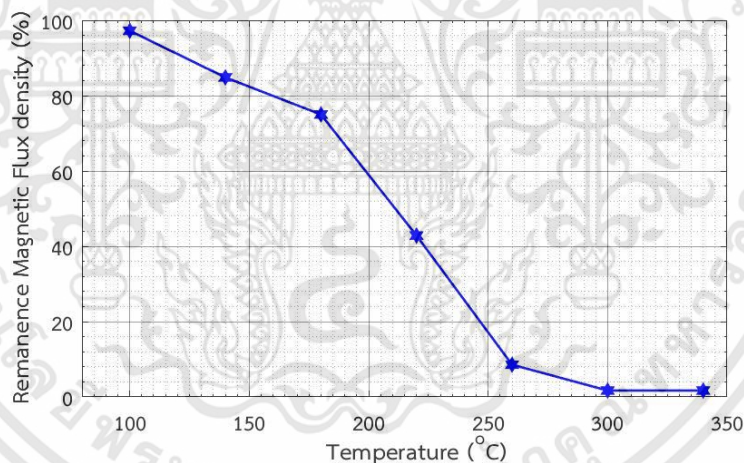
ในการเตรียมตัวอย่างของแม่เหล็กทดสอบที่จะนำมาใช้ทำการทดสอบนั้นจะทำการเตรียมตัวอย่างด้วยการอบด้วยความร้อนเพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่เป็นไปตามที่ต้องการ โดยใช้รูปที่ 3.15 กราฟของข้อมูลการเกิดความสูญเสียความเป็นแม่เหล็กที่เกิดผลมาจากความร้อนจากบที่ 3 เป็นข้อมูลอ้างอิงในการจัดเตรียม เบื้องต้นได้ทำการเตรียมแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างของแต่ละชุดตัวอย่างให้มีค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลือที่เท่ากัน โดยที่ค่าตั้งต้นแต่ละชุดตัวอย่างจะมีค่า ร้อยละ 2, 10, 20, 40, 60 และ 80 ของความเป็นแม่เหล็กตั้งต้นของแม่เหล็กทดสอบ ซึ่งแต่ละชุดตัวอย่างจะประกอบด้วยแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างจำนวน 6 ตัวอย่าง ในการทดสอบแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างภายในชุดตัวอย่างเดียวกันจะได้รับการกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กที่มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแตกต่างกันไป เพื่อให้เห็นพฤติกรรมของเส้นแรงแม่เหล็กหลงเหลือที่ได้เมื่อนำมากระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มแตกต่างกัน

ข้อควรระวังในการเตรียมแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคือ การห้ามเกิดความเสียหายทางกายภาพที่ทำให้เนื้อสารแม่เหล็กนั้นลดลงไป เนื่องจากเมื่อเนื้อสารของแม่เหล็กถาวรลดลงไปจะส่งผลกระทบต่อปริมาณโดเมนแม่เหล็กภายในนั้นลดลงตามไปด้วย ทำให้อำนาจแม่เหล็กสูงสุดของแม่เหล็กนั้นเปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งยังต้องระวังปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กหลงเหลือที่เป็นค่าตั้งต้นให้มีค่าใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้มากที่สุด เพื่อให้สามารถนำผลลัพธ์ที่ได้จากการกระตุ้นแต่ละระดับความเข้มสนามแม่เหล็กมาทำการวิเคราะห์ร่วมกันได้ เนื่องจากในการวิเคราะห์ที่ได้ใช้จุดเริ่มต้นของเส้นแรงแม่เหล็กหลงเหลือเป็นค่าอ้างอิง แล้วเปรียบเทียบเส้นแรงแม่เหล็กหลงเหลือที่เปลี่ยนแปลงไปจากจุดเริ่มต้น

5.2 การลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กทดสอบตัวอย่าง

ในการลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะใช้ข้อมูลการเกิดความสูญเสียความเป็นแม่เหล็กที่เกิดผลมาจากความร้อนจากบัทที่ 3 เป็นแนวทางในการเตรียมค่าร้อยละของความเป็นแม่เหล็กของชุดตัวอย่างแต่ละชุดที่จะนำมาใช้ในการทดสอบในบัทนี้มีค่าร้อยละ 2, 10, 20, 40, 60 และ 80 ของความเป็นแม่เหล็กตั้งต้นจากค่าความเป็นแม่เหล็กที่ได้ทำการวัดไว้ นั่นหมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแม่เหล็กทดสอบจะมีค่าที่แตกต่างกันออกไป โดยจะใช้เวลา 1 ชั่วโมง ในการอบเพื่อเกิดความสะดวกในการนำแม่เหล็กทดสอบเข้าหรือออกจากเครื่องอบ และเป็น การที่มั่นใจได้ว่าที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสจะทำให้ความเป็นแม่เหล็กหลงเหลือ ร้อยละ 2 อย่างแน่นอน

ข้อมูลที่ถูกนำมาใช้เป็นแนวทางในการเตรียมแม่เหล็กตัวอย่างเป็นไปตามรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของความเป็นแม่เหล็กที่หลงเหลือกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ โดยที่ใช้เวลา 1 ชั่วโมงในการอบแม่เหล็กทดสอบ



รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ของความเป็นแม่เหล็กที่หลงเหลือกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ โดยที่ใช้เวลา 1 ชั่วโมงในการอบแม่เหล็กทดสอบ

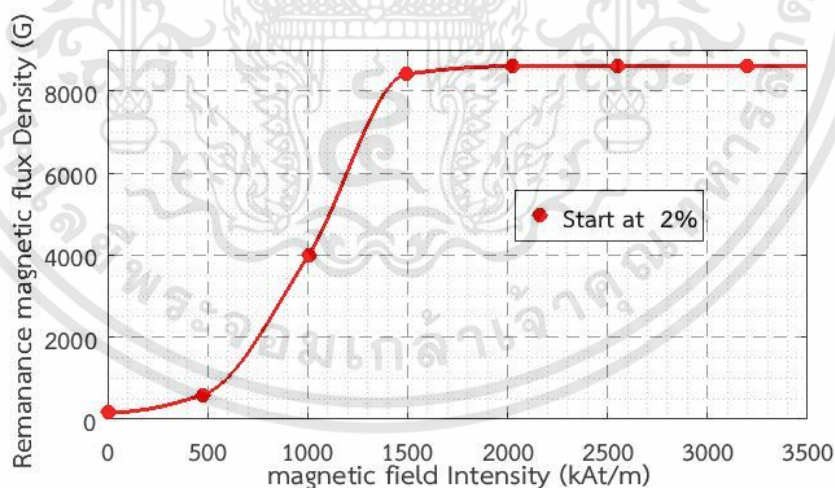
จากรูปที่ 5.2 เห็นได้ว่า เมื่อต้องการให้ความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กทดสอบลดลงเหลือร้อยละ 2, 10, 20, 40, 60 และ 80 ของความเป็นแม่เหล็กตั้งต้นโดยใช้เวลาในการอบ 1 ชั่วโมง ต้องใช้ อุณหภูมิในการอบอยู่ที่ 340, 265, 245, 220, 197 และ 155 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยที่แต่ละระดับอุณหภูมิในการอบจะใช้แม่เหล็กทดสอบตัวอย่างจำนวน 6 ตัวอย่างในการอบ เพื่อให้ได้เพียงพอตามจำนวนที่จำเป็นต้องใช้ในการทดสอบต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การทดลองการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กให้แก่แม่เหล็กทดสอบที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน

หลังจากเตรียมแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างที่จะนำมาใช้ในการศึกษาการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กให้แก่แม่เหล็กทดสอบที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อนให้เหลือความเป็นแม่เหล็กได้ตามที่ได้ตั้งเป้าหมายไว้แล้ว จากนั้นทำการตรวจสอบข้อของแม่เหล็กตัวอย่างให้มีทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการกระตุ้นเพื่อให้เกิดผลลัพธ์แบบเสริมกันระหว่างสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรและสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการกระตุ้น

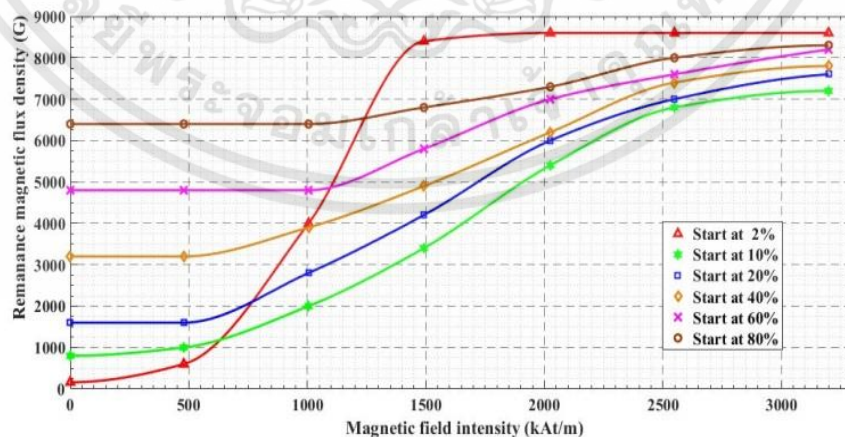
เมื่อทำการกระตุ้นแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างภายในชุดตัวอย่างเดียวกันด้วยสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกัน โดยที่ความเข้มสนามแม่เหล็กกระตุ้นจะถูกกำหนดด้วยระดับแรงดันที่ใช้ในการกระตุ้น ระดับแรงดันที่ใช้ในการกระตุ้นแต่ละตัวอย่างภายในชุดตัวอย่างเดียวกันจะมีค่า 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 โวลต์ จากนั้นจึงนำไปวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลือด้วยวงจรมแม่เหล็กแบบปรับความกว้างช่องว่างอากาศได้ และนำค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลือที่ได้จากวัดมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นแม่เหล็กที่ได้จากการกระตุ้นและความเข้มของสนามแม่เหล็กกระตุ้น



รูปที่ 5.3 ผลลัพธ์การเพิ่มความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กตัวอย่างที่มีความเป็นแม่เหล็กตั้งต้นร้อยละ 2 ด้วยสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่มีความเข้มต่าง ๆ

การทดลองการเพิ่มความเข้มแม่เหล็กของแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างที่มีความเข้มแม่เหล็กตั้งต้นร้อยละ 2 ด้วยสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่ความเข้มต่าง ๆ เป็นการเพิ่มความเข้มแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างที่มีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตั้งต้นร้อยละ 2 แต่ละตัวไปกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันจากรูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่า การนำแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างที่มีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตั้งต้นร้อยละ 2 สามารถเพิ่มความเข้มแม่เหล็กขึ้นได้จนมีความเข้มแม่เหล็กตั้งต้นได้ โดยในช่วงที่สนามแม่เหล็กที่ใช้ในการกระตุ้นมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่น้อยกว่า 1,989 kA/m ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลือที่สามารถเพิ่มได้นั้นขึ้นอยู่กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการกระตุ้นอยู่ กล่าวคือ เมื่อสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการกระตุ้นมีความเข้มสนามสูงขึ้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลือที่ได้จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ในช่วงที่สนามแม่เหล็กที่ใช้ในการกระตุ้นมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่มากกว่าหรือเท่ากับ 1,989 kA/m ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลือจะมีค่าสูงสุดและไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้อีก ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลือที่ได้จากการกระตุ้นด้วยความเข้มสนามแม่เหล็กที่มากกว่าหรือเท่ากับ 1,989 kA/m นั้นมีค่า 8600 เกาส์ ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กหลงเหลือตั้งต้นของแม่เหล็กทดสอบนั่นเอง

เมื่อทำการทดลองกับแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างของทุกชุดตัวอย่าง แล้วนำค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กหลงเหลือที่ได้มาทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลือกับความเข้มสนามแม่เหล็กกระตุ้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความเข้มแม่เหล็กให้แก่แม่เหล็กที่มีความหนาแน่นแม่เหล็กหลงเหลือร้อยละ 2, 10, 20, 40, 60 และ 80 ด้วยสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กแตกต่างกันได้ถูกแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 กราฟผลลัพธ์ของการเพิ่มความเข้มแม่เหล็กที่ได้จากการกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กกระตุ้นแตกต่างกัน

จากรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นถึง การเพิ่มความเป็นมแม่เหล็กให้แก่แม่เหล็กที่สูญเสียความเป็นมแม่เหล็กไปนั้นสามารถทำได้ เมื่อสนามแม่เหล็กมีความเข้มและทิศทางที่เหมาะสมในการกระตุ้น โดยเป้าหมายของการทดลองคือ การเพิ่มความเป็นมแม่เหล็กให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กทดสอบที่เกิดการลดความเป็นมแม่เหล็กจากผลของความร้อนมีค่ากลับเป็นดั่งค่าตั้งต้นที่ 8600 เกาส์ ด้วยสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่มีความเข้มสนามแม่เหล็ก 1,989 kA/m ซึ่งเป็นความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟตามที่ได้ระบุในกราฟคุณลักษณะของแม่เหล็กทดสอบ

ค่าความเป็นมแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นได้ต้องใช้นสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมซึ่งเห็นได้จากผลลัพธ์ของการทดลองนี้ เพื่อพิจารณาค่าความเข้มสนามแม่ที่ส่งผลให้ความหนาแน่นเส้นแรงที่หลงเหลือเริ่มเพิ่มขึ้นของแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างที่มีความเป็นมแม่เหล็กหลงเหลือร้อยละ 2, 10, 20, 40, 60 และ 80 จะมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ที่ 495, 495, 1,000, 1,000, 1,500 และ 1,500 kA/mตามลำดับ แม่เหล็กทดสอบตัวอย่างที่มีความเป็นมแม่เหล็กหลงเหลือร้อยละ 2 และ 10 นั้นมีความต้องการสนามแม่เหล็กที่มีค่าความเข้มสนามที่ทำให้เกิดการเพิ่มความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่ค่าที่น้อยกว่า 500 kA/m แม่เหล็กตัวอย่างที่มีความเป็นมแม่เหล็กหลงเหลือร้อยละ 20 และ 40 นั้นมีความต้องการความเข้มสนามแม่เหล็กที่มากกว่า 500 kA/m และแม่เหล็กตัวอย่างที่มีความเป็นมแม่เหล็กหลงเหลือร้อยละ 60 และ 80 นั้นมีความต้องการความเข้มสนามแม่เหล็กที่มากกว่า 1,000 kA/m

อีกทั้งเมื่อเมื่อนำแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างที่มีความเป็นมแม่เหล็กที่หลงเหลือต่างกันไปกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กเดียวกัน ผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะมีค่าที่แตกต่างกัน โดยเห็นได้จากในรูปที่ 5.4 เมื่อทำการพิจารณาการกระตุ้นแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างด้วยสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็ก 2000 kA/m ซึ่งเป็นความเข้มที่สูงกว่าความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟผลลัพธ์ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กหลงเหลือที่ได้จากการกระตุ้นของตัวอย่างที่มีความเป็นมแม่เหล็กหลงเหลือร้อยละ 2, 10, 20, 40, 60 และ 80 ที่ได้คือ 8,600, 5,300, 6,000, 6,200, 7,000 และ 7,200 เกาส์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า แม่เหล็กถาวรที่มีความเป็นมแม่เหล็กหลงเหลือร้อยละ 2 เป็นแม่เหล็กที่สามารถเพิ่มความเป็นมแม่เหล็กให้กลับมาสู่ค่าตั้งต้นไว้ได้ แต่แม่เหล็กถาวรที่มีความเป็นมแม่เหล็กหลงเหลือร้อยละ 10, 20, 40, 60 และ 80 นั้นมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจากการกระตุ้นยังคงมีค่าน้อยกว่าค่าตั้งต้นของแม่เหล็กที่ได้วัดไว้ ทำให้ในการเพิ่มความเป็นมแม่เหล็กให้แม่เหล็กทดสอบที่เกิดการลดความเป็นมแม่เหล็กจากผลของความร้อนมีค่ากลับเป็นดั่งค่าตั้งต้นได้นั้นจะเกิดขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อ นำแม่เหล็กถาวรที่เกิดการลดความเป็นมแม่เหล็กมากที่สุดไปกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงกว่าความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟตามที่ได้ระบุไว้ในกราฟคุณลักษณะของแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาพฤติกรรมการเพิ่มค่าความเป็นแม่เหล็กให้แม่เหล็กถาวรชนิด Nd-Fe-B Grade 38UH ที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน พบว่า การเพิ่มค่าความเป็นแม่เหล็กให้แก่แม่เหล็กตัวอย่างที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กไปแล้วนั้นสามารถทำได้ ในทดลองการเพิ่มค่าความเป็นแม่เหล็กจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อแม่เหล็กที่นำมาทำการเพิ่มค่าความเป็นแม่เหล็กนั้นสูญเสียความเป็นแม่เหล็กมากที่สุด โดยสามารถทำการกระตุ้นเพิ่มค่าความเป็นแม่เหล็กให้กลับไปได้เป็นไปตามค่าตั้งต้นที่ได้วัดค่าไว้ และแม่เหล็กตัวอย่างอื่น ๆ ที่ยังคงมีค่าความเป็นแม่เหล็กหลงเหลืออยู่ค่าที่ได้หลังการกระตุ้นในการทดลองจะไม่สามารถกลับไปมีค่าความเป็นแม่เหล็กตามความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กหลงเหลือตั้งต้นได้ เนื่องจากการกระจายตัวของโดเมนแม่เหล็กของแม่เหล็กที่มีความเป็นแม่เหล็กอยู่นั้น ส่วนใหญ่จะมีทิศทางที่เป็นไปในทางเดียวกันทำให้ความเข้มข้นแม่เหล็กที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนทิศทางโดเมนแม่เหล็กนั้นสูงกว่าการกระตุ้นแม่เหล็กที่มีโดเมนแม่เหล็กกระจายตัวแบบสมดุลที่ทำให้ไม่แสดงอำนาจทางแม่เหล็กออกมา

จากผลการศึกษาเบื้องต้นนี้จะเห็นได้ว่า หากแม่เหล็กทดสอบที่ถูกใช้งานในเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรได้รับพลังงานความร้อนจนทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กจะสามารถใช้สนามแม่เหล็กกระตุ้นเพื่อเพิ่มความเป็นแม่เหล็กให้กับแม่เหล็กที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กได้ แต่การกระตุ้นที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือ การนำแม่เหล็กทดสอบที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กมากที่สุดไปกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มข้นแม่เหล็กที่สูงกว่าค่าความเข้มข้นแม่เหล็กโคเออร์ซีฟตามที่ได้กำหนดไว้ในกราฟคุณลักษณะของแม่เหล็กทดสอบจะทำให้ความเป็นแม่เหล็กกลับไปเป็นเหมือนดังค่าตั้งต้น

ดังนั้น แนวทางในการจัดการกับแม่เหล็กถาวรที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กแต่ไม่เกิดความเสียหายแก่นื้อสารของแม่เหล็กถาวรนั้นสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ ซึ่งก่อนที่จะนำกลับมาใช้งานใหม่จำเป็นต้องนำแม่เหล็กที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กไปอบเพื่อทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กมากที่สุด จากนั้นจึงนำไปเคลือบฉนวนไฟฟ้าแล้วทำการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กด้วยสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มข้นแม่เหล็กตามที่ได้ระบุไว้ในกราฟคุณลักษณะแม่เหล็กนั้น ๆ จะทำให้ได้แม่เหล็กที่มีความเป็นแม่เหล็กเป็นดังเดิมกลับในใช้งานได้อีกครั้ง

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาคูณลักษณะการลดและกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรเนื่องจากผลของความร้อน โดยที่แม่เหล็กทดสอบที่นำมาทำการศึกษาคือแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH ซึ่งจากกราฟคูณลักษณะของแม่เหล็กทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานประเทศจีน ซึ่งมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างอยู่ที่ 1.24 T และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟอยู่ที่ 1,989 kA/m รูปร่างของแม่เหล็กทดสอบนั้นเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาด 20X24X7 มิลลิเมตร สาเหตุที่แม่เหล็กถาวรที่มีเนื้อสารเป็น Nd-Fe-B ได้รับความนิยมน้อยกว่าหลายในการนำไปใช้งานในเครื่องจักรกลไฟฟ้า เนื่องจากความหนาแน่นพลังงานแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก Nd-Fe-B มีค่าอยู่ในระดับที่สูงมากเมื่อเทียบกับสารแม่เหล็กอื่น ๆ ในกลุ่มแรร์เอิร์ธด้วยกัน โดยการศึกษาแม่เหล็กทดสอบภายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การศึกษาคูณลักษณะการลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กทดสอบจากผลของความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ และการศึกษาคูณลักษณะการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กให้แม่เหล็กทดสอบที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน

6.1 การศึกษาคูณลักษณะการลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรเนื่องจากผลของความร้อน

การศึกษาคูณลักษณะการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อนของแม่เหล็กทดสอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นการจำลองการเกิดการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อนที่ทำโดยการนำแม่เหล็กทดสอบไปให้ความร้อนด้วยเครื่องอบร้อนที่มีการควบคุมอุณหภูมิแบบ PI เนื่องจากในการศึกษาต้องการให้อุณหภูมิของแม่เหล็กมีระดับคงที่เป็นระยะเวลาตามที่ได้กำหนดไว้ อีกทั้งในการวัดค่าความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรตัวอย่างได้นำเสนอวงจรแม่เหล็กแบบอนุกรมที่สามารถปรับความกว้างช่องว่างอากาศได้ ก่อนเริ่มทำการทดลองได้ทำการสอบเทียบเครื่องอบลมร้อนที่นำมาใช้ทดลอง ผลของการสอบเทียบเห็นได้ว่า เครื่องอบร้อนนี้มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการทำการทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อนได้ และได้ทำการทดสอบวงจรแม่เหล็กแบบอนุกรมที่สามารถปรับความกว้างของช่องว่างอากาศได้ โดยทำการวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของระยะช่องว่างอากาศต่าง ๆ ด้วยแม่เหล็กถาวรที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กแตกต่างกัน เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างในความเข้มของสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกัน ผลของการทดสอบวงจรแม่เหล็กแบบอนุกรมที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถปรับความกว้างช่องว่างอากาศได้ คือ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้จะมีค่ามากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับความเข้มของแม่เหล็กถาวรที่อยู่ในวงจรแม่เหล็ก และค่าของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้ก็ยังคงลดลงเมื่อระยะช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้วงจรแม่เหล็กนี้มีความเหมาะสมที่สามารถนำมาใช้ในการวัดความเป็นแม่เหล็กของงานวิจัยทั้งหมดภายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

สำหรับการทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อนของแม่เหล็กทดสอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ทำการนำแม่เหล็กทดสอบที่มีความเป็นแม่เหล็กอย่างสมบูรณ์มาทำการวัดความเป็นแม่เหล็กด้วยวงจรแม่เหล็กแบบอนุกรมที่สามารถปรับความกว้างช่องว่างอากาศได้ โดยความกว้างช่องว่างอากาศที่ใช้ในการวัดมีขนาด 2 มิลลิเมตร ค่าความเป็นแม่เหล็กตั้งต้นที่วัดได้มีค่า 8,600 เกาส์ จากนั้นทำการนำแม่เหล็กทดสอบไปอบที่อุณหภูมิที่กำหนดไว้ อุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาการลดความเป็นแม่เหล็กนี้ ได้แก่ 100, 140, 180, 220, 260, 300 และ 340 องศาเซลเซียส ผลจากการทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อนของแม่เหล็กทดสอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กทดสอบจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ทำการทดสอบ โดยเมื่อมีการใช้งานแม่เหล็กทดสอบที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 100 องศาเซลเซียส แม่เหล็กทดสอบจะเริ่มมีการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กเกิดขึ้น การสูญเสียความเป็นแม่เหล็กมากที่สุดที่เกิดขึ้นได้ คือจะหลงเหลือความเป็นแม่เหล็กประมาณร้อยละ 2 จากค่าตั้งต้น ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียส อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิของแม่เหล็กทดสอบมีค่าตั้งแต่ 312 องศาเซลเซียสขึ้นไปจะทำให้การสูญเสียความเป็นแม่เหล็กมากที่สุดเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และสำหรับทุก ๆ อุณหภูมิที่เกิดการลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กทดสอบนั้น เมื่อการลดความเป็นแม่เหล็กลดลงถึงค่า ๆ หนึ่งจะไม่มีเกิดการลดความเป็นแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอีก เมื่ออุณหภูมิของแม่เหล็กมีค่าคงที่หรือต่ำกว่าที่เกิดการลดความเป็นแม่เหล็กขึ้นก่อนหน้า จากผลการศึกษาเบื้องต้นนี้จะเห็นได้ว่า หากเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรที่ใช้แม่เหล็กทดสอบมีอุณหภูมิภายในขณะใช้งานสูงเกินกว่า 100 องศาเซลเซียส ก็จะทำให้แม่เหล็กถาวรชนิดนี้ที่ติดตั้งอยู่มีความเป็นแม่เหล็กลดลงอันจะส่งผลให้ประสิทธิภาพและสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าลดลง เนื่องจากการเกิดการลดความเป็นแม่เหล็กภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรลดลง ส่งผลให้แรงบิดที่ได้จากมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าลดลงและระดับแรงดันขาออกที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าลดลงอีกด้วย

6.2 การออกแบบและจัดสร้างวงจรกระตุ้นแม่เหล็กอย่างง่าย

ก่อนทำการศึกษาคูณลักษณะการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กให้แม่เหล็กทดสอบที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างวงจรกระตุ้นด้วยขดลวดแกนอากาศอย่างง่าย วงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กนี้เป็นวงจรไฟฟ้าอนุพันธ์ลำดับที่สอง ที่มีตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำเป็นองค์ประกอบหลักเท่านั้น โดยเป้าหมายของวงจรกระตุ้นนี้คือ การสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่มีความเข้มสนามแม่เหล็ก 1,989 kA/m ซึ่งเป็นไปตามกราฟคุณลักษณะของแม่เหล็กทดสอบ ในการออกแบบค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ของวงจรกระตุ้นจะเริ่มจากการสร้างขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ขึ้นมา โดยที่ขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 มีความสูง 8 เซนติเมตร ใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วเป็นอากาศ และพันลวดตัวนำจำนวน 25 รอบ จากการทดสอบจะพบว่าตัวเก็บประจุขนาด 470 มิลลิฟาร์ดีต ทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงกว่า 1,989 kA/m เมื่อกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบที่ 1 ด้วยระดับแรงดัน 250 โวลต์ขึ้นไป แต่ระดับแรงดันที่ใช้ยังมีระดับที่สูงทำให้ยังไม่เหมาะสมทำให้ต้องมีการปรับปรุงวงจรกระตุ้นด้วยการสร้างขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 โดยลดความสูงของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ลงเหลือ 4 เซนติเมตรและเปลี่ยนขนาดของท่อพีวีซีที่ใช้เป็นแกนเป็นท่อพีวีซีขนาด 3 นิ้ว โดยขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 นี้จะทำให้ความต้านทานไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 และวงจรกระตุ้นที่จะนำไปใช้ร่วมกันนั้นมีตัวเก็บประจุขนาด 470 มิลลิฟาร์ดีตเป็นองค์ประกอบ ผลการทดลองพบว่า ขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 2 ทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงกว่า 1,989 kA/m เมื่อกระตุ้น ด้วยระดับแรงดัน 200 โวลต์ขึ้นไป ระดับแรงดันที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กตามที่ต้องการนั้นลดลงจากระดับแรงดันขดลวดกระตุ้นรูปแบบที่ 1 ต้องการ ทำให้วงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กด้วยขดลวดนี้ เป็นวงจรที่มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานการศึกษาพฤติกรรมการเพิ่มค่าความเป็นแม่เหล็กให้แก่แม่เหล็กทดสอบที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน วงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กที่ได้นำเสนอมีข้อดี ในด้านของความยืดหยุ่นในการใช้งานกระตุ้นได้ไม่ยุ่งยาก และจัดสร้างได้ง่าย แต่ข้อเสียที่ต้องได้รับการพัฒนาต่อไปคือ ประสิทธิภาพของวงจรกระตุ้นแกนอากาศที่ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

6.3 การศึกษาคุณลักษณะการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กให้กับแม่เหล็กถาวรที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน

การศึกษาคุณลักษณะการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กให้แม่เหล็กทดสอบที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้และแนวทางทางการจัดการกับแม่เหล็กทดสอบที่เกิดการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กแต่ไม่ได้รับความเสียหายทางกายภาพอันเป็นเหตุให้เนื้อสารลดลงไป ในการศึกษาคุณลักษณะการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กจะอาศัยข้อมูลของการลดความเป็นแม่เหล็กจากการศึกษาที่ได้กล่าวมาข้างต้น เพื่อเตรียมแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างที่จะทำการเพิ่มค่าความเป็นแม่เหล็ก และใช้วงจรกระตุ้นแม่เหล็กสำหรับขดลวดแกนอากาศรูปแบบที่ 2 ที่ได้ทำการจัดสร้างขึ้นมาเพื่อเพิ่มความเป็นแม่เหล็ก แม่เหล็กทดสอบตัวอย่างที่จะนำมาทดลองจะต้องใช้ชุดตัวอย่างของแม่เหล็กทดสอบจำนวน 6 ชุด ชุดละ 6 ตัวอย่าง ซึ่งค่าความเป็นแม่เหล็กที่หลงเหลือของแม่เหล็กทดสอบตัวอย่างในแต่ละชุดจะมีค่าเท่ากัน โดยที่ชุดตัวอย่างจะมีค่าความเป็นแม่เหล็กที่หลงเหลือร้อยละ 2, 10, 20, 40, 60 และ 80 จากค่าความเป็นแม่เหล็กตั้งต้น 8600 เกาส์ ที่ได้จากการวัดในการศึกษาก่อนหน้านี้ แม่เหล็กทดสอบตัวอย่างในชุดเดียวกันจะได้รับการกระตุ้นด้วยระดับแรงดันที่แตกต่างกัน ได้แก่ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 โวลต์ ผลของการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการเพิ่มค่าความเป็นแม่เหล็กให้แก่แม่เหล็กทดสอบที่ถูกลดความเป็นแม่เหล็กไปแล้วนั้นสามารถทำได้ แต่การเพิ่มจะขึ้นอยู่กับปริมาณของความเข้มสนามแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่และความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการกระตุ้น ในการทดลองการเพิ่มค่าความเป็นแม่เหล็กจะมีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อนำแม่เหล็กทดสอบที่เกิดการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กมากที่สุดมากระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงกว่าค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟตามที่ได้กำหนดไว้ในกราฟคุณลักษณะของแม่เหล็กทดสอบจะทำให้ความเป็นแม่เหล็กกลับไปเป็นเหมือนดังค่าตั้งต้นได้ ซึ่งทำการวัดด้วยวงจรมแม่เหล็กที่นำเสนอ

งานวิจัยนี้เป็นแนวทางของงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาแม่เหล็กถาวรด้วยวิธีการจำลองการเกิดผลกระทบจากการนำไปใช้งานจริง ซึ่งจากผลลัพธ์ต่าง ๆ ภายในงานวิจัยนี้ยังเป็นแนวทางในการจัดการกับแม่เหล็กถาวรที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กแต่ไม่เกิดความเสียหายแก่เนื้อสารของแม่เหล็กถาวรนั้นสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ ซึ่งก่อนที่จะนำกลับมาใช้งานใหม่จำเป็นต้องนำแม่เหล็กที่สูญเสียความเป็นแม่เหล็กไปอบเพื่อทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กโดยสมบูรณ์ จากนั้นจึงนำไปเคลือบฉนวนไฟฟ้าแล้วทำการกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กด้วยสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงกว่าค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโคเออร์ซีฟที่ได้กำหนดไว้ตามกราฟคุณลักษณะของแม่เหล็ก จะทำให้ได้แม่เหล็กที่มีความเป็นแม่เหล็กที่เป็นดั้งเดิมได้

6.4 ข้อเสนอแนะของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ยังมีประเด็นที่น่าสนใจสำหรับการนำไปศึกษาต่อได้อีก อันได้แก่ การวัดค่าความเป็นแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่ของแม่เหล็กถาวรในวงจรแม่เหล็กนั้นควรวัดค่าอย่างไรถึงถูกต้องอย่างแท้จริง เพื่อให้สามารถทำให้เข้าใจคุณลักษณะที่แท้จริงของแม่เหล็กถาวรที่ถูกนำมาให้ใช้งานจริงได้ การศึกษาโดเมนแม่เหล็กภายในแม่เหล็กถาวรที่เกิดความการลดความเป็นแม่เหล็กที่เป็นผลมาจากความร้อน เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของโดเมนแม่เหล็กภายในที่เกิดขึ้นจากผลของความร้อนของการทำงาน นอกเหนือจากการศึกษาที่มุ่งเน้นเพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นแล้วนั้น ยังมีการพัฒนาประสิทธิภาพของวงจรกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กอย่างง่ายที่ได้นำเสนอเป็นอีกหนึ่งประเด็นสำคัญ เพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสมและความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต และการพัฒนาอุปกรณ์สำหรับการวัดค่าความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรขณะใช้งานภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้า เพื่อเป็นตัวชี้วัดสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีการใช้งานแม่เหล็กถาวรต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. M. D. COEY, *Magnetism and Magnetic Materials*. the United States of America , New York: Cambridge University Press, 2010.
- [2] T. Sebastian, "Temperature effects on torque production and efficiency of PM motors using NdFeB magnets," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, pp. 353-357, 1995.
- [3] M. Taha and D. Greenwood, "PM material selection guide for IPMSM," in *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016, pp. 1989-1994.
- [4] B. Bochenkov and S. Lutz, "A review of modern materials of permanent magnets," in *Proceedings. The 8th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, 2004. KORUS 2004.*, 2004, pp. 201-203 vol. 1.
- [5] T. Gundogdu and G. Komurgoz, "The Impact of the Selection of Permanent Magnets on the Design of Permanent Magnet Machines – a Case Study: Permanent Magnet Synchronous Machine Design with High Efficiency " *Przełqd Elektrotechniczny*, vol. R. 89, nr 3a, pp. 103-108 2013.
- [6] T. M. Mulcahy and J. R. Hull, "A superconducting solenoid and press for permanent magnet fabrication," *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, vol. 13, pp. 1668-1671, 2003.
- [7] A. G. Clegg, I. M. Coulson, G. Hilton, and H. Y. Wong, "The temperature stability of NdFeB and NdFeBCo magnets," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 1942-1944, 1990.
- [8] P. A. Withey, H. M. Kennett, P. Bowen, and I. R. Harris, "The magnetic and mechanical properties of NdFeB type permanent magnets and the effect of quenching," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 2619-2621, 1990.
- [9] L. Jahn, R. Schumann, and V. Ivanov, "Investigation of the thermal remagnetization in sintered hard magnets," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 37, pp. 2506-2508, 2001.
- [10] M. Katter, "Angular dependence of the demagnetization stability of sintered Nd-Fe-B magnets," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 41, pp. 3853-3855, 2005.

- [11] F. Akagi and Y. Honkura, "Analysis of NdFeB Bonded Magnet Behaviors Within High-Frequency Field and High Temperature Using Micromagnetic Simulator," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 51, pp. 1-4, 2015.
- [12] H. Nishio, "Accurate Measurement of Magnetic Properties of Nd-Fe-B Sintered Magnets With High Coercivity," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 48, pp. 4779-4785, 2012.
- [13] K. Seiichi and K. Giyuu, "Pulsed field magnetometer for low-temperature study of high-performance permanent magnets," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 36, pp. 3634-3636, 2000.
- [14] Y. Nakahata, T. Todaka, and M. Enokizono, "Magnetization Process Simulation of Nd-Fe-B Magnets Taking the Demagnetization Phenomenon Into Account," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 47, pp. 1102-1105, 2011.
- [15] J. a. J. A. B. William H. Hayt, *Engineering Electromagnetics*, 8 ed.: Mc Graw Hill Education, 2012.
- [16] J. M. D. COEY, *Magnetism and Magnetic Materials*: Cambridge University Press, 2010.
- [17] D. R. Askeland and W. J. Wright, *Science and Engineering of Materials, SI Edition*: Cengage Learning, 2015.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๐

The 40th Electrical Engineering Conference (EECON - 40)

Cordially Supported by

SIEMENS
Ingenuity for life



การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY

Program Book of EECON-40

วันที่ ๑๕ - ๑๗ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๖๐

สถานที่ โรงแรมเดอะ ซายน์ (The Zign Hotel) อ.บางละมุง จ.ชลบุรี

The background of the advertisement is a top-down view of a Siemens SIRIUS modular terminal block system. The components are arranged in a grid, with glowing blue and yellow lines representing electrical connections and data flow. A large, semi-transparent watermark of a university seal is centered in the background. The seal features a central figure holding a scale, surrounded by Thai text and a sunburst at the top. The overall aesthetic is high-tech and industrial.

SIEMENS

Ingenuity for life

SIRIUS modular system

Combine perfect

[siemens.com/industrial-controls](https://www.siemens.com/industrial-controls)



การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



ชำระค่าไฟฟ้า

สะดวก รวดเร็ว ไม่เสียเวลา

เพียงดาวน์โหลด

PEA Mobile Application

ดาวน์โหลดเป็นต้นไปบนระบบ Android และ IOS



- ชำระเงินผ่านบัญชีบัตรเครดิต
- ติดตาม ตรวจสอบ ค่าไฟฟ้าในแต่ละเดือน
- กำหนดจุดชำระเงิน
- สร้างบรื้ได้เพิ่มเข้าไปชำระเงิน ณ จุดชำระเงิน
- แจ้งไฟดับ และร้องเรียน/เสนอแนะได้ทันที



ELECTRIC SYSTEMS PROVIDER

EMEC's Products

1. Distribution Boards
 - a. Main Distribution Boards (MDB)
 - b. Sub Distribution Boards (DB, SDB)
2. Motor Control Center
 - a. Air Conditioning / Motor Control Center (AMCC)
 - b. Sanitary Conditioning Motor Control Center (SMCC)
3. Synchronizing Panels
 - a. Diesel Gen-Set Synchronizing Panel
 - b. GAS Gen-Set Synchronizing Panel
4. Process and Automation System Panel
 - a. Machine Control Panel.
 - b. Process Control Panel.
5. Medium Voltage Switchgear up to 36 KV
6. Load bank
 - a. Resistive and Reactive Load bank
 - b. Available for both rent and sale

EMEC's Services

- ELECTRIC SYSTEMS DESIGN
- ELECTRIC SYSTEMS INSTALLATION
- ELECTRIC SYSTEMS TURNKEY PROJECT
- RENTAL SWITCHBOARDS
- ELECTRIC SYSTEMS CONSULTANT



Contact

Address: 9/29 Moo 1 Buddhamonhal 5 Rd,
Banggratuk Sampran Nakhonpathom Thailand

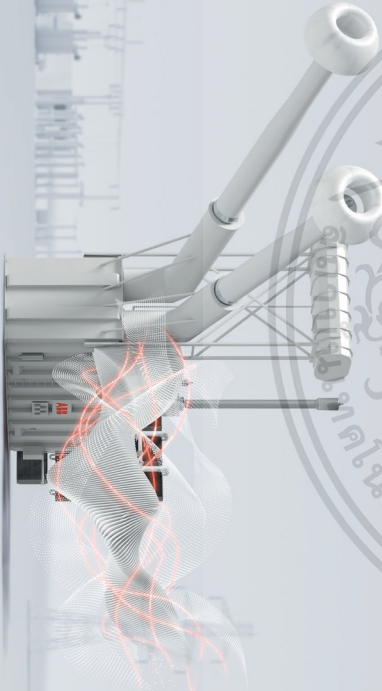
Tel : 66-2889-4518

Fax : 66-2889-5026

E-mail : emec@emec.co.th



Let's write the future
by enabling a stronger,
smarter, and greener
power grid.



Thanks to our latest generation of Transformers, renewable energy can be sent farther than ever before, over distances of more than 3000 km. Groundbreaking technologies like this are already playing a key role in addressing the world's energy challenges. Discover more at abb.com/future

VISION
& PASSION
MAKE THE
POWERFUL
PLAYER

PREMIER ENERGY OF TOMORROW
FOR THE WORLD OF TODAY



กัลฟ์ สร้างพลังงาน สร้างความเป็นไปได้

กัลฟ์ เอ็นเนอร์จี ดีเวลลอปเม้นท์ หนึ่งในผู้ประกอบธุรกิจโรงไฟฟ้าเอกชนรายใหญ่ของประเทศไทย ภายใต้กลยุทธ์ธุรกิจแนวคิดใหม่ ผสานรวมเข้ากับทรัพยากรที่มีคุณภาพ เทคโนโลยีชั้นนำ และวัฒนธรรมการทำงานที่มุ่งเน้นเพื่อผลผลิตและพัฒนาไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

บริษัท กัลฟ์ เอ็นเนอร์จี ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด (มหาชน)
www.gulf.co.th



KMUTNB

สารจากอธิการบดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ เชียงฉิน

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าระดับชาติ หรือ การประชุม *EECON* เริ่มต้นจากความร่วมมือตัวกันของ ๘ สถาบันการศึกษาชั้นนำของประเทศ ที่เปิดการเรียนการสอนด้านวิศวกรรมไฟฟ้าในสมัยนั้น ซึ่งการประชุม *EECON* นั้นนับเป็นการประชุมวิชาการระดับชาติที่ได้รับการยอมรับและความสนใจจากนักวิชาการและนักวิจัยของสถาบันการศึกษา และจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า การประชุมวิชาการนี้มีแบบแผนที่ดี และมาตรฐานสูง ครอบคลุมใจสำหรับผู้เข้าร่วมประชุมและผู้สนใจ เวทีในการนำเสนอผลงานทางด้านวิชาการเสริมสร้างบรรยากาศการวิจัย และเปิดโอกาสให้มีการแลกเปลี่ยนเรียนรู้ด้านการวิจัยระหว่างนิสิตนักศึกษา คณาจารย์ และผู้สนใจ กระตุ้นให้เกิดแนวคิด ความรู้ใหม่ๆ เกิดการพัฒนานวัตกรรม รวมถึงยังมีประโยชน์ต่อนิสิตนักศึกษาที่ได้รับโอกาสในการสร้างสรรค์และเผยแพร่ผลงานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ตลอดจนพัฒนาองค์ความรู้จากการวิจัยที่มีคุณภาพ ไปสู่การพัฒนาและประยุกต์ใช้เพื่อเป็นประโยชน์ทั้งต่อองค์กร สังคมและประเทศชาติต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ มีความยินดีและภาคภูมิใจเป็นอย่างยิ่ง ที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ได้รับเกียรติเป็นเจ้าภาพ ในการจัดการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าระดับชาติ ครั้งที่ ๔๐ (*EECON-40*) จากอัตลักษณ์ของมหาวิทยาลัยที่มุ่งเน้นในการสร้างเครือข่ายการพัฒนางานวิจัยและวิชาการแบบสหสาขาวิชา และมุ่งเน้นให้การนำเสนอผลงานวิจัยไปแก้ปัญหาให้กับอุตสาหกรรม ดังนั้นการเป็นเจ้าภาพในครั้งนี้จึงเกิดมีมิติใหม่ในการที่จะทำงานร่วมกันของ ๔ หน่วยงานภายในมหาวิทยาลัยได้แก่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ (ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมื่อวัดและอิเล็กทรอนิกส์) คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ (ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และสารสนเทศ และภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์) คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม (ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า) และคณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า และภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์) โดยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าทุกท่าน จะได้รับประโยชน์สูงสุดจากการใช้เวทีในการนำเสนอผลงานทางวิชาการตามวัตถุประสงค์ที่มุ่งหวังไว้

การทำงานเพื่อให้ประสบความสำเร็จในครั้งนี้ ต้องอาศัยความร่วมมือแรง ความร่วมมือ ของสถาบันเครือข่าย ผมจึงขอขอบพระคุณทุกภาคส่วนในการสนับสนุน และขออำนวยการให้ผู้เข้าร่วมประชุมคณะกรรมการผู้จัดการประชุม ได้รับประโยชน์เพื่อพัฒนาความเป็นเลิศทางวิชาการ และขอให้การจัดประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๐ ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์และเจตนารมณ์ที่ตั้งไว้ทุกประการ

(ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ เชียงฉิน)

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สารจากนายกสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)



รองศาสตราจารย์ ดร.อฉคม ฤกษ์บุตร

นายกสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า(ประเทศไทย) (EEAAT)

EECON-40 เป็นการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าระดับชาติคุณภาพสากลที่ได้ดำเนินการมาครบ 4 ทศวรรษแล้ว ถือว่าเป็นการประชุมทางวิชาการในประเทศที่มีอายุยืนยาวมากที่สุด การเข้าร่วมประชุมวิชาการ *EECON* ไม่เพียงเป็นการแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่เกี่ยวกับงานวิศวกรรมและเทคโนโลยีในสาขาของวิศวกรรมไฟฟ้าและที่เกี่ยวข้องแล้ว ยังถือเป็นการสร้างเครือข่ายทางวิศวกรรมไฟฟ้าที่สำคัญ อีกทั้งวิศวกรที่เข้าร่วมประชุมจะได้รับคะแนน(หน่วยความรู้) การพัฒนาวิชาชีพวิศวกรรมอย่างต่อเนื่อง หรือ *CPD (Continuing Professional Development)* ของสภาวิศวกร ตามบทบาทของการมีส่วนร่วมที่สอดคล้องกับเกณฑ์ที่สภาวิศวกรกำหนด ทั้งนี้หน่วยความรู้หรือคะแนน *CPD* ที่วิศวกรได้รับสามารถสะสมแล้วนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในการพิจารณาเลื่อนระดับจากภาคีวิศวกรเป็นสามัญวิศวกรได้อีกด้วย

สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า(ประเทศไทย) หรือ *Electrical Engineering Academic Association Thailand (EEAAT)* อ่านว่า double E - double A - T ขอแสดงความชื่นชมและขอบคุณ ภาคีวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ คณะกรรมการจัดงานทุกภาคส่วน ผู้แทนจากสถาบันสมาชิกต่าง ๆ ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ ผู้สนับสนุน และผู้เข้าร่วมประชุมทุกท่าน ที่มีส่วนร่วมทำให้ *EECON-40* เป็นกิจกรรมที่มีคุณค่าทั้งเชิงวิชาการและเชิงวิชาชีพ ก่อให้เกิดเครือข่ายที่เข้มแข็งทางวิศวกรรมไฟฟ้าภายในประเทศอย่างแท้จริง

สุดท้ายนี้ ในนามของสมาคม *EEAAT* ขออำนวยการให้ *EECON-40* จงประสบความสำเร็จและบรรลุวัตถุประสงค์ตามที่มุ่งหวัง อีกทั้งขอให้ผู้มีส่วนร่วมกับ *EECON-40* ทุกท่าน จงประสบแต่ความสุขความเจริญ มีสุขภาพพลานามัยแข็งแรง มีสติปัญญาที่เฉียบคม เป็นกำลังสำคัญในการพัฒนาวิชาชีพวิศวกรรมไฟฟ้าและสร้างความเจริญรุ่งเรืองให้กับประเทศชาติสืบต่อไป

รศ. ดร. อฉคม ฤกษ์บุตร

นายกสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า(ประเทศไทย) (EEAAT)

สารจากหัวหน้าภาควิชาฯ
ที่ร่วมมือกันเป็นเจ้าภาพร่วมจัดการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ ๔๐
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปัจจุบันการพัฒนางานวิจัยต่างๆ จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีและองค์ความรู้มากกว่า 1 สาขาวิชา หรือที่เรียกว่า การพัฒนางานวิจัยและวิชาการแบบสหสาขาวิชา เพื่อพัฒนางานวิจัยต่างๆ เหล่านี้สู่นวัตกรรมใหม่ๆ ในปี พ.ศ. 2560 นี้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือได้รับเกียรติให้เป็นเจ้าภาพจัด งานการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering Conference: EECON) ซึ่งเป็นงานประชุมวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้าที่เก่าแก่ และมีเกียรติประวัติยาวนานที่สุดในวงการวิศวกรรมไฟฟ้าของประเทศไทย ครั้งนี้นับเป็นครั้งที่ 40 (EECON-40) ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องแก่อัตลักษณ์และแนวทางการพัฒนาด้านการศึกษาและการวิจัยของมหาวิทยาลัยฯ เจ้าภาพถือโอกาสนี้สร้างมิติใหม่ในการจัดงานด้วยการร่วมมือร่วมใจกันของ 4 หน่วยงาน 7 ภาควิชา ภายในของมหาวิทยาลัยฯ อันได้แก่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ และ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมื่อวัดและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และสารสนเทศ และ ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า และ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้น ในฐานะสถาบันอุดมศึกษาภายใต้การกำกับของรัฐ คณะเจ้าภาพจัดงานมุ่งหวังว่าความร่วมมือจาก 7 หน่วยงาน 7 ภาควิชาภายในของมหาวิทยาลัยฯ ครั้งนี้จะเป็นตัวอย่างที่ดีในการแสดงพลังสามัคคีในสำนักงานวิชาการและงานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าให้แก่สังคมไทย เพื่อก่อให้เกิดการพัฒนาและแรงจูงใจต่อนักวิชาการรุ่นใหม่ได้สืบสานแนวทางอันดีงามนี้ควบคู่กับงานวิชาการต่อไป

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภดล วิวัชรโกเศศ

รองศาสตราจารย์ ดร.จิระศักดิ์ ชาญวุฒิชัยธรรม

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมื่อวัดและอิเล็กทรอนิกส์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัศรา ประโยชน์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัมรินทร์ รัตนะวิศ

หัวหน้าภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และสารสนเทศ

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์และอุปกรณ์การแพทย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิสุทธิ์ จันทร์ชัยชนะกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ประยงค์พันธ์

หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า

หัวหน้าภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรพงษ์ วงศ์พาสุข

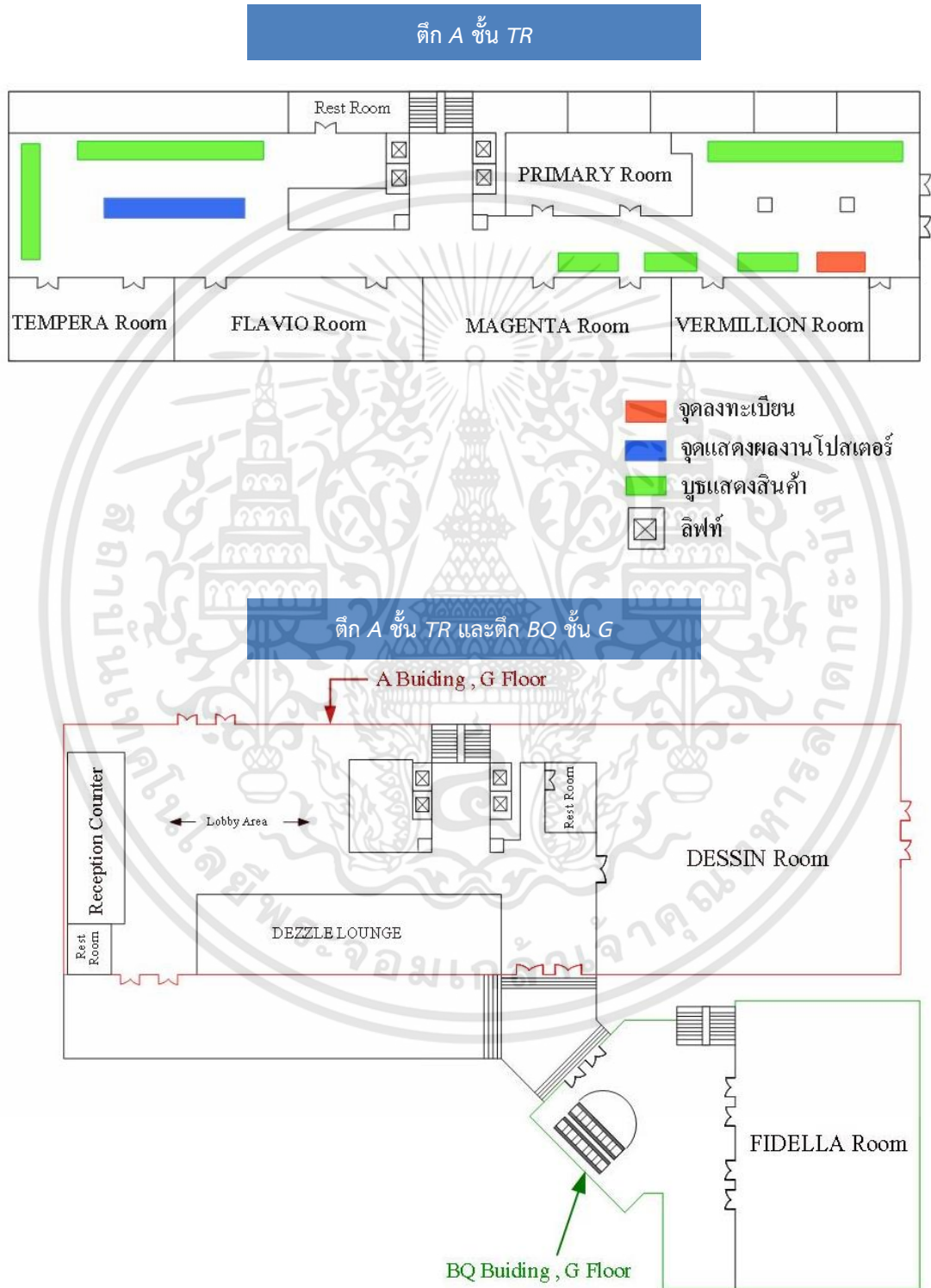
หัวหน้าภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิแต่ละสาขา
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ ๔๐

สาขา	ประธานภายใน			หน่วยงาน	ประธานภายนอก			หน่วยงาน
	คำนำหน้า	ชื่อ	สกุล		คำนำหน้า	ชื่อ	สกุล	
PW	ดร.	นพดล	ฉาบแก้ว	มจพ.	ดร.	ธรรมวฤทธิ์	สิงห์วิลัย	ม.มหิดล
PE	รศ.ดร.	นิตย	เฟื่องเวโรจน์สกุล	มจพ.	ผศ.ดร.	สุรพงศ์	สุวรรณกวิน	จุฬาฯ
CM	ดร.	พิสิฐ	วนิชชานันท์	มจพ.	รศ.ดร.	ภูมิพัฒ	แสงอุดมเลิศ	ม.กรุงเทพฯ
CT	ดร.	นที	ทองอ่อน	มจพ.	รศ.ดร.	ชินินทร์	บุญลักษณ์านุสรณ์	สจล.
EL	รศ.ดร.	มนตรี	ศิริปรัชญานันท์	มจพ.	รศ.ดร.	พิพัฒน์	พรหมมี	สจล.
DS	ผศ.ดร.	เอกรัฐ	บุญญา	มจพ.	ดร.	มนตรี	โพธิ์โสโนทัย	สจล.
PH	ผศ.ดร.	อมรินทร์	รัตนวิศ	มจพ.	ดร.	นพดล	นันทวงศ์	NECTEC สวทช.
BE	ผศ.	พยุ่ง	เดชอยู่	มจพ.	ผศ.ดร.	ปิยะมาศ	เสื่อเพ็ง	ม.รังสิต
CP	ดร.	อัครา	ประโยชน์	มจพ.	รศ.ดร.	มงคล	เอกปัญญาพงศ์	AIT
GN	ผศ.ดร.	พงศธร	ชมทอง	มจพ.	ดร.	ศุภกิจ	พฤกษ์อรุณ	ม.ธรรมศาสตร์
SS	ผศ.ดร.	กฤษณ์	อ่างแก้ว	มจพ.	ผศ.ดร.	ชูธรรม	สาวิกัน	ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

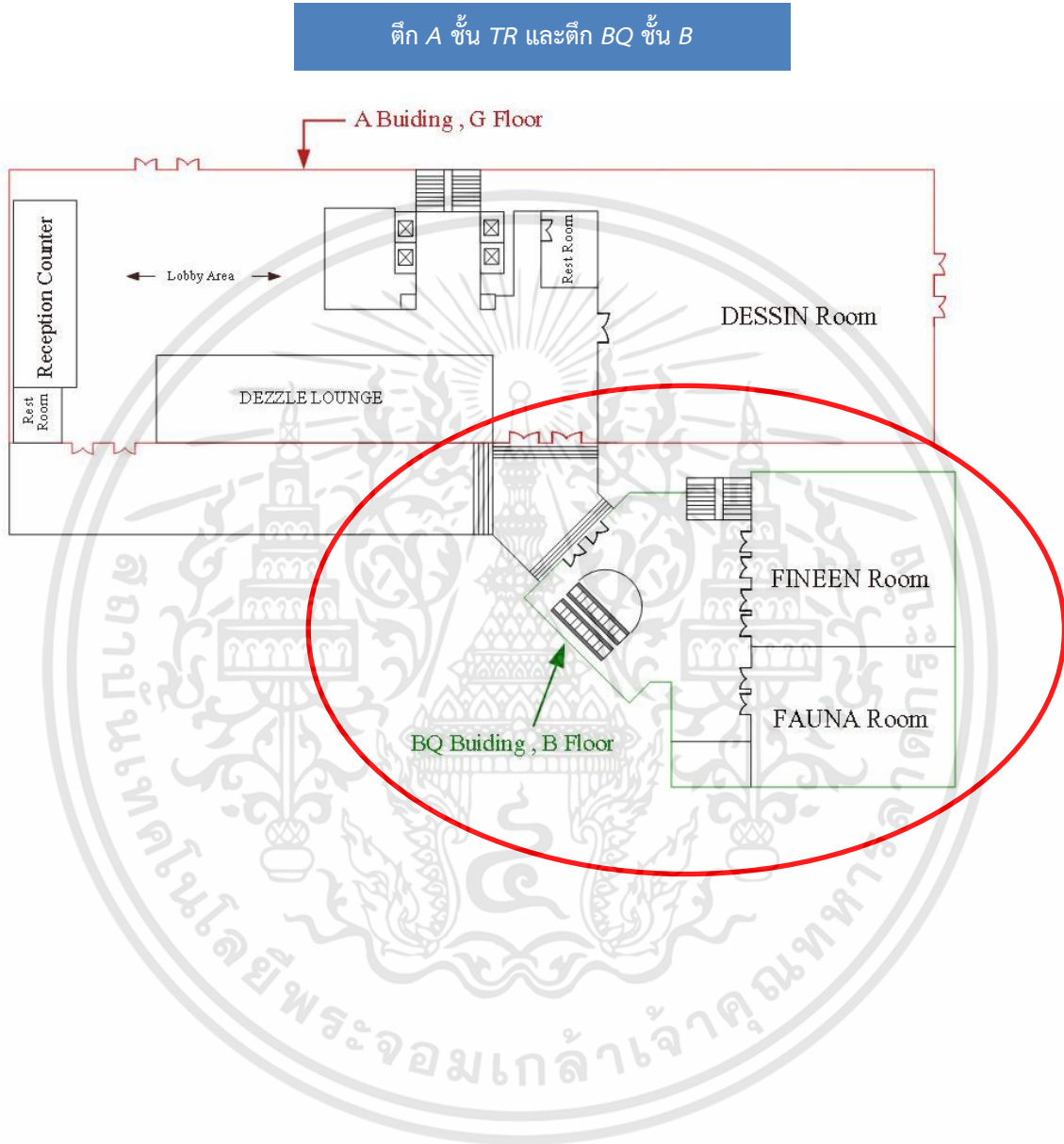
พื้นที่จัดงานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40

ณ โรงแรม The Zign Hotel



พื้นที่จัดงานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40

ณ โรงแรม The Zign Hotel (ต่อ)



กำหนดการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40 (EECON-40)

Wednesday, 15 November 2017

08.00 – 17.00	Registration
08.00 – 12.00	Tutorials
13.00 – 17.00	Tutorials

Thursday, 16 November 2017

Time	Fidella Grand Ballroom	Primary	Tempera	Flavio	Magenta	Vermillion
08.00 – 17.00	Registration (In front of Vermillion Room)					
08.00 – 10.00		CM-01 (8) ดร.พิสิฐ นิชชานันท์ ID249V, ID21, ID30, ID35, ID108, ID124, ID153, ID155	CT-01 (8) ผศ.นอ.ไชโย ธรรมรัตน์ ร.น ID248V, ID2, ID3, ID9, ID10, ID12, ID14, ID16	GN-01 (7) ว่าที่ร้อยตรี ดร.สรุจ พันธุ์จันทร์ ID13, ID22, ID49, ID50, ID66, ID68, ID69	PE-01 (7) ผศ.ดร.สาคร โพธิ์งาม ID8, ID18, ID19, ID32, ID34, ID37, ID38	PW-01 (7) ผศ.ดร.นพดล ฉาบแก้ว ID15, ID17, ID24, ID33, ID48, ID52, ID55
10.00 – 10.15	Coffee Break / Posters					
10.15 – 10.35	Opening					
10.35 – 11.05	Keynote (1)					
11.05 – 11.35	Keynote (2)					
11.35 – 12.05	Keynote (3)					
12.05 – 13.30	Lunch					
13.30 – 15.00		CM-02 (7) ผศ.ดร.วินวิลาศ ไทยวิโรจน์ ID250V, ID41, ID170, ID174, ID177, ID185, ID201	CT-02 (6) ดร.ธเนศ วงศ์หงษ์ ID46, ID47, ID53, ID71, ID92, ID102	SS-01 (6) ผศ.ดร.กฤษณ์ อ่างแก้ว ID117, ID118, ID123, ID181, ID197, ID212	EL-01 (6) ผศ.ดร.นภดล วิวัชรโกเศศ ID29, ID45, ID96, ID107, ID120, ID129	PW-02 (5) รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ ID56, ID59, ID62, ID64, ID99
15.00 – 15.15	Coffee Break / Posters					
15.15 – 17.15		PE-03 (8) ดร.ประชา คำภักดี ID90, ID93, ID95, ID97, ID106, ID113, ID115, ID128	CP-01 (7) ดร.พิศาล แก้วประภา ID11, ID73, ID85, ID101, ID182, ID203, ID230	GN-02 (8) ดร.ธาริณี ทองเกิด ID27, ID77, ID79, ID103, ID112, ID116, ID157, ID163	PE-02 (7) รศ.ดร.ยุทธนา ขำสุวรรณ ID40, ID42, ID44, ID51, ID58, ID80, ID83	PW-03 (7) ผศ.ดร.อภิบาล พุกษานูบาล ID109, ID126, ID131, ID138, ID140, ID145, ID14
15.15 – 17.45	Committee Meeting (Fineen Ballroom)					
18.00 – 22.00	Banquet					

กำหนดการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40 (EECON-40)

Friday, 17 November 2017						
Time	Fidella Grand Ballroom	Primary	Tempera	Flavio	Magenta	Vermillion
08.00 – 16.00	Registration (In front of Vermillion Room)					
08.00 – 10.15		PE-04 (8) รศ.ดร.ก้องพิน อารีรักษ์ ID149, ID156, ID161, ID162, ID164, ID165, ID166, ID167	CT-03 (4) ผศ.ดร.นิตติการ นิมสุข ID105, ID121, ID135, ID190	GN-03 (9) ผศ.ดร.ศุภชัย หอวิมานพร ID168, ID183, ID202, ID205, ID234, ID239, ID241, ID242, ID74	PE-05 (8) รศ.ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก ID178, ID180, ID184, ID186, ID198, ID199, ID213, ID217	PW-04 (7) ผศ.ดร.จงลักษณ์ พาหะชา ID188, ID189, ID193, ID218, ID231, ID240, ID246
10.15 – 10.30	Coffee Break / Posters					
10.30 – 12.00			PH-01 (4) ดร.นพดล นันทวงศ์ ID114, ID130, ID141, ID233	BE-01 (3) ผศ.ดร.ปิยะมาศ เสือเพ็ง ID125, ID224, ID244	PE-06 (6) รศ.ดร.บัลลังก์ เนียมมณี ID220, ID222, ID226, ID228, ID229, ID236	DS-01 (4) ดร.ปฎิมากร จันทร์พริ้ม ID20, ID195, ID215, ID232
12.00 – 13.00	Lunch					
13.00 – 15.00	Venue and Exhibition					
15.00 – 15.15	Coffee Break / Posters					
15.15 – 17.15	Closing Ceremony / Technical Area Conclusion Meeting					

ผู้ทรงคุณวุฒิรับเชิญการบรรยาย (Keynote Speakers)



รองศาสตราจารย์ ร้อยเอก ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

“ความท้าทายในการพัฒนาารถไฟฟ้าไทย”

บทคัดย่อ

ความท้าทายในการพัฒนาารถไฟฟ้าของไทย คือด้านการแทรกเข้าไปในตลาดรถยนต์สันดาปภายในและทำให้เกิดการยอมรับ ซึ่งใช้งานจริง ตลาดรถยนต์สันดาปภายในของประเทศไทยมีความแข็งแกร่งด้านเทคโนโลยี ด้านชิ้นส่วนสนับสนุน ด้านระบบการบำรุงรักษา ด้านราคา มีการยอมรับและเข้าใจมาช้านาน รวมทั้งเชิงนโยบายที่เอื้อต่อการเติบโตอย่างยั่งยืน แต่รถยนต์สันดาปภายในก็มีผลเสียในด้านมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและราคาน้ำมันที่จะทำให้กระทบตลาดรถยนต์ ประกอบกับมีการพัฒนาแบตเตอรี่ที่มีขีดความสามารถมากขึ้น จนจุดประกายมีการแข่งขันด้านแบตเตอรี่กันอย่างแพร่หลาย สมรรถนะรถไฟฟ้ามีความท้าทายมากเริ่มที่ค่าพลังงานต่อน้ำหนักของแบตเตอรี่น้อยกว่าน้ำมัน 104 เท่า และค่าพลังงานต่อปริมาตรของแบตเตอรี่น้อยกว่าน้ำมัน 42 เท่า ระบบ powertrain ในรถไฟฟ้าจึงต้องคัดสรรความเป็นสุดยอดเทคโนโลยีมาชดเชยกับค่าพลังงาน on board มีน้อยกว่าหลายเท่า ความท้าทายด้านการชาร์จพลังงานและราคาเป็นโจทย์ที่จะต้องทำให้เกิดการยอมรับให้ได้ ปัจจัยแรกที่จะช่วยให้เกิดการยอมรับของรถไฟฟ้าของไทย คือต้องมีการสื่อสารให้ความเข้าใจความเป็นรถไฟฟ้าและความเชื่อมั่นในด้านความปลอดภัย เช่นสถานะการใช้งานในภูมิประเทศที่เสี่ยงต่อน้ำท่วมขังในกรุงเทพฯ เป็นต้น ระยะทางต่อการชาร์จพลังงานจะเป็นส่วนสำคัญให้เกิดการยอมรับจนไม่ติดใจหรือกังขาแล้วจะขยับเข้าสู่ความนิยม โดยที่มาตรการภาครัฐต้องส่งเสริมของอุตสาหกรรมยานยนต์อย่างเป็นธรรมทั้งรถไฟฟ้าและรถยนต์สันดาปภายใน

The most challenge of Thai electric vehicle (EV) development is how to kick off in among the Thai internal combustion engine (ICE) market. ICE cars have been in the Thai market more than 50 years with the strength in supporting technology and parts, maintenance and service, pricing strategic and long term acceptability. The government policy drives the sustain growth of ICE cars for years. However, the polluted emission and the fluctuating gas price will affect the ICE markets. The era of battery EV (BEV) is surged and caused the worldwide research and development of high performance battery. The most challenge of BEV is the lower energy on board. The energy per weight of the battery compared to that of gasoline is lower by 104 time while the energy per volume of battery compared to that of gasoline is lower by 42 time. With this energy on board constrain, the BEV requires the best selected technology and innovation to lift up the BEV performance. The fast energy charging and reasonable EV pricing are a big issue in Thai market.

First factor to push the growth of Thai EV is the well communication and understanding of the EV principle for Thais. The confident of safety system is also a key factor to prove in flooding environment as in Bangkok. Driving distance per charge is basic consideration of EV selection. The government policy is a key success in Thai EV. The regulation, tax and promotion should be done in fair play of the ICE and EV competition in the automotive industry



คุณเฉลิมศักดิ์ สุมิตรไพบุลย์

ที่ปรึกษาหัวหน้าส่วนงานวิชาการ

คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

“วิวัฒนาการของการออกแบบและการประกอบไอซี”

บทคัดย่อ

ในไม่กี่ปีที่ผ่านมา โลกได้เปลี่ยนแปลงไปอย่างมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งมีการพูดเปรียบเปรยกันว่า ถ้าคุณหลับไปเพียงไม่ถึงปีแล้วคุณตื่นขึ้นมาคุณก็จะกลายเป็นคนที่ตามโลกไม่ทันแล้ว และในขณะนี้เทคโนโลยีกำลังก้าวข้ามไปสู่โลกในอนาคตอย่างรวดเร็ว สมองกล หุ่นยนต์ที่คิดแทนมนุษย์ ระบบสื่อสารไร้ขีดจำกัด รถยนต์ไร้คนขับ และ Super Computer รวมทั้งเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่จะทำให้มนุษย์อย่างเราๆ แทบจะปรับตัวไม่ทัน

หัวใจสำคัญที่ทำให้เทคโนโลยีได้พัฒนา และเปลี่ยนแปลงไปนั้นก็เกิดจากวิวัฒนาการของตัว IC (Integrated Circuit) ที่เป็นตัวขับเคลื่อนสำคัญ วงจรต่างๆที่บรรจุอยู่ในตัว Package IC มีการคิดค้นสร้างเสริมขึ้นใหม่อย่างไม่หยุดยั้งรวมถึงความต้องการที่จะทำให้ตัว IC นั้นมีขนาดเล็กและบางลงแต่มีประสิทธิภาพในการใช้งานสูงขึ้น (Small but high Application) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง IC ที่ใช้ในอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือ

ประเทศไทยก็เป็นประเทศหนึ่งที่มีโรงงานผลิต IC มากมายหลายโรงงาน ซึ่งในอดีตก็เคยเป็นอุตสาหกรรมส่งออกทำรายได้เป็นอันดับหนึ่งของประเทศมาแล้ว และเราก็เป็นประเทศชั้นนำที่มีการพัฒนาทางด้าน Packaging และรูปแบบต่างๆของตัว IC โดยเฉพาะ IC ที่มีขนาดเล็กมากๆ เช่น IC ชนิด QFN (Quad Flat Non-Lead)

เทคโนโลยีที่กำลังก้าวไปอย่างไม่หยุดยั้ง IC Packaging ก็กำลังก้าวควบคู่กันไป รูปแบบและขนาดของตัว IC ก็อาจจะมีความเป็นแค่ Film บางๆ และอาจจะมีความที่เล็กจนยากที่จะมองด้วยตาเปล่า

จับตาโลกของการพัฒนา IC อย่างใกล้ชิด เพราะนี่คือพัฒนาการแรกของเทคโนโลยีในอนาคตที่ไม่มีขีดจำกัด

ผู้ทรงคุณวุฒิรับเชิญการบรรยาย (Keynote Speakers)



Mr. Chayot Piyawannarat
Country Managing Director
for ABB in Thailand, Myanmar, Laos and Cambodia

“The Energy and forth Industrial Revolution”

Abstract:

ABB is unlocking value for customers in the Fourth Industrial Revolution. By combining ABB’s deep domain expertise with network connectivity and the latest digital technologies and innovations, **ABB Ability** creates powerful solutions and services that solve real business problems and produce tangible business opportunities.

The ABB Ability helps customers in utilities, industry, transport and infrastructure develop new processes and advance existing ones by providing insights and optimizing planning and controls for real-time operations.

The ABB Ability platform is an integrated Industrial Internet platform and cloud infrastructure based on ABB’s leading expertise in technologies, industries and digital to allow businesses to harnesses the power of industrial data. The platform enables customers to securely integrate and aggregate their data, combine with wider industry data, apply big data and predictive analytics, and generate insights that can help them drive performance and productivity improvements.

The offering builds on ABB’s pioneering technology and more than four decades of industrial digital leadership. It will enhance customers’ ability to innovate and compete in the emerging digital-industrial marketplace.

Digital offerings provided by ABB Ability include performance management solutions for asset-intensive industries; control systems for process industries; remote monitoring services for robots, motors and machinery; and control solutions for buildings, electric-vehicle charging networks and offshore platforms. Some of the more specialized offerings address energy management for data centers and navigation optimization for maritime shipping fleets, among many others.

The ABB Ability will serve customers in utilities, industry, transport and infrastructure. It will leverage the power of the digital revolution by enabling reduced maintenance costs, longer asset life, more efficient operations, reduced environmental impacts and improved worker safety.

การนำเสนอในรูปแบบโปสเตอร์

BE			
ลำดับ	รหัส ID	ชื่อเรื่อง	สถาบัน
	254	ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
CP			
	111	การพัฒนาระบบตรวจจับการล้มบนสมาร์ตโฟนแอนดรอยด์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
	127	ระบบการจัดการ การจองและเรียกคิวลูกค้าร้านอาหารด้วยสมาร์ตโฟน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
	253	ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และสารสนเทศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
	088	การพัฒนาระบบแจ้งเตือนอัตราการเต้นของหัวใจสำหรับผู้สูงอายุ	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
	251	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
	025	เทคโนโลยีระบบบังคับอัตโนมัติด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับระบบ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
CT			
	194	<i>Controller Design for Quadrotor using Feedback Linearization</i>	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
	252	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
	257	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
GN			
	075	การออกแบบเครื่องทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย
	087	ต้นแบบอุปกรณ์บันทึกข้อมูลเครื่องยนต์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
PE			
	235	การควบคุมในโหมดกระแสเฉลี่ยของวงจรแปลงผันไฟสลับ-ไฟ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

PW		
007	การวิเคราะห์การกระจายของสนามไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และพลังงานของกับดักเสิร์จที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าแรงสูง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
089	การวิเคราะห์การกระจายสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าบนลูกถ้วยฉนวนแยกสาย ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศไทย	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
110	การรักษาแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์โหลดคอนโทรลเลอร์ถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าและบัคคอนเวอร์เตอร์ปรับอัตราการผลิตประจุของแบตเตอรี่	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
169	ผลของการปล่อยไอโซนแบบพองนาโนแนวตั้งที่สร้างจากเครื่องกำเนิดไอโซนด้วยหลักการโคโรนาดีสชาร์จต่อการบำบัดน้ำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์สุพรรณบุรี)
255	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
256	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
171	ผลของการปล่อยไอโซนแบบพองนาโนแนวนอนที่สร้างจากเครื่องกำเนิดไอโซนด้วยหลักการโคโรนาดีสชาร์จต่อการบำบัดน้ำผิวดิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์สุพรรณบุรี)
173	การเปรียบเทียบลักษณะสนามไฟฟ้ากระแสสลับแบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอปานกลางต่อการลดความชื้นแมคคาเดเมียทั้งกะลา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์สุพรรณบุรี)

การนำเสนอในรูปแบบปากเปล่า (Oral Presentation)

BE			
ลำดับ	รหัส ID	ชื่อเรื่อง	ผู้แต่ง
1.	027	<i>Design and Implementation of a Daily Activity Monitor with Calorie Burn Estimation</i>	Patamawadee Leepaisomboon, Boonchuay Supmonchai, Arporn Teeramongkolrasmee Chulalongkorn University
2.	125	วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ความถี่สูงสำหรับเครื่องตัดชิ้นเนื้อด้วยไฟฟ้า	นรงค์ฤทธิ์ เสนาจิตร, อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3.	224	การพัฒนาระบบเชื่อมต่อสมองกับคอมพิวเตอร์แบบด้วยสัญญาณ EOG และ P300 สำหรับทางเลือกในการสื่อสารของผู้พิการขั้นรุนแรง	จักรพัฒน์ วัฒนราชกูร์, ศาส์นสิทธิ์ งามรัศมีวงศ์, ยรรยงค์ พันธุ์ สวัสดิ์ มหาวิทยาลัยมหิดล
4.	244-1	อุปกรณ์วัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบพกพาสำหรับผู้สูงอายุ	กัญญา กริประเสริฐกุล, อารณณ์ อีรัมย์กลรัมย์ อภิวัดน์ เล็กอุทัย, ภาคภูมิ สมบูรณ์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
CM			
1.	021	การศึกษาคุณสมบัติไดโอดเล็กทรอนิกส์ของวัสดุโดยการประยุกต์ใช้ โพรงทรงกระบอกซ้อนกัน	โชคชัย แสงดาว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
2.	030	การศึกษาระยะปลดปล่อยจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่	ธีระ จงสมชัย, สุวัฒน์ ภัทรมาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
3.	035	วงจรขยายส่งผ่านอิมพีแดนซ์ต่อเรียงกันโดยใช้เทคนิคไตรเรโซแนนซ์	อิทธิพัฒน์ รูปคม, วรพงศ์ ศิลาพันธ์, อนุรี หล่อสวีสดี, สุพี ตรา เพ็ชรนิล
4.	041	การปรับปรุงไดเวอร์ซิติ เกนสำหรับระบบเชื่อมโยงขาแบบMISO	สัมพันธ์ พรหมพิชัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
5.	108	การออกแบบสายอากาศแบบร่องที่ใส่เส้นตรึงร่วมกับการป้อนแบบเส้นทริปคู่และสตับแบบรูปทรงผสมคู่	นัตพล ดอกจอก วันวิสาข์ ไทยวิโรจน์ เอกรัฐ บุญญา, ประยู ทธ อัครเอกผาลิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
6.	124	การออกแบบแผ่นสะท้อนสายอากาศโดยใช้ผิวเลือกความถี่สำหรับปรับปรุงทิศทางการแผ่รังสีเพื่อประยุกต์อัลตราไวด์แบนด์	พรรษมน สิงห์สุระ, วันวิสาข์ ไทยวิโรจน์, ประยู ทธ อัครเอกผาลิน

			มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
7.	153	การประยุกต์ใช้ สายอากาศไมโครสตริปสำหรับ ระบบระบบมูม รับสัญญาณที่เข้ามาด้วยการเปรียบเทียบอัตราส่วน ผลต่างของแบบรูปการแผ่พลังงาน	จักรกฤษ ตรีกรพาณิชย์, อภิศักดิ์ เกตุขว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
9.	155	สายอากาศ 2 แถบความถี่ แบบร่งเปิดสามเหลี่ยมมุมฉากคู่ที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมแบบไม่ สมมาตรสำหรับเครือข่ายไร้สายย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.5 GHz	กมลทิพย์ วัฒนิกำธร, ธนะกิจ วัฒนิกำธร, ชาติรี มหัทธนาจตุภั ทร, ประยูทธ อัคร เอกฉालิ น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระ นครเหนือ
10.	170	การศึกษาและพัฒนาระบบระบุตำแหน่งในโครงข่าย เซ็นเซอร์ไร้ สายด้วยบลูทูธพลังงานต่ำ	ต้องยศ แซ่ มช้อย, ปานทิ พย์ จันทรสมุทร , อริพงษ์ สุริยา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
11.	174	Design and Development of a Wideband Wilkinson Power Combiner Circuit for PAM-4 Signal Generator	E. Khansalee, T. Saengsrirueang, T. Sanrian, P. Saokaew, K. Puntsri Rajamangala University of Technology Isan Khonkaen Campus
12.	177	สายอากาศไดโพลรูปตัวเอสสำหรับโทรศัพท์ระบบ ดิจิตอล	ธนะกิจ วัฒนิกำธร, กมลทิพย์ วัฒนิกำธร อรรถพล ช่วยค้าชู, ณทนา จันทศร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
13.	185	สายอากาศไดโพลช่องป้อนสัญญาณรูปขั้นบันได สำหรับโทรศัพท์ ระบบดิจิตอล	กมลทิพย์ วัฒนิกำธร, ธนะกิจ วัฒนิกำธร, นพกฤษณ์ ดาน้อย, ธเนชฐ ยืนยง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
14.	201	การออกแบบสายอากาศแบบไมโครสตริปแพทช์ ร่ว มกับช่องว่างแถบความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าโครงสร้าง เสมือนเห็ดรูปตัวไอสำหรับประยุกต์ ใช้กับ WLAN	พงษ์ พัฒน์ เกตุขุนทด, ธนันต์ หงส์นรา, วันวิสาข์ ไทยวิโรจน์ , ประยู ทร อัครเอกฉา ลิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระ นครเหนือ
CP			
1.	011	เว็บไซต์สำหรับให้บริการและจัดการคลังเคมี อาหาร	พิกุลแก้ว ตั้งดีสานนท์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง
2.	025	เทคโนโลยีระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับระบบ บริหารและการจัดการทรัพยากรบุคคล	จักรกฤษณ์ จันทรกระจ่าง, สมิต เล้าโสภา ภิรมย์ บัญชา เหลือแดง, ลักขณา บรรณวัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์

3.	073	ระบบการจัดการห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโทรคมนาคมผ่านเว็บเบราว์เซอร์	ชยานิชฐ์ บุญสนิท, ระวี วรรณพันธ์นิยะ, ไชยวัศ ชิงแก้ว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
4.	085	การปรับปรุงขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมด้วยตัวปฏิบัติการทางพันธุกรรมแบบปรับตัวได้	อนรรักษ์ เชยชุ่ม, ณรงค์ เกียรติพรานนท์ ชัยพร เขมะภาคะพันธ์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
5.	088	การพัฒนาระบบแจ้งเตือนอัตราการเต้นของหัวใจสำหรับผู้สูงอายุ	กัญกร อ่อนภูเวียง, อภิชาติ แก้มทอง, ปริฉัตร แสงปัญญา, เศรษฐกาล โปร่งนุช มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
6.	101	การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของคอมพิวเตอร์บอร์ดเดียวในการรับส่งข้อมูลด้วยโปรโตคอล MQTT	คณิตกร ชันเชื้อ และ เรวัต ศิริโกภาภิรมย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
7.	111	การพัฒนาระบบตรวจจับการล้มบนสมาร์ตโฟนแอนดรอยด์	ภูริทัต วิจิตรนวกุล, โกวิท ทองอรัญกุล, ลือพล พิพานเมฆาภรณ์, สุวัจชัย กมลสันติโรจน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
8.	127	ระบบการจัดการการจองและเรียกคิวลูกค้าร้านอาหารด้วยสมาร์ตโฟน	เจษฎา วีระเดชกำพล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
9.	182	ระบบตรวจจับผู้บุกรุกอัจฉริยะโดยใช้อาร์เอฟไอดีเซนเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหวและรหัสเบร็พายผ่านเว็บแอปพลิเคชัน	ภุมมิมล ไชยเชิดเกียรติ, พัลลภา เขมรังษสฤฎ์, ฐะปะนีย์ ตริรัตน์ภรณ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
10.	203	การพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนบริเวณลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม	ภูติ สุกข์ ธรรมกุล, พิศาล แก้วประภา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
11.	221	การปรับปรุงจาโคเบียนบนตัวกรองคาลมานแบบขยายสำหรับโครงข่ายประสาทแบบแพร่กลับ	สุทิศ องอาจ, จิรพัฒน์ แสงทอง, เกียรติกุล เจียรนัยธนะกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
12.	230	การปรับปรุงตัวกรองคาลมานแบบขยายโดยอาศัยสัญญาณรบกวนของการวัดแบบปรับตัวเองได้ สำหรับโครงข่ายประสาทแบบแพร่กลับ	สุทิศ องอาจ, จิรพัฒน์ แสงทอง, เกียรติกุล เจียรนัยธนะกิจ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
CT			
1.	002	โปรแกรมการวัดอุณหภูมิในงานอุตสาหกรรมด้วย LabVIEW	รังสิมันต์ สิทธิกร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
2.	003	เทคนิคการตรวจสอบและปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นเฉลี่ยของความล้มเหลวบนเวลาที่ต้องการของวาล์วปิดฉุกเฉิน	ภุชพงษ์ จันทเขตต์, สาธิต มังคลาจารย์, จิระศักดิ์ ชาญวุฒิชัยธรรม

			มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
3.	009	เทคนิคการคลาดเคลื่อนอุณหภูมิต่ำกว่า 1 มิลลิลองศาเซลเซียส สำหรับสมการพื้นฐานเทอร์มิสเตอร์ NTC	รังสิมันต์ สิทธิกร, สุพัตรา เพ็ชรนิล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
4.	010	การเทียบมาตรฐานเทอร์มิสเตอร์ NTC และการวัดอุณหภูมิด้วย LabVIEW	รังสิมันต์ สิทธิกร, สุพัตรา เพ็ชรนิล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
5.	012	การหาค่าการวางตัวของ MEMS-IMU โดยใช้ ตัวกรองคาลแมนไม่เชิงเส้นแบบปรับตัวในรูปควอเตอร์เนียน	กฤษฎา กันทะวงศ์, วีระชัย มาลยเวช มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
6.	014	การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น	จิรวรรณ หอมจันทร์, กองพล อารีรักษ์, ธิดารัตน์ อารีรักษ์, กองพัน อารีรักษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
7.	016	การสังเคราะห์ตัวควบคุมPID แบบแอนะล็อกด้วยขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้	เดชา พงดาวเรือง, อรรถรัตน์ นาวิกาวตาร, ไชโย ธรรมรัตน์, สาโรจน์ หลั่งน้ำทิพย์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
8.	046	การประยุกต์ใช้การค้นหาแบบนกกาเหว่าในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีทีกำลังสองอย่างเหมาะสมสำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน	ชูเกียรติ ศิริ, ดนุ พล คำปัญญา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี
9.	047	การระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเซอร์โวด้วยการค้นหาแบบกระแสวิ่งข้ามขั้น	ดนุพล คำปัญญา, สัตถาภ มีไทยพานิช, ชูเกียรติ ศิริ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี
10.	053	<i>An Initial Set of Candidate Controllers for Unfalsified Control</i>	<i>Tanet Wonghong Kasetsart University Sriracha Campus, Sriracha</i>
11.	071	การควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับเฟสเดียวที่ไม่มีกรวดแรงดันกริด	เจษฎา พันธุ์ออน, วิโรจน์ แสงธงทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
12.	092	การประยุกต์ใช้การควบคุมค่า pH โดยใช้ระบบควบคุมเชิงทำนาย แบบจำลอง	อานูพงศ์ จัดนอก, ธเนศ วงศ์หงษ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตศรีราชา
13.	102	สมการปริภูมิสถานะของการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ที่มีตัวควบคุมพีไอสี่ตัว	กุลพงษ์ บุญมาวงศ์, วิโรจน์ แสงธงทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
14.	105	การพัฒนาแบบจำลองอัตรานมตีในการติดตามเป้าหมายเคลื่อนที่ของอากาศยานไร้คนขับ	ชาติ ฤทธิหิรัญ, อนุชิต เจริญ, วิญญู แสวงสินกสิกิจ, ณธรรม เกิดสำอางค์, คม กฤษ แก่นทอง มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
15.	121	การพัฒนาเครื่องตรวจวัดอุณหภูมิบริเวณหน้าผกด้วยเซ็นเซอร์อินฟราเรดและกระบวนการตรวจจับใบหน้า	นิติการ นิมสุข, นวพล เกิดต่อพันธ์, กนกพร รุ่งโรจน์สกุลพร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

16.	135	<i>A Study of flowrate calculation using ESPRIT technique for Ultrasonic Velocity Profiles</i>	<i>Jatuphol DAOSAENG and Natee THONG-UN</i> <i>King Mongkut's University of Technology North Bangkok</i>
17.	190	การควบคุมอากาศยานสี่ใบพัดโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟuzzyที่ตีร่วมกับเทคนิคการทำให้เป็นเชิงเส้นแบบป้อนกลับ	ศตวุฒิ ปรีชล, วิทวัส ผ่องญาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
18.	194	การออกแบบตัวควบคุมอากาศยานสี่ใบพัดโดยใช้เทคนิคการทำให้เป็นเชิงเส้นแบบป้อนกลับ	ธนัช อัครนัตตา, ภูริชวัฒน์พานิชกิจ, ธนา สถาพรพินิจกิจ, คทาเทพ สวัสดิพิศาล, วิทวัส ผ่องญาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
DS			
1.	020	การดีมอดูเลชันคิวพีเอสเคด้วยวงจรรองแบบปรับตัวที่มีโครงสร้างการกำจัดสัญญาณรบกวนแบบปรับตัว	วุฒิพร เลิศวาสนา, กนกวรรณ มิ่งสกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
2.	195	ผลตอบสนองฟังก์ชันถ่ายโอนของการจำลองแบบอัลตราซาวด์อัลตราฮาร์โมนิกในโดเมนความถี่จากการกระตุ้นความถี่ครึ่งหนึ่งของสัญญาณอินพุท	จินดา สามัคคี, สัญญา ผาสุก, ชยานิษฐ์ บุญสนิท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
3.	215	การตรวจจับคุณภาพของการนอน	ปฎิมากร จันทร์พริ้ม, นาวิณพกุล, วศินี เกื้อเอียด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
4.	232	การหาเส้นทางการบินที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพของอากาศยานไร้คนขับแบบอัตโนมัติที่ใช้ในการเกษตรด้วยวิธีระบบมดแบบกำหนดขอบเขตสูงสุด-ต่ำสุดที่ถูกปรับปรุงเพิ่มขึ้น	นลิน สีดาห่าว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
EL			
1.	029	<i>Theoretical Investigation of Type-II GaSb/GaAs Quantum Dot Solar Cells</i>	<i>Maetee Kunruga</i> <i>King Mongkut's University of Technology Thonburi</i>
2.	045	เทคนิคการลดทอนฮอรัสซิมอสทรานส์คอนดักเตอร์กัลบัตรรกะ	ทิตพันธ์ ชูกร และ สุริยา อติเรก
3.	096	วงจรรองความถี่สูงคัตออฟ 108 MHz สำหรับใช้วิเคราะห์ หาประเภทของอินเทอร์มอดูเลชัน	ธนะกิจ วัฒนกัธธร, กมลทิพย์วัฒนกัธธร, อรรถพล ช่วยค้าชู, วัชรเช ศิริลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
4.	107	วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมโดยไขว้จร ECCII	พิเชฐ ศรีพรหมมา, พิชัย สุขไสบูลย, มนตรี คำเงิน, สมเกียรติ ฤกษ์วรัญญู สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
5.	120	วงจรรวมแอนะลอกที่ใช้ BJT ทำงานที่ระดับแรงดันและกำลังงานสูญเสีย	บุญชัย บุญชู มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี มหานคร

6.	129	<i>Synchronization and Circuit Realization of two coupled Chaotic Lorenz System</i>	<i>Suphaphorn Panikhom Rajamangala University of Technology Isan</i>
GN			
1.	013	<i>Intelligent Walking Cane for the Visually-Impaired</i>	<i>Chaiyacheat kongsomboon, Siwasek thumpatsorn, Greetha khruethet, Chakkaphong Suthaputchakun Bangkok University</i>
2.	022	ผลกระทบของสนามแม่เหล็กเนื่องจากฟ้าผ่าต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในอาคาร	จิตติภัทร ใจห้าว, อภิบาล พฤกษานุบาล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
3.	049	การวิเคราะห์สมรรถนะมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยวิธีวิเคราะห์แรงแม่เหล็กไฟฟ้า	ภัควี หะยะมิน, ชัยยพล ธงชัยสุรชัยกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
4.	050	การประมาณค่าความเร็วรอบและแรงบิดมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล	อดิศร พลเสนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
5.	066	การประมาณค่าความสกกปรกบนแผงโซลาเซลล์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมและกระบวนการทางภาพ	พงษ์ศักดิ์ ทามแก้ว, ประจวบ อินระวงศ์, กาณท์ เกิดชื่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
6.	068	วงจรรขยายกำลังสำหรับระบบโทรมาตรและปีคอนของดาวเทียมขนาดเล็ก	อนิวัฒน์ ปลอดภัย, สวัสดิ์ บุญยะเวศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
7.	069	การปรับปรุงวิธีระบบมดแบบกำหนดขอบเขตสูงสุด-ต่ำสุดด้วยการถ่ายทอดทางพันธุกรรมสำหรับการค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุด	นราศักดิ์ วงษ์वासัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
8.	074	การออกแบบและสร้างรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก	ธีรพงศ์ บริรักษ์, ปฏิภาณ เกิดลาภ, พงษ์ สวัสดิ์ คชภูมิ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
9.	075	การออกแบบเครื่องท ความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์	เอกนรินทร์ ประดับญาติ, หยาตพิรุณ จาริยะ, ปาริษา ศี ริวงษ์, จิตรา แซกระโทก, ปฏิภาณ เกี ดลาภ, ณัฐพงศ์ เมืองจันทร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
10.	077	การจำแนกการนำเสียของล่องกองด้วยเทคโนโลยีจมองอิเล็กทรอนิกส์	วิจิตชัย ชาญสงคราม, นิตการ นิมสุข มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
11.	079	การคัดแยกอนุภาคขนาดไมโครเมตรด้วยแรงไดอิเล็กโตรโฟรีติก	นิตินพงศ์ ปานกลาง, บุญชัย เตชะอำนาจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
12.	087	การพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์บันทึกข้อมูลเครื่องยนต์แบบเรียลไทม์	ธนณัฐ์ จันทร์รุ่งเรือง, อชิระรัชช โชติเทียนชัยวัต, ศุภชัย วรพจน์พิศุท มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

13.	103	การควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกรีดเฟสเดี่ยว	ณรงค์เดช ดิงกระโทก, วิโรจน์ แสงธทอง, ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรั กษ์, ถาวร หินซุย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
14.	112	การวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าตัวประกอบการกำบังสนามแม่เหล็กความเข้มสูงเนื่องจากฟ้าผ่าของโครงตาข่ายเหล็กสำ สำหรับการประยุกต์ใช้งาน	จิตติภัทร ใจห้าว, อภิบาล พฤษพานูบาล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
15.	116	ชุดปฏิบัติการการทำงานของรีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาตามมาตรฐาน IEC60255	สุธีไกรสุนทรเลิศภาพ, พศวีร์ ศรีโหมด, เพชร นันทวิวัฒนา, กิรติ ชยะกุลศิริ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
16.	157	ระบบสี่ อสารขาลงแบบมัลติโมดส สำหรับดาวเทียมคิวบ์แซท	ชาธิพนุทัตน์, สวัสดิ์ บุญยะเวศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
17.	163	การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ตรวจสอบคุณภาพน้ำในบ่อปลาเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติระบุตำแหน่งด้วยจีพีเอส	กมล บุญล้อม, ศิลปชัย อุ้นคา, เสกสรรค์ วินยางค์กุล มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย
18.	168	ระบบตรวจติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารโรงพยาบาลโดยอินเทอร์เน็ต่อพอิงส์	เพชร กลั่นวิชิต, ชาญปกรณ์ ณ วิโรจน์, เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ และ พิเชษฐ์ยองสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
19.	183	ระบบควบคุม มระดับความเป็นกรด-ด่างแบบสมองกลฝังตัวสำหรับการเพาะปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์	อัฐวิฑูฒิ ไหวพริบ, ญัฐพร ฤทธิ์นุ้ม มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
20.	202	ระบบวัดข้อมูลการใช้พลัง งานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศในบ้านอยู่อาศัยโดยไม่ติดตั้งเครื่องมีวัดล่งล้าผู้อยู่อาศัย ด้วยเทคนิคการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีน	ชานนท์ ชูพงษ์, บุญย้ง ปลั่งกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชชมงคลธัญบุรี
21.	205	การพัฒนาตัวควบคุมแบบสวิตซิง PD บนบอร์ด FPAA	ธนากร บุญเพชรแก้ว, กฤษณ์ อ่างแก้ว, วิทวัส ผ่องญาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
22.	234	การศึกษาและออกแบบระบบวัดสมบัติทางไฟฟ้าของยางก้อนถ้วด้วยคลื่นความถี่วิทยุ	อธิพงษ์ สุริยา, วรการวงศ์สายเชื้อ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
23.	239	การสร้างและทดสอบวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สองเฟสเพื่อการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส	ประสพโชค โห้ทองคำ, วรต์ถ์ มากกาญจนกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชชมงคลรัตนโกสินทร
24.	241	การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบลอยน้ำและผลกระทบจากอุณหภูมิของระบบแบบลอยน้ำและระบบบนพื้นดิน	กาญจนศิษฏ์ เวชการ, บุญย้ง ปลั่งกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชชมงคลธัญบุรี

25.	242	แผ่นดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้วัสดุรีไซเคิล HDPE และวัสดุ ไมโครจากแร่ไฮโดรอลิมีนัมของไทย	พนิดา คำมีสิทธิ์, วิษณุ เจริญถนอม, ณรงค์ชัย โอเจริญ, สมัญญา สงวนพรรค, อนุชา วรณก้อง, สรพงษ์ ภาสุปรีย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
PE			
1.	008	วงจรทบระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง	เกื้อกมล กองกาญจนะ, สุภารัตน์ ขวัญอ่อน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
2.	018	ผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก	จักรกริช ภัคดีโต, กองพันธ์ อารีรักษ์, กองพล อารีรักษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
3.	019	การควบคุมระบบกักเก็บพลังงานสำหรับไมโครกริดเพื่อลดความผันผวนทางความถี่	กิตติโชติ สุนทรทวีทรัพย์, สมภพ ผลไม้สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
4.	032	แท่นทดสอบเตาหุงต้มไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำภายในครัวเรือน สำหรับศึกษาค่าพารามิเตอร์ของโหลดแบบเหนี่ยวนำบนพื้นฐานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบเรโซแนนท์คลาสอี	สุพรรณณี โพธิ์เงิน, ปฎิพงษ์ เจริญเวียงเหนือ, ไชยรินทร์ อัครวโรดม, กมล จิรเสรีอมรกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
5.	034	การวิเคราะห์ทางพลศาสตร์และการหาพารามิเตอร์ของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้าโดยวิธีการประมาณรูปแบบ OE	อธิปตย์ จันทร์ดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
6.	037	การเปรียบเทียบวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งและวิธีกรอบอ้างอิงซึ่งโครนส์สำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส	ฐานันตร์ ตรงใจ, ทศพร ณรงค์ฤทธิ์, กองพล อารีรักษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
7.	038	การจำลองของสวิตชิงคอนเวอร์เตอร์กระแสสูงสำหรับเครื่องชาร์จรถยนต์พลังงานไฟฟ้า	chanthy Phok, ไปรยา เฉยไสย, กฤษ เฉยไสยมหาวิทยาลัยขอนแก่น
8.	040	การวิเคราะห์วิธีควบคุมและวิธีมอดูเลชันที่ใช้งานร่วมกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา	กชกร ศิริพันธ์, ผดุง กิจแสวง, ประชา คำภักดี, วรการ วงศ์สายเชื้อ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
9.	042	การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อนแบบบางอันดับสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส	มนรัตน์ ผดุงศิลป์, ทศพร ณรงค์ฤทธิ์, กองพล อารีรักษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
10.	044	<i>An Implement 1.5 MHz of Induction Heating for Aluminum Based on Vacuum Tube Oscillator Circuit</i>	<i>J. Haema and P.Chanmontree King Mongkut's University of Technology North Bangkok</i>
11.	051	อัลกอริธึมแบบง่ายในการคำนวณลำดับการสวิตซ์ของการมอดูเลชันเชิงความกว้างพัลส์ แบบ สเปซเวคเตอร์สำหรับอินเวอร์เตอร์ สามระดับ	สาทร ทองถึง, สมภพ ผลไม้, สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา

		สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
12.	058	การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
13.	080	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นโดยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ
14.	083	การควบคุมวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามขั้นสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน
15.	090	<i>An Experimental Study for Semiconductor Loss Reduction in a Voltage Source Inverter under Sinusoidal Carrier-Based PWM Techniques</i>
16.	093	การควบคุมแบบโรเซนเซอร์สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยวิธีการสังเกตฟลักซ์แม่เหล็ก
17.	095	พฤติกรรมของกังหันที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางภายใต้แรงดันตกช่วงสั้น
18.	097	การควบคุมแรงบิดโดยตรงของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรโดยวิธีทำให้เป็นแพสซีฟด้วยการป้อนกลับ
19.	106	การวิเคราะห์การเสื่อมถอยประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามอายุใช้งานจริงตามมาตรฐานการทดสอบ
20.	113	การทำให้กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่สามของวงจรไมโครอินเวอร์เตอร์ชนิดครึ่งบริดจ์แบบสองภาคลดน้อยลงโดยใช้เทคนิคตัวควบคุมพีโอร่วมกับการป้อนไปหน้า
21.	115	วิธีการใหม่สำหรับการประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่สมดุลแบบต่ำกว่าปกติ
22.	128	ผลของรูปแบบการสวิตช์ของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่มีต่อความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดันในย่านการมอดูเลตเกินจากมุมมองไดอะแกรมสเปซเวกเตอร์
23.	149	การออกแบบวงจรบัค-บูสต์ เอซี-ดีซี สำหรับโคมไฟถนนแอลอีดี
		เทพพนม โสภะเพิ่ม , กองพัน อารีรักษ์, กองพล อารีรักษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
		ศุภณัฐ เดย์ วสุรินทร์, สุดำรัตน์ ขวัญอ่อน, กองพัน อารีรักษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
		ศุภณัฐ เดย์ วสุรินทร์ , สุดำรัตน์ ขวัญ อ่อน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
		<i>Krit Yodpradit, Achara Pichetjamroen, and Nithiphat Teerakawanich¹</i> <i>Kasetsart University</i>
		โกวิท โชวสุธรรม , เชิดพงษ์ ดีเลิศไพบูลย์ , พงศพิชญ วิชาสุรมณฑล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
		เดชา ปานประเสริฐ , วรार्ท สาตะระ, บัลลังก์ เนียมมณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
		พนัสชัย ศรีบำรุง , สุขสันต์ นุ่นงาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
		เกียรติศักดิ์ พรรณจำปา , รุ่งเพชร ก่องนอก , บุญยัง ปลั่งกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
		ปกครอง วงศ์คุณ , พิสิษฐ์ ลีวัฒนกุล , นภดล วิวัชรโกเศศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
		บุญยภัทร ภูมิภาค , ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
		ไพบูลย์ เกียรติสุขคนธาธร, สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
		รุ่งเรือง สุณาอาจ , ชัชวาลย์ เยรบุดร มหาวิทยาลัยมหิดล

24.	156	การศึกษาพฤติกรรมการลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรชนิด Nd-Fe-B เนื่องจากผลของความร้อน	ชาญปกรณ์ ณ นิโรจน์, พชร กลิ่นวิจิต, เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์, พิชิต ถ้ายอง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
25.	161	วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์บนฐานคลื่นพาห်ของอินเวอร์เตอร์สามระดับเพื่อแยกการติดตามกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์สองสตรึง	มนต์ชัย อริยพฤกษ์, สมบูรณ์ แสงวงศ์ วณิชย์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
26.	162	ผลกระทบของการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่มีต่อปรากฏการณ์การจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง	พุทธพร เสวตสกุลานนท์, วิจิตร กิณเรศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
27.	164	การลดกระแสกระชากขณะเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสกับระบบไฟฟ้ากำลัง	ณัฐพงษ์ ประพฤติ, พุทธพร เสวตสกุลานนท์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
28.	165	พฤติกรรมการเกิด กระแสไหลวนของการขนานพีดับบิวเอ็มคอนเวอร์เตอร์โดยตรง	จิรวุฒิ เบญจนาธาตุ, บัลลังก์ เนียมมณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
29.	166	การควบคุมแรงบิดโดยตรงของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรด้วยวิธีการเลียปูนอฟ	กริษา จิรัฏฐิวิรุฒ์กุล ¹ , สุขสันต์ นุ่นงาม ² มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
30.	167	การตัดออกของแรงดันโหมตรวมสำหรับระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ ชนิดสองภาคสามเฟส แบบเชื่อมต่อโครงข่าย	อดิศักดิ์ พรมอยู่, สุรพงศ์ สุวรรณกวิน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
31.	178	การซิงโครไนซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทางเชื่อมเข้ากับกริดระบบด้วยเทคนิคการควบคุมแบบจัดปรับกริดฟลักซ์	ศุทธิมัต เมืองเงิน, ยศนัย ศรีอุทัยศิริวงศ์, ยุทธนา ขำสุวรรณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
32.	180	วิธีการหาค่าพารามิเตอร์วงจรมูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดโดยใช้วิธีการแบบไฮบริดกับ ข้อมูลผู้ผลิต	บุญยภัทร ภูมิภาค, หทัยชนก ทวีชัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
33.	184	การควบคุมกระแสของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกรแสตรงหนึ่งเฟสด้วยตัวควบคุมพีไอบนแกนอ้างอิงแบบหมุนและตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกรีโซแนนซ์บนแกนอ้างอิงแบบนิ่ง	ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข, ทองอินทร์ สุยะทา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
34.	186	<i>Comparison of PI Regulator Tuning Techniques for DC Bus Voltage Control of Single-Phase Grid-Connected Voltage Source Converters</i>	<i>Sakda Somkun¹, Viboon Chunkag² King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand</i>
35.	198	การบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว	เทพพนม โสภาเพิ่ม, กองพัน อารีรักษ์, กองพล อารีรักษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

36.	199	การสร้างเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์	เทพพนม โสภภาพิม , กองพัน อารีรักษ์, กองพล อารีรักษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
37.	213	วิธีการชดเชยผลกระทบของเดดไทม์อย่างง่าย สำหรับวงจรแปลงผันไฟสลับ-ไฟตรงแบบเต็มบริดจ์ในระบบไฟฟ้าเฟสเดียวที่มีการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลัง	หัตถุระ สาระจันทร์, พิสิษฐ์ ลีวณกุล , นกมล วิวัชรโกเศศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
38.	217	การวิเคราะห์และออกแบบ วงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟตรงชนิดทอนแรงดัน แบบสวิตซ์ซิงที่มีการกระตุ้นด้วยตัวเอง สำหรับขับโหลดแอลอด	กัญญา โปธิรักษ์, พิสิษฐ์ ลี วนกุล , นกมล วิวัชรโกเศศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
39.	220	การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแรงบิดออกตัวต่ำสำหรับกักหน้ลมความเร็วลมต่ำ	เดชา ปานประเสริฐ , วรารห์ สาตะระ, สาธิต โอวาทชัยพงค์ , บัลลังก์ เนียมมณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
40.	222	การควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเหลือกระแสและแก้ไขค่าตัวประกอบกำลัง	พงษ์ศิริ มุ่งพร, บุรินทร์ ยอดวงศ์ , สุวจัน ลิกบุตร, อมร บุญเส็ง, ทรงกลด ศรีปรางค์ , วัฒนา แก้วมณี, ปฏิพัทธ์ ทวนทอง , วิบูลย์ ชื่นแขก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
41.	226	ศึกษาตัวควบคุมการทำงานสำหรับซิงโครนสมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร	สุวจัน ลิกบุตร, พงษ์ศิริ มุ่งพร , บุรินทร์ ยอดวงศ์ ,อมร บุญเส็ง, ณชิมิน พูนน้อย , วัฒนา แก้วมณี ,ทรงกลด ศรีปรางค์, ปฏิพัทธ์ ทวนทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
42.	228	ตัวชดเชยตัวควบคุมไม่เชิงเส้นสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร	บุรินทร์ ยอดวงศ์, วัฒนา แก้วมณี, สุวจัน ลิกบุตร ,พงษ์ศิริ มุ่งพร, อมร บุญเส็ง, ณชิมิน พูนน้อย, ทรงกลด ศรีปรางค์, ปฏิพัทธ์ ทวนทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
43.	229	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการติดตามจุดกำลังสูงสุดไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีที่เหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาคภายใต้สมการขอบเขตแบบใหม่	คชพงศ์ สุมานนท์, พิสิษฐ์ สุวรรณิงคาร, พิสิษฐ์ ลีวณกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
44.	235	การควบคุมในโหมดกระแสเฉลี่ยของวงจรแปลงผันไฟสลับ -ไฟตรงบูสต์สำหรับการปรับปรุงค่าตัว ประกอบกำลัง ไฟฟ้า	ณัฐวุฒิ บุญตา, วชรพร สุขสมกิจ, พิสิษฐ์ ลีวณกุล ,นกมล วิวัชรโกเศศ

			มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
45.	236	การออกแบบหม้อแปลงพาวเวอร์ชนิดหลายขดลวดสำหรับวงจรพวซ-พูลคอนเวอร์เตอร์	ไพโรจน์ แสงอำไพ, กุศุมาลัย เฉลิมยานนท์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
SS			
1.	117	<i>A Nanopower Self-Compensated Lowpass Filter in 0.35 μm CMOS Using Current-Reuse Biquads</i>	Chutham Sawigun, Surachoke Thanapithak Mahidol University
2.	118	วงจรรองความถี่ต่ำผ่านสำหรับประมวลผลสัญญาณไอซีจีที, ไฟเลี้ยง 1 V, 3.36 nW และ $FoM = 0.13 \text{ fJ}$	สุรโชค ธนพิทักษ์, กฤษณ์ อ่างแก้ว, ชูธรรม สาวิกันย์ มหาวิทยาลัยมหิดล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สถาบันนวัตกรรมมหานครมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
3.	123	<i>Design and Implementation of Logarithmic and Anti-logarithmic ADCs</i>	S. Sirimasakul, Y. Sundarasaradula , A. Thanachayanont King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
4.	181	<i>RF wake-up circuit and system design for low power wireless network</i>	Sitt Tontisirin, Sitthipong Wongnamkum, Sahakoon Panyai Silicon Craft Technology Co.Ltd., Thailand
5.	197	วงจรรากที่สองรูปแบบกระแสโดยใช้หลักการซิมอสทรานซิสเตอร์	ณัฐพงศ์ วงศ์พร้อมมูล, ปรีชา ทองดิษฐ์, มนตรี ศิริปรัชญานันท์, พิพัฒน์ พรหมมี ⁴ มหาวิทยาลัยศิลปากร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
6.	212	วงจรรองแถบความถี่ผ่านอันดับสูงโดยใช้หลัก การของซิมอสไบควอด	ณัฐพงศ์ วงศ์พร้อมมูล, ศุภวัฒน์ ลาวัฒน์ วิสุทธิ์, ณรงค์ศักดิ์ มโนสิทธิชัย, พิพัฒน์ พรหมมี มหาวิทยาลัยศิลปากร มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
PH			
1.	114	การจำลองระบบสื่อสารเชิงแสงด้วยเทคนิค SSFM บนโปรแกรม Matlab Simulink	สิทธิกร ไตรยสุทธิ, อธิคม ฤกษ์บุตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

2.	130	<i>Implementation of VPPM for Visible Light Communication systems using FPGA</i>	<i>Prakran Thongbai, Phornphrom Soinak, Kidsanapong Puntsri Rajamangala University of Technology Isan khonkaen campus</i>
3.	141	<i>Pilot-Based OFDM Frame Synchronization for Underwater Optical Wireless Communication Systems via Barker Code</i>	<i>Phornphrom Soinak, Piyamaporn Tasao, Kidsanapong Puntsri, Ekapong Khongsombu Rajamangala University of Technology Isan, Khonkhaen Campus</i>
4.	233	การศึกษาเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตคัปเปิลอร์เส้นใยนำแสงชนิดเอฟบีที	ธีรวัฒน์ อุปลา, กนต์พงศ์ สุวรรณศักดิ์, สมมาตร แสงเงิน, อธิคม ฤกษ์บุตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
PW			
1.	007	การวิเคราะห์การกระจายของสนามไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า และพลังงานของกัปเปิลอร์ที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าแรงสูง	กวิศรา ไพศาลนนท์, ธนา เทียมเกรียงไกร, ณัฐพงศ์ ตัณฑนุช มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
2.	015	ระบบควบคุมใบมิตในสภาวะไฟดับโดยใช้รีเลย์ระยะทางเพื่อออกแบบระบบป้องกันโหลดสำคัญ	ณฤพงค์ ทิมสมบูรณ์, เชิดพงษ์ ดิเลิศไพบุลย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
3.	017	การออกแบบระบบกริดต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีความต้านทานจำเพาะของดินสูง	ภัควัฒน์ แสงเพ็ง, ศิริชัย วัฒนาศภณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
4.	024	การเปรียบเทียบวิธีการประมาณสถานะหนทางสำหรับการประมาณสถานะประมาณสถานะระบบไฟฟ้ากำลัง	เชวศักดิ์ รักเป็นไทย, เสริมศักดิ์ เอื้อตรงจิตต์, จงลักษณ์ พาหะชา มหาวิทยาลัยพะเยา, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
5.	033	สูตรการคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิดมอเตอร์เหนี่ยวนำของคอสที่แม่นยำ	พิชัย อารีย์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
6.	048	<i>Design and Construction of 10/350 μs, 500 A Impulse Current Generator</i>	<i>Kraisee Luecha, Komson Petcharaks Chulalongkorn University</i>
7.	052	เทคนิคการหาขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส	เสริมศักดิ์ ก.ศรีสุวรรณ, พิชัย อารีย์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
8.	055	การประมาณข้อมูลฐานพลังงานอ้างอิงที่นำเชื่อถือสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมในช่วงขยายขนาดกำลังการผลิตโดยวิธีการถดถอยของกระบวนการเกาส์เซียน	โตมร สุทรนภา มหาวิทยาลัยสยาม

9.	056	การประมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของเครื่องปรับอากาศในอาคารที่พักอาศัยในเขตกรุงเทพมหานคร	ธนโชติ จิรวัลลภ, ธนภัทร พรพงษ์รุ่งเรือง, ศุจินันท์ ชื่นชม, จักราวุธ เดชวิเศษ, ณิชัฐพงศ์ ตัณฑนุช มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
10.	059	การวางแผนส่งการถ่ายเทโหลดของระบบจำหน่าย 22 kV โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม	ณิชัฐชาติ คำขันตี, วิชัย ผดุงศิลป์, ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.	062	การนำพลังงานจากรถยนต์ไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้กับที่พักอาศัย	ชวิน หฤพรพงษ์, รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
12.	064	การจัดสรรหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวร่วมกับอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นที่เหมาะสมสำหรับการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	ศตวรรษ บูรณา, ปณดี ธารารักษ์, พีรพล จิราพงศ์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
13.	089	การวิเคราะห์การกระจายสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าบนลูกถ้วยฉนวนแยกสายในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศไทย	ชัยรัตน์ วลัยธรรมเจริญ, พิสุทธิณี ภูเขา, ณิชัฐพงศ์ ตัณฑนุช มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
14.	099	การวิเคราะห์สมรรถนะทางไฟฟ้าและฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโหลดพลูออเรสเซนต์ด้วยโหลดแอลอีดี(LED) เพื่อการประหยัดพลังงานไฟฟ้า	คณิศร บุญรัตน์, กัญญาภัค ศรีสุข มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยวิทยาเขตตรัง
15.	109	ขนาดอนุภาคของสารตัวเติมอินทรีย์ที่ได้จากเปลือกหอยเชอร์รี่ต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนยางซิลิโคน	ศุจิรัตน์ เทพศิลา, อำนาจ สุขศรี มหาวิทยาลัยขอนแก่น
16.	110	การรักษาแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์โหลดคอนโทรลเลอร์ถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าและบีคอนเวอร์เตอร์ปรับอัตราการผลิตประจุของแบตเตอรี่	ธนพงศ์ ประทีปพรกุล, ไพรินทร์ เพงโพธิ์, พิชัย อารีย์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
17.	126	ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนของก๊าซผสมระหว่างก๊าซ SF ₆ และก๊าซ N ₂	จาตุรนต์ สิ้นสุคนาการ, นรเศรษฐ์ พัฒนเดช สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
18.	131	การลดแรงบิดสั่นสะเทือนในแกนเพลลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยการหน่วงเวลาจ่ายแรงดัน	นิธิชัย แก้วขำ, พิชัย อารีย์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
19.	138	การศึกษาออกแบบระบบเฝ้าระวังและเตือนภัย การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังฉนวนน้ำมันและแสดงผลผ่านทางเว็บไซต์	พินิจ จิตจริง, สิริชัย ประกอบธรรม, อภิสิทธิ์ เมฆะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
20.	140	การตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV : กรณีศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมของบริษัทราชบุรีเพาเวอร์จำกัด	วรัญญา บุญเพ็ญ, ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล, พินิจ จิตจริง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
21.	145	การสร้างแบบจำลองเครื่องกักเก็บแก๊สสำหรับใช้ศึกษาในระบบไฟฟ้ากำลัง	กรสิทธิ์ สิ้นสมบุรณ์, ศิวพล ศรีสนพจน์, คมสันต์ หงส์สมบัติ, บุศรา พิริยะอนนท์

			มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
22.	148	การคำนวณค่าเวลาตัดกระแสวิกฤตโดยใช้ซอฟต์แวร์ <i>DlgSILENT PowerFactory</i>	คมสันต์ หงษ์สมบัติ, เนาวรัตน์ เทพศิริรักษ์, วีรุฒิ กนกบรรณกร, ศิวพล ศรีสนพันธ์, นิธิพัฒน์ ทิรฆวนิช มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
23.	169	ผลของการปล่อยไอโซนแบบฟองนาโนแนวตั้งที่สร้าง จากเครื่องกำเนิดไอโซนด้วยหลักการโคโรนาดีสชาร์จ ต่อการบำบัดน้ำผิวดิน	เอกวิน บุญรอด, สุธี ลีจิ่งเพิ่มพูน, ณัฐกร ปรีชาจารย์, ปานเทพ ชาวลุ่มบัว, นัฐวุฒิ แห่งหอม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี
24.	171	ผลของการปล่อยไอโซนแบบฟองนาโนแนวนอนที่สร้าง จากเครื่องกำเนิดไอโซนด้วยหลักการโคโรนาดีสชาร์จ ต่อการบำบัดน้ำผิวดิน	กิตติพันธ์ สายทอง, สุธี ลีจิ่งเพิ่มพูน, เทวินทร์ ปิ่นวิไล, วีรภัทร แก้วสละบัว, ภูมิพัฒน์ โทจันทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี
25.	173	การเปรียบเทียบลักษณะสนามไฟฟ้ากระแสสลับแบบ สม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอปานกลางต่อการลด ความชื้นมะคาเดเมียทั้งกะลา	สิทธิชัย แก้วมีศรี, ฉัตรชัย เกตุหิรัญ, ชิตชนก มากจันทร์, สุธี ลีจิ่งเพิ่มพูน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี
26.	188	การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรเชิงเส้น 1 ตัวแปร 2 ตัวอยู่กับที่แบบโครงสร้างแกนอี	วันชัย นิมนวี มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
27.	189	ต้นแบบการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายอาศัยการควบคุม แม่เหล็กที่สภาวะความถี่เรโซแนนซ์ 35 kHz	ยุทธนา จงเจริญ, อรรถภูธ เย็นฉ่ำ, อาทิตย์ เฉลิมเกียรติคุณกุล มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
28.	193	การศึกษาและทดสอบผลกระทบการเกิดฟ้าผ่าบนเสา ไฟฟ้าคอนกรีตพิกัด 22 kV	อนุสรณ์ จวงงาม, วนิดา รุ่งแจ้ง, พินิจ จิตจริง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
29.	218	การประเมินสภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด เครื่องยนต์ดีเซล	ณัฐวุฒิ ภิรมย์เมือง, แคทริยา สุวรรณศรี, ธนพงศ์ สุวรรณศรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระ นครเหนือ
30.	231	การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์สำหรับการ วางแผนก่อสร้างสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย	อรุณ ชลิ่งสุทธิ, ศุภาวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว, นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ, อรรถ พะยอมหอม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
31.	240	สมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้แรงดันขาด หายไปหนึ่งเฟสกรณีต่อและไม่ต่อสายนิรล	พิชัย อารีย์, นิธิชัย แก้วขำ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
32.	246	<i>A Co-optimization Model of Natural Gas Supply and Electric Power Systems</i>	<i>Worawat Nakawiro King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang</i>

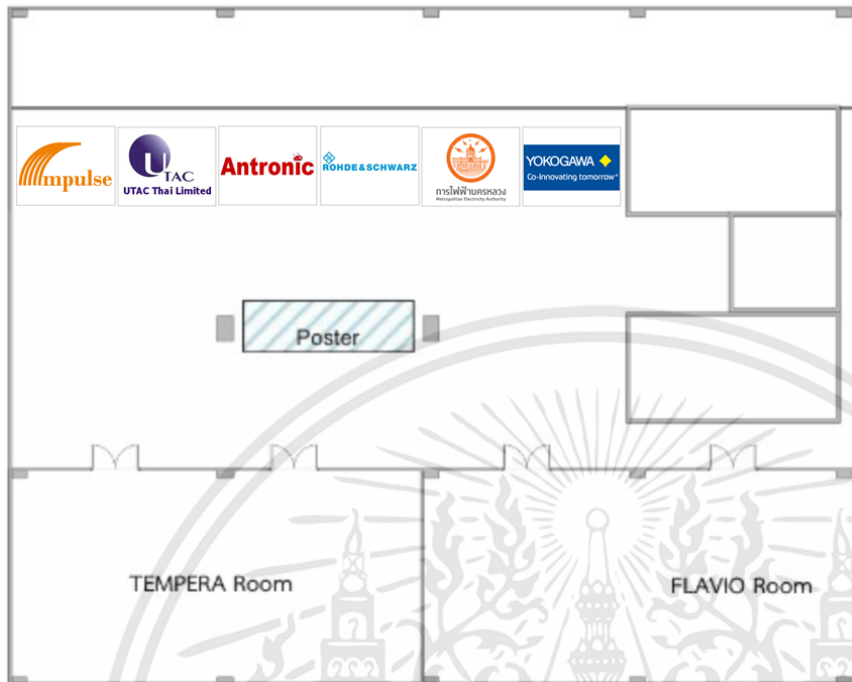
ขอขอบพระคุณผู้สนับสนุนการจัดประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 40 (EECON 40)

1. บริษัท สตาบิล จำกัด (สำนักงานใหญ่)
เลขที่ 77 อาคารสตาบิล ตรอกนอกเขต ถนนนนทบุรี แขวงช่องนนทรี เขตยานนาวา กรุงเทพมหานคร 10120
2. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.)
200 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900
3. บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) สำนักงานใหญ่
เลขที่ 1 ถนนปูนซิเมนต์ไทย บางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800
4. บริษัท ยูนิเพาเวอร์ เอ็นยีเนียริง จำกัด
เลขที่ 12 ถนนเทศบาลนิมิตรใต้ แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900
5. บริษัท ทริกลู ซายเอนซ์ จำกัด
เลขที่ 694 ซอยรัชดาภิเษก 24 ถนนประชาราษฎร์บำเพ็ญ แขวงสามเสนนอก เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร 10310
6. บริษัท ไทร์เนอร์ อี อินสทรูเมนต์ จำกัด (สำนักงานใหญ่)
333 ซอยประชาสันติ (ซอยรัชดาภิเษก 10) ถนนรัชดาภิเษก แขวงห้วยขวาง เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร 10310
7. บริษัท แควนเทล จำกัด
2170 อาคารบางกอกทาวเวอร์ ชั้น 5 ถนนเพชรบุรีตัดใหม่ แขวงบางกะปิ เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร 10310
8. บริษัท ไฟฟ้าอุตสาหกรรม จำกัด
85/2, 85/3 ซอยสดพินสรอง ถนนรางน้ำ แขวงถนนพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400
9. บริษัท โยโกกาวา (ประเทศไทย) จำกัด
799 ถนนพระราม 9 แขวงบางกะปิ เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร 10310
10. บริษัท อิมพัลส์ อินทิเกรท เทคโนโลยี จำกัด
71/637 หมู่บ้านพฤกษา 18/1 หมู่ที่ 4 ตำบลบางแม่นาง อำเภอบางใหญ่ จังหวัดนนทบุรี
11. บริษัท ไลท์ติ้งแอนด์อีควิปเมนต์ จำกัด (มหาชน)
539/2 ชั้น 16, 17 อาคารมหานครยิบซัม ถนนพญาไท แขวงพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร

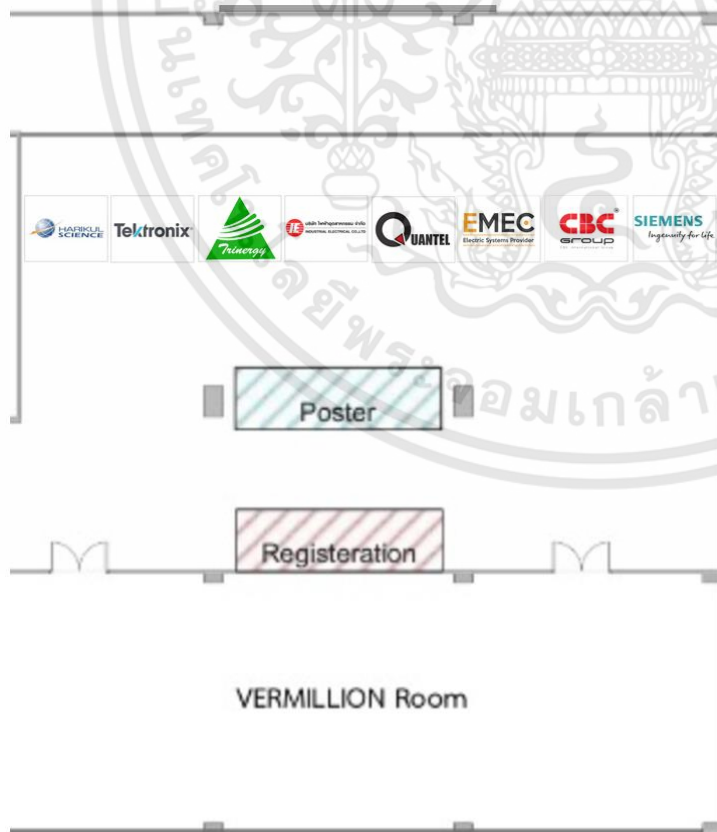
- 10400
12. บริษัท *UTAC Thai Limited*
237 ซอยลาซาล สุขุมวิท 105 ถนนลาซาล แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร
13. บริษัท อีเมค จำกัด
9/29 หมู่ที่ 1 ถนนพุทธมณฑลสาย 5 ตำบลบางกระพี้ อำเภอสสามพราน จังหวัดนครปฐม 73210
14. บริษัท ทีทีซีแอล จำกัด (มหาชน) (สำนักงานใหญ่)
159/41/44 อาคารเสริมมิตรทาวเวอร์ ชั้น 27-30 ซ.สุขุมวิท 21 (อโศก) แขวงคลองเตยเหนือ
เขตวัฒนา กรุงเทพมหานคร 10100
15. การไฟฟ้านครหลวง
30 ซอยชิดลม ถนนเพลินจิต แขวงลุมพินี เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
16. บริษัท. *CBC INTERNATIONAL GROUP*
ซอย พระยาสุเรนทร์ 45 แขวง สามวาตะวันตก เขต คลองสามวา กรุงเทพมหานคร 10510
17. บริษัท *Rhode & Schwarz*
89 AIA Capital Center unit 905-906 ชั้น 9 ถนน รัชดาภิเษก ดินแดง กรุงเทพมหานคร 10140
18. บริษัท *ABB Limited*
322 Moo 4, Bangpoo, Industrial Estate, Soi 6 Praeksa, Muang, Samutprakarn 10280
19. บริษัท ซีเมนส์ จำกัด
2322/333 อาคารชาญอิสสระ ทาวเวอร์ 2 ถนนเพชรบุรีตัดใหม่ ห้วยขวาง บางกะปิ
กรุงเทพมหานคร 10310
20. บริษัท ซีพีที โดร์ แอนด์ เพาเวอร์ จำกัด (มหาชน)
230/7 ถนนเทศบาลรังรักษ์เหนือ แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร
21. บริษัท แอนทรอนิกส์ จำกัด (สำนักงานใหญ่)
เดอะทรีอเวนิว ห้อง (216) 99/99-2 ม.7 ต.บางคูวัด อ.เมืองปทุมธานี จ.ปทุมธานี 12000
22. บริษัท อิทธิไทย จำกัด (มหาชน)
516/1 หมู่ 4 นิคมอุตสาหกรรมบางปู ถนนสุขุมวิท ตำบลแพรกษา อำเภอมือง จังหวัดสมุทรปราการ 10280
23. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)
เลขที่ 53 หมู่ 2 ถนนจรัญสนิทวงศ์ ตำบลบางกรวย อำเภอบางกรวย นนทบุรี ประเทศไทย 11130

แผนที่จัดแสดงสินค้าจากบริษัทชั้นนำทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า

Left Plan



Right Plan





การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๐ The 40th Electrical Engineering Conference (EECON-40)

วันที่ ๑๔-๑๗ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๖๐

โรงแรม เดอะ ซายน์ (The Zign Hotel) อ.บางละมุง จ.ชลบุรี
555/65 Moo 5, 12 Naklua Rd., Banglamung, Chonburi, 20150, Thailand



Industrial Tutorial Session

OMICRON Transformer Tutorial - Thailand 2017

Wednesday 15th November 2017

The Zign Hotel, Pattaya, Thailand

Registration : 8.00 - 9.00 h

Moderator: Assoc. Prof. Dr-Ing. Thanapong Suwanasri

The Sirindhorn International Thai-German Graduate School of Engineering
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

OMICRON



Mr. Wenyu Guo, Omicron Australia

Speakers: Mr. Seokhon Hong, Omicron Hong Kong

Mr. Noble Ji, Omicron Hong Kong

Session 1 : 9.00 - 10.00 h

Conventional diagnostic on high voltage power transformers

Coverage:

- Three phase test for winding resistant, turn ratio, vector groups
- Short circuit impedance, frequency of stray losses
- Inrush current and transformer demagnetization
- On load tap-changer test (OLTC) and dynamic resistant measurement (DRM)
- Power factor test

Session 3 : 11.15 - 12.15 h

Efficient transformer testing

Coverage:

- Guided Workflow
- Data Management on both conventional and non-conventional diagnostic
- Increase the testing efficiency of the transformer testing

Session 2 : 10.15 - 11.15 h

Non-conventional diagnostic on high voltage power transformers

Coverage:

- Sweep Frequency Response Analysis (SFRA)
- Dielectric analysis of high voltage power transformers

Session 4 : 13.15 - 16.15 h

Partial discharge measurement diagnostic and monitoring on power transformer

Coverage:

- Essentials of Partial Discharge (PD) test
- Partial Discharge test according to IEC 60270
- Partial Discharge with High Frequency Current Transformer (HFCT)
- Partial Discharge at Ultra High Frequency (UHF) range
- Partial Discharge localization with acoustic method
- Monitoring on the PD of power transformer and condition-based maintenance

Q & A : 16.15 - 17.00 h

Sponsored by:

UNIPOWER ENGINEERING CO.,LTD. 12 Thetsabannimitai Rd., Ladyao, Chatuchak, Bangkok 10900

บริษัท ยูนิเพาเวอร์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด, 12 เทศบาลนิมิตรใต้ แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กทม. 10900



ขอสงวนลิขสิทธิ์ในเอกสารนี้ไว้เป็นของตนเองเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

The 40th Electrical Engineering Conference (EECON - 40)

Cordially Supported by

SIEMENS
Ingenuity for life



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING FAHD UNIVERSITY OF PETROLEUM & TECHNOLOGY

ABB

EMEC

EMEC Sports Provider

Gulf

การศึกษาพฤติกรรมการลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรชนิด Nd-Fe-B เนื่องจากผลของความร้อน

A Study of Demagnetization Behavior of Nd-Fe-B Permanent Magnet due to Thermal Effect

ชาญปรกรณ์ ณ นิโรจน์, พชร กลิ่นวิจิต, เปี่ยมภูมิ สฤตพฤกษ์ และพิชิต ล้ายอง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง 59601160@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

แม่เหล็กถาวรนิยมถูกนำมาใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้า อย่างไรก็ตามแม่เหล็กถาวรจะเสื่อมสภาพความเป็นแม่เหล็กเนื่องจากผลของความร้อนอันจะทำให้สมรรถนะและประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าลดลง งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการศึกษาพฤติกรรมการลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร NdFeB ชนิด 38UH จากผลของความร้อน การศึกษาได้จำลองการเกิดความร้อนด้วยวิธีการอบร้อน ณ อุณหภูมิต่าง ๆ โดยพิจารณาจากอุณหภูมิใช้งานสูงสุดของแม่เหล็กถาวร จากนั้นนำมาวัดสภาพความเป็นแม่เหล็กด้วยวงจรมแม่เหล็กที่สามารถปรับช่องว่างอากาศได้ ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของแม่เหล็กสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส แนวโน้มการลดความเป็นแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิใช้งานที่เพิ่มสูงขึ้น และการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กทั้งหมดจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ : แม่เหล็กถาวร นีโอดีเมียมไอออนโบรอน การลดความเป็นแม่เหล็ก วงจรมแม่เหล็กที่สามารถปรับช่องว่างอากาศ

Abstract

Permanent Magnets (PMs) have been widely used in electrical machines for improving their efficiency. However, the demagnetization of PMs can occur due to thermal impact leading to the decreasing of electrical machine performance and efficiency. Therefore, this paper presents a study of demagnetization behavior of 38UH Nd-Fe-B PM due to the thermal effect. This PM is heated using the thermal oven in various temperatures considering its maximum operating temperature. Then, the magnetic flux density of heated PM is measured with an adjustable air gap magnetic circuit. The results of this study show that the demagnetization of heated PM initially occurs at 100 °C. In addition, when the PM is heated at higher temperature, its demagnetization increases. Heating PM at 340 °C results in the complete demagnetization of this PM.

Keywords : Permanent magnet, NdFeB, Demagnetization, Movable air-gap magnetic circuit.

1. บทนำ

แม่เหล็กถาวรเป็นองค์ประกอบสำคัญอย่างหนึ่งของเครื่องจักรกลไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยแม่เหล็กถาวรจะถูกนำมาใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กแทนขดลวดกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ทำให้ลดการสูญเสียที่เกิดจากขดลวดนี้ อย่างไรก็ตามแม่เหล็กถาวรยังมีข้อเสียในการใช้งาน กล่าวคือเมื่อมีการใช้งานเครื่องจักรกลไฟฟ้าอุณหภูมิของเครื่องจักรจะเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อแม่เหล็กถาวรได้รับความร้อนจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิใช้งานของแม่เหล็ก จะส่งผลให้เกิดการลดความเป็นแม่เหล็ก (Demagnetization) อันจะส่งผลให้ประสิทธิภาพและสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะลดลงตามด้วย[1]

โดยทั่วไปแล้ว แม่เหล็กถาวรที่ได้รับความนิยมและความสนใจอย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรมและงานวิจัยต่าง ๆ เป็นแม่เหล็กถาวรที่มีองค์ประกอบเป็นธาตุแรร์เอิร์ท ซึ่งประกอบด้วย นีโอดีเมียม (Nd) ไอออน (Fe) และ โบรอน (B) ในงานวิจัย[2-4] ได้มีการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรที่มีกรรมวิธีการผลิตและองค์ประกอบที่แตกต่างกันซึ่งทำให้เห็นได้ว่า แม่เหล็กถาวร NdFeB ชนิด 38UH ผ่านกระบวนการในการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนก่อนนำไปกระตุ้นให้เกิดเป็นแม่เหล็กถาวร (Sintered) ผลของการขึ้นรูปด้วยวิธีการนี้จะส่งผลทำให้แม่เหล็กที่ผ่านกระตุ้นแล้วมีความเป็นแม่เหล็กหลงเหลืออยู่มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดและชนิดขององค์ประกอบของแม่เหล็กที่มีสัดส่วนเช่นเดียวกัน จากที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้เลือกแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH มาเป็นตัวอย่างสำหรับการศึกษาพฤติกรรมของการลดความเป็นแม่เหล็กที่เป็นผลจากความร้อนในการใช้งาน โดยทำการทดสอบกับวงจรมแม่เหล็กที่ทำการปรับช่องว่างอากาศได้เพื่อยืนยันผลการทดสอบ

2. ทฤษฎี

2.1 สารแม่เหล็กและวงจรมแม่เหล็ก

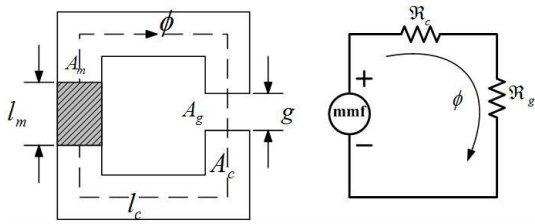
ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density; B) กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity; H) ของสารแม่เหล็กเป็นไปตามสมการที่ (1)

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (1)$$

โดยที่ B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Wb/m^2 หรือ T), μ_0 คือ Permeability of free space ซึ่งมีค่าเป็น $4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/At.m}$, μ_r คือ ความซึมซาบสัมพัทธ์ และ H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (At/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษานี้วงจรแม่เหล็กที่ใช้ในการวัดค่าความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรนั้นเป็น วงจรแม่เหล็กแบบอนุกรม ตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 (ซ้าย) วงจรแม่เหล็กแบบอนุกรม (ขวา) วงจรสมมูลของวงจรแม่เหล็กแบบอนุกรม

จากรูปที่ 1 (ขวา) เห็นได้ว่า เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) ของวงจรแม่เหล็กตลอดทั้งวงจรมีค่าเท่ากัน ϕ ของวงจรมันจะเป็นความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก(mmf) และค่าความต้านทานแม่เหล็กของวงจรแม่เหล็ก ดังสมการที่ (3)

$$(mmf)_m = (\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g) \times \phi \quad (3)$$

โดยที่ $(mmf)_m$ คือแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแม่เหล็กถาวร (Ampere-turn), \mathcal{R}_c และ \mathcal{R}_g คือค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็กและช่องว่างอากาศ ตามลำดับ (A.t/Wb), ϕ คือเส้นแรงแม่เหล็กของวงจรแม่เหล็ก (Wb)

\mathcal{R}_c และ \mathcal{R}_g สามารถหาได้จากสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$\mathcal{R}_c = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_c}, \mathcal{R}_g = \frac{g}{\mu_0 A_g} \quad (4), (5)$$

เมื่อ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (m^2), A_g คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศ (m^2), l_c คือ ความยาวของแกนเหล็กที่ใช้ในวงจรแม่เหล็ก (m), g คือ ระยะของความกว้างช่องว่างอากาศ (m)

จากสมการที่ (4) ในงานการศึกษานี้ วัสดุแม่เหล็กสำหรับแกนเหล็กคือ Iron(0.2 impurity) ที่มีค่า μ_r ประมาณ 6000 ส่งผลให้ค่า \mathcal{R}_c ในวงจรแม่เหล็กมีค่าน้อยกว่า \mathcal{R}_g มาก ๆ ทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรจึงไปเกิดขึ้นที่ช่องว่างอากาศเพียงอย่างเดียว

เมื่อพิจารณา ϕ ของวงจรแม่เหล็กแบบอนุกรมที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับพื้นที่หน้าตัด อีกทั้งผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กภายในวงจรมีค่าเป็น 0 ดังสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ

$$\phi = B_m A_m = B_g A_g \quad (6)$$

$$H_m l_m + H_g l_g + H_c l_c = 0 \quad (7)$$

โดยที่ B_g คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ(T)

B_m คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร (T)

H_g คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กของอากาศ (A.t/m)

H_m คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร (A.t/m)

A_m คือ พื้นที่หน้าตัดของแม่เหล็กถาวร (m^2),

l_m คือ ความหนาของแม่เหล็กถาวร (m)

จากสมการที่ (6) และ (7) สามารถจัดรูปสมการของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศในที่ไม่คิดผลของแกนเหล็กได้ดังสมการที่ (8)

$$B_g = \mu_0 \times \frac{A_m}{A_g} \times \frac{l_m}{g} \times H_m \quad (8)$$

2.2 การลดความเป็นแม่เหล็ก

การให้ความร้อนกับแม่เหล็กจะทำให้ไอเล็กตรอนที่อยู่ภายในเกิดการหมุนและย้ายไปอยู่ในชั้นพลังงานที่อยู่สูงขึ้นไป ซึ่งทำให้ไอเล็กตรอนหยุดตรงตำแหน่งที่ขัดกันกับไอเล็กตรอนใกล้เคียง จากเหตุการณ์นี้ทำให้การเรียงตัวของไอเล็กตรอนเปลี่ยนไป ดังนั้น ความเป็นแม่เหล็กของวัสดุทั้งหมดจะลดลง จนในที่สุดวัสดุนั้นก็จะสูญเสียความเป็นแม่เหล็ก โดยอุณหภูมิที่ทำให้ความเป็นแม่เหล็กสูญหายไป นั้นเรียกว่า Curie Temperature โดย Curie temperature ของสารแม่เหล็กต่าง ๆ มีค่าดังตารางที่ 1 [5]

ตารางที่ 1 Curie temperature ของสารแม่เหล็กต่าง ๆ

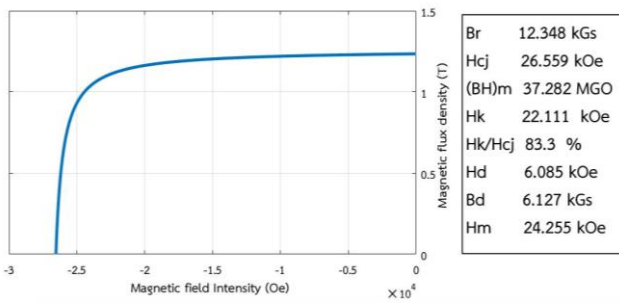
Material	Curie Temperature (°C)	Material	Curie Temperature (°C)
Gadolinium	16	Iron	771
Nd ₂ Fe ₁₂ B	312	Alnico 1	780
Nickel	358	Cunico	855
BaO 6Fe ₂ O ₃	469	Alnico 5	900
Co ₂ Sm	747	Cobalt	1117

3. การออกแบบการทดลอง

ในการศึกษานี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การทดลองการเกิดการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน และการทดสอบวงจรแม่เหล็กที่ใช้ในการวัดค่าความเป็นแม่เหล็กที่หลงเหลือ โดยที่แม่เหล็กถาวรที่ใช้ในการทดลองเป็นแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH ที่มีค่า ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (Remanence Flux density: B_r) ตั้งต้นอยู่ที่ 1.23 T อุณหภูมิใช้งานสูงสุดอยู่ที่ 180 °C ขนาดของแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 24x20x7 มม. ดังรูปที่ 2 และมีคุณสมบัติความเข้มสนามของ B-H เป็นดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 แม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH

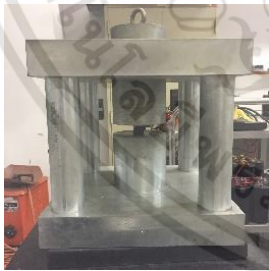


รูปที่ 3 ลักษณะความสัมพันธ์ของ B-H ของแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH

3.1 การทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน

ก่อนเริ่มทำการทดลองจำเป็นต้องปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องอบให้ได้ตามที่ต้องการ หลังจากทำการปรับตั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการอบร้อนแล้วปล่อยให้อุณหภูมิภายในเครื่องอบมีค่าใกล้เคียงกันและคงที่โดยใช้เวลาประมาณ 10-15 นาทีในขั้นตอนนี้ โดยที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบเริ่มตั้งแต่ 100 ถึง 340 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พิจารณาจากอุณหภูมิสูงสุดในการใช้งานของแม่เหล็กที่กล่าวมาข้างต้น

ในการทดลองจะทำการเก็บค่าความเป็นแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่ทุก ๆ 15 นาที โดยใช้เครื่องวัดเกาส์ (Gauss Meter) ซึ่งมีแม่เหล็กถาวรในวงจรแม่เหล็กที่สามารถปรับช่องว่างอากาศได้ ที่ช่องว่างอากาศคงที่ที่มีความกว้าง 4 มม. ดังรูปที่ 4 จนกระทั่งความเป็นแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่มีค่าคงที่ สำหรับการวัดความเป็นแม่เหล็กโดยเครื่องวัดเกาส์จะต้องทำการปรับตั้งค่าเพื่อให้ได้ค่าการวัดที่ถูกต้องแม่นยำ โดยทำการสอบเทียบสองจุด คือการปรับตั้งค่าศูนย์ดังรูปที่ 5 (ซ้าย) และการสอบเทียบด้วยแม่เหล็กมาตรฐาน 1000 G ดังรูปที่ 5 (ขวา)



รูปที่ 4 วงจรแม่เหล็กที่ใช้แกนเหล็กแบบปรับความกว้างของช่องว่างอากาศได้



รูปที่ 5 (ซ้าย) การปรับตั้งศูนย์ (ขวา) การสอบเทียบแม่เหล็กมาตรฐาน 1000G

3.2 การทดสอบวงจรแม่เหล็กที่นำมาใช้ในการทดสอบ

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบว่า วงจรแม่เหล็กที่ปรับช่องว่างอากาศนำมาใช้นี้มีความเหมาะสมในการนำมาใช้งาน โดยจะทำการปรับช่องว่างอากาศกับแม่เหล็กทดสอบที่มีความเป็นแม่เหล็กหลงเหลือที่ค่าต่าง ๆ ตั้งแต่ 2 ถึง 12 มม. โดยพิจารณาจากแนวโน้มของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้

4. การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อน

4.1.1 การปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องอบร้อน

ในการทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อนจำเป็นต้องมีการปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องอบร้อนที่ควบคุมความร้อนด้วยระบบ PI เพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยสอบเทียบกับ Fluke 65 Infrared Thermometer เป็นเครื่องวัดมาตรฐาน อุณหภูมิของเครื่องอบร้อนจะถูกแสดงด้วยหน้าจอแบบดิจิทัล ผลการสอบเทียบอุณหภูมิที่ได้ถูกแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าของอุณหภูมิเครื่องอบร้อนที่ได้จากหน้าจอดิจิทัลและเครื่องวัดอุณหภูมิ

เครื่องอบร้อน	เครื่องวัดอุณหภูมิ	เครื่องอบร้อน	เครื่องวัดอุณหภูมิ
100	101.7	260	260.2
140	140.6	300	299.6
180	179.5	340	341.5
220	220.4		

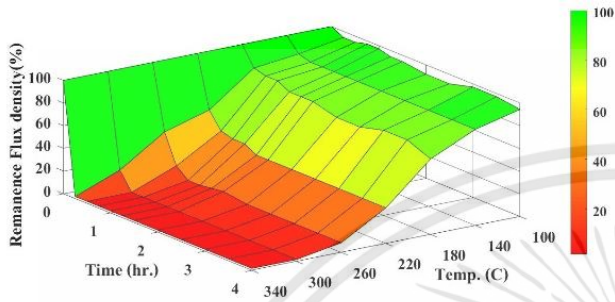
จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของเครื่องอบร้อนมีค่าที่แตกต่างกันมากที่สุด 1.7 °C และในช่วงเวลาที่เครื่องอบทำงานนั้นอุณหภูมิของเครื่องอบร้อนมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ตั้งไว้เพียงเล็กน้อย ทำให้เครื่องอบร้อนมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการทำการทดลอง

4.1.2 การวัดการลดความเป็นแม่เหล็กจากการทดสอบด้วยเครื่องอบความร้อน

เมื่อเครื่องอบร้อนได้อุณหภูมิคงที่ตามที่ต้องการแล้วจึงนำแม่เหล็กถาวรตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเข้าไปอบแล้วเริ่มทำการจับเวลา โดยที่อุณหภูมิของแม่เหล็กถาวรก่อนทำการทดลองจะอยู่ที่อุณหภูมิห้อง 25 °C ในการเก็บผลของการทดลองนั้นจะนำแม่เหล็กถาวรที่อบร้อนออกมาวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กทุก ๆ 15 นาที จนกระทั่งค่าความหนาแน่นแม่เหล็กที่หลงเหลือมีค่าคงที่เป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 4 ชั่วโมง

จากสมการที่ (6) เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแม่เหล็กและช่องว่างอากาศมีค่าเท่ากันและเส้นแรงแม่เหล็กภายในวงจรแม่เหล็กมีค่าเท่ากันตลอดทั้งวงจรแม่เหล็ก ทำให้ในการทดลองนี้สามารถวัดผลของความหนาแน่น

เส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลือของแม่เหล็กถาวรได้จาการวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ นำผลการทดลองที่ได้พล็อตกราฟ 3 แกน โดยที่ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่ในแกน Z ซึ่งมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตั้งต้น ณ ชั่วโมงที่ 0 อยู่ที่ 100% อุณหภูมิที่ใช้ในการอบร้อนอยู่ในแกน X และระยะเวลาของการอบร้อนอยู่ในแกน Y ดังรูปที่ 6

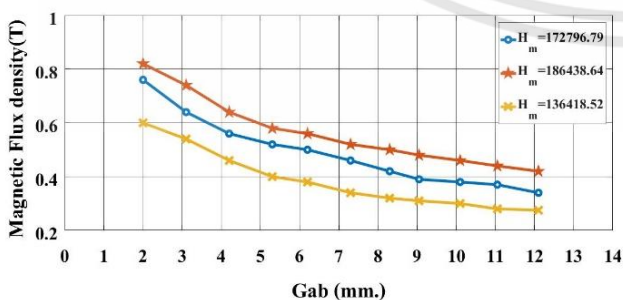


รูปที่ 6 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

จากรูปที่ 6 เห็นได้ว่าปริมาณของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลือ เมื่อถูกอบด้วยความร้อน ณ อุณหภูมิที่มากขึ้นจะมีค่าลดลงมากขึ้น และ เมื่อใช้เวลานานในการอบความร้อนมากขึ้น ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กก็จะมีค่าลดลงมากยิ่งขึ้นด้วย โดยจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง โดยที่ค่าของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่สุดท้ายของแต่ละอุณหภูมินั้นมีค่าแตกต่างกันซึ่งจะแปรผกผันกับอุณหภูมิที่ใช้ ที่อุณหภูมิ 100°C ความสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยและการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กทั้งหมดจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 340°C ภายในระยะเวลา 15 นาที

4.2 การทดสอบวงจรแม่เหล็กที่นำมาใช้ในการทดสอบ

จากสมการที่ (8) สำหรับการทดสอบนี้พื้นที่หน้าตัดของแม่เหล็กถาวรและช่องว่างอากาศมีขนาดเท่ากันและขนาดของแม่เหล็กถาวรมีค่าคงที่ ทำให้เหลือเพียงปัจจัยความกว้างของช่องว่างอากาศเท่านั้นที่มีผลต่อความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้ รูปที่ 7 แสดงผลของการวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ระยะความกว้างของช่องว่างอากาศต่าง ๆ ด้วยแม่เหล็กถาวรที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกัน



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะช่องว่างอากาศกับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ

จากรูปที่ 7 เห็นได้ว่าเมื่อความกว้างของช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้มีค่าลดลงค่อนข้างที่จะเป็นเชิงเส้น และเมื่อเปลี่ยนตัวอย่างแม่เหล็กถาวรที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กต่างกัน ค่าของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้ก็ยังคงลดลงเมื่อระยะช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์นี้เป็นไปตามสมการที่ (8) ซึ่งเห็นได้ว่า วงจรแม่เหล็กนี้มีความเหมาะสมที่จะสามารถนำมาใช้ในการวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลือในการทดลองที่ 4.1.2

5. สรุป

จากผลการทดลองการลดความเป็นแม่เหล็กจากผลของความร้อนของแม่เหล็กถาวรชนิด Sintered Nd-Fe-B Grade 38UH ที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการใช้งานแม่เหล็กที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 100°C จะเริ่มมีการสูญเสียเกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิใช้งานสูงขึ้นการลดความเป็นแม่เหล็กก็จะมีมากขึ้น อีกทั้งมี Curie temperature อยู่ที่ 340°C และสำหรับทุก ๆ อุณหภูมิที่มีการลดความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรเมื่อลดถึงค่าๆ หนึ่งจะ ไม่มีการลดความเป็นแม่เหล็กเพิ่มอีกหากยังมีการ ใช้งานในอุณหภูมิเดิม จากผลการศึกษาเบื้องต้นนี้จะเห็นได้ว่า หากเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรมีอุณหภูมิขณะ ใช้งานสูงขึ้นก็จะส่งผลให้แม่เหล็กถาวรมีความเป็นแม่เหล็กลดลงอันจะส่งผลให้ประสิทธิภาพและสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าลดลง การศึกษาผลของวงจรแม่เหล็กแบบปรับความกว้างของช่องว่างอากาศเพื่อศึกษาคุณลักษณะต่าง ๆ ของแม่เหล็กถาวรที่ทดสอบ เช่น Remanence flux density และ การกระตุ้นความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรที่ถูกลดความเป็นแม่เหล็กนี้ สามารถเป็นหัวข้อศึกษาวิจัยที่น่าสนใจต่อไปได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Sebastian, "Temperature effects on torque production and efficiency of PM motors using NdFeB magnets," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, pp. 353-357, 1995.
- [2] M. Taha and D. Greenwood, "PM material selection guide for IPMSM," in 2016 *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016, pp. 1989-1994.
- [3] B. Bochenkov and S. Lutz, "A review of modern materials of permanent magnets," in *Proceedings. The 8th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology*, 2004. *KORUS 2004.*, 2004, pp. 201-203 vol. 1.
- [4] T. K. Gundogdu, G. , "The Impact of the Selection of Permanent Magnets on the Design of Permanent Magnet Machines – a Case Study: Permanent Magnet Synchronous Machine Design with High Efficiency " *Przeegląd Elektrotechniczny*, vol. R. 89, nr 3a, pp. 103-108 2013.
- [5] D. R. Askeland and W. J. Wright, *Science and Engineering of Materials, SI Edition*: Cengage Learning, 2015.

Magnetization of NdFeB Permanent Magnet Considering Demagnetization Effect

Piampoom Sarikprueck
 Department of Electrical Engineering
 Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Bangkok, Thailand
 piampoom.sa@kmitl.ac.th

Charpakorn Na Nirojana
 Department of Electrical Engineering
 Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Bangkok, Thailand
 charn.pa.korn.3@gmail.com

Pichit Lumyong
 Department of Electrical Engineering
 Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Bangkok, Thailand
 pichit.lu@kmitl.ac.th

Chodchanok Attaphong
 Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Research Program of Industrial Waste Management Policies and
 Practices, Center of Excellence on Hazardous Substance
 Management (HSM), Chulalongkorn University
 Bangkok, Thailand
 chodchanok.at@kmitl.ac.th

Abstract— Electrical machine efficiency improvement has been paid more attention over the past years. Using Permanent Magnets (PMs) in various modern electrical machines is one of the most favorable approaches to increase machine efficiency. However, PMs still have a significant disadvantage that is the demagnetization issue. Therefore, these demagnetized PMs need to magnetize for regaining their initial capability considering the demagnetization level. Therefore, first of all, this paper proposes the demagnetization behavior of NdFeB PMs due to thermal effect. Then, these PMs are magnetized using a proposed simple magnetizing technique considering various demagnetization conditions. Finally, the results indicate that the most complete demagnetized PMs are able to significantly recover to their initial capability.

Keywords— Permanent magnet material, NdFeB, Magnetization, Demagnetization

I. INTRODUCTION

Over the past few years, cost of Permanent Magnets (PMs) has been rapidly decreased and the fast development of rare earth material helps improve the performance of PMs. Therefore, the study of PMs has been paid more attention due to their highly uses in various modern electrical machines to effectively increase the machines efficiency.

In the existing literatures, the studies of PMs from cradle to grave have been widely proposed. The manufacturing process of PMs considering the press for PMs fabrication and magnetic field intensity direction is reported in [1]. The comparison of properties and performance for different PMs manufacturing methods and compositions are presented in [2, 3]. In these studies, they are indicated that the NdFeB PM provides high energy density compared to other PM materials. Moreover, the studies in [1, 4, 5] propose various magnetization and demagnetization approaches with Superconducting Solenoid, Pulsed Field Magnetometer. In addition to investigate the PM demagnetization concern, various related parameters such as temperature, pressure, demagnetization direction, and frequency are considered in [6-11]. In particular, the study in

[6] indicates that the performance and efficiency of PM machines are significantly decreased due to the PM demagnetization using in the high temperature condition.

Although these abovementioned papers have been studies various topics of the PMs, there are some important gaps to fill in. This is because the proposed magnetization methods are complicate and the PM magnetization from the demagnetization effect has not been clearly addressed yet. Therefore, this paper presents the effective and simple method for the PM magnetization. In addition and very importantly, the PM magnetization based on the various and comprehensive demagnetization conditions of NdFeB PMs, one of the highest energy density PMs, are proposed in this study.

The rests of this paper are as follows. The related PM theories are briefly introduced in section II. The study of demagnetization for NdFeB PMs is proposed in section III. Section IV, and V presents the proposed simple magnetization method and the testing results. Finally, section VI provides the conclusion of this paper.

II. RELATED PM THEORIES

A. Permanent Magnet Magnetic Circuit

Using a PM in an air-gap magnetic circuit creates the irregular magnetic circuit as shown in Fig. 1. It is a series magnetic circuit between a PM, a magnetic core, and an air-gap. Considering high magnetic core reluctance, the PM magneto motive force (mmf_m) can be simply calculated as (1).

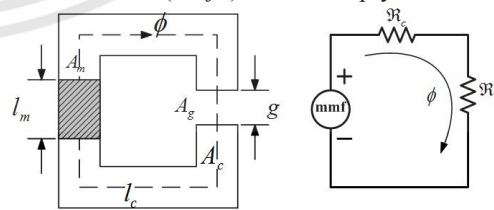


Fig 1. Permanent magnet magnetic circuit

$$mmf_m = \phi \cdot \mathfrak{R}_g \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where ϕ is a magnetic flux (Wb), and \mathfrak{R}_g is an air-gap reluctances (A.t/Wb).

Based on the PM magnetic circuit, the magnetic flux and the total mmf in this magnetic circuit can be calculated by (2) and (3), respectively.

$$\phi = B_m A_m = B_g A_g \quad (2)$$

$$H_m l_m + H_g l_g = 0 \quad (3)$$

where B_m , H_m , A_m , and l_m are a magnetic flux density (T), a magnetic field intensity (A.t/m), an area (m²), and a length (m) of PM, respectively. In addition, B_g , H_g , A_g , and l_g are a magnetic flux density, a magnetic field intensity, an area, and a length of air-gap, respectively.

B. Curie Temperature

The curie temperature is a critical temperature that completely deteriorates the PMs characteristics. Different PM materials have their own different specific curie temperatures. Some examples of curie temperature for significant PM materials are reported in table I [12]. High energy density PM materials typically provide low curie temperature characteristics. For example, Neodmium normally yields higher energy density than that of Cobalt. The curie temperature of Neodmium is lower than that of the Cobalt as shown in table I.

TABLE I. CURIE TEMPERATURE OF PERMANENT MAGNET MATERIALS

Material	Curie Temperature (°C)	Material	Curie Temperature (°C)
Gadolinium	16	Iron	771
Nd ₂ Fe ₁₂ B	312	Alnico 1	780
Nickel	358	Cunico	855
BaO 6Fe ₂ O ₃	469	Alnico 5	900
Co ₅ Sm	747	Cobalt	1117

III. DEMAGNETIZATION OF NDFEB PMS

A. Electric Oven Calibration

As aforementioned discussion, demagnetization of PMs can be significantly caused by the high temperature and reverse magnetizing direction issues. In this study, the high temperature condition is taken into consideration to investigate the demagnetization effect of NdFeB PMs. A PID temperature control electric oven as shown in Fig. 2 is used to heat up the testing PMs. The temperature calibration between 100 °C and 340 °C, which is a testing temperature range, using Fluke 65 IR thermometer for this electric oven is presented in table II. This heating temperature accuracy can confidently ensure the proposed electric oven use for demagnetizing testing specimens.

TABLE II. ELECTRIC OVEN CALIBRATION

Setting temperature	Measured temperature	Setting temperature	Measured temperature
100	101.7	260	260.2
140	140.6	300	299.6
180	179.5	340	341.5
220	220.4		



Fig. 2. PID temperature control electric oven

B. Remanence Flux Density Testing instruments

A two millimeters air-gap magnetic circuit as shown in Fig. 3 (a) is used for obtaining the remanence flux density measured by a Gauss meter as depicted in Fig. 3(b). This testing circuit can measure the mmf produced by testing PMs via the air-gap magnetic flux density measurement.



(a)



(b)

Fig. 3. Remanence flux density testing instrument (a) air-gap magnetic circuit (b) Gauss meter

C. Demagnetization Results

In this study, 38UH NdFeB PMs are demagnetized using the abovementioned electric oven to investigate the thermal effect. Fig. 4 depicts the demagnetization testing result considering various heating temperatures and testing times. The PM magnetic flux density of the designed air-gap magnetic circuit in percentage of its initial value is measured as abovementioned discussion.

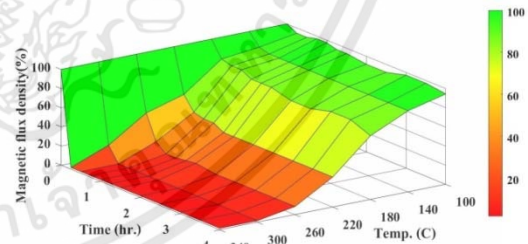


Fig. 4. Demagnetization of NdFeB due to thermal effect

It can be obviously seen from Fig.4 that both temperature and time have major impact to PM property considering its magnetic flux density in the testing magnetic circuit. In addition, the 38UH NdFeB PM could be completely demagnetized at the using temperature more than 300 °C in only 1 hour.

IV. THE PROPOSED MAGNETIZING METHOD

A. The Proposed Magnetizing Method

As aforementioned discussion in the review of literature, there are several magnetizing methods reported in the previous studies. This paper presents a simpler and more effective magnetizing method compared to those proposed methods as illustrated in Fig. 5.

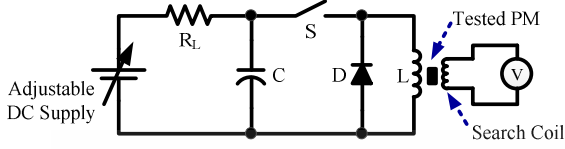


Fig. 5 Proposed magnetizing circuit

As depicted in Fig. 5, a set of capacitor is charged the energy from an adjustable DC supply until reaching the required voltage, and then the switching device is triggered to release energy to an inductor. This inductor is an air core model in which a NdFeB PM is put and magnetized. Moreover, a search coil is used to measure induced voltage for calculating magnetic field intensity in this method. The designed and developed of this testing technique is shown in Fig. 6.



Fig. 6 The actual magnetizing circuit

The designed components in this circuit are as follows. R_L is 25 ohm. C is 4.7 Farad. Number of search coil turns is 20. As shown in Fig. 7, two models of inductor with 25 turns are invented to compare the magnetizing performance. The difference between these two models are their configurations which the model I has 0.08 meter (m) in length and 0.104 m in diameter while the model II has 0.04 and 0.085 m in length and diameter, respectively. The magnetizing results of these two models are presented in section V.

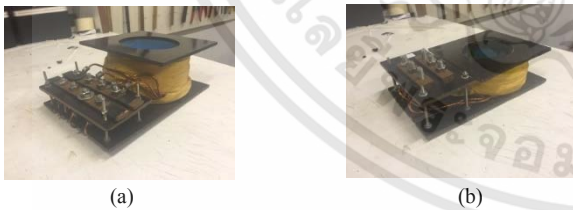


Fig. 7. The inductors (a) Model I (b) Model II

B. Magnetic Field Intensity Calculation

The N turns search coil in the proposed method is used to measure induced voltage that is the electromotive force (emf) magnetized to the tested PMs in the inductor. Therefore, magnetic flux (ϕ), magnetic flux density and magnetic field intensity magnetized to the tested PMs can be simply calculated based on the Lenz's law by (4)-(7).

$$emf = N \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

$$\phi = \frac{1}{N} \int emf dt \quad (5)$$

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (6)$$

$$H = \frac{B}{\mu_0} \quad (7)$$

V. TESTING RESULTS

A. The Performance of Proposed Magnetizing method

According to the proposed method, the DC supply can be adjusted between 0-300 V which approximately gives the charging current between 0-12 A. Fig.8 illustrates the inductor current, inductor voltage (V_{coil}), capacitor voltage (V_c), and emf measured by the search coil of 100 VDC testing voltage with inductor model I.

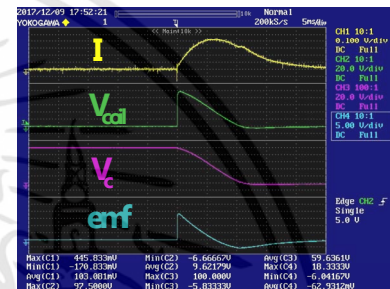


Fig. 8 PM magnetization testing results

Considering the measured emf in Fig.8, it is used to calculate the maximum magnetic flux density (B_{max}) and maximum magnetic field intensity (H_{max}) by (4)-(7). The calculation results with Matlab are shown in Fig. 9.

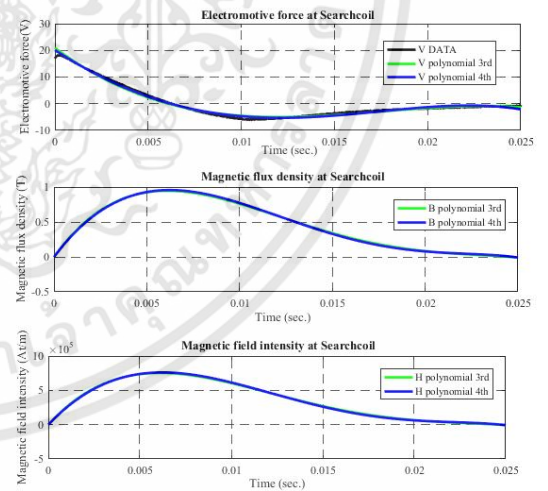


Fig. 9 Magnetic flux density and magnetic field intensity calculation

It can be clearly observed from Fig.9 that only 100 VDC of the proposed approach provide the B_{max} and H_{max} about 0.95 T and 753.62 kA.t/m, respectively. The testing voltage between 50 and 300 V are applied to the testing circuit for both inductors for making a comparison as reported in table III.

TABLE III. THE PERFORMANCE OF PROPOSED MAGNETIZING METHOD

Voltage (V)	Model I		
	I_{max} (A)	B_{max} (T)	H_{max} (kA.t/m)
50	2,389	0.45	360.33
100	4,583	0.95	753.62
150	6,667	1.40	1,115.54
200	8,916	1.92	1,529.73
250	11,055	2.40	1,907.34
300	13,221	2.88	2,294.35
Voltage (V)	Model II		
	I_{max} (A)	B_{max} (T)	H_{max} (kA.t/m)
50	2,604	0.61	488.35
100	4,541	1.26	1,005.82
150	6,750	1.88	1,492.87
200	9,083	2.56	2,034.55
250	12,083	3.23	2,567.13
300	14,062	3.90	3,169.80

According to table III, these two inductor models can sufficiently meet the magnetizing requirement of 2100 kA.t/m for NdFeB PMs grade 38UH. The inductor model II yields higher magnetizing characteristics with the same supply voltage compared to those of the inductor model I due to its shorter coil length; therefore, the inductor model II is selected for testing the PM magnetization in this study.

B. Magnetization of NdFeB PMs

To comprehensively investigate PM magnetization considering demagnetization conditions, prior to magnetize NdFeB PMs, these PMs are demagnetized to various remanence magnetic flux densities using the electric oven as proposed in section III.A. Six cases including 2%, 10%, 40%, 60%, and 80% of the remanence magnetic flux densities compared to new NdFeB PMs are considered in this study. These remanence magnetic flux densities of PMs are measured in the testing magnetic circuit as discussed in section III.B. Different magnetization levels including 500, 1000, 1500, 2000, 2500, and 3200 kA.t/m approximately are applied to these demagnetized PMs by the proposed magnetizing method as presented in section IV.A. The results of the PM magnetization considering demagnetization conditions are depicted in Fig.10.

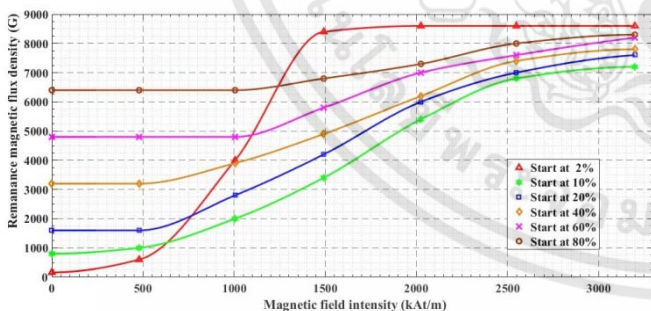


Fig. 10 Magnetizing of NdFeB considering demagnetization conditions

According to Fig. 10, the demagnetized PMs can be regained their capability by proposed magnetizing technique. As higher magnetic field intensity, these demagnetized PMs can recover more remanence magnetic flux density. The most complete demagnetized PMs can be magnetized to their initial characteristics as the new PMs when they are applied at the magnetized requirement level.

Moreover, demagnetized PMs as 10 % to 80 % compared to their initial values are also able to magnetize to enhance their properties. However, these PMs cannot be effectively recovered their initial capability applied by the similar magnetic field intensity as the complete demagnetized PMs although they are applied as the magnetizing requirement level. This is because magnetic domain changes in magnetic material are different due to the level of demagnetization. The magnetic material with complete different magnetic domain is simply to magnetize to be the high performance PM.

VI. CONCLUSION

Although using PM in modern electrical machines provides several advantages in term of performance and efficiency, there is a PM demagnetization concern. High temperature applied to PM can completely deteriorate its property. However, demagnetized PMs can be recovered their characteristics by magnetization method. This paper proposes the simple and effective magnetizing method for 38UH NdFeB PM as its magnetization requirement level. Considering various demagnetization conditions, the most complete deteriorated PMs magnetized as the requirement level can be regained their initial properties. However, other levels of demagnetized PMs cannot be recovered their initial properties, even though they are applied as the magnetization requirement level. This is because magnetic domain changes in magnetic material are different due to the level of demagnetization.

REFERENCES

- [1] T. M. Mulcahy and J. R. Hull, "A superconducting solenoid and press for permanent magnet fabrication," *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 13, pp. 1668-1671, 2003.
- [2] B. Bochenkov and S. Lutz, "A review of modern materials of permanent magnets," in *Science and Technology, 2004. KORUS 2004. Proceedings. The 8th Russian-Korean International Symposium on*, 2004, pp. 201-203.
- [3] M. Taha and D. Greenwood, "PM material selection guide for IPMSM," in *Electrical Machines (ICEM), 2016 XXII International Conference on*, 2016, pp. 1989-1994.
- [4] H. Nishio, "Accurate measurement of magnetic properties of Nd-Fe-B sintered magnets with high coercivity," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, pp. 4779-4785, 2012.
- [5] K. Seiichi and K. Giyuu, "Pulsed field magnetometer for low-temperature study of high-performance permanent magnets," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 36, pp. 3634-3636, 2000.
- [6] T. Sebastian, "Temperature effects on torque production and efficiency of PM motors using NdFeB magnets," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, pp. 353-357, 1995.
- [7] A. Clegg, I. Coulson, G. Hilton, and H. Wong, "The temperature stability of NdFeB and NdFeBCo magnets," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 26, pp. 1942-1944, 1990.
- [8] P. Withey, H. Kennett, P. Bowen, and I. Harris, "The magnetic and mechanical properties of NdFeB type permanent magnets and the effect of quenching," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 26, pp. 2619-2621, 1990.
- [9] L. Jahn, R. Schumann, and V. Ivanov, "Investigation of the thermal remagnetization in sintered hard magnets," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 37, pp. 2506-2508, 2001.
- [10] M. Katter, "Angular dependence of the demagnetization stability of sintered Nd-Fe-B magnets," *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 41, pp. 3853-3855, 2005.
- [11] F. Akagi and Y. Honkura, "Analysis of NdFeB Bonded Magnet Behaviors Within High-Frequency Field and High Temperature Using Micromagnetic Simulator," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, pp. 1-4, 2015.
- [12] D. R. Askeland and W. J. Wright, *Science and engineering of materials*: Nelson Education, 2015.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายชาญปกรณ์ ณ นิโรจน์
 วัน เดือน ปีเกิด 30 กรกฎาคม 2535 ที่จังหวัดพัทลุง
 ที่อยู่ 31 หมู่ที่ 10 ตำบล ชะมวง อำเภอ ควนขนุน จังหวัดพัทลุง 93110

ประวัติการศึกษา 2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้