

การออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก
เพื่อใช้งานในอุตสาหกรรม

DESIGN OF A SMALL CIRCULAR LIFTING MAGNET
FOR INDUSTRY APPLICATIONS

กรุง ลีววัฒนา
KRUNG LUEWATTANA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMUTL-2007-EN-M-020-108

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก
เพื่อใช้งานในอุตสาหกรรม

DESIGN OF A SMALL CIRCULAR LIFTING MAGNET
FOR INDUSTRY APPLICATIONS

กรุง ลือวัฒนา

KRUNG LUEWATTANA

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 77982
วัน,เดือน,ปี..... 12 ก.พ. 2551

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

KMITL-2007-EN-M-020-108

**DESIGN OF A SMALL CIRCULAR LIFTING MAGNET
FOR INDUSTRY APPLICATIONS**

KRUNG LUEWATTANA

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

2007

KMITL-2007-EN-M-020-108

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กเพื่อใช้งานในอุตสาหกรรม
นักศึกษา	นาย กรุง ลือวัฒนา
รหัสประจำตัว	45060105
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. สิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการออกแบบ และจัดสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก โดยใช้เทคนิคของแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการออกแบบ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรม โดยได้จัดสร้างโปรแกรมการออกแบบตัวเครื่องที่สามารถแสดงผลค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ และขนาดของเครื่องเป็นกราฟฟิก 2 มิติ รวมถึงได้จำลองเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการใช้เครื่อง โดยใช้โปรแกรม MAXWELL SV นอกจากนี้ได้จัดสร้างชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมด้วยระบบสำรองไฟฟ้าฉุกเฉินที่สามารถใช้งานได้สะดวก จากนั้นได้ทำการทดสอบการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม โดยการยกแผ่นเหล็ก และเศษเหล็กซึ่งตัวเครื่องที่จัดสร้างสามารถยกเหล็กน้ำหนักไม่เกิน 250 kg ใช้แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 70 V_{dc} ใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักสูงสุด 0.4 W/kg ซึ่งจากผลการทดสอบใช้งานจริงในอุตสาหกรรมเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบที่จัดสร้างสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมีโครงสร้างไม่ยุ่งยากและมีต้นทุนการผลิตต่ำ

Thesis Title	DESIGN OF A SMALL CIRCULAR LIFTING MAGNET FOR INDUSTRY APPLICATIONS
Student	Mr. Krung Luewattana
Student ID.	45060105
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Siriwat Potivejkul

ABSTRACT

This thesis presents design and construction of a small circular lifting magnet. The design uses electromagnetic force techniques. The purpose of this thesis is aimed at producing a prototype for the application in industries. The program is constructed so that the result of a major parameters and a size of machine can be displayed into a two dimensional graphic including a magnetic flux pattern simulated using Maxwell SV program. Furthermore, a DC power supply is constructed with an emergency system which can be operated conveniently. Then, the prototype is tested by lifting iron plate and scraps. It is found that the iron with maximum weight of 250 kg can be lifted, using a maximum voltage of $70V_{dc}$, a maximum watt per kg of 0.4 W/kg. The test results show that the prototype is able to function effectively with a simple construction and low costs.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับเทคนิค ด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจาก รองศาสตราจารย์ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุม วิทยานิพนธ์ผู้วิจัยผู้ศึกษาซึ่งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์รัชต์ มั่งมีชัย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี มหานคร ซึ่งเป็นผู้ช่วยเหลือให้คำแนะนำในบางจุดที่ผู้วิจัยคิดปัญหา และมีส่วนช่วยให้ผู้ทำวิจัย เข้าใจในปัญหานั้น จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ พี่ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์รุ่งโรจน์ อาจารย์แสนศักดิ์ อาจารย์พัฒนา อาจารย์พงษ์สวัสดิ์ อาจารย์วัฒน์ และอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และแนวคิดในการทำวิจัยตลอดจนน้อง ๆ ที่ช่วยในการทำงานวิจัยนี้โดยเฉพาะน้องเบร็ด น้องสาธ และกิม รวมถึงเพื่อน ๆ ที่เป็นกำลังใจ และแรงกระตุ้นผลักดันให้งานวิจัยนี้สำเร็จ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีมหานคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ และความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และห้องปฏิบัติการ ในการทดสอบ

ขอบคุณ บริษัท ACME INTERNATIONAL (THAILAND) และครอบครัววีระประเวศน์กุล โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณ บุญวัฒน์ วีระประเวศน์กุล ที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาจนงานวิจัยสำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณย่าลูกอินทร์ ลือวัฒนา คุณแม่สำรวย นั้วตระกูล คุณพ่อสุธรรม นั้วตระกูล พ.ต.อ กิตติคม ลือวัฒนา คุณแม่กอบลาภ ลือวัฒนา ซึ่งท่านเป็นผู้ให้ทุนสนับสนุนและ ให้กำลังใจในการทำงานวิจัยจนประสบความสำเร็จ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กรุง ลือวัฒนา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 สนามแม่เหล็ก.....	6
2.3 กฎการเหนี่ยวนำฟาราเดย์.....	9
2.4 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล.....	11
2.5 ความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	12
2.6 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	13
2.7 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก.....	13
2.8 ความซึมซาบแม่เหล็ก.....	14
2.9 ความต้านทานวงจรแม่เหล็ก.....	14
2.10 วัสดุแม่เหล็ก.....	16
2.11 เส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก.....	16
2.12 การสูญเสียในแกนเหล็ก.....	18
2.13 การหาสมการแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องยกของหนัก.....	22

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.14 การหาขนาดของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม.....	25
บทที่ 3 การออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก.....	30
3.1 บทนำ.....	30
3.2 การออกแบบตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม.....	31
3.3 การออกแบบชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	42
3.3.1 วงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส แบบควบคุมครึ่งคลื่น.....	42
3.3.2 วงจรเบตเตอร์รีซาร์ตเจอร์และไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน.....	48
3.3.3 เบตเตอร์รี.....	51
3.4 การออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก โดยการใช้โปรแกรมช่วยออกแบบ.....	52
บทที่ 4 การทดสอบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	56
4.1 บทนำ.....	56
4.2 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในการยกแผ่นเหล็ก.....	57
4.3 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในสถานะไม่มีโหลด.....	62
4.4 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในการยกเศษเหล็ก.....	65
4.5 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในกรณี กำหนดค่าแรงดันคงที่.....	69
4.6 การทดสอบวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก.....	73
4.7 การทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน.....	79
4.8 การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดด้วยวิธี V-I Method.....	82

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.9 การทดสอบจำลองสภาวะการใช้งาน โดยใช้โปรแกรม Maxwell SV.....	85
4.10 การเปรียบเทียบผลการออกแบบกับการทดสอบใช้งานจริงของเครื่องยกของหนัก ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก.....	91
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	94
5.1 บทนำ.....	94
5.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	94
5.2.1 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในการยกแผ่นเหล็ก.....	94
5.2.2 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในสถานะไม่มีโหลด.....	95
5.2.3 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในการยกเศษเหล็ก.....	95
5.2.4 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในกรณีกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่.....	96
5.2.5 การทดสอบวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก.....	96
5.2.6 การทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน.....	97
5.2.7 การทดสอบหาค่าความต้านทานจากขดลวดด้วยวิธี V-I Method.....	97
5.2.8 การทดสอบจำลองสภาวะการใช้งาน โดยใช้โปรแกรม MAXWELL SV.....	98
5.2.9 การเปรียบเทียบผลการออกแบบกับการทดสอบใช้งานจริง ของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก.....	99
5.3 สรุป.....	100
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	101
6.1 สรุปผลการออกแบบ.....	101
6.2 สรุปผลการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม.....	102
6.3 สรุปผลเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบใช้งานจริงกับการออกแบบ.....	103

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.4 คุณสมบัติของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	103
6.5 สรุปผลการวิจัย.....	104
6.6 แนวทางการพัฒนาและข้อเสนอแนะ.....	104
เอกสารอ้างอิง.....	106
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก. คู่มือการใช้งาน โปรแกรมการออกแบบเครื่องยกของหนัก ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก.....	108
ภาคผนวก ข. คู่มือการใช้งานเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แบบวงกลมขนาดเล็ก.....	112
ภาคผนวก ค. คู่มือการใช้งาน โปรแกรม MAXWELL SV.....	120
ภาคผนวก ง. ตารางผลการทดสอบ.....	131
ภาคผนวก จ. Source code.....	145
ภาคผนวก ฉ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	184
ประวัติผู้เขียน.....	197

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แสดงโครงสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก.....3
1.2	แผ่นเหล็ก และเศษเหล็กตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ.....3
1.3	ไดอะแกรมโครงสร้างการทำงานของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....3
2.1	การทดลองของเออสเตด.....7
2.2	การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กของตัวนำ.....7
2.3	กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก.....8
2.4	ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าและทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ.....9
2.5	เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวด.....9
2.6	การทดลองของฟาราเดย์.....10
2.7	เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล.....11
2.8	แสดงการหาค่าความต้านทานวงจรแม่เหล็ก.....15
2.9	ลักษณะของทอรอยด์.....17
2.10	เส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก (B-H Curve) ของสารแม่เหล็กชนิดต่างๆ.....18
2.11	วงฮิสเตอรีซิสของสารเฟอร์โรแมกเนติก.....19
2.12	วงฮิสเตอรีซิสของสารเฟอร์โรแมกเนติกชนิดอ่อน (Soft) และ ชนิดแข็ง (Hard).....20
2.13	การเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก.....21
2.14	โครงสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม.....22
2.15	วงจรแม่เหล็ก และวงจรแม่เหล็กสมมูลของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....23
2.16	สัดส่วนต่างๆ ของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม.....26
3.1	ไดอะแกรมโครงสร้างการทำงานของเครื่อง.....30
3.2	โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....31
3.3	สัดส่วนต่างๆ ของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม.....32
3.4	โครงสร้างและสัดส่วนของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....38
3.5	โครงสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....39
3.6	แกนเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....40
3.7	บอบบิ้นและขดลวดที่พันอยู่ด้านในของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....40
3.8	ชุดโซ่รับน้ำหนัก.....41

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ.....	42
3.10 แสดงไดอะแกรมส่วนเฟสคอนโทรลเรกติไฟ.....	43
3.11 วงจรปรับแรงดันและกรองสัญญาณ.....	44
3.12 วงจรกรองและวงจรขยายผลต่าง.....	44
3.13 วงจร PI-Control และ วงจรจำกัดแรงดัน.....	45
3.14 วงจร Zero voltage detector.....	46
3.15 วงจรรวม TCA 785.....	46
3.16 วงจรทริก SCR.....	47
3.17 วงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟสแบบควบคุมครั้งคลื่น.....	48
3.18 ไดอะแกรมชุดเบตเตอร์ชาร์ตเจอร์.....	49
3.19 วงจรชาร์ตเจอร์ และวงจรจ่ายไฟฟ้าฉุกเฉิน.....	50
3.20 วงจรชุดเฟสคอนโทรลเรกติไฟ และเบตเตอร์ชาร์ตเจอร์.....	51
3.21 ลำดับขั้นตอนการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม.....	52
3.22 หน้าจอโปรแกรมการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม.....	53
3.23 หน้าจอการกำหนดค่าน้ำหนักที่ต้องการยก ช่องว่างอากาศ และกระแสไฟฟ้าที่ใช้.....	53
3.24 หน้าจอการเลือกกำหนดขนาดตัวนำจากตารางสายภายในโปรแกรม.....	54
3.25 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบเครื่องโดยใช้โปรแกรม.....	54
3.26 ขนาดเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมที่ได้จากโปรแกรม.....	55
4.1 ระบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 ส่วนเมื่อทำงานรวมกัน.....	56
4.2 วงจรทดสอบการยกแผ่นเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	58
4.3 การทดสอบยกแผ่นเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	59
4.4 ค่าระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบต่อการยกแผ่นเหล็กที่น้ำหนัก 30-250kg.....	60
4.5 ค่าระดับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบต่อการยกแผ่นเหล็กที่น้ำหนัก 30-250kg.....	60
4.6 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบต่อน้ำหนักแผ่นเหล็ก 30-250kg.....	61
4.7 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในสถานะไม่มีโหลด.....	62
4.8 การทดสอบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลด.....	63

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ค่าระดับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในสถานะไม่มีโหลดเปรียบเทียบกับทดสอบยกแผ่นเหล็กจริง.....	64
4.10 ค่าพิคคัล่าลังไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในสถานะไม่มีโหลดเปรียบเทียบกับทดสอบยกแผ่นเหล็กในสถานะมีโหลด.....	64
4.11 วงจรการทดสอบยกเสหเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	66
4.12 การทดสอบยกเสหเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	66
4.13 ค่าระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบต่อการยกเสหเหล็กที่น้ำหนัก 1- 9kg.....	67
4.14 ค่าระดับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบต่อการยกเสหเหล็กที่น้ำหนัก 1 - 9kg.....	68
4.15 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบต่อน้ำหนักเสหเหล็ก 1 - 9kg.....	68
4.16 วงจรการทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในกรณีกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่.....	70
4.17 การทดสอบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในกรณีกำหนดแรงดันไฟฟ้าคงที่.....	70
4.18 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในต่อน้ำหนักแผ่นเหล็กที่เพิ่มขึ้นที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $45V_{dc}$	71
4.19 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อน้ำหนักแผ่นเหล็กที่เพิ่มขึ้นที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $70V_{dc}$	72
4.20 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อน้ำหนักแผ่นเหล็กที่เพิ่มขึ้นที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $80V_{dc}$	72
4.21 ค่า(W/kg) ต่อน้ำหนักแผ่นเหล็กที่เพิ่มขึ้นที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $45V_{dc}$, $70V_{dc}$ และ $80V_{dc}$	73
4.22 วงจรการทดสอบวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า.....	74
4.23 การทดสอบวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก.....	75
4.24 ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณพื้นผิวหน้าสัมผัสของเครื่องยกของหนัก ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $10V_{dc}$ กระแสไฟฟ้า 0.13A.....	76
4.25 ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณพื้นผิวหน้าสัมผัสของเครื่องยกของหนัก ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $40V_{dc}$ กระแสไฟฟ้า 0.68A.....	76
4.26 ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณพื้นผิวหน้าสัมผัสของเครื่องยกของหนัก ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $90V_{dc}$ กระแสไฟฟ้า 1.39A.....	77

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หน้าสัมผัสของเครื่องที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 10V _{dc} , 40V _{dc} และ 90V _{dc} กระแสไฟฟ้า 0.13A, 0.68A และ 1.39A.....	78
4.28 วงจรการทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน.....	79
4.29 การทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน.....	80
4.30 แรงดันไฟฟ้าและน้ำหนักที่ได้จากการทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน.....	81
4.31 การเปรียบเทียบระหว่างระดับแรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินสามารถจ่าย ให้กับเครื่องยกของหนักได้กับระดับแรงดันไฟฟ้าปกติที่เครื่องสามารถทำงานได้.....	81
4.32 วงจรการทดสอบ V-I Method.....	83
4.33 การทดสอบ V-I Method.....	83
4.34 อัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อกระแสไฟฟ้า.....	84
4.35 การจำลองการยกแผ่นเหล็ก 250kg.....	86
4.36 การจำลองการยกเศษเหล็ก 9kg.....	87
4.37 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่กระแส 0.13A.....	88
4.38 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่กระแส 0.68A.....	89
4.39 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่กระแส 1.34A.....	89
4.40 ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างการทดสอบกับการจำลอง.....	90
4.41 เปรียบเทียบกระแสที่ใช้จากการคำนวณกับการทดสอบใช้งานจริง.....	91
4.42 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ใช้จากการคำนวณกับการทดสอบใช้งานจริง.....	92
4.43 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบใช้งานจริง.....	92
ก.1 หน้าจอเริ่มเข้าโปรแกรมการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แบบวงกลมขนาดเล็ก.....	109
ก.2 หน้าจอรับค่าน้ำหนักที่ยก, ช่องว่างอากาศและกระแสไฟฟ้า.....	109
ก.3 หน้าจอรับค่าชนิด, เส้นผ่านศูนย์กลาง และพื้นที่หน้าตัดขดลวดตัวนำ.....	110
ก.4 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	110
ก.5 ขนาดของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการใช้โปรแกรม.....	111
ข.1 แสดงการนำโซลีนอยด์ที่ขดติดกับตัวเครื่อง โดยแขวนกับรอกซึ่งติดอยู่กับเครน.....	113

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.2	แสดงการต่อสายไฟด้านเอาต์พุตจากชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเป็นด้าน DC เข้ากับขั้วต่อสายซึ่งติดกับตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....113
ข.3	แสดงการติดตั้งตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าพร้อมด้วยชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งอยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน.....114
ข.4	แสดงตำแหน่งเซอร์กิตเบรกเกอร์.....114
ข.5	แสดงหลอดไฟ SYSTEM ON, EMERGENCY และ CHARGER หน้าตู้ควบคุม.....115
ข.6	แสดงหน้าจอ VOLT METER และ AMP METER.....115
ข.7	แสดงหน้าตู้ควบคุมเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม.....115
ข.8	แสดงการวางเครื่องยกของหนักลงบนแผ่นเหล็กทดสอบ.....116
ข.9	แสดง VOLUMN สำหรับปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....116
ข.10	แสดงการยกแผ่นเหล็กโดยการ ใช้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....117
ข.11	แสดงการยกเศษเหล็กโดยการ ใช้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....117
ข.12	แสดงการดึงโซ่จากตัวรถซึ่งแขวนชุดโซ่รับน้ำหนักของตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ติดตั้งแผ่นเหล็กทดสอบไว้เพื่อให้ลอยสูงขึ้นก่อนทำการเคลื่อนย้ายไปสู่ตำแหน่งที่ต้องการ.....118
ข.13	แสดงสวิตช์ ON/OFF BATTERY และ ON/OFF FIX VOLT.....119
ค.1	แสดงไอคอน โปรแกรม Maxwell SV.....121
ค.2	แสดงหน้าต่าง Maxwell SV.....121
ค.3	แสดงหน้าต่าง Maxwell Project.....121
ค.4	หน้าต่าง Add a new project directory.....122
ค.5	หน้าต่าง Enter project name and select project type.....122
ค.6	แสดงหน้าจอ Maxwell SV Lifting magnet 1.....123
ค.7	แสดงหน้าจอ 2D Modeler Lifting magnet 1.....124
ค.8	แสดงหน้าจอ New Object.....124
ค.9	แสดงรูป Lifting magnet ที่วาดเสร็จ.....125
ค.10	หน้าจอการ Setup Materials.....125
ค.11	แสดงหน้าจอ Boundaries/Sources.....126

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.12 แสดงหน้าจอ Solve Setup.....	127
ค.13 แสดงค่า Energy Error (%).....	127
ค.14 แสดงหน้าจอ Create New Plot.....	128
ค.15 แสดงหน้าจอ Scalar Surface Plot.....	129
ค.16 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการใช้โปรแกรม Maxwell SV.....	130

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน โรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งดำเนินธุรกิจที่เกี่ยวข้องกับการนำ โลหะประเภทแผ่นเหล็กหรือเศษเหล็กไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเหล็กในรูปแบบต่างๆ จำเป็นที่จะต้องมีการขนถ่ายเหล็กหรือเศษเหล็กไปใช้ที่เครื่องรีดเหล็ก[1]. การเคลื่อนย้ายรางเหล็กหรือแผ่นเหล็กภายในโรงงาน, การเคลื่อนย้ายเศษเหล็กซึ่งกองรวมกันอยู่สู่เตาหลอม นอกจากนั้นยังรวมถึงธุรกิจซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องทำการคัดแยกและเก็บสต็อกแผ่นเหล็กหรือเศษเหล็กจำนวนมาก ซึ่งกระบวนการในการเคลื่อนย้ายหรือคัดแยกแผ่นเหล็กและเศษเหล็กดังกล่าวมักจะทำให้เกิดปัญหาอยู่เสมอไม่ว่าจะเป็น การร่วนหล่นของแผ่นเหล็กหรือเศษเหล็กขณะเคลื่อนย้าย การสิ้นเปลืองเวลาในการทำงาน รวมถึงการใช้แรงงานจำนวนมากในการคัดแยกเศษเหล็กเป็นต้น อย่างไรก็ตามในปัจจุบันการเคลื่อนย้ายหรือคัดแยกแผ่นเหล็กและเศษเหล็กทำได้หลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านการใช้เวลา, แรงงาน และด้านความปลอดภัย ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกที่จะศึกษาและออกแบบสร้าง เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม[2] เนื่องจากมีคุณสมบัติง่ายในการนำไปใช้งานสำหรับการเคลื่อนย้ายแผ่นเหล็กหรือเศษเหล็ก ซึ่งจะสามารถช่วยลดการใช้แรงงาน, รวมไปถึงประหยัดเวลาในการเคลื่อนย้าย และปลอดภัยในการใช้งาน โดยที่ตัวเครื่องมีโครงสร้างไม่ยุ่งยากบำรุงรักษาง่าย ต้นทุนในการสร้างต่ำ นอกจากนี้ยังรวมถึงการจัดสร้างชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีระบบจ่ายไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน เพื่อให้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถใช้งานได้จริงในโรงงานอุตสาหกรรม อีกทั้งยังได้จัดทำ โปรแกรมช่วยในการออกแบบตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กขึ้น เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยให้ผู้ออกแบบเกิดความสะดวกในการออกแบบสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งทั้งหมดนี้จะเป็นประโยชน์ในพัฒนาการออกแบบตัวเครื่องที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไปในอนาคต

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายในการทำวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการออกแบบสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก[3] และชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมด้วยระบบจ่ายไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน เพื่อให้สามารถใช้งานได้จริงในโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีความมุ่งหมายให้เครื่องที่ได้ออกแบบสร้างขึ้น สามารถทำการยกเหล็กได้ตามที่ได้ออกแบบรวมถึงนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบความสามารถในการยกแผ่นเหล็กและเศษเหล็ก และที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือเครื่อง

จะต้องสามารถทำงานได้ในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าปกติไม่สามารถจ่ายได้ นอกจากนั้นแล้วยังรวมถึงการสร้างโปรแกรมช่วยในออกแบบ เครื่องยกของหนักด้วยสนามเหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก อีกทั้งยังได้ศึกษาการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux) ที่เกิดขึ้นได้โดยใช้โปรแกรม Maxwell SV ช่วยในการจำลอง ซึ่งทั้งหมดนี้ใช้วัสดุที่มีในประเทศเพื่อความสะดวกในการซ่อมบำรุง และติดตั้งใช้งานจริงในอุตสาหกรรม

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

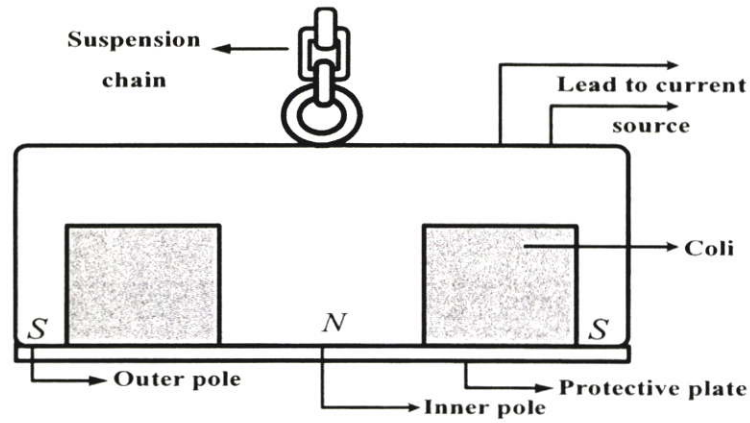
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ตั้งสมมติฐานของการศึกษาโดยแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

1. การทดสอบยกแผ่นเหล็กเพื่อเปรียบเทียบกับทดสอบในสถานะไม่มีโหลด
2. การทดสอบยกแผ่นเหล็กในกรณีกำหนดแรงดันไฟฟ้าคงที่
3. การทดสอบยกเศษเหล็กเพื่อเปรียบเทียบกับยกแผ่นเหล็ก
4. การเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณที่ได้ออกแบบไว้กับการทดสอบใช้งานจริง
5. การทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินที่ได้จัดสร้างขึ้น
6. การทดสอบหาค่าความต้านทานด้วยวิธี V-I Method
7. การทดสอบหาความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density)
8. การศึกษาโปรแกรม Maxwell SV เพื่อนำมาจำลองรวมถึงวิเคราะห์เส้นแรงแม่เหล็ก

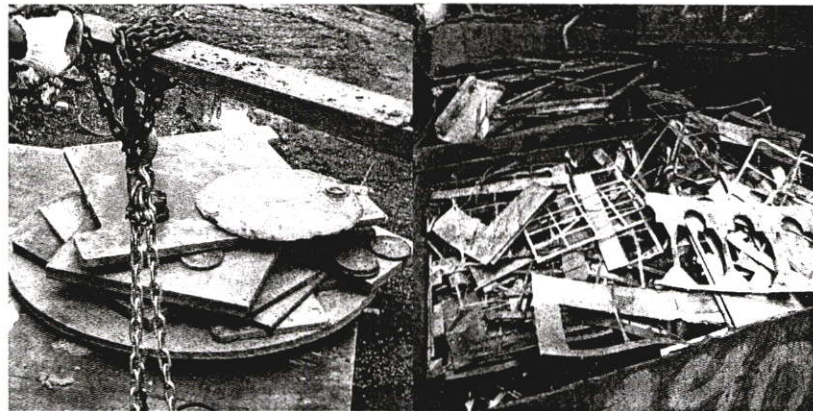
(Magnetic flux) และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density) ที่เกิดขึ้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การออกแบบสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า[4] แบบวงกลมขนาดเล็ก เพื่อให้สามารถยกแผ่นเหล็ก และเศษเหล็กได้นั้น อาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ขดลวดทองแดงซึ่งพันอยู่รอบแกนเหล็กวงในภายในตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม โดยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายเข้าสู่ขดลวดจะเหนี่ยวนำทำให้แกนเหล็กกลายเป็นแม่เหล็กจากกระแสที่ไหลผ่านขดลวดและ ส่งผลทำให้พื้นผิวหน้าสัมผัสแกนเหล็กวงในกลายเป็นขั้วแม่เหล็ก[5] และพื้นผิวหน้าสัมผัสแกนเหล็กวงนอกจะกลายเป็นขั้วแม่เหล็กซึ่งมีทิศทางตรงข้ามตามทิศทางกระแสไฟฟ้า โดยที่ขั้วแม่เหล็กทั้งสองที่เกิดขึ้น จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic field) ซึ่งทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะวิ่งจากแกนเหล็กที่สร้างขั้วแม่เหล็กเหนือสู่แกนเหล็กที่สร้างขั้วแม่เหล็กใต้ส่งผลทำให้เกิดแรงในการยกวัตถุ[6] จากทฤษฎีนี้สามารถนำไปจัดสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กได้ดังรูปที่ 1.1 โดยนำไปทดสอบโดยการยกแผ่นเหล็ก และเศษเหล็กจริงในโรงงานอุตสาหกรรมดังรูปที่ 1.2

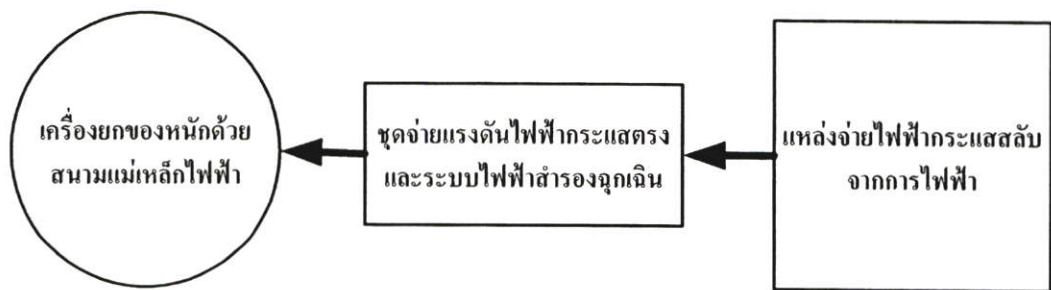


รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างเครื่องชกของหน้กด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก



รูปที่ 1.2 แผ่นเหล็ก และเศษเหล็กตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

โดยการสร้างชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมด้วยระบบจ่ายไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินเพื่อใช้ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายเข้าสู่เครื่อง เพื่อใช้ในการทดสอบที่ระดับแรงดันค่าต่าง ๆ โดยสามารถแสดงไดอะแกรมโครงสร้างการทำงานได้ดังนี้



รูปที่ 1.3 ไดอะแกรมโครงสร้างการทำงานของเครื่องชกของหน้กด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แบ่งขอบเขตงานวิจัยเป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. การออกแบบและสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กที่สามารถยกเหล็กที่มีน้ำหนักไม่เกิน 250 kg ได้
2. การออกแบบและสร้างชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง[7] ที่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 0-110 V_{dc} พิกัดกระแสไฟฟ้า 0-5 A
3. การออกแบบและสร้างชุดจ่ายไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินพร้อมด้วย ชุดแบตเตอรี่ชาร์จเจอร์ ซึ่งสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำรองฉุกเฉิน ในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟจากการไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายไฟให้กับเครื่องได้ โดยมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 96 V_{dc} พิกัดกระแสไฟฟ้า 5 A ซึ่งต้องใช้แบตเตอรี่จำนวน 8 ลูกต่ออนุกรมกันโดยแต่ละลูกสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้นาน 1 ชม
4. การสร้างโปรแกรมช่วยในการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก โดยใช้โปรแกรม Visual Basic ในการออกแบบโปรแกรม
5. การจำลองสถานะการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic flux) และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density) ของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม เพื่อศึกษาและวิเคราะห์สถานะการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ขณะทำการทดสอบใช้งานโดยการใช้โปรแกรม Maxwell SV

1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในการศึกษาและออกแบบสร้างเครื่องยกของหนัก ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กเพื่อให้ได้ ผลการทดลองและข้อมูลต่างๆเพียงพอสำหรับเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไปในอนาคต จึงได้แบ่งโครงงานวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้ออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์สมมติฐานที่ใช้ขอบเขตและขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็ก กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์[8] ความเข้มสนามแม่เหล็ก ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก แรงเคลื่อนแม่เหล็ก ความซึมซาบแม่เหล็ก วัสดุแม่เหล็ก เส้นโค้งก้านเค้นแม่เหล็ก การสูญเสียในแกนเหล็ก การหาสมการแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม การหาขนาดของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและจัดสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก รวมไปถึงการออกแบบสร้างชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง พร้อมด้วยชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินและชุดแบตเตอรี่ชาร์ตเจอร์ นอกจากนี้ยังรวมถึงขั้นตอนในการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก โดยการใช้โปรแกรมช่วยออกแบบที่ได้สร้างขึ้นซึ่งทั้งหมดนี้เป็นการเตรียมการก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการทดสอบต่อไป

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดสอบขีดความสามารถของ เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการยกแผ่นเหล็กที่สภาวะรับโหลดจริงและที่สภาวะไม่มีโหลด รวมถึงการยกเศษเหล็ก, การเปรียบเทียบขีดความสามารถในการใช้งานจริงกับการออกแบบ, การทดสอบวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, การทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินรวมถึง การทดสอบหาค่าความต้านทานด้วยวิธี V-I Method การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องในกรณีกำหนดแรงดันไฟฟ้าคงที่ นอกจากนั้นได้จำลองสภาวะการเกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux) และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density) จากการใช้งานโดยการใช้โปรแกรม Maxwell SV ช่วยในการจำลองสภาวะดังกล่าว

บทที่ 5 กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในส่วนของการทดสอบยกแผ่นเหล็กในสภาวะรับโหลดจริงและในสภาวะไม่มีโหลด, การทดสอบยกเศษเหล็ก, การทดสอบยกแผ่นเหล็กในกรณีกำหนดแรงดันไฟฟ้าคงที่, การเปรียบเทียบขีดความสามารถในการใช้งานจริงกับการออกแบบ, การทดสอบวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, การทดสอบหาค่าความต้านทานด้วยวิธี V-I Methode, การทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน, การจำลองสภาวะการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปผลการดำเนินงานทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นในส่วนของการออกแบบตัวเครื่องโดยการใช้โปรแกรม, การจัดสร้างตัวเครื่องต้นแบบ, การสร้างชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมด้วยระบบสำรองไฟฟ้าฉุกเฉิน, การทดสอบวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, การจำลองการใช้งานโดยการใช้โปรแกรม Maxwell SV, การทดสอบการใช้งานจริงในการยกแผ่นเหล็ก และเศษเหล็กในอุตสาหกรรม, การทดสอบการใช้งานจริงโดยกำหนดแรงดันไฟฟ้าคงที่, การเปรียบเทียบการใช้งานจริงในการยกแผ่นเหล็กและเศษเหล็ก รวมถึงเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบใช้งานจริงกับการออกแบบ, การทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน แนวทางการพัฒนาและข้อเสนอแนะเพื่อนำไปสู่การพัฒนาต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในการเคลื่อนย้ายแผ่นเหล็กหรือเศษเหล็ก โดยใช้ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมด้วยระบบสำรองไฟฟ้าฉุกเฉินเพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับตัวเครื่อง รวมถึงได้มีการนำเอาโปรแกรม Maxwell SV ซึ่งเป็นการนำ FEM มาใช้ในการจำลองสถานะการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการใช้งานเครื่องตั้งนั้นในบทนี้จึงเป็นการอธิบายถึงทฤษฎีที่ใช้อ้างอิงของโครงการวิจัยนี้โดยละเอียด ซึ่งจะทำได้ ทำให้สามารถ ทำความเข้าใจในวิทยานิพนธ์ได้สะดวก ด้วยเหตุนี้จึงได้แบ่งหัวข้อทฤษฎีออกตามลำดับของการอ้างอิงตั้งแต่พื้นฐานของสนามแม่เหล็ก (Magnetic fields), กฎความเหนี่ยวนำฟาราเดย์ (Faraday Laws), เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Magnetic leakage or leakage flux), ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity), ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density), แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force), ความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability), ความต้านทานวงจรแม่เหล็ก (Reluctance), วัสดุแม่เหล็ก (Magnetic materials), เส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก ($B - H$ Curve), การสูญเสียในแกนเหล็ก, การหาสมการแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม, การหาสัดส่วนต่างๆของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม, และการประยุกต์ใช้ FEM ในทางวิศวกรรม

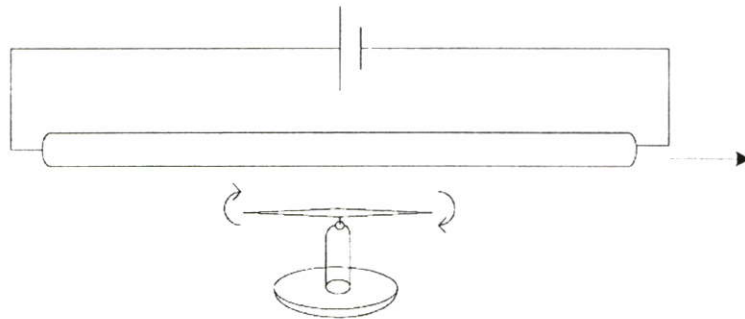
2.2 สนามแม่เหล็ก

ในปี ค.ศ. 1819 แฮนส์ คริสเตียน เออร์สเตด (Hans Christian Oersted) นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์กได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้า และพบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นเสมอ

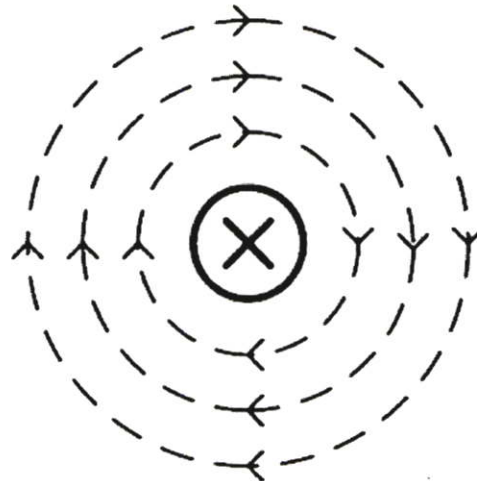
การทดลองของเออร์สเตดนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 โดยการนำเอาลวดตัวนำไฟฟ้า AB ต่อเข้ากับเซลล์ไฟฟ้า และให้ตัวนำนั้นวางขนานกับเข็มทิศที่วางอยู่ในตัวนำนั้น เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำจะทำให้เข็มทิศเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวขนานเดิม โดยเข็มทิศจะตั้งฉากกับตัวนำ AB แต่เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับทาง เข็มทิศจะเกิดการเบี่ยงเบนกลับทางไปอีกทางหนึ่ง ซึ่งทำมุมกับตำแหน่งเดิม 180 องศา และยังพบอีกว่าถ้าให้ลวดตัวนำทำมุม 90 องศากับเข็มทิศแล้ว เข็มทิศจะไม่เบี่ยงเบนไปในทิศทางใด ๆ เลย

เออร์สเตดยังได้ค้นพบอีกว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น เนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้านั้น ประกอบไปด้วยเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนหนึ่งจัดเรียงเป็นวงรอบ ๆ ตัวนำที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

นั้นโดยตัวนำจะเป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมเหล่านั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำนี้ถ้ายังอยู่ห่างตัวนำมากอำนาจแม่เหล็กยิ่งน้อย การเกิดสนามแม่เหล็กนี้สามารถแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ในแนวตั้งทะลุผ่านกระดาษแข็ง แล้วนำเข็มทิศวางไว้บนกระดาษแข็งตามตำแหน่งต่างๆ จะสังเกตเห็นว่าทิศทางจะหันเหเรียงตามกันไปเป็นวงกลมรอบตัวนำ โดยให้สีดำแทนด้วยขั้วเหนือ และสีขาวแทนด้วยขั้วใต้ หรืออาจใช้ผงเหล็กโรย โดยจะสังเกตเห็นว่าผงเหล็กเรียงตัวเป็นวงกลม



รูปที่ 2.1 การทดลองของเออสเตด

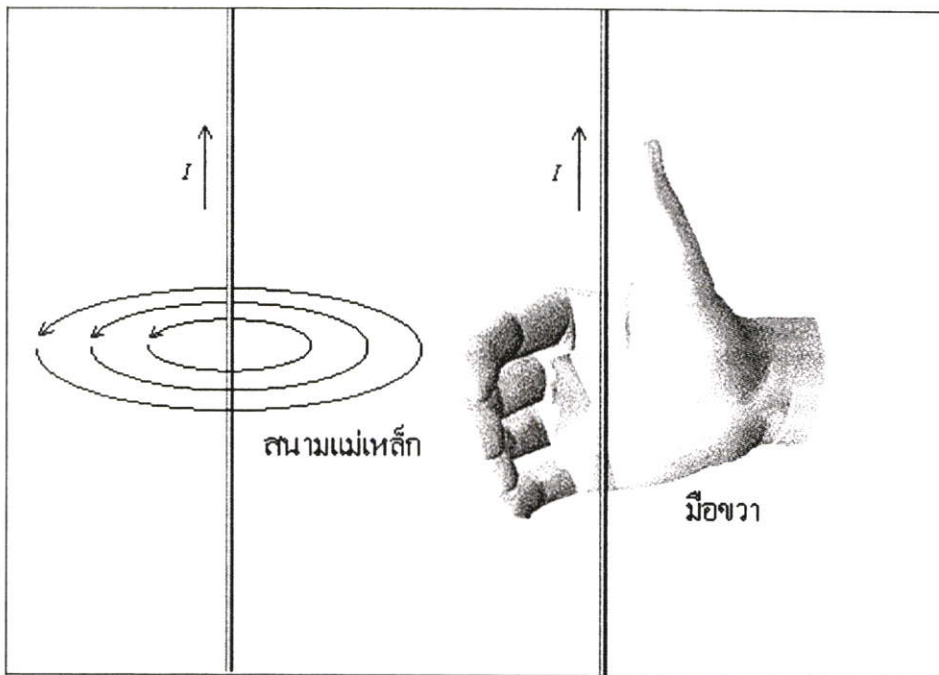


รูปที่ 2.2 การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ

การค้นพบของเออสเตด สามารถสรุปได้ดังนี้

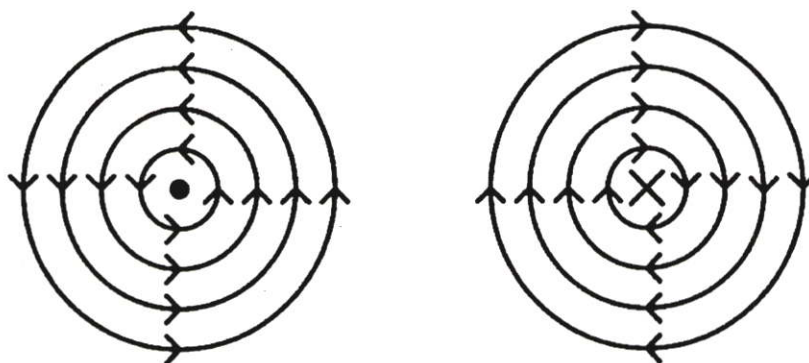
- ประจุที่เคลื่อนที่ หรือกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก เมื่อวางแม่เหล็กไว้ใกล้ ๆ เส้นลวดที่มีกระแสไหล จะเกิดแรงกระทำต่อแม่เหล็ก
- สนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงกระทำต่อประจุที่เคลื่อนที่ นั่นคือประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ จะมีทั้งสร้างสนามแม่เหล็ก และมีแรงมากระทำเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก

- กระแสในที่แห่งหนึ่งจะก่อให้เกิดแรงกระทำที่จุดที่มีกระแสไหลอีกแห่งหนึ่ง ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำไฟฟ้ากับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำสามารถหาได้โดยการใช้กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก คือให้ใช้มือขวากำรอบตัวนำไฟฟ้า โดยให้หัวแม่มือชี้ไปตามความยาวของตัวนำแทนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าและให้นิ้วทั้งสี่ที่เหลือกำรอบตัวนำโดยนิ้วทั้งสี่นั้นจะแทนทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำนั้นดังแสดงในรูปที่ 2.3

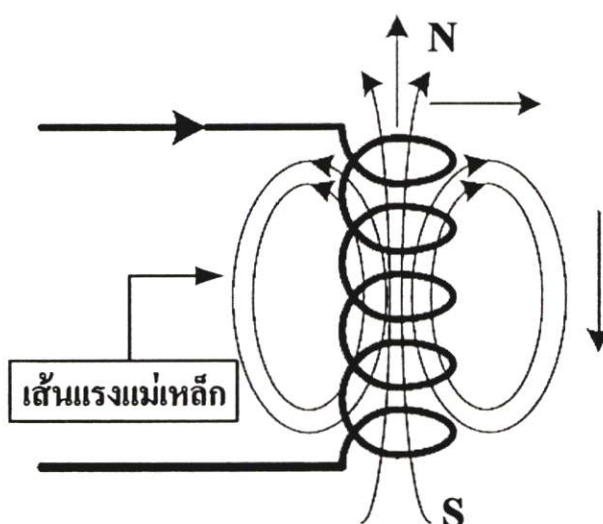


รูปที่ 2.3 กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก

ลูกศรที่ใช้ในวงจรไฟฟ้าจะใช้แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ไปตามความยาวของตัวนำไฟฟ้า โดยจะกำหนดให้ที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้าซึ่งเห็นกันลูกศรนั้นแทนด้วยเครื่องหมายกากบาท (×) ส่วนด้านที่กระแสไฟฟ้าไหลออกซึ่งเห็นเป็นหัวลูกศรแทนด้วยเครื่องหมายจุด (•) และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.4 และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



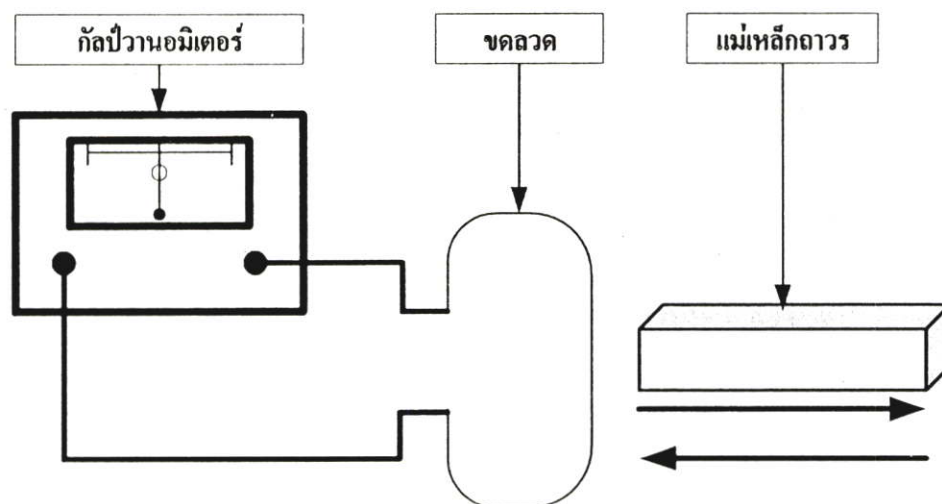
รูปที่ 2.4 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าและทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ



รูปที่ 2.5 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวด

2.3 กฎการเหนี่ยวนำฟาราเดย์ (Faraday Laws)

ในปี ค.ศ. 1831 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ คือ ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ได้ค้นพบหลักฐานสำคัญเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าคือ ถ้ามีขดลวด C ปลายของขดลวดต่อกับ กัลป์วานอมิเตอร์ G (แอมมิเตอร์ที่มีความไวสูง) แล้วนำแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่เข้าไปในขดลวด เข็มของกัลป์วานอมิเตอร์ จะบ่ายเบนไปทิศทางหนึ่งแสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด C หลังจากการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กถาวรหยุดลง เข็มของกัลป์วานอมิเตอร์ จะกลับมาชี้ที่ศูนย์ตามเดิมผลการทดลองพิสูจน์ได้ว่า มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับขดลวด C ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การทดลองของฟาราเดย์

ถ้าจับขั้วแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ ออกจากขดลวด C เข็มของกัลป์วานอมิเตอร์จะบ่ายเบนไปทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรกเช่นกัน ถ้าเราจับแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างกันจะพบว่ายิ่งมีความเร็วมากเข็มของกัลป์วานอมิเตอร์ก็ยิ่งเบี่ยงเบนมาก ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดก็ต้องมากขึ้นด้วย ผลที่ได้รับจากการทดลองเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าสรุปได้ดังนี้

- เมื่อลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดเส้นแรงแม่เหล็ก หรือ เส้นแรงแม่เหล็ก เคลื่อนที่ตัดลวดตัวนำจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด
- ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็ก และขึ้นอยู่กับทิศทางของขดลวดตัวนำที่เคลื่อนที่สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก
- ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราความเร็วที่ลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัด หรือถูกตัดโดยเส้นแรงแม่เหล็ก ดังนั้นกฎของฟาราเดย์จึงนำมาสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

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

เมื่อ e คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

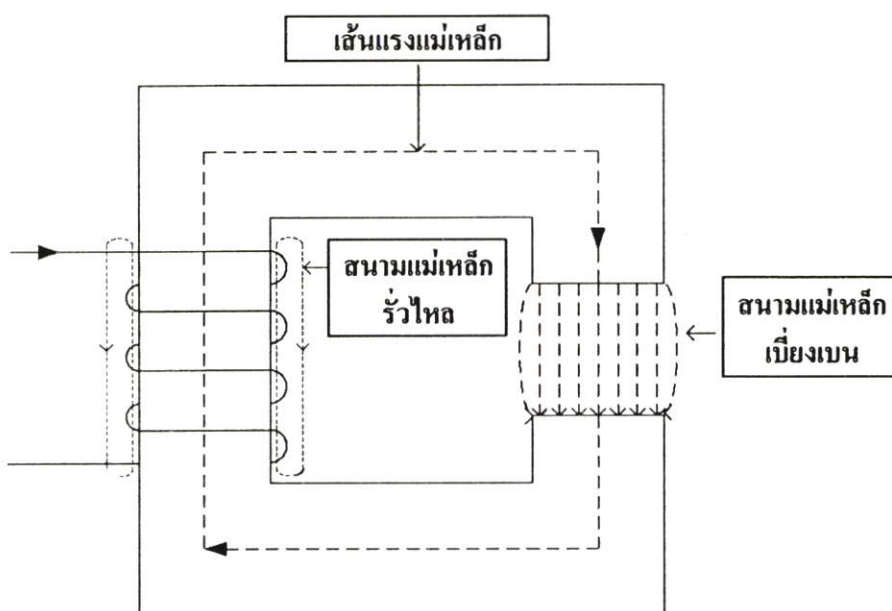
$d\phi$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก

dt คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของเวลา

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรหนึ่งมีค่าเป็นอัตราส่วนกับการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรนั้น

2.4 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Magnetic leakage or leakage flux)

จากลักษณะการกระจายสนามแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลเป็นเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนที่เกิดขึ้นโดยการใช้อากาศรอบ ๆ ขดลวดเป็นวงจรปิดแสดงในรูปที่ 2.7 เส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการและใช้ประโยชน์จริง ๆ ได้ก็คือเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านช่องอากาศเท่านั้น



รูปที่ 2.7 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

ส่วนเส้นแรงแม่เหล็กที่ไม่ผ่านช่องว่างอากาศแต่ใช้อากาศรอบ ๆ ขดลวดเป็นวงจรปิดจะเรียกเส้นแรงแม่เหล็กนี้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage flux) ซึ่งเราจะสามารถทราบได้ว่ามีการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กได้ จากการที่นำเอาเข็มทิศไปวางไว้ในบริเวณที่มีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล และก็จะเป็นการยากมากที่จะไม่ให้มีการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดที่อาศัยอำนาจแม่เหล็ก เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์อย่างใดจะมีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลประมาณ 15-20 %

ถ้ากำหนดให้

ϕ_l คือเส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นหรือเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั้งหมด

ϕ คือเส้นแรงแม่เหล็กที่สามารถใช้งานได้จริง

จากการทดลองของฮอปคินสัน (Hopkinson) พบว่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลจะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นมา ต่อ เส้นแรงแม่เหล็กที่สามารถใช้งานได้จริง โดยสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วนี้จะใช้สัญลักษณ์ λ และสามารถหาได้จากสมการดังนี้

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

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

ค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลนี้เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของฮอปคินสันถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลมาก นั่นแสดงว่าการออกแบบเครื่องใช้ไฟฟ้านั้นไม่ดี แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลต่ำ แสดงว่าการออกแบบไฟฟ้านั้นดี โดยเครื่องใช้ไฟฟ้าในปัจจุบันจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลประมาณ 1.1 ถึง 1.25

นอกจากจะมีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลแล้ว จากรูปจะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนกระจายออกนอกช่องอากาศ เส้นแรงแม่เหล็กนี้เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการ โป่งออก (Fringing flux) เส้นแรงแม่เหล็กนี้ไม่เกิดประโยชน์เช่นเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กได้แพร่กระจายออกไปบนพื้นที่ที่เกี่ยวข้องที่โตกว่า ดังนั้นจึงมีผลทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศมีค่าลดลง

2.5 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity; H)

คือแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวของวงจรแม่เหล็ก วงจรแม่เหล็กที่มีเส้นแรงแม่เหล็กสม่ำเสมอจะมีค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวคงที่ ตลอดแนวของเส้นแรงแม่เหล็กนั้นนั่นหมายความว่าความเข้มสนามแม่เหล็ก จะมีค่าคงที่ตลอดแนวความเข้มสนามแม่เหล็กนั้นด้วยหน่วยวัดของความเข้มสนามแม่เหล็ก คือ แอมแปร์/เมตร (A/m) ความเข้มสนามแม่เหล็กเราสามารถวัดได้หรือหาได้จากการนำเอาขั้วเหนือเดี่ยว (N) ที่มีแรงแม่เหล็ก 1 หน่วยขั้วไปวางไว้ ณ จุดใดจุดหนึ่งในสนามแม่เหล็ก ค่าของบงแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระทำของขั้วเหนือเดี่ยวกับสนามแม่เหล็กก็จะมีเป็นค่า ความเข้มสนามแม่เหล็กนั้นๆ โดยความเข้มสนาม แม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการคือ

$$H = \frac{\mathfrak{F}}{l} = \frac{Ni}{l} \quad (2.2)$$

เมื่อ H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก หน่วย แอมแปร์ต่อเมตร (A/m)

l คือ ความยาวของวงจรแม่เหล็ก หน่วย เมตร(m)

\mathfrak{I} คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force) หน่วย แอมแปร์เทอน (A-T)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด หน่วย รอบ (t)

i คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด หน่วย แอมแปร์ (A)

2.6 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density ; B)

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

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (2.3)$$

โดย B คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก หน่วย เทสลา (T) หรือ เวเบอร์ต่อตารางเมตร (wb/m^2)

ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็ก หน่วย เวเบอร์ (Wb)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็ก หน่วย ตารางเมตร (m^2)

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

ความสามารถในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก ของขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็กเป็นแหล่งที่ทำหน้าที่ส่งเส้นแรงแม่เหล็ก ให้เคลื่อนที่ผ่านไปในวงจรแม่เหล็กซึ่งคล้ายกับแรงดันไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ส่งกำลังให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปในโหลดหรือส่วนต่าง ๆ ของวงจรโดยแรงดันแม่เหล็กนั้นเป็นงานมีหน่วยวัดเป็นจูล (Joules) ซึ่งได้จากการนำเอาชั่วเหนือเดียวส่งผ่านเข้าไปในสนามแม่เหล็ก หน่วยของงานคิดเป็น จูล แต่หน่วยของแรงดันแม่เหล็ก ใช้ แอมแปร์เทิร์น (A-T) ซึ่งได้จากการเอากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดคูณกับจำนวนรอบของขดลวดที่พันไว้เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก แรงดันแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการ

$$\mathfrak{I} = m.m.f. = Ni \quad (2.4)$$

โดย \mathfrak{I} คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force) หน่วย แอมแปร์เทอน (A-T)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด หน่วย รอบ (T)

i คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด หน่วย แอมแปร์ (A)

2.8 ความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability; μ)

จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ที่แท้จริงมันจะขึ้นอยู่กับโมเลกุล ของแกนเหล็กว่าจะสามารถวางตัวในแนวเดียวกันได้ง่ายเพียงใด เรียกว่าความซึมซาบได้ ความซึมซาบได้นี้เป็น อัตราส่วนของความหนาแน่นแห่งเส้นแรงแม่เหล็กต่อความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mu = \frac{B}{H} = \mu_0 \mu_r \quad (2.5)$$

โดย μ_0 คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอวกาศ (free space) มีค่าคงที่เท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ หน่วย เฮนรีต่อเมตร

μ_r คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability) ไม่มีหน่วย

ความซึมซาบได้ คือ ความยินยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่าน โดยความซึมซาบของสุญญากาศ เป็น 1 ซึ่งปกติทั่วไปแล้วจะกล่าวถึงเฉพาะความซึมซาบได้สัมพัทธ์ ซึ่งหมายถึงตัวกลาง เช่น เหล็ก ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้เป็นที่เท่าของอากาศ เมื่อมีความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากัน

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

2.9 ความต้านทานวงจรแม่เหล็ก (Reluctance; \mathcal{R})

ความต้านทานแม่เหล็ก คือความต้านทานที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็กซึ่งอาจจะเป็นอากาศ หรือ วัสดุอะไรก็ได้ที่อยู่บริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กส่งอำนาจไปถึงซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุนั้น ๆ ความต้านทานนี้จะต้านทานการส่งเส้นแรงแม่เหล็กที่ออกจากแหล่งกำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กให้มีค่าลดลง ความต้านทานแม่เหล็กจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของแกนเหล็ก หรือวัตถุคือ l ที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่านไปเพื่อให้ครบวงจรของตัวเองเป็นส่วนกลับกับพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กคือ A ความต้านทานแม่เหล็กเป็นการแสดงคุณสมบัติของวัตถุที่มีการต้านต่อการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งคล้าย ๆ กับคุณสมบัติของวัตถุที่มีการต้านต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่าความต้านทาน โดยความต้านทานแม่เหล็กมีหน่วยวัดเป็น (A-c/wb)

ถ้าพิจารณาแกนแม่เหล็กที่มีพื้นที่หน้าตัด A ตารางเมตรและมีความยาวของเส้นรอบแกน โดยเฉลี่ย l เมตร พันด้วยขดลวดจำนวน N รอบ มีกระแสไหลผ่าน I แอมแปร์ ดังนั้น

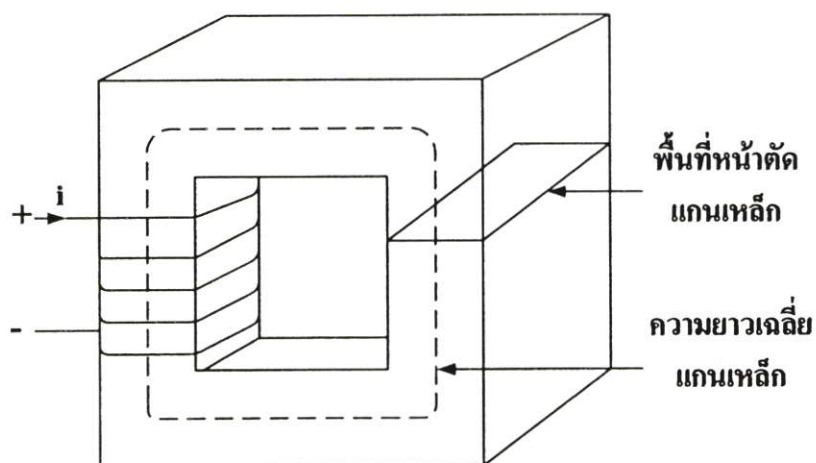
$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (2.6)$$

โดย \mathcal{R} คือ ค่าความต้านทานจรแม่เหล็ก หน่วย แอมแปร์ต่อเวเบอร์ (A/wb)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก หน่วย ตารางเมตร (m^2)

l คือ ความยาวของวงจรมแม่เหล็ก หน่วย เมตร(m)

μ คือ ความซึมซาบแม่เหล็ก



รูปที่ 2.8 แสดงการหาค่าความต้านทานวงจรมแม่เหล็ก

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบค่าวงจรไฟฟ้ากับวงจรมแม่เหล็ก

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

2.10 วัสดุแม่เหล็ก

2.10.1 ไดอะแมกเนติก (Diamagnetic) เป็นสารประเภทหนึ่งซึ่งประกอบไปด้วยอะตอมที่ไม่มีโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็กถาวรสารไดอะแมกเนติก เช่น ทอง เงิน เพชร และตะกั่ว เมื่อสารไดอะแมกเนติก อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอก จะเกิดโมเมนต์แม่เหล็กอ่อนขึ้นในทิศทางต้านต่อสนามแม่เหล็กภายนอกนั้น โดยผู้ค้นพบคือ ไมเคิลฟาราเดย์ เมื่อปี ค.ศ.1846 โดยสารมีค่า μ_r น้อยกว่า 1 เล็กน้อย

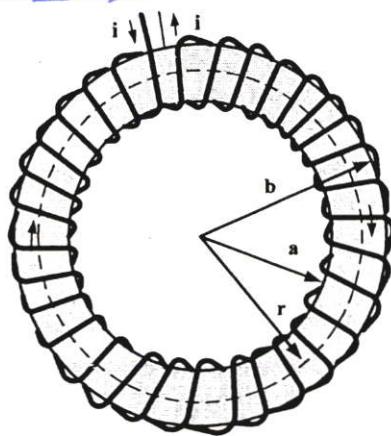
2.10.2 พาราแมกเนติก (Paramagnetic) หมายถึง การที่สนามแม่เหล็กจากภายนอกทำให้อะตอมเกิดแรงคู่ควบจัดเรียงขั้วให้หันไปในทิศทางที่เรียงตัวกันตามสนามแม่เหล็กจากภายนอกนั้น คุณสมบัติที่สำคัญของความเป็นแม่เหล็กแบบนี้คือ ค่าความเป็นแม่เหล็กของสารเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งสารนั้นวางอยู่ และเป็นสัดส่วนกลับกันกับอุณหภูมิผู้ค้นพบคือ ปีแอร์คูรี (Pierre Curie) เมื่อปี ค.ศ. 1895 โดยมีค่า μ_r มากกว่า 1 เล็กน้อยเช่น อากาศ อลูมิเนียม แมงกานีส ดังนั้นสารประเภทนี้จะกำหนดให้มีค่า μ ประมาณเท่ากับ μ_0

2.10.3 เฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) อะตอมของสารแม่เหล็กเฟอร์โร จะมีการจัดโมเลกุลขั้วคู่เหนี่ยวนำซึ่งกัน และกันให้มีทิศทางไปทางเดียวกันภายใต้แรงกระทำซึ่งกันและกัน คุณสมบัติที่สำคัญของสารแม่เหล็กเฟอร์โรคือ ค่าความเป็นแม่เหล็กของสารไม่เป็ปฏิภาคโดยตรงกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และสารอาจแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กได้ถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามแม่เหล็ก สารแม่เหล็กเฟอร์โรมีอยู่ 5 ธาตุ ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล กาโคลิเนียม และดีสโพรเซียมโดยสารทั้ง 5 นี้จะยังคงสภาพเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โร ตามที่อุณหภูมิยังไม่เกินค่าอุณหภูมิของคูรี (Curie temperature) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้จะเปลี่ยนเป็นสารแม่เหล็ก พาราแมกเนติกทันที โดยเหล็กนั้นมีอุณหภูมิของคูรี 1043 K คุณสมบัตินี้จะเกิดได้แม้ว่าอะตอมของธาตุทั้ง 5 นี้จะอยู่ในโครงสร้างของผลึกซึ่งไม่ใช่มีแค่ธาตุทั้ง 5 นี้อย่างเดียว โดยสารจะมีค่า μ_r มากกว่า 1 ($10^2 - 10^6$) ดังนั้นสารประเภทนี้จะเกิดค่าสนามแม่เหล็กได้มาก แต่อย่างไรก็ตามพฤติกรรมค่า μ_r จะมีค่าไม่คงที่เมื่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก H เปลี่ยนแปลงไป

2.11 เส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก (B - H Curve)

เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับความซึมซาบได้ดียิ่งขึ้นจึงของยกตัวอย่างของสนามแม่เหล็กที่เกิดกับขดลวดที่เป็นวงกลมเรียกว่า ทอรอยด์ (toroid) ดังรูป 2.9

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.9 ลักษณะของทอรอยด์

การที่ขดลวดโซลินอยด์ให้เป็นวงกลมนั้นมีความยาวเฉลี่ย 1 หน่วยความยาว สนามแม่เหล็กภายในไม่เปลี่ยนค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก แต่ถ้านำเอาแกนเหล็กมาใส่ภายในขดโซลินอยด์ จะทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนไป และค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กนี้ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นหลายร้อยเท่า ของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเดิมความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่าเท่ากับ μ_r ซึ่งหมายความว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าของ μ_r หรือ $\frac{\mu}{\mu_0}$ ของสารนั้น ๆ

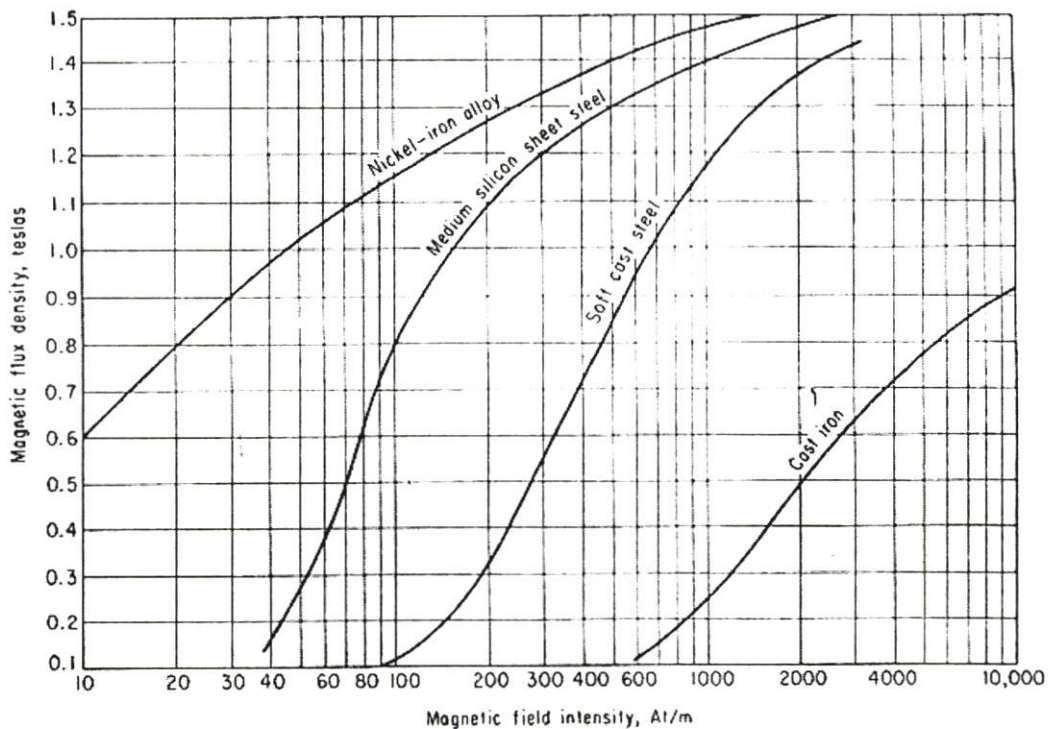
เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) จากรูปที่ 2.9 ขดลวดทอรอยด์นั้นถ้าเพิ่มกระแสไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นตาม ถ้าเราเริ่มต้นจากกระแสเป็นศูนย์และมีเครื่องมือวัดค่าเส้นแรงแม่เหล็กในแกนทอรอยด์ เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก กับ ความเข้มสนามแม่เหล็กโดยจากรูปที่ 2.9 ถ้าเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแกนเหล็ก เช่น ทอรอยด์ เราจะได้เส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 2.10 แต่ความชันของเส้นโค้งจะไม่คงที่เมื่อมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นค่า μ จะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดเมื่อค่า μ เพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดแล้ว การเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็ก ก็จะไม่ทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นมากนัก จนกระทั่งเกิดการอิ่มตัว จะทำให้ค่า μ ลดลงเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอีกดังแสดงในรูป 2.10 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก กับความเข้มสนามแม่เหล็กบางครั้งเรียกว่า ($B-H$ Curve) หรือเส้นโค้งการอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็กหรือเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก

- สารใดมีค่า μ_r มากกว่า 1 เล็กน้อยสารนั้นจัดเป็นชนิดพาราแมกเนติก (Paramagnetic) เช่น อากาศ, ไม้
- สารใดมีค่า μ_r น้อยกว่า 1 สารนั้นจัดเป็นสารชนิด ไดอาแมกเนติก (Diamagnetic) เช่น

พวกอะลูมิเนียม หรือสารตัวนำสมบรูณ์ ซึ่งมี $\mu_r = 0$

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

ค่าความสัมพันธ์จะไม่เป็นเส้นตรงและจะมีระดับหนึ่ง ถึงแม้ว่าเราจะเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กให้มากขึ้นไปอีกแต่ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก จะไม่เปลี่ยนแปลงที่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก ในจุดนี้เราเรียกว่าจุดอิ่มตัวของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของสารนั้นและค่าของ μ_r ที่มีขนาดสูงที่สุดของสารใดๆ จะสามารถหาจากการลากเส้นตรงไปสัมผัสกับเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H



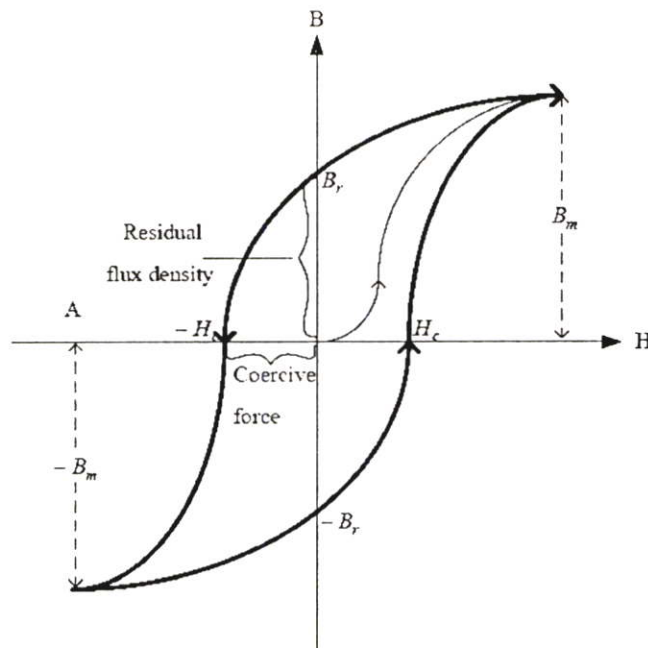
รูปที่ 2.10 เส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก (B-H Curve) ของสารแม่เหล็กชนิดต่างๆ

2.12 การสูญเสียในแกนเหล็ก

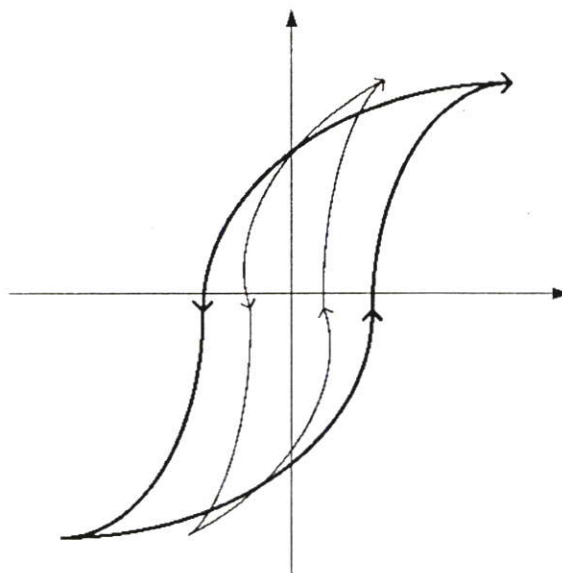
การสูญเสียในแกนเหล็กของวงจรแม่เหล็กทุกชนิด จะถูกจ่ายทิ้งออกมาเป็นรูปพลังงานความร้อนซึ่ง เป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กภายในเวลาแต่ละรอบประกอบไปด้วยการสูญเสียจากฮิสเตอรีซิส และการสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กการสูญเสียนี้นั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารแม่เหล็กที่ใช้ต่าง ๆ เช่น ความถี่ของระบบไฟฟ้า ส่วนผสมอัตราส่วนของซิลิกอน ความหนาแน่นของแผ่นเหล็ก เป็นต้น

2.12.1 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss)

ถ้าป้อนค่าความเข้มสนามแม่เหล็กให้กับสารแม่เหล็ก จนถึงช่วงที่เกิดการอิ่มตัวนั้นเมื่อทำการลดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กลง จะทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กลดลง แต่จะไม่เท่ากับตอนที่เพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังนั้นเมื่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กลดลงจนเหลือศูนย์จะมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเหลืออยู่เรียกว่าค่าสนามแม่เหล็กตกค้าง (residual flux density B_r) ดังรูปที่ 2.11 ถ้าต้องการลดค่า B_r ลงให้เป็นศูนย์จะต้องป้อนค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามกับสารแม่เหล็กนั้น ค่า H_c นั้นเรียกว่าค่า coercive force ขณะที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กยังคงเพิ่มต่อไปในทิศทางลบ สารแม่เหล็กจะเกิดสนามแม่เหล็กที่ขั้วตรงข้ามจากเดิม และเมื่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กลดลงจนเป็นศูนย์อีกครั้งหนึ่งจะทำให้เกิดค่า $-B_r$ ซึ่งต้องใช้ค่า $+H$ เพื่อลดค่า $-B_r$ ให้เป็นศูนย์ ปรากฏการณ์เช่นนี้ต่อไปเรื่อย ๆ จนเกิดวงที่เรียกว่าวงฮิสเทอรีซิส จากรูปที่ 2.12 แสดงถึงสภาพการเป็นแม่เหล็กของสารแม่เหล็กแบบอ่อน (soft magnetic material) การเป็นแม่เหล็กจะเกิดวงฮิสเทอรีซิสที่เล็ก และแคบในขณะที่สารแม่เหล็กที่แข็งหรือยาก (Hard magnetic material) การเป็นแม่เหล็กจะเกิดวงฮิสเทอรีซิสที่ใหญ่กว่า



รูปที่ 2.11 วงฮิสเทอรีซิสของสารเฟอร์โรแมกเนติก



รูปที่ 2.12 วงฮิสเตอร์ีซิสของสาร เฟอร์โรแมกเนติก ชนิดอ่อน (Soft) และ ชนิดแข็ง (Hard)

การใช้ไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำวงจรตลอดที่พันรอบแกนเหล็ก ให้เกิดอำนาจแม่เหล็กในแต่ละรอบ (Cycle) การสูญเสียในแกนเหล็ก อันเกิดจากฮิสเตอร์ีซิส จะเท่ากับพื้นที่ภายในวงฮิสเตอร์ีซิสนั้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และชนิดของสารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกน ดังนั้นค่าโดยประมาณของการสูญเสียจากฮิสเตอร์ีซิสของสารแม่เหล็กที่ความถี่ f หาได้จาก

$$P_h = K_h f B_m^n \quad (2.7)$$

โดยที่ P_h คือ การสูญเสียจากฮิสเตอร์ีซิส

K_h คือ ค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็กที่ทำการทดลอง

f คือ ความถี่ไฟฟ้าของแหล่งจ่าย หน่วย เฮิร์ต (Hz)

n คือ สไตน์เมทซ์เอกซ์โพเนนท์ (Steinmetz exponent) ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 - 2.0 แต่โดยทั่วไปใช้ $n=1.6$

2.12.2 การสูญเสียเนื่องจากกระแไหลวน (Eddy Current Loss)

กระแสไหลวนจะทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) อยู่ภายในสารแม่เหล็ก โดยถ้าทำให้สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านตัวนำ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในตัวนำนั้น แต่ถ้าเราใส่แกนเหล็กเข้าไปในขดลวดที่มีกระแสสลับไหลอยู่ ก็จะทำให้เกิด เส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะของรูปไซน์ด้วย การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่

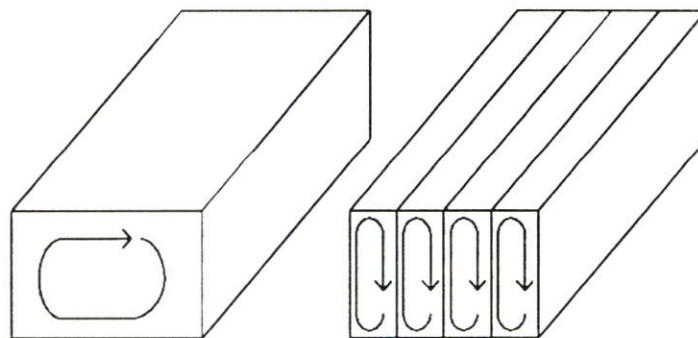
เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า เหนือวงนำขึ้นภายในแกนเหล็ก และแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในแกนเหล็กนี้จะเป็นตัวทำให้เกิดมีกระแสไหลวนภายในแกนเหล็กนั้น ซึ่งเรียกระแสไฟฟ้านี้ว่า กระแสไหลวน กระแสไหลวนจะเกิดขึ้นในแกนเหล็กทุกๆ ชนิดของสารที่เป็นตัวนำไฟฟ้า กระแสนี้จะไหลผ่านความต้านทานไฟฟ้าของสารแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากกำลังสูญเสียซึ่งมีค่า I^2R และเนื่องจากความต้านทานของเหล็กมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับสารชนิดอื่น ๆ ดังนั้นกำลังสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กนี้จึงมีค่าค่อนข้างสูง และขนาดกระแสไหลวนจะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของแกนเหล็ก การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงแบบรูปคลื่นไซน์สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$P_e = K_e f^2 B_m^2 \quad (2.8)$$

โดย P_e คือ การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน หน่วย วัตต์ (W)

K_e คือ ค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็ก

ขนาดของกระแสไหลวนขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ความถี่ และค่าความต้านทานไฟฟ้าของแกนเหล็ก การลดการสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนสามารถทำได้ โดยการใช้แกนเหล็กที่สร้างเป็นแผ่นบางๆ (Laminated sheet steel) อัดซ้อนเข้าด้วยกัน โดยในแต่ละแผ่นจะใช้สารฉนวนเคลือบผิวที่มีค่าความต้านทานสูง เช่น ฉาบด้วยน้ำมันวานิช ซึ่งจะทำให้กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก ที่ใช้แผ่นเหล็กบางๆ อัดซ้อนกันมีค่าลดลงอย่างมาก ดังนั้นจึงทำให้กำลังสูญเสียอันเนื่องมาจากการเกิดกระแสไหลวนมีค่าลดลง หรือมีค่าน้อยลงและยังตามไปด้วย กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กที่มีเนื้อเดียวกันตลอด ดังนั้นเราจึงไม่นำเอาแกนเหล็กที่มีเนื้อเดียวกันตลอดหรือแกนเหล็กตันมาใช้กับแรงดันแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับ และในแกนเหล็กที่ใช้แผ่นบางๆ อัดซ้อนกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.13

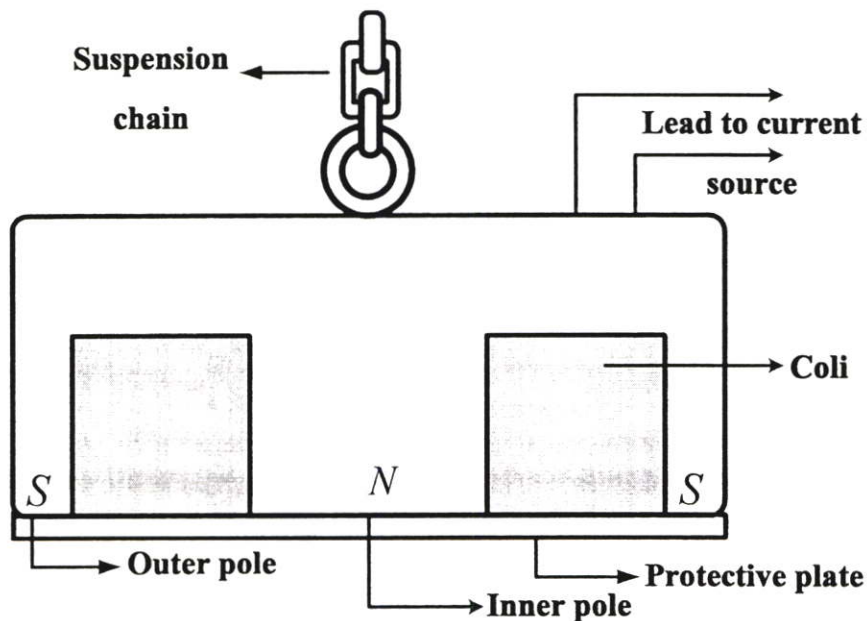


รูปที่ 2.13 การเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

การสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์ซิส และกระแสไหลวน รวมกันเรียกว่า การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) P_c

2.13 การหาสมการแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องยกของหนัก

กลไกการเคลื่อนย้ายเหล็ก โดยการใช้อุปกรณ์ยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถอธิบายได้โดยเริ่มจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในขดลวด (Coil) ซึ่งพันอยู่รอบแกนเหล็กวงใน (Inner pole) ของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งขดลวดนี้จะต้องถูกป้องกันการกระแทกจากภายนอกในขณะที่ใช้งานเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยแผ่นป้องกัน (Protective plate) เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายเข้าสู่ขดลวดจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่แกนเหล็กวงใน ส่งผลให้พื้นผิวหน้าสัมผัสแกนเหล็กวงใน กลายสภาพเป็นขั้วแม่เหล็กและในขณะเดียวกันก็ส่งผลทำให้พื้นผิวหน้าสัมผัสแกนเหล็กวงนอก (Outer pole) กลายเป็นขั้วแม่เหล็กซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามตรงกันข้ามตามทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ส่งเข้ามา โดยขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดย ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux) ที่เกิดขึ้นจะวิ่งจากขั้วแม่เหล็กขั้วหนึ่งสู่ขั้วแม่เหล็กขั้วได้ โดยการพุ่งของเส้นแรงแม่เหล็กจะพุ่งออกจากพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในสู่พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอกผ่านแผ่นป้องกันซึ่งจะทำให้เกิดแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic force) ในการยกวัตถุซึ่งเหล็กได้โดยสามารถแสดงโครงสร้างภายในของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบนี้

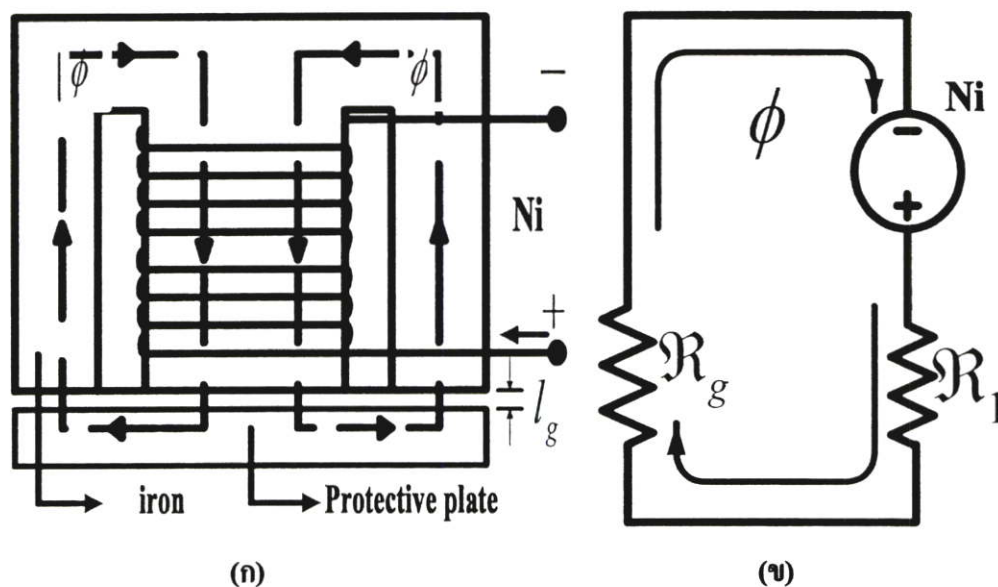


รูปที่ 2.14 โครงสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม

จากรูป 2.14 จะแสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบโครงสร้างของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมซึ่งจะมีส่วนประกอบหลักดังนี้

- ขดลวด (Coil) ซึ่งพันอยู่โดยรอบแกนเหล็กวงในเพื่อทำหน้าที่รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและเหนี่ยวนำสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น
- แกนเหล็กวงใน (Inner pole) คือแกนกลางของตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมทำหน้าที่รับแรงกระทบกระเทือนทางกลที่ผ่านมาจากแผ่นป้องกันขณะใช้งานและกำเนิดขั้วแม่เหล็ก
- แกนเหล็กวงนอก (Outer pole) คือขอบนอกของแกนเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมทำหน้าที่รับแรงกระทบกระเทือนทางกลที่ผ่านมาจากแผ่นป้องกันขณะใช้งานและกำเนิดขั้วแม่เหล็กขั้วตรงข้ามกับแกนเหล็กวงใน
- แผ่นป้องกัน (Protective plate) ทำหน้าที่แทนช่องว่างอากาศ (Air gap) และป้องกันแรงกระทบกระเทือนทางกล
- โซ่รับน้ำหนัก (Suspension chair) ทำหน้าที่รับน้ำหนักตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมทั้งในขณะมีโหลดและไม่มีโหลด

จากรูป 2.14 สามารถนำมาเขียนวงจรแม่เหล็ก และวงจรแม่เหล็กสมมูลได้ดังนี้



รูปที่ 2.15 วงจรแม่เหล็ก และวงจรแม่เหล็กสมมูลของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม

จากรูปที่ 2.15 (ก) แสดงให้เห็นถึงวงจรแม่เหล็กที่มีขดลวดพันรอบแกนเหล็กซึ่งทำจากเหล็ก SS41 (เหล็กเหนียว) จำนวน N รอบ โดยมีกระแสที่ป้อนเข้าสู่ขดลวดคือ i และมี l_g เป็นช่องว่างอากาศและแผ่นป้องกัน (Protective plate) ในส่วนรูป 2.15 (ข) แสดงวงจรแม่เหล็กสมมูลของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม โดยมีความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็ก (Reluctance) \mathcal{R}_1 และความต้านทานแม่เหล็กของช่องอากาศคือ \mathcal{R}_g ซึ่งมีเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux) ϕ วิ่งผ่านพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงใน A_1 และพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก A_2 ซึ่งจากวงจรแม่เหล็กสมมูลสามารถนำมาหาสมการของแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ โดยที่ค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศมีค่ามากกว่าของแกนเหล็ก ($\mathcal{R}_g > \mathcal{R}_c$) ดังนั้นจะสามารถหาสมการของแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้จาก

$$\text{โดยที่} \quad \phi = \frac{Ni}{\mathcal{R}_g}$$

$$\text{จาก} \quad \mathcal{R} = \frac{l}{\mu A}$$

โดยเมื่อกำหนดให้พื้นที่หน้าตัด $A_1 \approx A_2$ ดังนั้นจะสามารถหาความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศได้จากสมการ

$$\mathcal{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_1} + \frac{l_g}{\mu_0 A_2}$$

และจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนสมการได้ดังนี้

$$dW_{elec} + dW_{mech} = dW_{fld} + dW_{loss}$$

ซึ่งถ้าไม่คิดการสูญเสียพลังงาน ในระหว่างการเปลี่ยนรูปพลังงานและเป็นการเปลี่ยนรูปจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยที่ $dW_{elec} > 0$ และ $dW_{mech} < 0$ [2] จะได้สมการ

$$dW_{fld} = d\left(\frac{1}{2} \mathcal{R} \phi^2\right) = \frac{1}{2} \frac{\phi^2 dl}{\mu A} + \frac{l \phi d\phi}{\mu A}$$

เมื่อทำการรวมสมการทั้งหมดและทำการจัดสมมูลของสมการโดยที่ $dW_{mech} = f_{fld} dx$ [2] จะทำให้ได้สมการของแรงที่เกิดจากเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้

$$f_g = \frac{\phi^2}{2\mu_0 A_1} + \frac{\phi^2}{2\mu_0 A_2}$$

ซึ่งเมื่อแทนค่าเส้นแรงแม่เหล็กและความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศได้
สมการของแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดังนี้[9]

$$f_g = \left[\frac{(Ni)^2}{\left(\frac{l_g}{\mu_0 A_1} + \frac{l_g}{\mu_0 A_2} \right)^2} \right] + \left[\frac{(Ni)^2}{\left(\frac{l_g}{\mu_0 A_1} + \frac{l_g}{\mu_0 A_2} \right)^2} \right] \quad (2.9)$$

โดย f_g คือ แรงยกที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า หน่วย นิวตัน (N)

Ni คือ แรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetomotive force) หน่วย
แอมแปร์เทอน (A-T)

l_g คือ ระยะห่างของช่องว่างอากาศ หน่วย เมตร (m)

μ_0 คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอวกาศ (free space) มีค่าคงที่เท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$
หน่วย เฮนรีต่อเมตร

μ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก หน่วย เฮนรีต่อเมตร

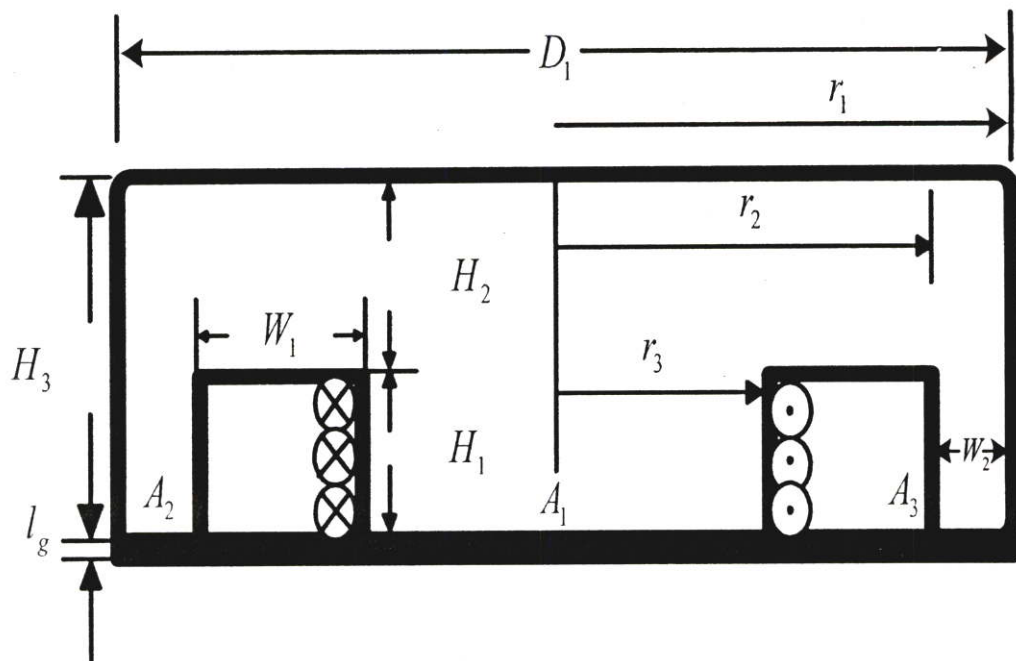
A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงใน หน่วย เมตร (m)

A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก หน่วย เมตร (m)

ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux) หน่วย เวเบอร์(Weber)

2.14 การหาขนาดของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม

เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนสามารถใช้ได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร รวมถึงทนต่อการกระทบกระเทือนทางกล ทั้งนี้เนื่องมาจากตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม ในการใช้งานหน้าสัมผัสจะต้องสัมผัสและกระแทกกับแผ่นเหล็กหรือเศษเหล็กซึ่งอาจจะวางเป็นระเบียบหรือไม่เป็นระเบียบซึ่งถ้าเป็นในกรณีเศษเหล็กส่วนแหลมคมของเศษเหล็กเหล่านั้นอาจจะทะลุแผ่นป้องกันหรือตัวเครื่องยกของหนักได้โดยง่ายซึ่งด้วยตัวเครื่องที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนจึงทำให้ตัวเครื่องสามารถทนต่อการใช้งานดังที่กล่าวมาซึ่งสามารถแสดงโครงสร้างของเครื่องได้ดังนี้



รูปที่ 2.16 สัดส่วนต่างๆของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม

โดยที่

- D_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องหน่วย เมตร
- r_1 คือ รัศมีของเครื่องหน่วย เมตร
- r_2 คือ รัศมีในของแกนเหล็กวงนอกหน่วย เมตร
- r_3 คือ รัศมีแกนเหล็กวงในหน่วย เมตร
- A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในหน่วย ตารางเมตร
- A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอกหน่วย ตารางเมตร
- A_3 คือ พื้นที่หน้าตัดส่วนร่องสลีตหน่วย ตารางเมตร
- H_1 คือ ความลึกร่องสลีตหน่วย เมตร
- H_2 คือ ความสูงแกนเหล็กหน่วย เมตร
- H_3 คือ ความสูงเครื่องหน่วย เมตร
- l_g คือ ความหนาของแผ่นป้องกันหน่วย เมตร
- W_1 คือ ความกว้างร่องสลีตหน่วย เมตร
- W_2 คือ ความกว้างของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก (0.02) เมตร

ในที่นี้ได้กำหนดให้ความกว้างพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก W_2 มีค่าเท่ากับ 0.02 เมตร โดยเนื่องจากการให้พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงใน A_1 และพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก A_2 มีพื้นที่เท่ากันเพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็ก(Magnetic flux) สามารถไหลจากพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กทั้ง

สองได้สม่ำเสมอและทั่วถึงอีกทั้งยังกำหนดเพื่อต้องการให้ความกว้างของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอกมีพื้นที่น้อยที่สุดซึ่งเพียงพอที่จะสามารถยึดแผ่นป้องกัน (Protective plate) ให้ติดกับหน้าสัมผัสของเครื่องได้โดยผ่านอุปกรณ์ยึดติดทางกล ทั้งนี้สามารถหาพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นพื้นผิววงกลมได้จาก

$$A_1 = \pi r^2 \quad (2.10)$$

โดย A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในของเครื่อง หน่วย (m^2)

π คือ ค่าคงที่ไม่มีหน่วย ($\pi = \frac{22}{7}$)

r คือ รัศมีของแกนเหล็กวงในของเครื่อง หน่วย (m)

เมื่อใช้ทองแดงเป็นขดลวดตัวนำในการนำกระแสให้กับเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมดังนั้นสามารถหาค่าความต้านทานขดลวดได้คือ

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.11)$$

โดย R คือ ค่าความต้านทานของขดลวดตัวนำ หน่วย โอห์ม (Ω)

ρ คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของวัสดุ หน่วย โอห์มเมตร ($\Omega - \text{m}$)

l คือ ความยาวเฉลี่ยของตัวนำ หน่วย เมตร (m)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ หน่วย ตารางเมตร (mm^2)

ทั้งนี้ก่อนที่จะหาค่าของความต้านทานของขดลวดตัวนำได้นั้น จะต้องหาค่าของความยาวเฉลี่ยของตัวนำก่อนโดยจากรูปที่ 2.16 จะแสดงให้เห็นถึงระยะ r_2 และ r_3 ซึ่งสามารถนำมาหาค่าของความยาวเฉลี่ยขดลวดตัวนำได้จากสมการดังนี้

$$l = \left[\left(\left(\frac{r_2 - r_3}{2} \right) + r_3 \right) 2\pi \times N \right] \quad (2.12)$$

โดย l คือ ความยาวเฉลี่ยของตัวนำ หน่วย เมตร (m)

r_2 คือ รัศมีในของแกนเหล็กวงนอกหน่วย เมตร

r_3 คือ รัศมีแกนเหล็กวงในหน่วย เมตร

N คือ จำนวนรอบขดลวด

เนื่องจากต้องการให้สามารถสร้างบอบป็นและพันขดลวดได้ง่าย ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าอัตราส่วนความหนาแน่นร่องสลิตกับพื้นที่หน้าตัดของตัวนำมีค่าเท่ากับ 0.4 เพื่อที่จะสามารถหาขนาดร่องสลิตได้ดังสมการ

$$\text{ความหนาแน่นร่องสลิต} = \left[\frac{\text{พื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำ}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของร่องสลิต (Slot area)}} \right] = 0.4$$

$$\text{ดังนั้น} \quad (\text{slot area}) = \frac{\text{conductor area}(\text{mm})^2}{0.4} \quad (2.13)$$

โดย slot area คือ พื้นที่หน้าตัดร่องสลิต หน่วย ตารางเมตร (mm^2)
 Conductor area คือ พื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำ หน่วย (mm^2)

โดยเมื่อสามารถหาค่าของพื้นที่ร่องสลิตได้ต่อจะนั้นจะสามารถนำค่าที่ได้มาหาขนาดความลึกของร่องสลิตโดยสามารถหาได้จากสมการ

$$H_1 = \left[\frac{(N \times \text{slot area})}{W_1} \right] \quad (2.14)$$

โดย H_1 คือ ความลึกร่องสลิตหน่วย เมตร
 N คือ จำนวนรอบขดลวด
 W_1 คือ ความกว้างร่องสลิตหน่วย เมตร
 slot area คือ พื้นที่หน้าตัดร่องสลิต หน่วย ตารางเมตร (mm^2)

เมื่อได้ค่าความลึกร่องสลิตแล้วจะต้องทำการหาค่าความสูงของแกนเหล็ก (H_2) เพื่อที่จะนำไปสู่การหาค่าความสูงรวมทั้งหมดของเครื่อง โดยกำหนดให้พื้นที่ผิวแกนเหล็กซึ่งเป็นทรงกระบอกจะสามารถหาได้จากสมการ $2\pi r_2 H_2$ ซึ่งมีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าตัด A_1 ดังนั้นจะสามารถหาค่าความสูงแกนเหล็กได้จากสมการ

$$H_2 = \left[\frac{A_1}{(2 \times \pi \times r_2)} \right] \quad (2.15)$$

- โดย H_2 คือ ความสูงแกนเหล็กหน่วย เมตร
 A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในหน่วย ตารางเมตร
 r_2 คือ รัศมีในของแกนเหล็กวงนอกหน่วย เมตร

เมื่อสามารถหาค่าความสูงแกนเหล็กและความลึกร่องสลีตดังนั้นจะสามารถนำค่าทั้งสองที่ได้มาหาค่าความสูงรวมของเครื่องได้จากสมการ

$$H_3 = (H_1 + H_2) \quad (2.16)$$

- โดย H_3 คือ ความสูงเครื่องหน่วย เมตร
 H_1 คือ ความลึกร่องสลีตหน่วย เมตร
 H_2 คือ ความสูงแกนเหล็กหน่วย เมตร

บทที่ 3

การออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แบบวงกลมขนาดเล็ก

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการศึกษา ออกแบบ และจัดสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กต้นแบบ โดยจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ ในส่วนแรกจะเป็นส่วนของการศึกษาและออกแบบสร้างในส่วนของตัวเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าและในส่วนที่สองจะเป็นในส่วนการออกแบบสร้างชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีประสิทธิภาพสูง และมีระบบเบตเตอร์ชาร์ตเจอร์สำหรับใช้ในกรณีฉุกเฉินหากเกิดปัญหาแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับเครื่องได้ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะเป็นการมุ่งเน้นที่จะสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กต้นแบบ โดยจะออกแบบให้สามารถยกเหล็กน้ำหนักสูงสุดที่ 250 kg ซึ่งทั้งนี้สมารถที่จะแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.1



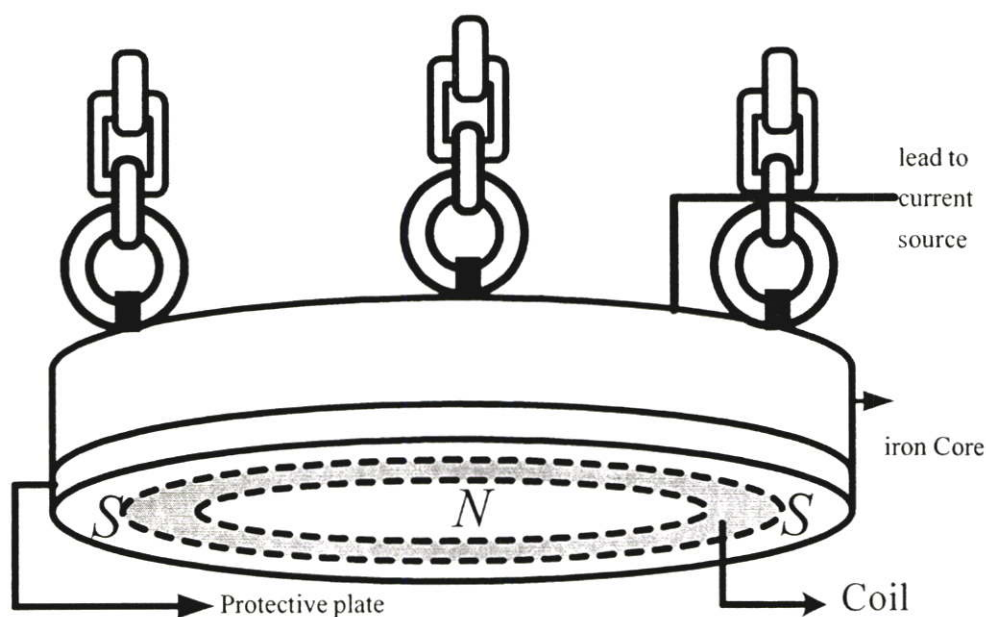
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมโครงสร้างการทำงานของเครื่อง

จากไดอะแกรมจะแสดงโครงสร้างการทำงานของเครื่องซึ่งจะแบ่งเป็น 3 ส่วนคือส่วน A จะเป็นส่วนของตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่สัมผัสกับแผ่นเหล็กหรือเศษเหล็กเพื่อที่จะใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการยกแผ่นเหล็กหรือเศษเหล็กขึ้นมาส่วน B เป็นส่วนของชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่รับมาจากการไฟฟ้าซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินซึ่งทำหน้าที่ในการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีที่ส่วน C ซึ่งเป็นส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจากการไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายได้

3.2 การออกแบบตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม

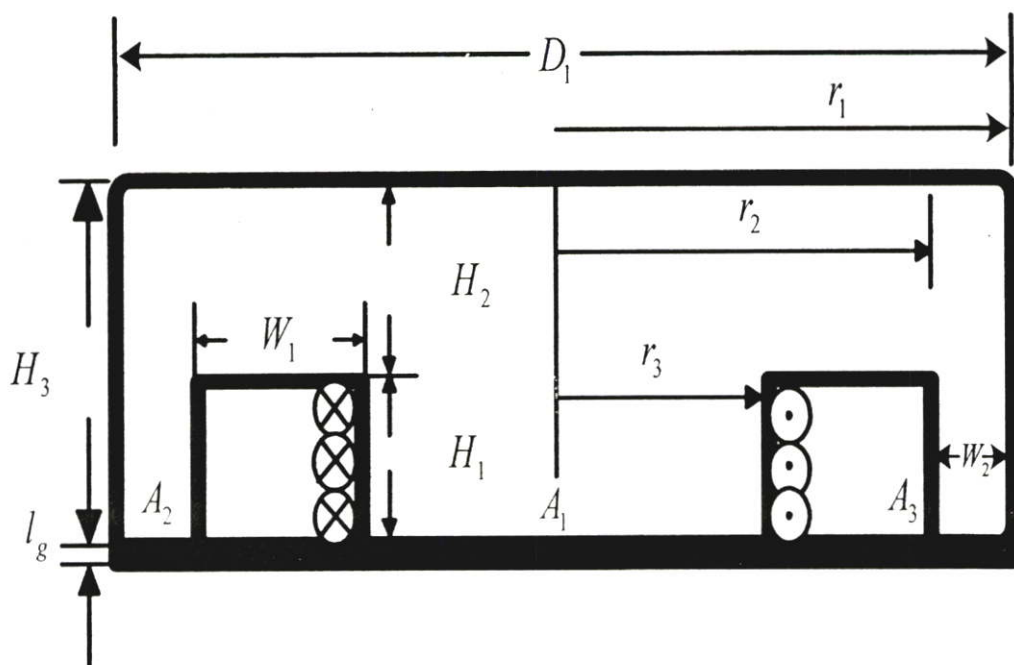
3.2.1 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบ และจัดสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยตัวเครื่องนั้นในส่วนของแกนเหล็กจะทำจากเหล็กเหนียว SS41 ซึ่งเป็นเหล็กที่หาได้ง่ายทั่วไป และมีราคาถูกลง ซึ่งในที่นี้นั้นเนื่องจากเหล็กเป็นเหล็กคุณภาพต่ำซึ่งมีราคาถูกลงและหาได้ง่ายดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าไม่เกิน 0.5 เทสลา โดยโครงสร้างแกนเหล็กจะถูกนำมาทำลึงเซาะร่องสำหรับพันขดลวดทองแดง และในส่วนที่จะต้องสัมผัสกับแผ่นเหล็กหรือเศษเหล็กที่จะต้องยกก็จะป้องกันขดลวดด้วยแผ่นอะลูมิเนียม ซึ่งทำหน้าที่แทนช่องว่างอากาศ และทำหน้าที่เห็นแผ่นป้องกัน (PROTECTIVE PLATE) ขดลวดจากการกระทบกระเทือนทางกล ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ซึ่งจากโครงสร้างพื้นฐานสามารถแสดงสัดส่วนที่สำคัญของเครื่องได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 สัดส่วนต่างๆ ของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม

โดยที่

- D_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องหน่วย เมตร
- r_1 คือ รัศมีของเครื่องหน่วย เมตร
- r_2 คือ รัศมีในของแกนเหล็กวงนอกหน่วย เมตร
- r_3 คือ รัศมีแกนเหล็กวงในหน่วย เมตร
- A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในหน่วย ตารางเมตร
- A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอกหน่วย ตารางเมตร
- A_3 คือ พื้นที่หน้าตัดส่วนร่องสลีตหน่วย ตารางเมตร
- H_1 คือ ความลึกร่องสลีตหน่วย เมตร
- H_2 คือ ความสูงแกนเหล็กหน่วย เมตร
- H_3 คือ ความสูงเครื่องหน่วย เมตร
- l_g คือ ความหนาของแผ่นป้องกันหน่วย เมตร
- W_1 คือ ความกว้างร่องสลีตหน่วย เมตร
- W_2 คือ ความกว้างของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก (0.02) เมตร

โดยในการออกแบบจะเริ่มจากการกำหนดพิกัดน้ำหนักที่ต้องการให้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถยกได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการให้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถยกเหล็กที่น้ำหนัก 250 kg ได้ ดังนั้นจึงมีขั้นตอนในการหาขนาดรวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบเพื่อสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมดังนี้

1. การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในการคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_1) ของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องออกแบบให้สามารถยกเหล็กน้ำหนัก 250 kg ได้ซึ่งสามารถคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ดังนี้[6]

$$\begin{aligned} \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง } D_1 &= \sqrt{\text{น้ำหนักที่ต้องการยก(ton)}} & (3.1) \\ &= \sqrt{(0.25)\text{ton}} \\ &= 0.5 \text{ m} \end{aligned}$$

2. การคำนวณหาขนาดพื้นที่หน้าตัดวงใน (A_1) และวงนอก (A_2) ของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

การคำนวณเพื่อหาขนาดพื้นที่หน้าตัดวงใน (A_1) และวงนอก (A_2) ของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า[9] ซึ่งจะต้องมีพื้นที่หน้าตัดที่ใกล้เคียงกันจะสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \text{รัศมีนอกของแกนเหล็กวงนอก } r_1 &= \frac{D_1}{2} & (3.2) \\ &= \frac{0.5}{2} \\ &= 0.25\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รัศมีในของแกนเหล็กวงนอก } r_2 &= r_1 - W_2 & (3.3) \\ &= 0.25 - 0.02 \\ &= 0.23\text{m} \end{aligned}$$

ในที่นี้ได้กำหนดให้ความกว้างพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก W_2 มีค่าเท่ากับ 0.02 เมตร เนื่องจากต้องการให้พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงใน A_1 และพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก A_2 มีพื้นที่เท่ากันเพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux) สามารถไหลจากพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กทั้งสองได้สม่ำเสมอและทั่วถึงอีกทั้งยังกำหนดเพื่อต้องการให้ความกว้างของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอกมีพื้นที่น้อยที่สุดซึ่งเพียงพอที่จะสามารถยึดแผ่นป้องกัน(Protective plate)ให้ติดกับหน้าสัมผัสของเครื่องได้โดยผ่านอุปกรณ์ยึดติดทางกล

สามารถคำนวณหารัศมีนอกแกนเหล็กวงใน (r_3) ได้จากการหาค่าพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก (A_2) โดยใช้ความสัมพันธ์พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในต้องเท่ากับพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก ($A_1 = A_2$) ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่หน้าตัดรวม} \quad A_5 &= \pi(r_1)^2 \\ &= \pi \times 0.25^2 \\ &= 0.196m^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในรวมพื้นที่หน้าตัดร่องสล๊อต

$$\begin{aligned} A_4 &= \pi \times (r_2)^2 \\ &= \pi \times 0.23^2 \\ &= 0.166m^2 \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก } A_2 &= A_5 - A_4 \\ &= 0.196 - 0.166 \\ &= 0.03m^2 \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \text{รัศมีแกนเหล็กวงใน} \quad r_3 &= \sqrt{\frac{A_1}{\pi}} \\ &= \sqrt{\frac{0.03}{\pi}} \\ &= 0.1m \end{aligned} \quad (3.7)$$

3. การคำนวณหาค่า Magnetomotive force

เมื่อได้ค่าของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงใน และวงนอกแล้วสามารถนำค่าดังกล่าวมาหาค่า Magnetomotive force (Ni) ได้โดยกำหนดให้ระยะช่องว่างอากาศ (l_g) ให้มีค่าเท่ากับ 2mm และค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ (free space) (μ_0) = $4\pi \times 10^{-7}$ ดังนั้นสามารถหาค่าความซึมซาบแม่เหล็กได้ดังนี้

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

และเนื่องจากในงานวิจัยนี้ กำหนดน้ำหนักที่ต้องการให้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า นั้นสามารถยกน้ำหนักได้ 250 kg ดังนั้นจะต้องกำหนดค่า น้ำหนักเหล็กที่ต้องการยก lifting force (f_g) ให้มีค่า เท่ากับ 250 kg หรือเท่ากับ $250\text{kg} \times 9.8\text{m/sec} = 2450\text{N}$ โดย 9.8 คือ ค่าแรงโน้มถ่วงโลกมีหน่วยเป็น เมตร/วินาที ดังนั้นจากสมการที่ 2.9 สามารถหาค่าได้ดังนี้[9]

$$f_g = \frac{\left[\frac{(Ni)^2}{\left(\frac{l_g}{\mu_0 A_1} + \frac{l_g}{\mu_0 A_2} \right)^2} \right]}{2\mu_0 A_1} + \frac{\left[\frac{(Ni)^2}{\left(\frac{l_g}{\mu_0 A_1} + \frac{l_g}{\mu_0 A_2} \right)^2} \right]}{2\mu_0 A_2}$$

น้ำหนักเหล็กที่ต้องการยก

$$= \frac{\left[\frac{(N)i^2}{\left(\frac{0.002}{(4\pi \times 10^{-7} \times 0.03)} + \frac{0.002}{4\pi \times 10^{-7} \times 0.03} \right)^2} \right]}{2(4\pi \times 10^{-7} \times 0.03)}$$

$$+ \frac{\left[\frac{(Ni)^2}{\left(\frac{0.002}{(4\pi \times 10^{-7} \times 0.03)} + \frac{0.002}{4\pi \times 10^{-7} \times 0.03} \right)^2} \right]}{2(4\pi \times 10^{-7} \times 0.03)}$$

$$f_g = 0.002366 \times (Ni)^2$$

$$\text{น้ำหนักเหล็กที่ต้องการยก Weight} = 9.8 \times \text{kg} \quad (3.8)$$

$$= 9.8 \times 250$$

$$= 2450 \text{ N}$$

ดังนั้น

$$f_g = \text{Weight}$$

$$\therefore 0.002366 \times (Ni)^2 = 2450$$

$$Ni = \sqrt{\frac{2450}{0.002366}}$$

$$Ni = 1017(A-t)$$

Safety factor 25%

$$Ni = 1017 \times 1.25 = 1271.25(A-t)$$

4. การคำนวณหาขนาดร่องสลีต, จำนวนรอบที่พันขดลวด และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ใช้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ (1 - 1.5 A)

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวนรอบขดลวด} \quad N &= \frac{1271.25}{1} \\
 &= 1271.25 \approx 1300 \text{turns} \\
 \text{ขนาดลวดตัวนำ} &= \frac{I}{CD} (\text{mm}^2) \\
 &= \frac{1}{2} \\
 &= 0.5 \text{mm}^2
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

โดยกำหนดค่าความหนาแน่นกระแสในตัวนำ (Current density ; CD) เท่ากับ 2Amp/mm^2 และจากการคำนวณทำให้ได้ค่า ขนาดของลวดตัวนำเท่ากับ 0.5 mm^2 ซึ่งสามารถนำค่านี้มาหาค่า ขดลวดทองแดงที่มีใช้อยู่จริงได้จากตารางโดยจากค่าที่คำนวณได้เมื่อเทียบกับตาราง จะได้ค่าขนาด ขดลวดทองแดงที่ใช้พันเท่ากับ 0.5189 mm^2 ซึ่งจะตรงกับลวดทองแดง ตามมาตรฐาน S.W.G เบอร์ 21 และสามารถหาค่าความต้านทานของขดลวดตัวนำได้โดยใช้ค่า ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ[10] (ρ) ของทองแดงซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.72×10^{-8} ดังนั้นจะสามารถหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

ในการหาค่าของความต้านทานขดลวดตัวนำจะต้องหาค่าความยาวเฉลี่ยของลวดตัวนำก่อน โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 2.12 ซึ่งเป็นการหาค่าความยาวเฉลี่ยของลวดตัวนำโดยหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ความยาวเฉลี่ยของลวดตัวนำ} \quad l &= \left[\left(\left(\frac{0.23 - 0.1}{2} \right) + 0.1 \right) 2\pi \times 1300 \right] \\
 &= 1347.74 \text{m}
 \end{aligned}$$

เมื่อได้ค่าของความยาวเฉลี่ยของลวดตัวนำแล้วจากนั้นจะสามารถนำค่าที่ได้ไปทำการหาค่า ของความต้านทานขดลวดตัวนำโดยจะสามารถหาได้จากสมการที่ 2.11 ซึ่งจะเป็นการหาค่าความ ต้านทานขดลวดตัวนำได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ความต้านทานขดลวดตัวนำ} \quad R &= \rho \frac{l}{A} \\
 &= 1.72 \times 10^{-8} \times \left(\frac{1347.74}{0.5189} \right) \\
 &= 44.67 \Omega
 \end{aligned}$$

เมื่อสามารถหาค่าความต้านทานขดลวดตัวนำได้แล้วจากนั้นจะสามารถนำไปหาค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้โดยสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \text{แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง} \quad V_{dc} &= I_{dc} \times R & (3.10) \\ &= 1.5 \times 44.67 \\ &= 67 \approx 70V_{dc} \end{aligned}$$

5. การคำนวณหาขนาดร่องสลิต

ในการคำนวณขนาดของร่องสลิตสามารถหาได้ โดยนำค่าความกว้างของร่องสลิต (W_1) ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความกว้างร่องสลิต} \quad W_1 &= (r_2 - r_3) & (3.11) \\ &= 0.23 - 0.1 \\ &= 0.13m \end{aligned}$$

ซึ่งจะทำให้ได้ขนาดความกว้างร่องสลิตเท่ากับ 13 cm มาใช้ในการคำนวณโดยจะกำหนดค่าอัตราส่วนความหนาแน่นของร่องสลิตกับพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเท่ากับ 0.4 โดยสามารถหาขนาดของร่องสลิตได้จากสมการที่ 2.13 ดังนี้

อัตราส่วนความหนาแน่นของร่องสลิตกับพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ

$$\begin{aligned} &= 0.4 \\ &= \frac{\text{conductor area}(mm)^2}{\text{slot area}(mm)^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ขนาดพื้นที่หน้าตัดร่องสลิต (slot area)} &= \frac{\text{conductor area}(mm)^2}{0.4} \\ &= \frac{0.5189}{0.4} \\ &= 1.29725(mm)^2 \end{aligned}$$

เมื่อได้ขนาดร่องสลิตหลังจากนั้นจะสามารถหาค่าของควมลึกร่องสลิตได้โดยจะสามารถหาได้จากสมการที่ 2.14 ดังนี้

ความลึกร่องสลีต

$$H_1 = \left[\frac{(1300 \times 1.29725)}{130} \right]$$

$$= 12.97 \text{ mm}$$

เมื่อได้ค่าของความลึกร่องสลีตแล้ว จะต้องทำการหาค่าความสูงของแกนเหล็กเพื่อที่จะนำไปสู่การหาค่าความสูงรวมทั้งหมดของเครื่องต่อไปโดยสามารถหาค่าความสูงแกนเหล็กได้จากสมการที่ 2.15 ดังนี้

ความสูงแกนเหล็ก

$$H_2 = \frac{A_1}{2 \times \pi \times r_2}$$

$$= \frac{0.03}{(2 \times \pi \times 0.23)}$$

$$= 2.1 \text{ cm}$$

เมื่อสามารถหาค่าความสูงแกนเหล็กและความลึกร่องสลีตมาแล้วดังนั้นจะสามารถนำค่าทั้งสองที่ได้มาหาค่าความสูงรวมของเครื่องซึ่งจะสามารถหาได้จากสมการที่ 2.16 ดังนี้

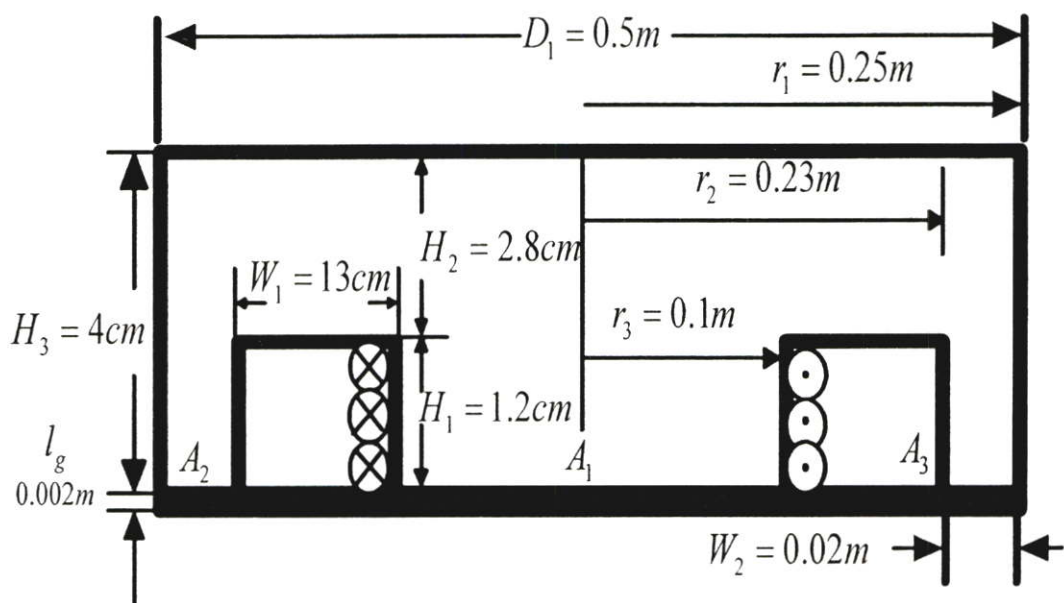
ความสูงรวมของเครื่อง

$$H_3 = (H_1 + H_2)$$

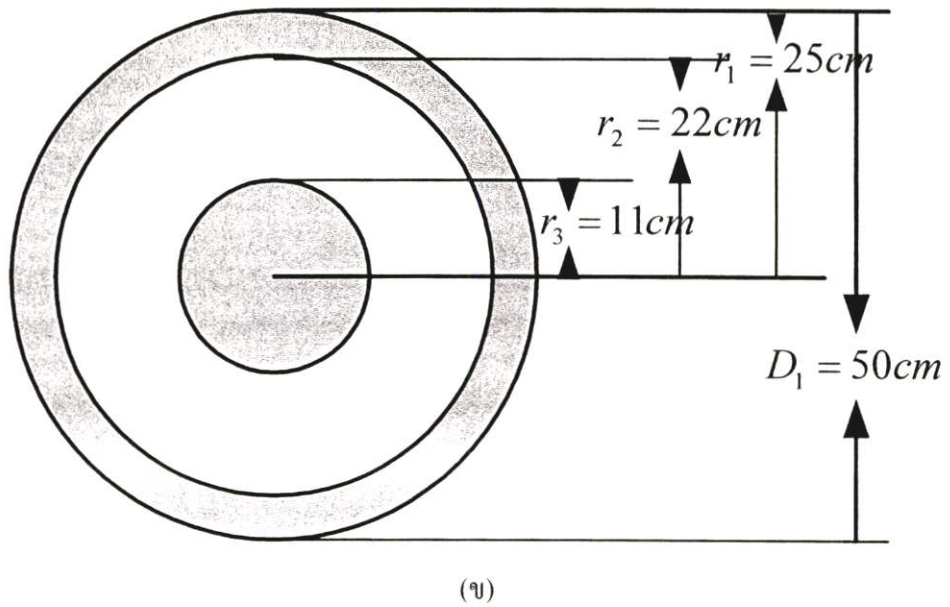
$$= 1.3 + 2.1$$

$$= 3.4 \text{ cm} \approx 4 \text{ cm}$$

ดังนั้นจากการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาสามารถนำมาออกแบบตัวเครื่องขกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในการทดสอบสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ดังรูปที่ 3.4

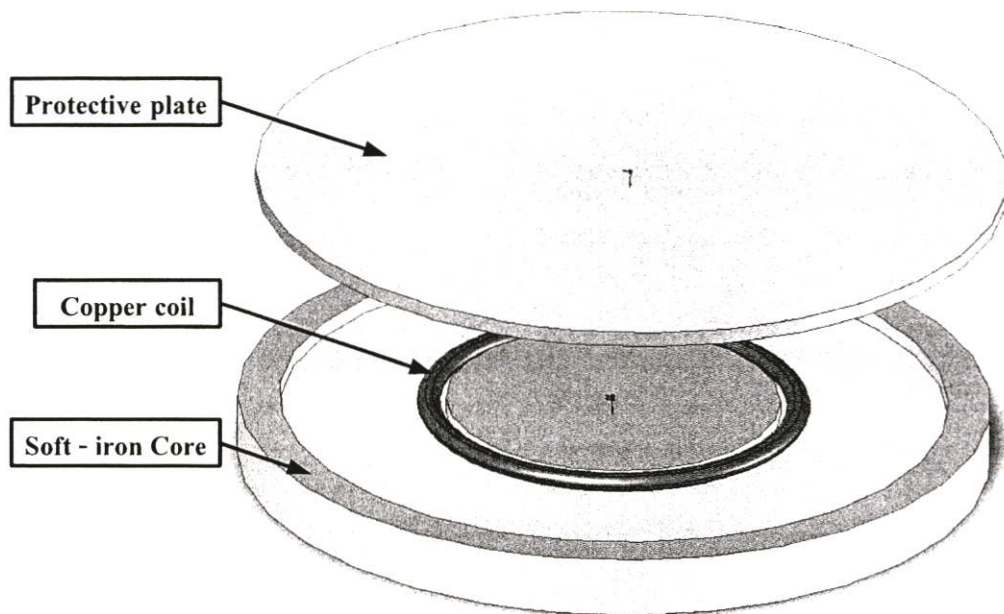


(ก)



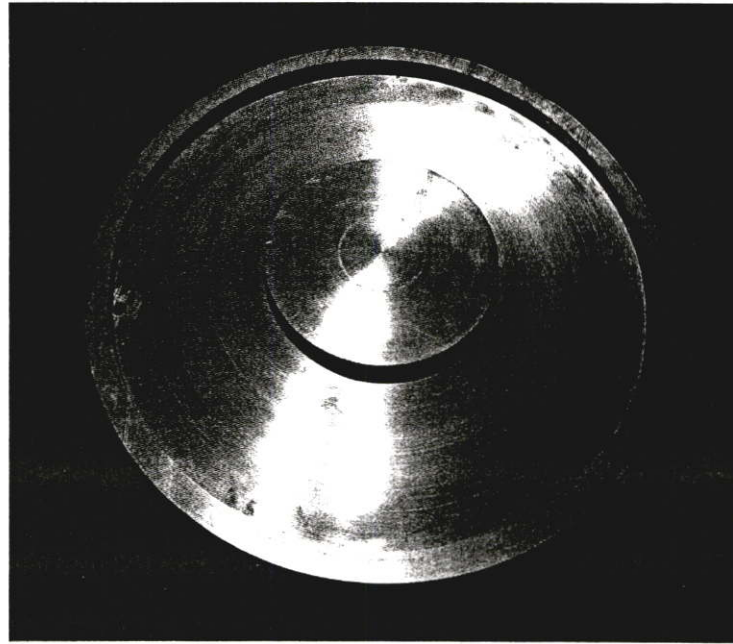
รูปที่ 3.4 โครงสร้างและสัดส่วนของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

จากโครงสร้าง และสัดส่วนของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปที่ 3.4 สามารถแสดงเป็นภาพสามมิติได้ดังรูป

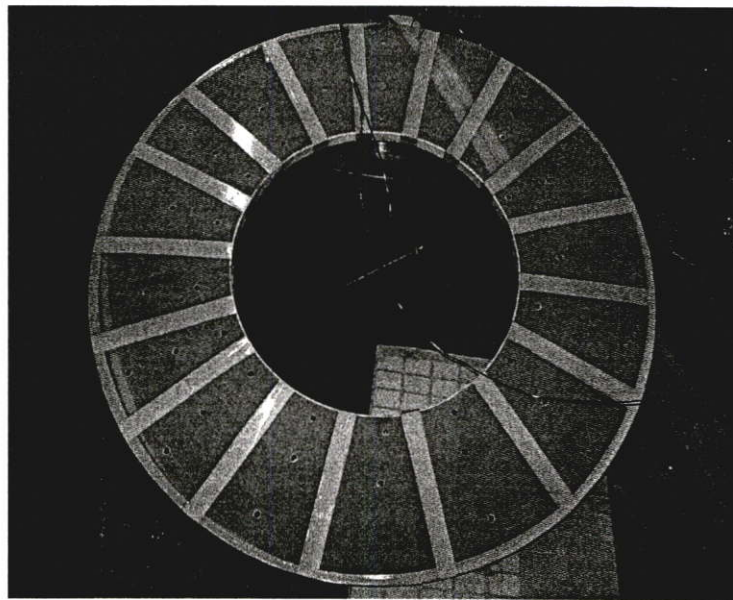


รูปที่ 3.5 โครงสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

จากโครงสร้าง และสัดส่วนที่ได้จากการออกแบบสามารถนำไปสร้างแกนเหล็กและออกแบบบอบบิ้นเพื่อพันขดลวดตามขนาด และรอบได้จากการคำนวณดังรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 แกนเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

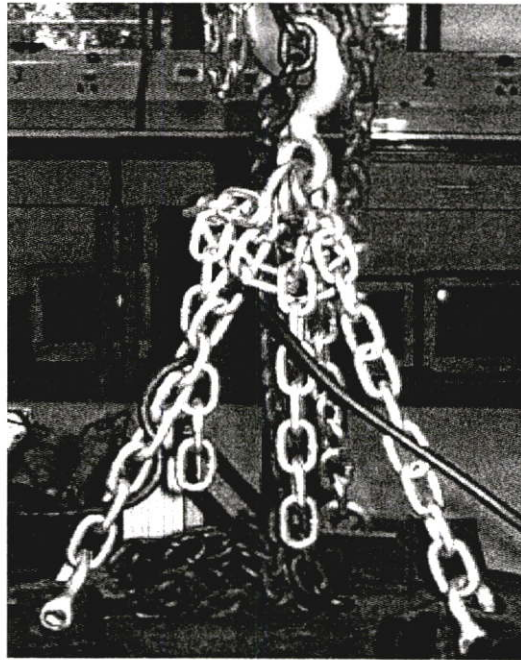


รูปที่ 3.7 บอบบิ้นและขดลวดที่พันอยู่ด้านในของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

หลังจากนั้นจึงนำบอบบิ้นซึ่งมีขดลวดพันอยู่มาวางในแกนเหล็กที่เตรียมไว้และเทอิพริกซ์เสร็จแล้วจึงนำแผ่นอะลูมิเนียมซึ่งทำหน้าที่เป็นแผ่นป้องกัน (PROTECTIVE PLATE)

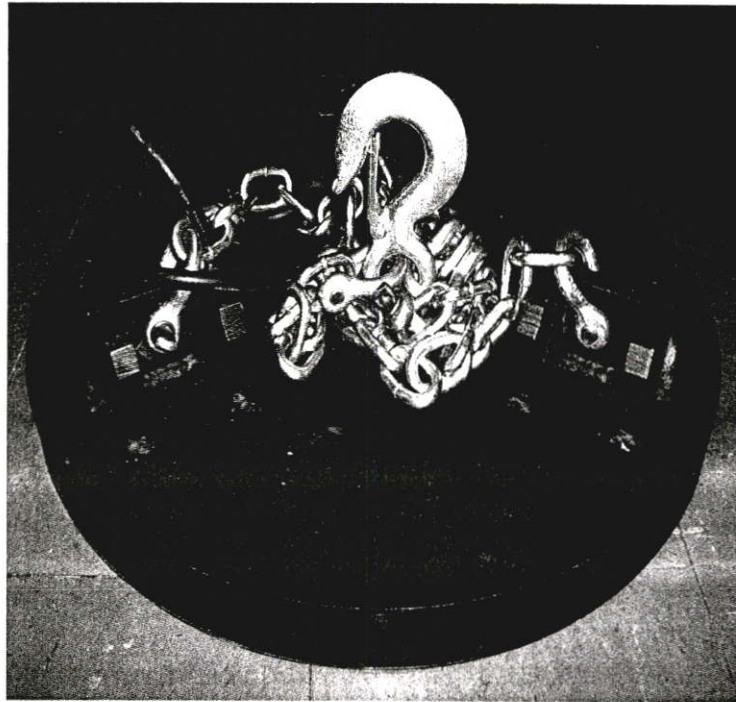
6. การออกแบบชุดโซ่รับน้ำหนัก

เนื่องจากต้องออกแบบให้ชุดโซ่รับน้ำหนัก สามารถรับน้ำหนักตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีน้ำหนักเมื่อรวมขดลวดทองแดงที่พันอยู่ภายใน และอิพริกซี่ซึ่งเท็บลงไปรวมถึงแผ่นป้องกันจะมีน้ำหนักรวมประมาณ 70 kg โดยจะต้องรวมกับน้ำหนักโหลดซึ่งเป็นเหล็กที่เครื่องจะต้องสามารถยกได้ซึ่งเครื่องที่ออกแบบจะต้องสามารถยกเหล็กน้ำหนัก 250 kg ซึ่งเมื่อรวมน้ำหนักทั้งหมดแล้วจะมีน้ำหนักรวม 320 kg ดังนั้นในการออกแบบจึงเลือกใช้ชุดโซ่เหล็กซึ่งสามารถรับน้ำหนักได้ 1 ตัน



รูปที่ 3.8 ชุดโซ่รับน้ำหนัก

จากนั้นทำการยึดชุดโซ่เข้ากับหัวของแกนเหล็กที่เตรียมไว้ โดยตำแหน่งที่ยึดโซ่กับตัวเครื่องแต่ละเส้นจะห่างกันเป็นมุม 0 องศา, 120 องศา และ 240 องศา หลังจากนั้นจะได้ตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมที่พร้อมสำหรับนำไปทำการทดสอบดังรูปที่ 3.9

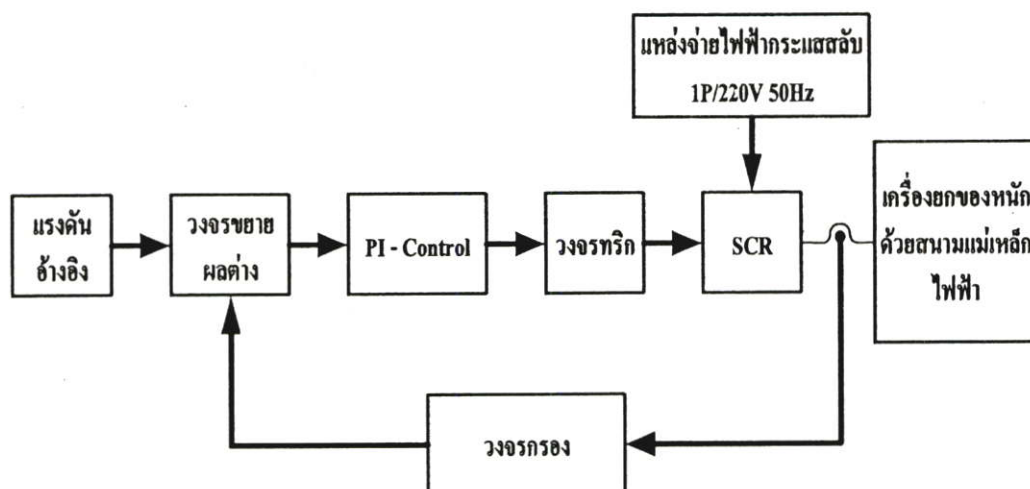


รูปที่ 3.9 เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

3.3 การออกแบบชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC POWER SUPPLY)

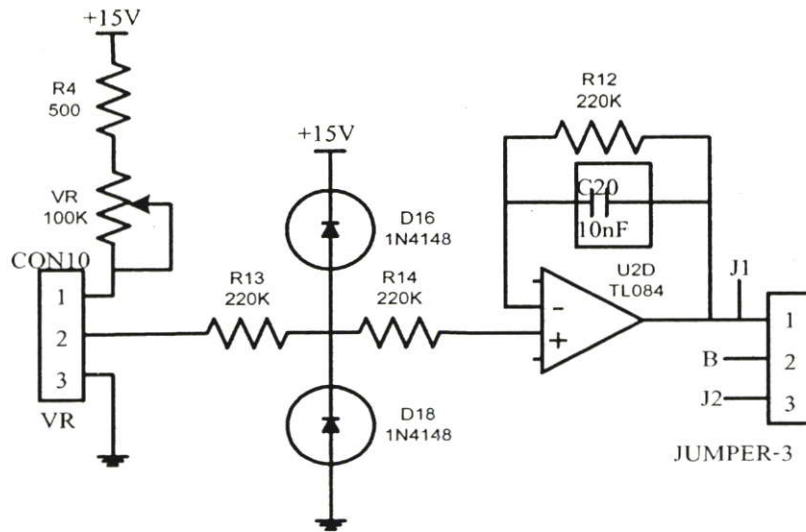
3.3.1 วงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส แบบควบคุมครึ่งลูกคลื่น (Single Phase half wave control rectifier circuit)

โดยการออกแบบต้องการให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงค่าต่ำ โดยรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V_{ac} เข้ามา ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรควบคุมแบบเฟสคอนโทรลเรกติไฟเนื่องจากประหยัด เพราะไม่ต้องมีหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าเพื่อลดแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับแรงดันพิกัดใช้งานอีกทั้ง ยังไม่ต้องใช้วงจรเปลี่ยนผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC - DC CONVERTER) ทั้งนี้นอกจากจะเป็นการลดค่าใช้จ่ายในด้านอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งปัจจุบันวงจรดังกล่าวมีราคาสูงแล้ว ยังเป็นการลดเป็นการลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากหม้อแปลง ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวงจรที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนจึงทำให้วงจรมีขนาดเล็กน้ำหนักเบาโดยในวงจรควบคุมแบบเฟสคอนโทรลเรกติไฟนี้จะใช้ SCR ซึ่งเป็นอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ ที่สามารถควบคุมแรงดันได้จึงเป็นอุปกรณ์หลักในการปรับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับใช้งาน ซึ่งสามารถแสดงไดอะแกรมการทำงานส่วนเฟสคอนโทรลเรกติไฟได้ดังนี้



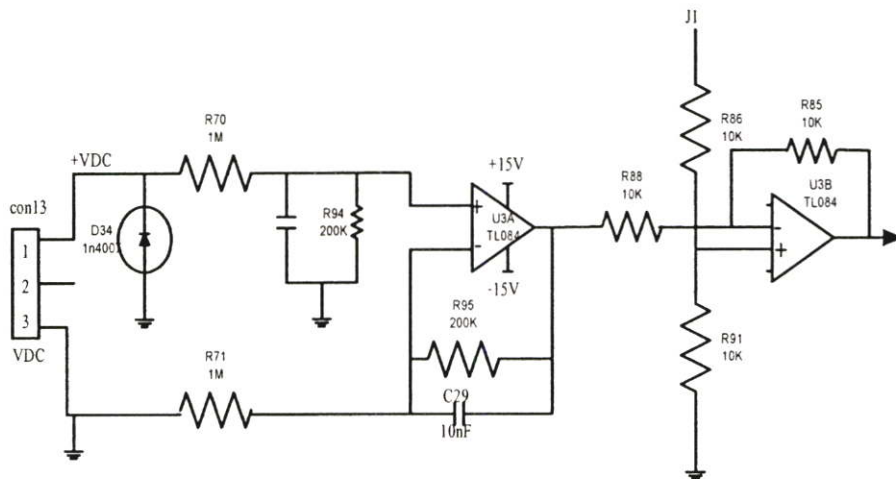
รูปที่ 3.10 แสดงโคอะแกรมส่วนวงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง
ชนิด 1 เฟส แบบควบคุมครึ่งลูกคลื่น

จากรูป 3.10 สามารถอธิบายการทำงานของโคอะแกรมได้โดยสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่ปรับจาก Volume จะถูกส่งผ่านมายังวงจรขยายผลต่าง (Differential amplifier) ซึ่งจะทำหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณระหว่างค่า Set point กับค่าแรงดันที่ถูกป้อนกลับมาให้มีค่าตาม Set point ที่ปรับจากนั้นจะส่งผ่านไปยังส่วน PI-Control ซึ่งจะทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันให้คงที่โดยการควบคุมมุมทริกที่ได้จะส่งไปทริกเพื่อสั่งให้ SCR นำกระแสจ่ายสู่โหลดซึ่งเป็นเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้ทำงานตามขนาดแรงดันที่ต้องการ โดยที่เมื่อแรงดันที่ส่งผ่านไปยังเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าลดลงจะถูกชดเชยแบบป้อนกลับในส่วนของ PI-Control เพื่อให้ระบบสามารถที่จะรักษาระดับแรงดันให้คงที่ไว้ได้ซึ่งสามารถแสดงส่วนต่าง ๆ ของวงจรได้ดังนี้



รูปที่ 3.11 วงจรปรับแรงดันและกรองสัญญาณ

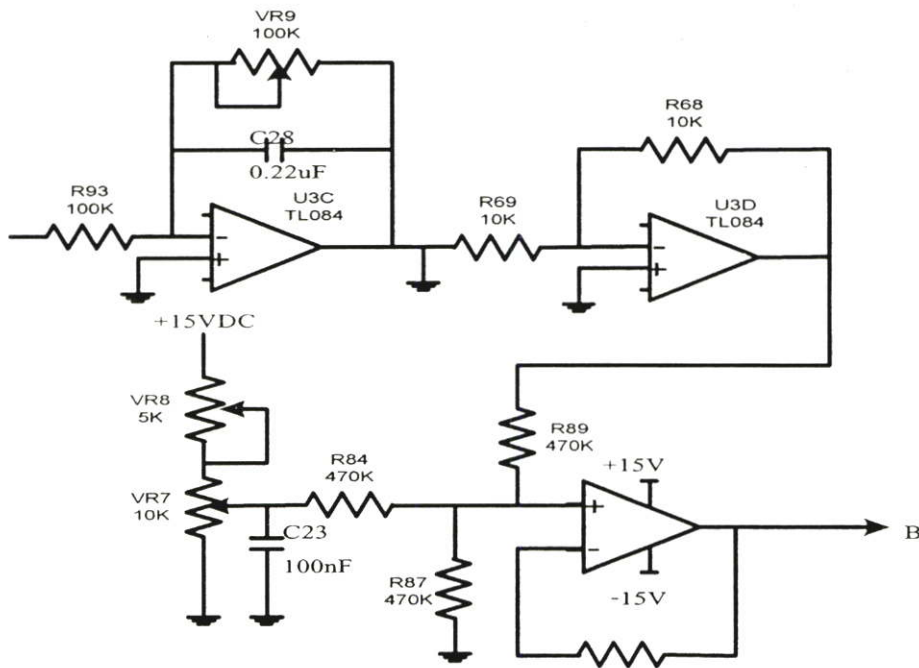
จากรูป 3.11 จะเป็นส่วนของวงจรซึ่งจะรับสัญญาณที่ปรับจาก Volume ที่หน้าตู้ควบคุมชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยรับจากจุดเชื่อมต่อ Con10 จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งผ่านไปยังวงจรรองโดยผ่านไปที่ออปแอมป์ U2DTL084 ซึ่งจะทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนต่าง ๆ จากภายนอกที่ได้จากการปรับ Volume จากนั้นจะส่งผ่านสัญญาณส่วนของวงจรรขยายผลต่าง (Differential amplifier) ต่อไป



รูปที่ 3.12 วงจรรองและวงจรรขยายผลต่าง

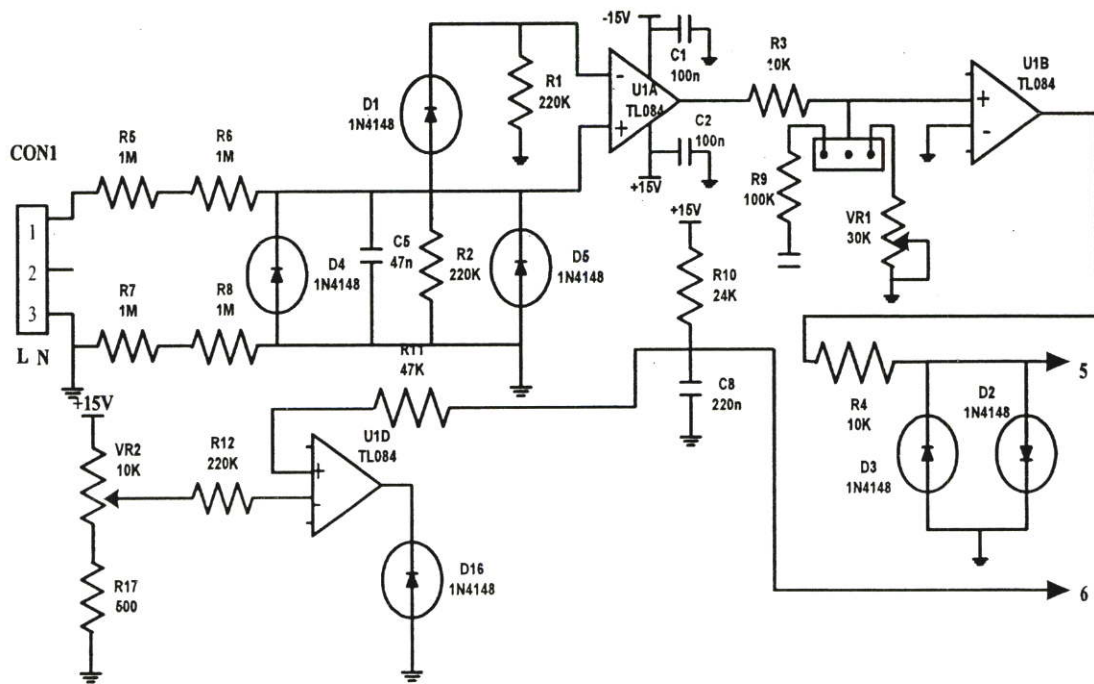
จากรูป 3.12 เป็นส่วนของวงจรรองและวงจรรขยายผลต่าง (Differential amplifier) ซึ่งจะรับสัญญาณอ้างอิงที่ปรับมาจาก Volume ในส่วนของวงจรปรับแรงดันและกรองสัญญาณดังที่ได้กล่าวมาในขั้นต้นโดยจะทำหน้าที่เปรียบเทียบระหว่างแรงดันที่ส่งไปตามค่า Set point ซึ่งได้จาก

การปรับ Volumn กับแรงดันที่ถูกส่งกลับมาจากส่วนของ PI - control โดยผลต่างของแรงดันจะถูกส่งผ่านไปยังส่วนของ PI - control เพื่อสั่งเพิ่มมุมทริกให้ SCR เพื่อให้ระดับแรงดันไฟฟ้าตามค่า Ste point ที่ปรับ Volumn



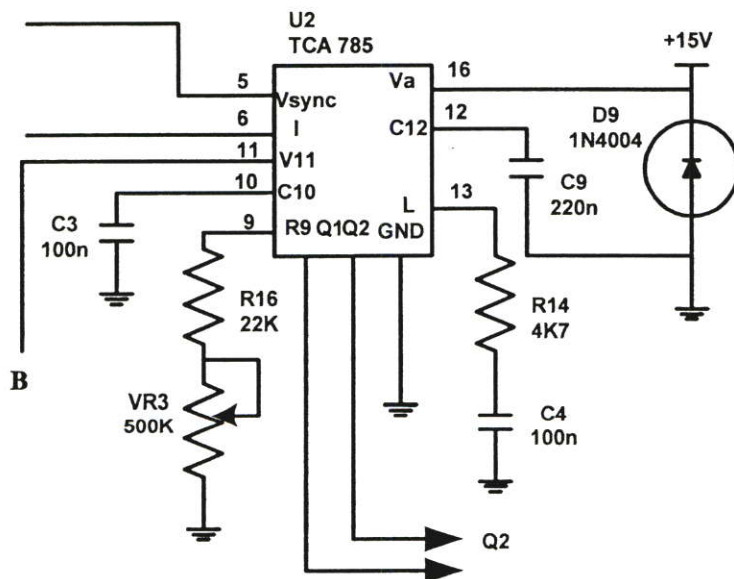
รูปที่ 3.13 วงจร PI - Control และ วงจรจำกัดแรงดัน

จากรูป 3.13 เป็นวงจรในส่วนของ PI - control จะรับสัญญาณอ้างอิงมาจากวงจรขยายผลต่าง (Differential amplifier) ซึ่งถ้าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายโหลดซึ่งในที่นี้คือเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายได้เพียงพอตามค่า Set point ที่ได้จากการปรับ Volumn อันเนื่องมาจากโหลดดึงกระแสทำให้แรงดันที่จ่ายต่ำกว่าแรงดันที่ตั้งค่า Set point ตามการปรับ Volumn ดังนั้นแรงดันจะถูกชดเชยแบบป้อนกลับในส่วน PI - Control โดยจะส่งเอาท์พุทไปสั่งวงจรทริกให้เพิ่มมุมทริกเพื่อให้ SCR ทำงานตามขนาดแรงดันที่ต้องการ และในส่วนวงจรจำกัดแรงดันซึ่งเป็นวงจรส่วนล่างของรูป 3.13 จะเป็นวงจรสำหรับทำหน้าที่จำกัดแรงดันไม่ให้เกินระดับแรงดันสูงสุดตามที่ปรับตั้งไว้ซึ่งในงานวิจัยนี้จะตั้งแรงดันสูงสุดที่สามารถปรับจาก Volumn ไม่ให้เกิน $110 V_{dc}$ หลังจากนั้นจะส่งสัญญาณเอาท์พุทผ่านทางจุด B ไปสู่วงจรรวม TCA 785 ผ่านทางขา 11 เพื่อสั่งให้ SCR ทำงาน



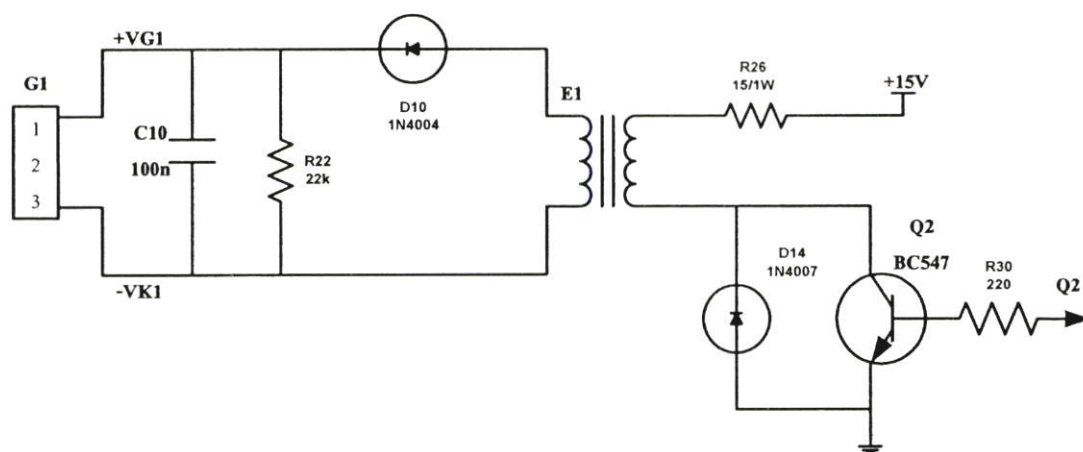
รูปที่ 3.14 วงจร Zero voltage detector

จากรูป 3.14 เป็นวงจร Zero crossing voltage detector ซึ่งจะทำหน้าที่ซึ่งโครโนซ์สัญญาณเฟสที่ความดันทานสูงจากแหล่งจ่ายที่จุดเชื่อมต่อ Con1 ซึ่งเป็นสัญญาณ 220 V_{ac} เพื่อหาจุดเริ่มต้นสัญญาณที่ตำแหน่ง 0 ว่าอยู่ที่ตำแหน่งใดและจะส่งสัญญาณอ้างอิงไปยังวงจรรวม TCA 785 ผ่านทางขา 5 ต่อไป



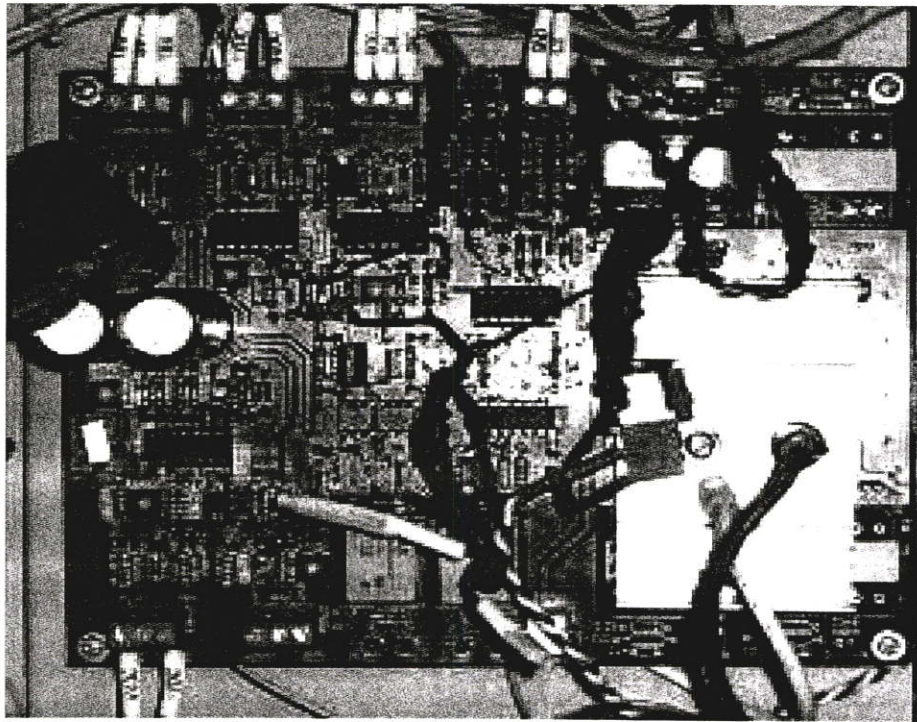
รูปที่ 3.15 วงจรรวม TCA 785

จากรูป 3.15 เป็นวงจรรวม TCA 785 ซึ่งทำหน้าที่สร้างสัญญาณทริกเพื่อสั่งให้ SCR ทำงาน โดยขา 5 จะทำหน้าที่ซิงโครไนซ์สัญญาณจากแหล่งจ่ายโดยผ่านความต้านทานสูงซึ่งจะตรวจจับหาค่าสัญญาณแรงดัน 0 ที่ผ่านจากการซิงโครไนซ์แล้วเก็บผลไว้เพื่อเป็นตำแหน่งอ้างอิงและควบคุมผลเก็บผลการซิงโครไนซ์โดยผ่านคาปาซิเตอร์ที่ขา 10 ซึ่งชาร์ตที่กระแสซึ่งกำหนดโดยขา 9 ส่วนขา 12 และ 13 จะต่อลงกราวด์สัญญาณพัลส์จะอยู่ในช่วงมุมทริก 180 องศา ส่วนที่ขา 16 จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง +15Vdc สำหรับขา 11 จะรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากส่วน PI - control ที่ผ่านการกำหนดระดับแรงดันไฟฟ้าให้ได้ตามที่ได้ Set point ไว้เพื่อให้ TCA 785 สร้างสัญญาณพัลส์เพื่อทริกให้ SCR ทำงานโดยผ่านขา Q2 ซึ่งจะเป็นขาที่ส่งสัญญาณ พัลส์บวกประมาณ $30\mu s$ เพื่อไปทริกขั้วขาเกจของ SCR ให้ทำงาน



รูปที่ 3.16 วงจรทริก SCR

จากรูป 3.16 เป็นวงจรซึ่งจะรับสัญญาณพัลส์มาจากวงจรรวม TCA785 ผ่านมาทาง Q2 ซึ่งเป็นขา 15 ซึ่งพัลส์ที่ส่งมาจะผ่านเข้าไปยังทรานซิสเตอร์ Q2BC547 เพื่อให้ทรานซิสเตอร์สับสวิตช์เพื่อให้หม้อแปลง E1 เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันจากด้านไพรมารี ไปยังด้านเซคันดารีเพื่อสั่งขั้วขาเกจของ SCR ให้นำกระแสตามพัลส์ที่รับมาจาก TCA785

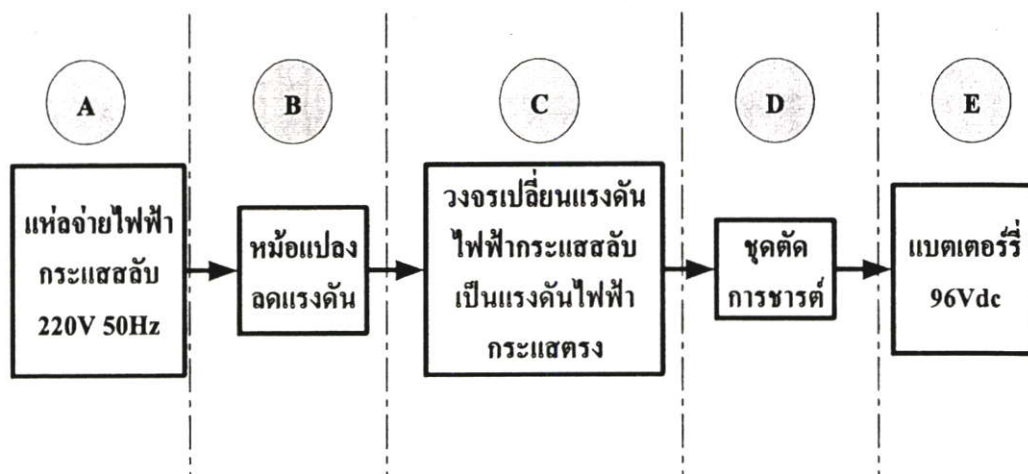


รูปที่ 3.17 วงจรเฟสคอนโทรลเรกติไฟ

3.3.2 วงจรเบตเตอร์รีชาร์ตเจอร์และไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน

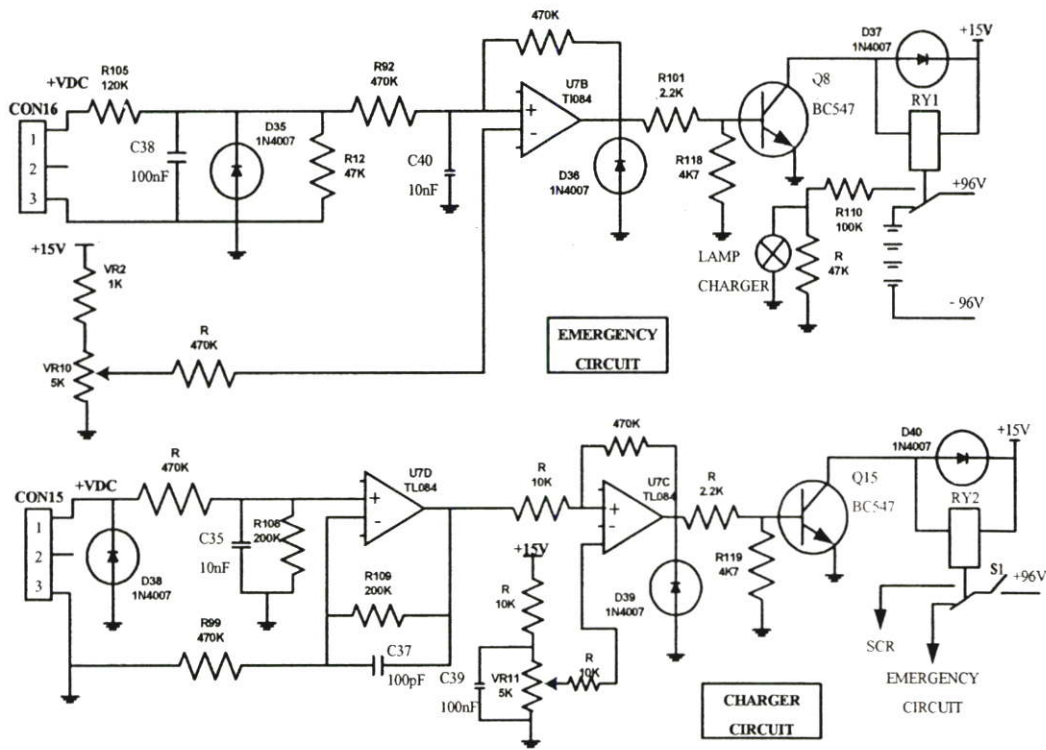
เนื่องจากการใช้งานเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แบบวงกลมขนาดเล็ก โดยที่ตัวเครื่องมีน้ำหนักประมาณ 70 kg และในการใช้งานจะเป็นการใช้งานที่ต้องยกชิ้นงานซึ่งเป็นเหล็กซึ่งมีน้ำหนักตั้งแต่ 0-250 kg แล้วยกขึ้นไปในอากาศแล้วจึงทำการเคลื่อนย้ายเหล็กเหล่านั้นซึ่งในการทำงานหากเกิดกรณีที่ระบบไฟฟ้าจากการไฟฟ้า ไม่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังนั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ขดลวดภายในตัวเครื่องเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ก็จะหยุดลงทำให้เหล็กที่เครื่องกำลังยกอยู่นั้นล่องหล่นสู่พื้น ซึ่งอาจเกิดอันตรายกับผู้ที่ทำงานอยู่บริเวณนั้นรวมถึงอาจเกิดความเสียหายกับเหล็กที่กำลังเคลื่อนย้ายอยู่ในขณะนั้นด้วย ดังนั้นในการใช้งานจริงในอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องมีระบบเบตเตอร์รีชาร์ตเจอร์และไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินรวมอยู่ในระบบควบคุมเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย เพื่อป้องกันเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นจากกรณีที่แหล่งจ่ายจากการไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบได้ โดยในงานวิจัยนี้จะสร้างชุดเบตเตอร์รีชาร์ตเจอร์ และไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินโดยให้สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวเครื่องได้ที่ระดับแรงดัน $96 V_{dc}$ ที่กระแส ไฟฟ้าที่ 5 A โดยใช้เบตเตอร์รีแห่งจำนวน 8 ลูกต่ออนุกรมกันโดยแต่ละลูกจะสามารถจ่ายกำลัง ไฟฟ้าได้นาน 1hr ซึ่งในการใช้งานจริงในอุตสาหกรรมนั้นหากเกิดไฟฟ้าดับขึ้นผู้ใช้งานต้องการเวลาไม่เกิน 15 นาทีเพื่อที่จะเคลื่อนย้ายแผ่นเหล็กหรือเศษเหล็กไปสู่จุดหมายหรือเคลื่อนย้ายกลับมาสู่จุดตั้งต้นเพื่อรอให้ระบบการจ่ายไฟฟ้าจากการไฟฟ้ากลับเข้าสู่

สภาวะปกติดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการออกแบบชุดแบตเตอรี่ชาร์ตเจอร์ และไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินให้สามารถใช้งานได้จริงในหากเกิดสภาวะดังที่กล่าวมาโดยสามารถแสดงโคอะแกรมระบบได้ดังนี้



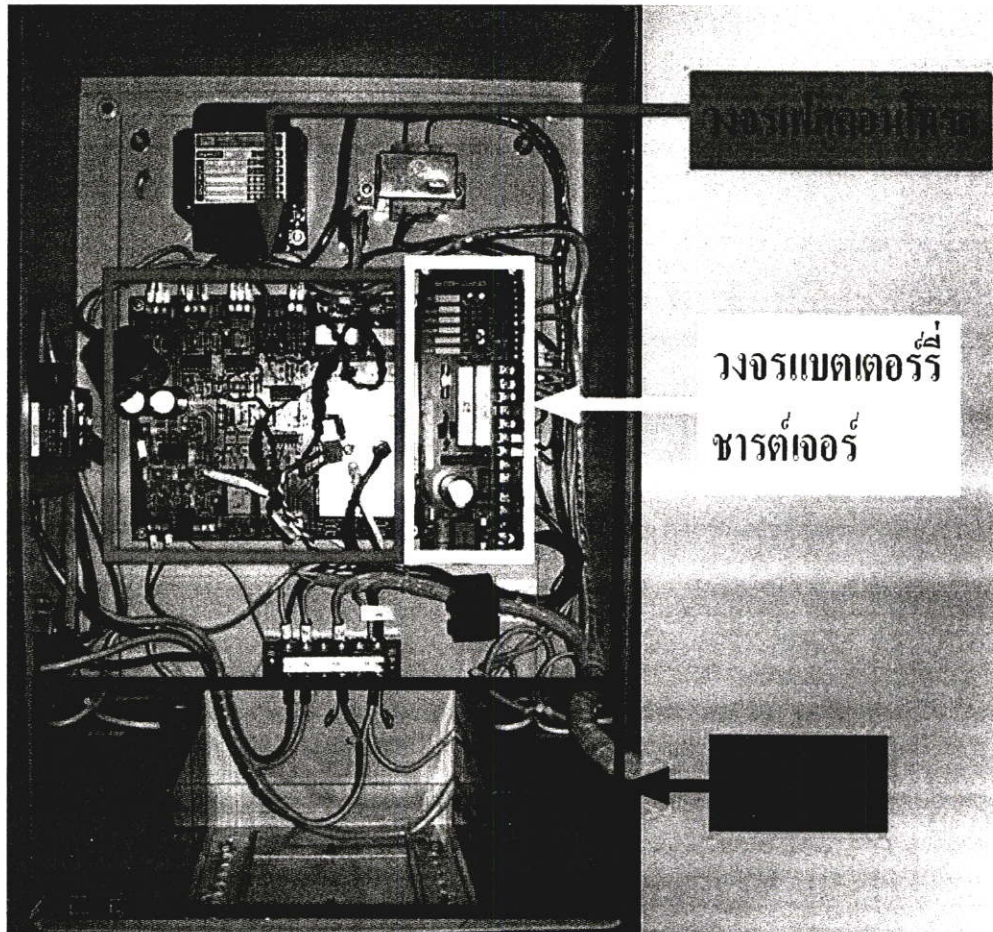
รูปที่ 3.18 โคอะแกรมชุดแบตเตอรี่ชาร์ตเจอร์

จากรูป 3.18 การทำงานจะเริ่มจากรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V_{ac} เข้ามาในส่วน A จากนั้นส่งผ่านไปที่ส่วน B ซึ่งเป็นหม้อแปลงลดแรงดันโดยลดแรงดันลงเหลือ 130 V_{ac} และจะถูกเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยชุดบริดจ์เรกติไฟในส่วน C จากนั้นก็จะทำการชาร์ตมาที่แบตเตอรี่ซึ่งอยู่ในส่วน E จนเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึง 104 V_{dc} ซีเนอร์ไดโอดซึ่งอยู่ในชุดตัดการชาร์ตในส่วน D จะทำงานยับยั้งทรานซิสเตอร์ให้ทำงานเพื่อตัดชุดชาร์ตออกจากแบตเตอรี่และเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าลดลงที่ 96 V_{dc} ระบบก็จะทำการชาร์ตอีกครั้งซึ่งทั้งนี้สามารถแยกวงจรของระบบได้เป็นสองวงจรหลักคือวงจรชาร์ตเจอร์ ซึ่งเป็นวงจรเพื่อทำหน้าที่ชาร์ตไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่และวงจรการจ่ายไฟฟ้าฉุกเฉินจากแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถแสดงวงจรทั้งสองได้ดังรูป



รูปที่ 3.19 วงจรชาร์ตเจอร์ และวงจรจ่ายไฟฟ้าฉุกเฉิน

จากรูป 3.19 จะเป็นส่วนของวงจรชาร์ตเจอร์ (Charger circuit) และวงจรจ่ายไฟฟ้าฉุกเฉิน (Emergency circuit) โดยในส่วนของวงจรชาร์ตเจอร์นั้นจะเริ่มจากรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าผ่านเข้าสู่หม้อแปลงลดแรงดันเพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้เหลือ $130 V_{dc}$ จากนั้นจะผ่านวงจรบริดเจ็คติไฟเออร์จนกลายเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ความถี่ 100Hz เพื่อให้การชาร์ตมีความถี่เพิ่มขึ้นในช่วง 1Sec ซึ่งจะช่วยให้คาอูการใช้งานของแบตเตอรี่และส่งผ่านไปที่แบตเตอรี่จนเมื่อแรงดันที่ชาร์ตเข้าสู่แบตเตอรี่เพิ่มสูงขึ้นถึง $104 V_{dc}$ ซีเนอร์ไดโอดจะทำการขั้ทรานซิสเตอร์ BC547 ให้ทำงานสั่งรีเลย์ RY2 ตัดการชาร์ตเข้าสู่แบตเตอรี่ ในส่วนของวงจรจ่ายไฟฟ้าฉุกเฉินในสภาวะปกติ RY1 และ RY2 จะทำงานตัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่สู่โหลดซึ่งถ้าเกิดสภาวะไฟฟ้าดับแบตเตอรี่ทั้งสี่ลูกจะทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าสู่โหลดโดยหน้าคอนแทกของ RY1 และ RY2 จะกลับมาอยู่ในสภาวะปกติต่อทำให้แบตเตอรี่จ่ายแรงดันไฟฟ้าสู่โหลดแทนแหล่งจ่ายจากการไฟฟ้า



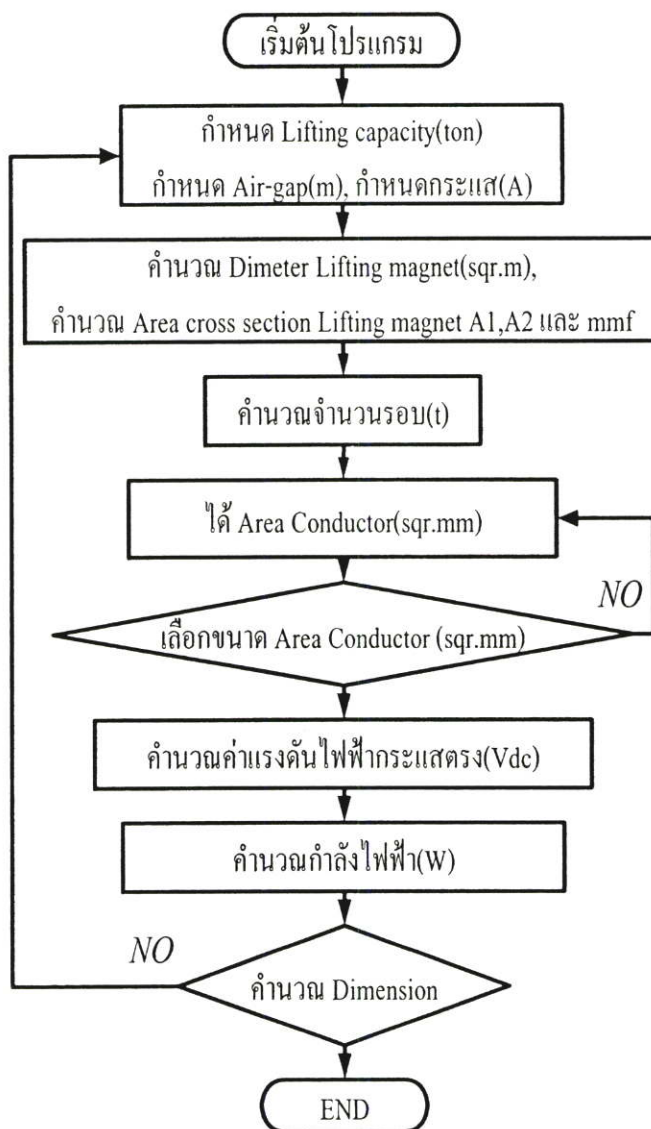
รูปที่ 3.20 วงจรชุดเฟสคอนโทรลเรกติไฟ และเบตเตอร์รีชาร์ตเจอร์

3.3.3 แบตเตอร์รี

ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบเครื่องยกของหนัก ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นเครื่องต้นแบบดังนั้นในการออกแบบส่วนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจึงต้องการที่จะให้มีขนาดเล็กน้ำหนักเบา เพื่อง่าย และสะดวกในการทดสอบนอกสถานที่จึงได้กำหนดให้ใช้เบตเตอร์รีแห่งในการทดสอบจำนวน 8 ลูกซึ่งจะมีพิกัดแรงดัน 12 V_{dc} /ลูก ที่กระแส 5 A เพื่อให้สามารถจ่ายโหลดได้รวม 96 V_{dc} ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบในกรณีเมื่อเกิดสภาวะไฟฟ้าดับ เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าก็จะสามารถยกเหล็กทดสอบได้โดยที่แผ่นเหล็กทดสอบไม่ล่องหล่นโดยในการทำงานจริงการสำรองเบตเตอร์รีให้จ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอกับความต้องการของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสำคัญ และจำเป็นอย่างยิ่งต่อการใช้งานเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการใช้งานในอุตสาหกรรม

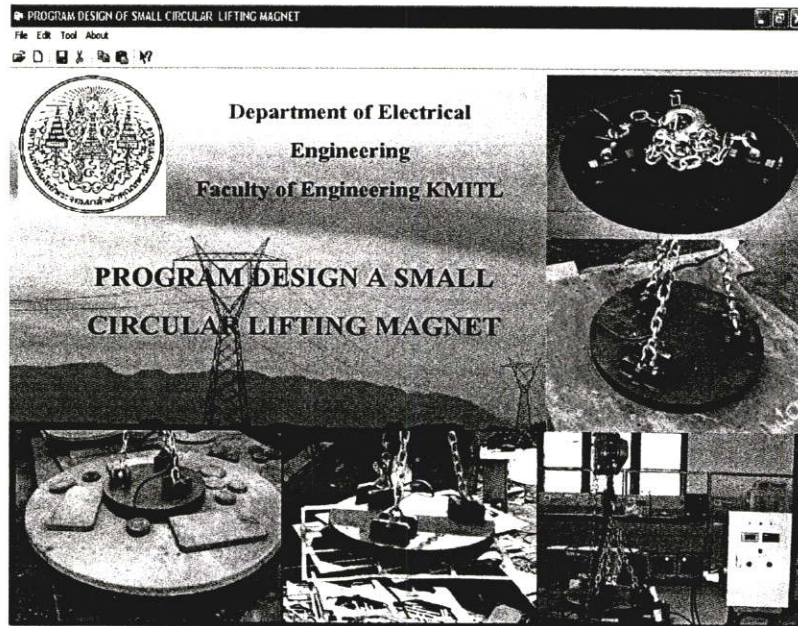
3.4 การออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก โดยใช้โปรแกรมช่วยออกแบบ

จากการออกแบบเครื่องยกของหนัก ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กในหัวข้อ 3.4 สามารถนำมาเขียนเป็น โปรแกรมการออกแบบโดยใช้โปรแกรม Visual basic ซึ่งสามารถแสดงลำดับขั้นตอนการออกแบบโดยใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบได้ดังนี้



รูปที่ 3.21 ลำดับขั้นตอนการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม

จากรูปที่ 3.21 แสดงลำดับขั้นตอนการออกแบบโดยใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก โดยสามารถแสดงหน้าจอเริ่มเข้าสู่โปรแกรมดังนี้



รูปที่ 3.22 หน้าจอโปรแกรมการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม

หลังจากเข้าสู่หน้าจอแรกสามารถเข้าสู่หน้าจอถัดไปโดยเข้าไปที่ File และ new จากนั้นโปรแกรมจะเริ่มการรับมุล โดยกำหนดน้ำหนักที่ต้องการให้เครื่องสามารถยกได้ (Lifting capacity) เท่ากับ 0.25 ตัน หรือ 250 kg จากนั้นโปรแกรมจะรับข้อมูลในส่วนช่องว่างอากาศ (Air gap) ซึ่งเลือกให้มีค่าเท่ากับ 2 mm ต่อจากนั้นโปรแกรมจะคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่อง และพื้นที่หน้าตัดวงใน A_1 และพื้นที่หน้าตัดวงนอก A_2 พร้อมด้วยค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า mmf หลังจากนั้นให้กำหนดค่ากระแสที่ต้องการใช้โดยในที่นี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1.5 A ซึ่งโปรแกรมจะแสดงหน้าจอดังนี้

INFORMATION		A.W.G	S.W.G	Diameter(ML)	Diameter(mm)	Sectional area(Ck.ML)	Sectional area(s. μ)
LIFTING CAPACITIES	0.25 tons.	4/0	6/0	464	11.786	215.236	
				460	11.684	211.600	
			5/0	432	10.973	186.624	
			3/0	409.6	10.404	167.772	
AIRGAP	2.0 mm			400	10.160	160.000	
				372	9.440	139.834	
			2/0	364.8	9.256	133.079	
				348	8.839	121.104	0
CURRENT	1.5 A			324.9	8.250	105.560	0
				324	8.230	104.976	0
				300	7.629	90.000	0
			1	289.3	7.348	83.694	0
				276	7.070	76.176	0
				252	6.401	63.504	0
				232	5.893	53.824	0
			3	229.4	5.827	52.624	0
				212	5.395	44.944	0
				204.3	5.189	41.728	0
				192	4.877	36.861	0
				181.9	4.571	33.088	0
				176	4.470	30.976	0
				162	4.115	26.244	0
				160	4.064	25.600	0
				144.3	3.665	20.822	0
				144	3.658	20.736	0
			8	128.5	3.265	16.512	0
				128	3.251	16.384	0

รูปที่ 3.23 หน้าจอการกำหนดค่าน้ำหนักที่ต้องการยก ช่องว่างอากาศ และ กระแสไฟฟ้าที่ใช้

ต่อจากนั้นโปรแกรมจะคำนวณเพื่อหาจำนวนรอบที่ใช้ซึ่งได้เท่ากับ 1300 รอบ พร้อมทั้งพื้นที่หน้าตัดตัวนำมีค่าเท่ากับ 0.5 mm^2 ซึ่งหลังจากนั้นจะทำการเลือกขนาดสายตัวนำจากตารางสายในโปรแกรมโดยเลือกเป็นสาย S.W.G 21 ขนาดพื้นที่หน้าตัด 0.5189 mm^2 จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 67.5 V_{dc} และกำลังไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 101.39 วัตต์ โดยแสดงหน้าจอดังนี้

The screenshot shows a software window with two main sections. On the left, there are input fields for various parameters: LIFTING CAPACITIES (0.25 tons), AIRGAP (2.0 mm), CURRENT (1.5 A), AREA CONDUCTOR (5 sq. mm), TYPE OF CONDUCTOR (S.W.G), DIAMETER OF CONDUCTOR (NEW) (0.6129 mm), and AREA OF CONDUCTOR (NEW) (0.5189 sq. mm). On the right, there is a table with the following columns: Diameter(mm), Sectional area(Cu.Mil), Sectional area(sq.in), Sectional area(sq.mm), and Weight. The table contains multiple rows of data, with the row for diameter 0.5189 mm highlighted in black, corresponding to the selected conductor.

Diameter(mm)	Sectional area(Cu.Mil)	Sectional area(sq.in)	Sectional area(sq.mm)	Weight
1.626	4.086	0.003217	2.075	
1.450	3.257	0.002558	1.650	
1.427	3.136	0.002483	1.586	
1.291	2.583	0.002029	1.305	
1.215	2.304	0.001810	1.167	
1.150	2.048	0.001608	1.037	
1.024	1.624	0.001275	0.8226	
1.016	1.600	0.001257	0.8107	
0.9144	1.296	0.001018	0.6576	
0.9116	1.288	0.001012	0.6525	
0.7229	1.024	0.0008042	0.5189	
0.8118	1.021	0.0008019	0.5174	
0.7229	910	0.0006362	0.4105	
0.7112	784	0.0006158	0.3973	
0.6436	642.6	0.0005047	0.3256	
0.6096	576	0.0004524	0.2919	
0.5723	509.4	0.0004001	0.2581	
0.5583	484	0.0003801	0.2452	
0.5106	404	0.0003173	0.2047	
0.5080	400	0.0003142	0.2027	
0.4572	324	0.0002545	0.1642	
0.4547	320.4	0.0002516	0.1623	
0.4166	269	0.0002113	0.1363	
0.4049	254.1	0.0001996	0.1288	
0.3759	219	0.0001720	0.1110	
0.3606	201.6	0.0001563	0.1021	

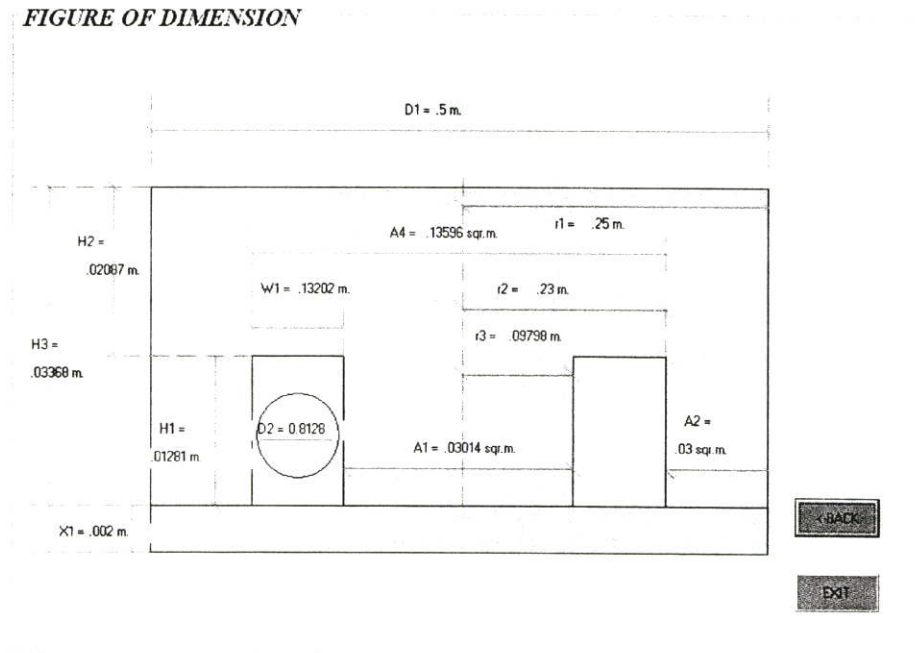
รูปที่ 3.24 หน้าจอการเลือกกำหนดขนาดตัวนำจากตารางสายภายใน โปรแกรม

หลังจากทำการเลือกขนาดสายตัวนำจากตารางแล้วกำหนดค่าลงใน โปรแกรมแล้ว ต่อจากนั้น โปรแกรมจะทำการแสดงผลค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ได้ดังนี้

The screenshot shows a software window titled 'RESULTANT' with two columns of parameters and their values. The parameters include LIFTING, DIAMETER OF LIFTING MAGNET (D1), AREA OF CROSSSECTION LIFTING MAGNET (A1), AREA OF CROSSSECTION LIFTING MAGNET (A2), AIRGAP (X1), MAGNETOMOTIVE FORCE (mmf), VOLTAGE, POWER, CURRENT, NUMBER OF TURNS, TYPE OF CONDUCTOR, AREA OF CONDUCTOR (NEW), DIAMETER OF CONDUCTOR NEW (D2), HIGH OF SLOT (H1), WIDTH OF SLOT (W1), HIGH OF CORE (H2), and HIGH OF LIFTING MAGNET (H3). Each parameter has a corresponding value displayed in a dark box.

รูปที่ 3.25 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบเครื่อง โดยใช้โปรแกรม

จากรูปที่ 3.25 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจากค่าพารามิเตอร์นี้โปรแกรมจะนำค่าต่าง ๆ ที่ได้แสดงเป็นภาพ 2 มิติซึ่งจะบอกขนาดของเครื่องที่จำเป็นในการจัดสร้างเครื่องต้นแบบดังนี้



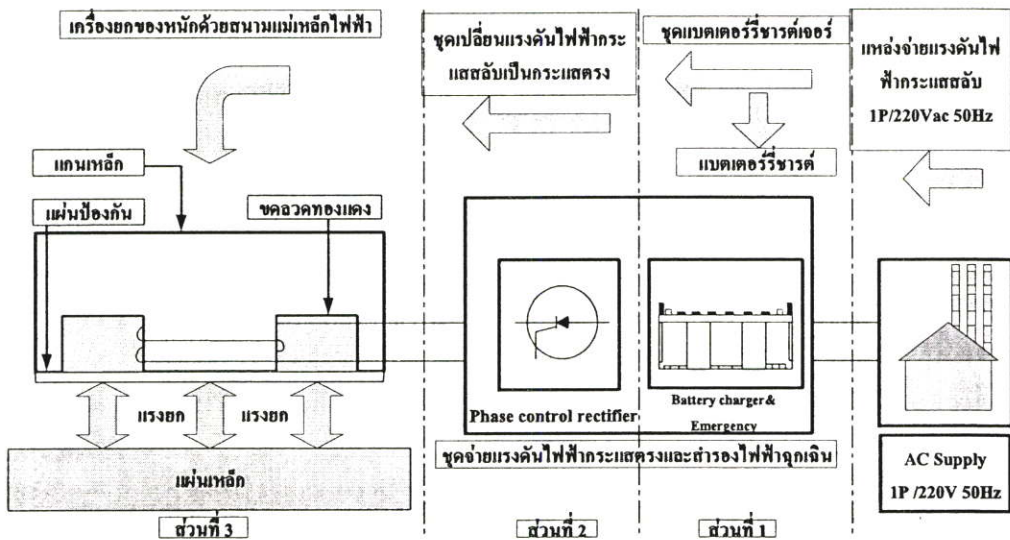
รูปที่ 3.26 ขนาดเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมที่ได้จากโปรแกรม

จากรูปที่ 3.26 แสดงกราฟฟิคซึ่งเป็นขนาดที่ของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กที่จำเป็น เพื่อใช้ในการจัดสร้างเครื่องต้นแบบ โดยกำหนดน้ำหนักยกเหล็กเท่ากับ 250 kg ระยะช่องว่างอากาศ 2 mm กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 A ใช้สายทองแดง S.W.G 21 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 67.5 V_{dc} กำลังไฟฟ้า 101.39 W ซึ่งจะได้ขนาดเครื่องที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรวม 50 cm ความสูงเครื่อง 3.4 cm เส้นผ่านศูนย์กลางแกนเหล็กวงในเท่ากับ 20 cm พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในและวงนอกเท่ากับ 0.03 mm² ความสูงร่องสลีตเท่ากับ 1.3 cm ความกว้างร่องสลีตเท่ากับ 13 cm ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการจัดสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้

การทดสอบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

4.1 บทนำ

ต้นแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อทำการออกแบบ และจัดสร้างส่วนประกอบของชุดทดสอบครบทั้ง 3 ส่วนแล้วจากนั้นได้นำมาทดสอบขีดความสามารถในการยกเหล็กเหล็กที่เงื่อนไขในการทดสอบต่าง ๆ ซึ่งสามารถแสดงระบบการทำงานทั้ง 3 ส่วนเมื่อทำงานรวมกัน ได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 ระบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 ส่วนเมื่อทำงานรวมกัน

จากรูปที่ 4.1 ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ ชุดแบตเตอรี่รีชาร์ตเจอร์ ชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การทำงานจะเริ่มจากเมื่อชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งภายในประกอบไปด้วยชุดแบตเตอรี่รีชาร์ตเจอร์ และชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากการไฟฟ้าเข้ามาชุดแบตเตอรี่รีชาร์ตเจอร์ ก็จะทำการชาร์ตพลังงานเก็บไว้ในแบตเตอรี่กรณีที่มีแรงดันไม่ถึงระดับที่กำหนดไว้แต่ถ้าหากแบตเตอรี่มีพลังงานไฟฟ้าสะสมอยู่ในระดับที่กำหนดไว้ชุดชาร์ตก็จะหยุดชาร์ตพลังงานให้กับแบตเตอรี่ จากนั้นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับก็จะถูกส่งไปยังส่วนที่ 2 ซึ่งเป็นส่วนของชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหลังจากผ่านส่วนนี้ แรงดันไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันกระแสตรงจะถูกจ่ายให้กับตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นส่วนที่ 3 ซึ่งในส่วนนี้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้พลังงานที่ได้รับ จากชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในการสร้าง

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อแยกแผ่นเหล็กหรือเศษเหล็กทดสอบ ซึ่งในกรณีหากเกิดปัญหาอันเนื่องมาจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบได้ พลังงานไฟฟ้าที่ถูกเก็บสะสมอยู่ในแบตเตอรี่ในส่วนที่ 1 ก็จะถูกจ่ายออกมายังตัวเครื่องซึ่งเป็นส่วนที่ 1 แทนส่วนที่ 2 ซึ่งเป็นชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่สามารถทำงานได้ อันเนื่องมาจากไม่ได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟจากการไฟฟ้า และหลังจากที่ตัวเครื่องได้รับพลังงานไฟฟ้าจากชุดแบตเตอรี่ชาร์จเจอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่ 1 ตัวเครื่องก็จะใช้พลังงานที่ได้รับในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในการยกแผ่นเหล็กหรือเศษเหล็กทดสอบ และเมื่อแหล่งจ่ายไฟจากการไฟฟ้าสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ตามปกติ ชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในส่วนที่ 2 ก็จะกลับมาทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับตัวเครื่องตามปกติ

โดยสามารถแบ่งการทดสอบได้ดังนี้

4.1.1 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการยกแผ่นเหล็ก

4.1.2 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลด

4.1.3 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการยกเศษเหล็ก

4.1.4 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่

4.1.5 การทดสอบวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

4.1.6 การทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน

4.1.7 การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดด้วยวิธี V-I Methode

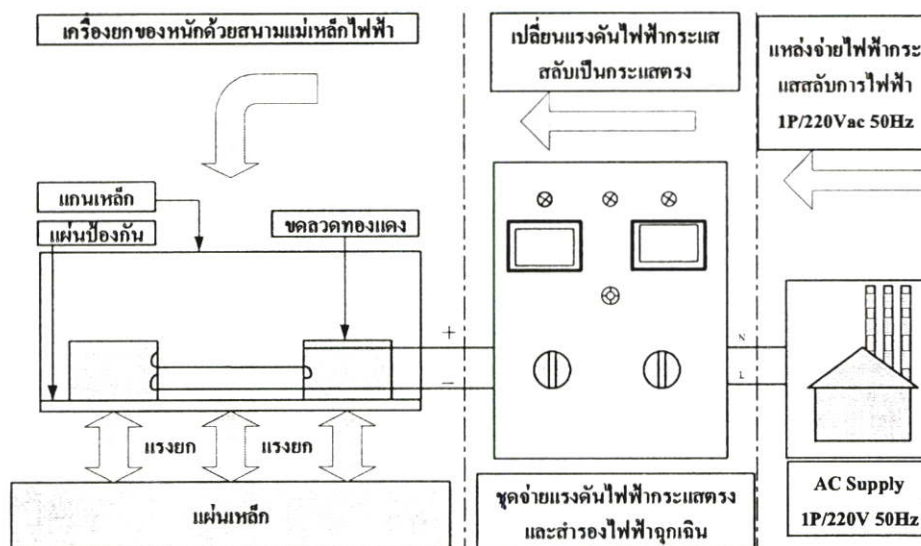
4.1.8 การทดสอบจำลองสถานะการใช้งานโดยใช้โปรแกรม Maxwell SV

4.1.9 การเปรียบเทียบผลการออกแบบกับการทดสอบใช้งานจริงของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก

4.2 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการยกแผ่นเหล็ก

เป็นการทดสอบการยกแผ่นเหล็กในสถานะรับโหลดจริง เพื่อหาค่าของแรงดันและกระแสและค่าพลังงานที่ใช้ต่อน้ำหนักแผ่นเหล็กที่ยกได้ซึ่งจะทำการทดสอบโดยการวางเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าลงบนแผ่นเหล็ก และจากนั้นก็ทำการปรับค่าของแรงดันไฟฟ้าขึ้นสูงสุด

ถึงค่าพิกัดซึ่งจะอยู่ที่ 95 V_{dc} หลังจากนั้นจะทำการยกตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นมาซึ่งตัวเครื่องอยู่ในสถานะที่เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นจึงทำให้สามารถยกแผ่นเหล็กคืบขึ้นมาพร้อมกันหลังจากนั้นจึงทำการปรับลดค่าของแรงดันลง จนเมื่อถึงค่าหนึ่งที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไม่สามารถที่จะยกน้ำหนักของแผ่นเหล็กได้แผ่นเหล็ก ก็จะร่วงลงสู่พื้นซึ่งจะทำการบันทึกค่าของแรงดันและกระแสก่อนที่แผ่นเหล็กจะร่วงลงสู่พื้นไว้โดยจะทำการทดลองในลักษณะเช่นนี้และเพิ่มน้ำหนักของแผ่นเหล็กจนถึงค่าที่กำหนดไว้คือ 250 kg แล้วบันทึกผล



รูปที่ 4.2 วงจรทดสอบการยกแผ่นเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.2 เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าจ่ายให้กับชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง และชุดเบตเตอร์รีชาร์ตเจอร์ ชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงจะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ให้กับเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใช้กำลังไฟฟ้าที่ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในการยกแผ่นเหล็ก แสดงการต่อชุดทดสอบดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การทดสอบยกแผ่นเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

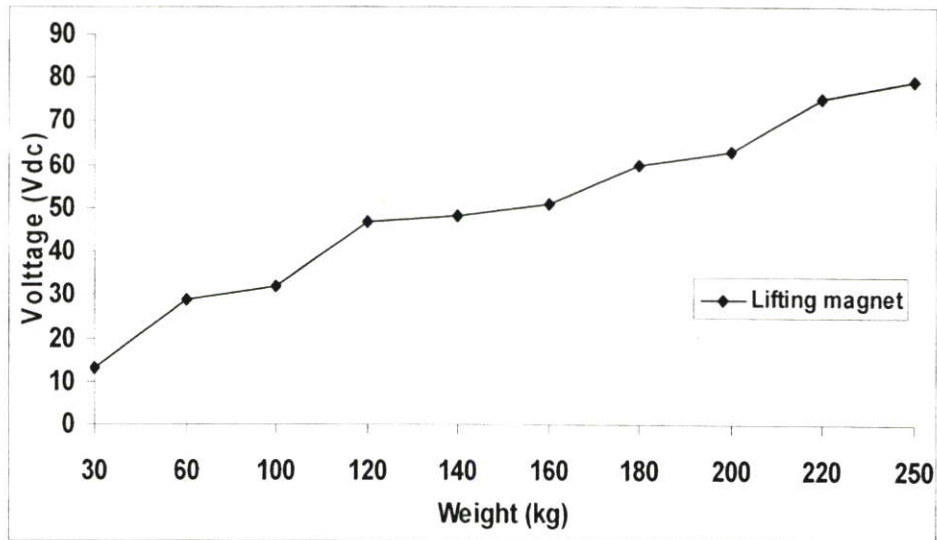
1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0-110 V_{dc} พร้อมชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำรอง
ฉุกเฉิน 96 V_{dc}
2. ต้นแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
3. เครื่องชั่งดิจิตอล 0-30 ตัน
4. เครื่องชั่ง 0-120 kg
5. รถโฟลคลิฟต์ 0-3 ตัน

ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำโซ่ที่ยึดตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแขวนกับแกนรับน้ำหนักของ
รถโฟลคลิฟต์
2. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าฉุกเฉินเข้ากับ
เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
3. วางเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าลงบนแผ่นเหล็กทดสอบ โดยให้
หน้าสัมผัสแผ่นป้องกันวางอยู่บนแผ่นเหล็กซึ่งทำการชั่งน้ำหนักก่อนทดสอบโดย
น้ำหนักที่ได้จะได้ตามขนาดแผ่นเหล็กที่มีอยู่จริง
4. ปรับแรงดันที่ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าสูงสุด
5. บังคับแกนรับน้ำหนักที่รถโฟลคลิฟต์ซึ่งแขวนเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็ก
ไฟฟ้าให้เลื่อนขึ้นซึ่งจะมีแผ่นเหล็กติดขึ้นมากับเครื่องยกของหนักด้วยสนาม
แม่เหล็กไฟฟ้า

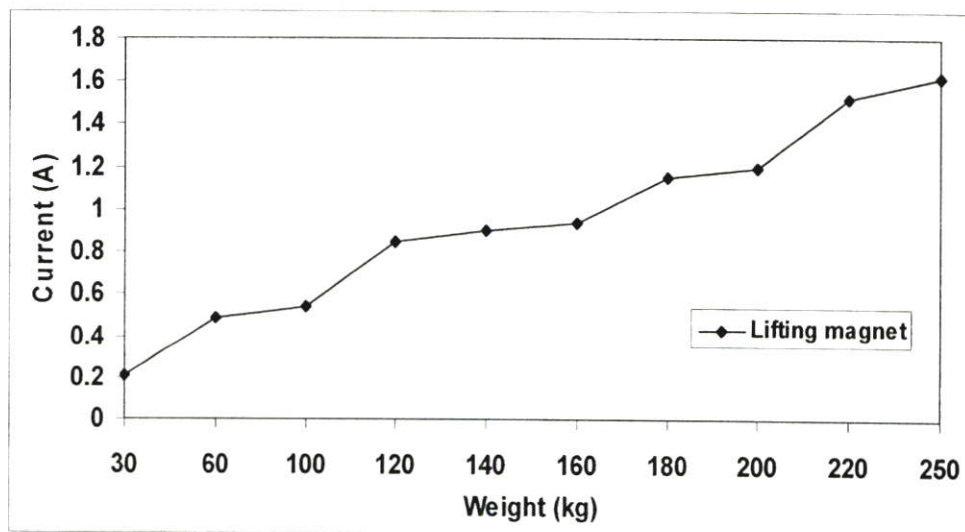
6. ปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้ลดลงจนถึงค่าที่แผ่นเหล็กวางลงสู่พื้นแล้วทำการบันทึกผลการทดสอบ
7. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 2- ข้อ 6 โดยเพิ่มน้ำหนักแผ่นเหล็กจนถึง 250 kg

ผลการทดสอบ



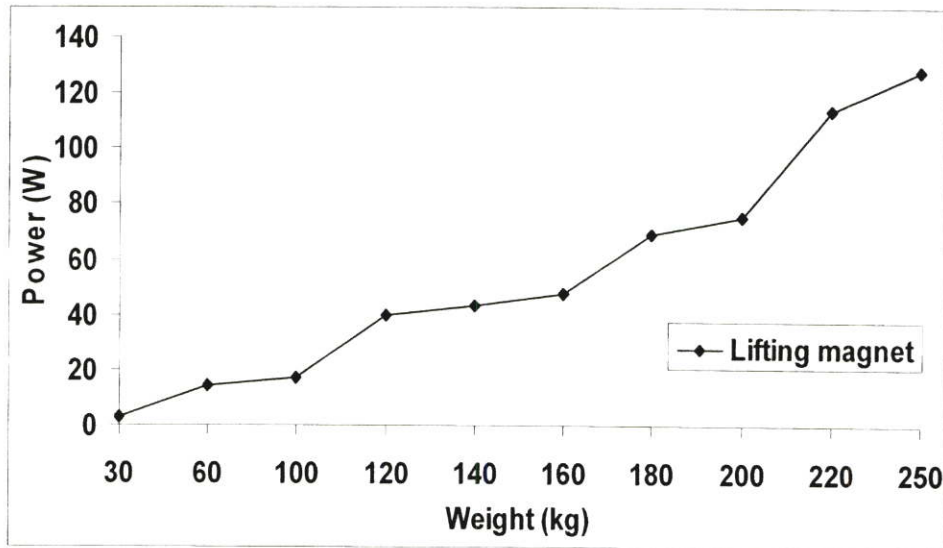
รูปที่ 4.4 ค่าระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบต่อการยกแผ่นเหล็กที่น้ำหนัก 30-250 kg

จากรูป 4.4 (ตาราง ง.1) เป็นการทดสอบขีดความสามารถในการยกแผ่นเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทดสอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ พบว่าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 79 V_{dc} เครื่องสามารถยกแผ่นเหล็กที่น้ำหนัก 250 kg ได้



รูปที่ 4.5 ค่าระดับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบต่อการยกแผ่นเหล็กที่น้ำหนัก 30-250 kg

จากรูป 4.5 (ตาราง ง.1) เป็นการทดสอบขีดความสามารถในการยกแผ่นเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทดสอบที่ระดับกระแสไฟฟ้าต่าง ๆ พบว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้า 1.62 A เครื่องสามารถยกแผ่นเหล็กที่น้ำหนัก 250 kg ได้



รูปที่ 4.6 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบต่อน้ำหนักแผ่นเหล็ก 30-250 kg

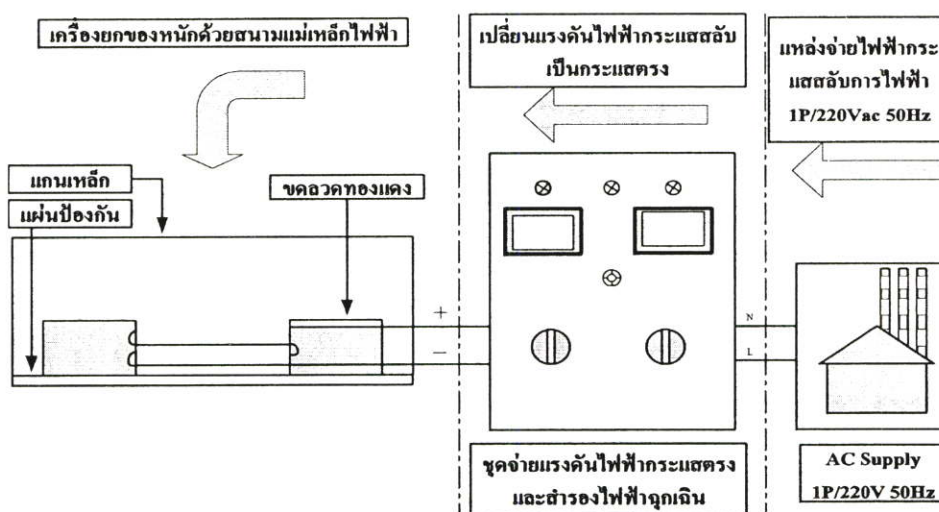
จากรูป 4.6 (ตาราง ง.1) เป็นการทดสอบขีดความสามารถในการยกแผ่นเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทดสอบที่พิกัดกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ พบว่าที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 127.98 W เครื่องสามารถยกแผ่นเหล็กที่น้ำหนัก 250 kg ได้ซึ่งพิกัดกำลังไฟฟ้ามีผลต่อขีดความสามารถในการยกแผ่นเหล็ก โดยที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงจะมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงทำให้ขีดความสามารถในการยกแผ่นเหล็กสูงตาม

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่าเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อขีดความสามารถในการยกแผ่นเหล็ก โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $79 V_{dc}$ จะมีขีดความสามารถในการยกแผ่นเหล็กที่น้ำหนักเหล็ก 250 kg คิดเป็นการใช้กำลังไฟฟ้า 0.5 W/kg เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับแรงดันที่ป้อนให้กับเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยขดลวดที่รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่แกนเหล็ก ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าขั้วเหนือขึ้นที่พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก และเกิดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าขั้วใต้ขึ้นที่พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งจากขั้วแกนเหล็กขั้วเหนือไปยังขั้วแกนเหล็กขั้วใต้ ซึ่งเมื่อแนวเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตัดผ่านแผ่นเหล็กก็จะทำให้เกิดแรงยกแผ่นเหล็กขึ้น

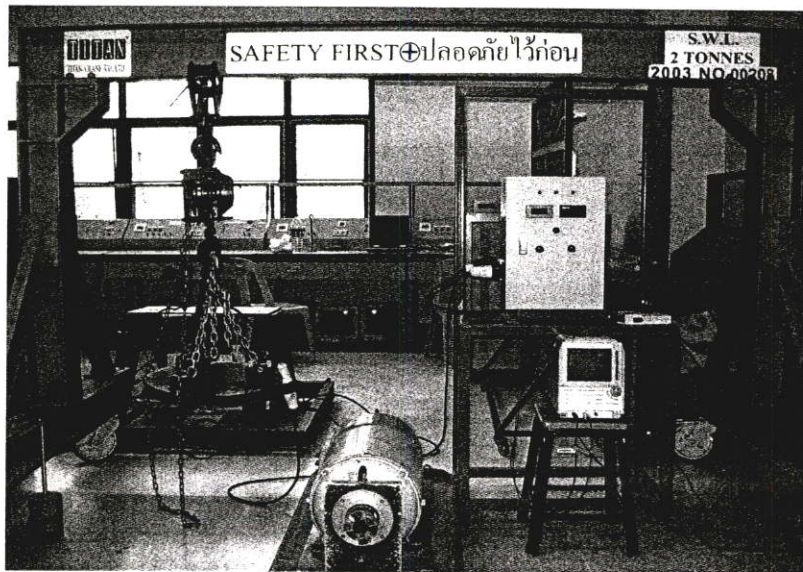
4.3 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในสถานะไม่มีโหลด

เป็นการทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนัก ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในสถานะไม่มีโหลดเพื่อหาค่าของแรงดันและกระแสรวมทั้งค่าพลังงานที่ใช้ต่อน้ำหนักแผ่นเหล็กที่ยกซึ่งในการทดสอบจะไม่มีแผ่นเหล็กที่ใช้ทดสอบ ทั้งนี้จะทดสอบโดยแขวนเครื่องยกของหนัก ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไว้บนรอกให้อยู่สูงจากพื้น 50 cm จากนั้นจะทำการปรับค่าของแรงดันไฟฟ้าขึ้นสูงสุดถึงค่าพิกัด หลังจากนั้นจึงทำการปรับลดค่าของแรงดันลงจนเท่ากับค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบยกแผ่นเหล็กในสถานะมีโหลด หลังจากนั้นทำการบันทึกค่าของแรงดันและกระแสโดยจะทำการทดลองในลักษณะเช่นนี้และเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าขึ้น ตามการทดลองในสถานะมีโหลด



รูปที่ 4.7 วงจรการทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
ในสถานะไม่มีโหลด

จากรูป 4.7 เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าจ่ายให้กับชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง และชุดแบตเตอรี่รีชาร์ตเจอร์ ชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงจะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ให้กับเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้เครื่องใช้กำลังไฟฟ้าที่ได้ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อใช้ในการยกแผ่นเหล็ก ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่มียกแผ่นเหล็ก โดยแสดงการต่อชุดทดสอบดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การทดสอบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาวะไม่มีโหลด

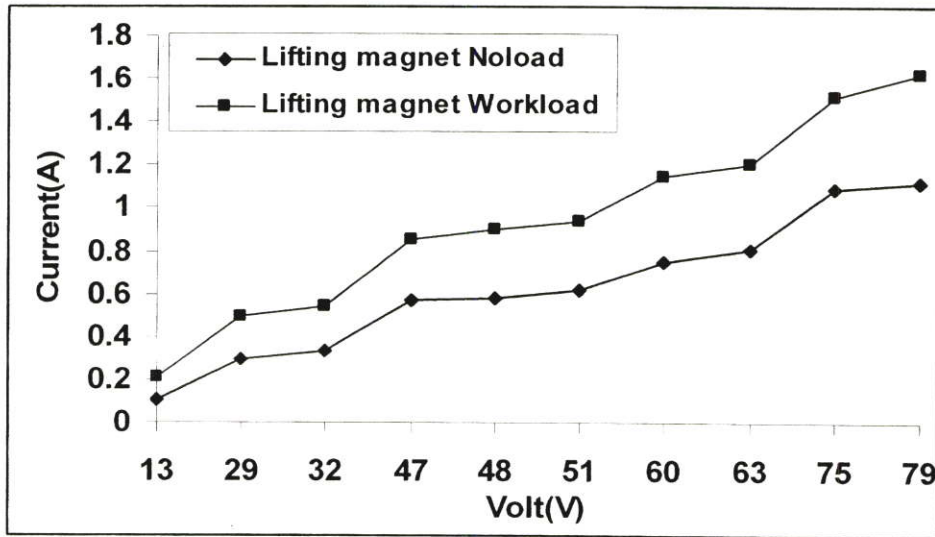
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0-110 V_{dc} พร้อมชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำรอง
ฉุกเฉิน 96 V_{dc}
2. ต้นแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
3. เครื่อง Capacity 2 ตัน

ขั้นตอนการทดสอบ

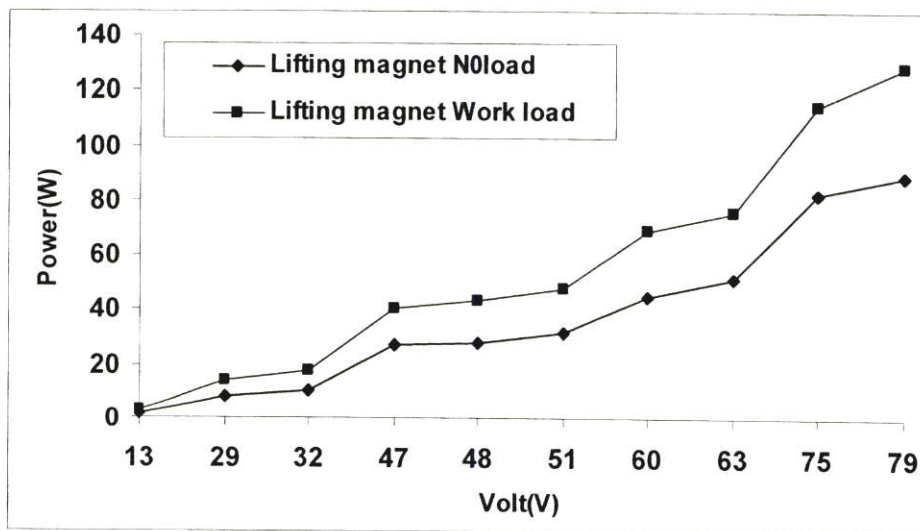
1. นำโซ่ที่ยึดตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแขวนกับรอกที่ติดกับเครน
จากนั้นดึงโซ่ที่รอกเพื่อให้เครื่องลอยสูงขึ้นจากพื้นประมาณ 50 cm
2. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าฉุกเฉินเข้ากับ
เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
3. ปรับแรงดันที่ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าสูงสุด
4. ปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้ลดลงจนเท่ากับค่าที่ได้
จากการทดสอบการยกแผ่นเหล็กในสภาวะมีโหลด บันทึกค่าแรงดันและกระแส
5. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 2- ข้อ 4 โดยเพิ่มระดับแรงดันตามค่าแรงดันที่ได้จากการทดสอบ
การยกแผ่นเหล็ก

ผลการทดสอบ



รูปที่ 4.9 ค่าระดับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาวะไม่มีโหลดเปรียบเทียบกับ การทดสอบยกแผ่นเหล็กจริง

จากรูป 4.9 (ตาราง ง.3, ง.4) เป็นการทดสอบขีดความสามารถ ของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาวะไม่มีโหลดซึ่งทดสอบเปรียบเทียบกับ การทดสอบยกแผ่นเหล็กในสภาวะมีโหลดที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ ที่เท่ากัน ซึ่งพบว่าค่ากระแสที่ใช้ในการยกแผ่นเหล็กในสภาวะที่มีโหลดจะมีค่าสูงกว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการยกแผ่นเหล็กในสภาวะมีโหลด



รูปที่ 4.10 ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาวะไม่มีโหลดเปรียบเทียบกับ การทดสอบยกแผ่นเหล็กในสภาวะมีโหลด

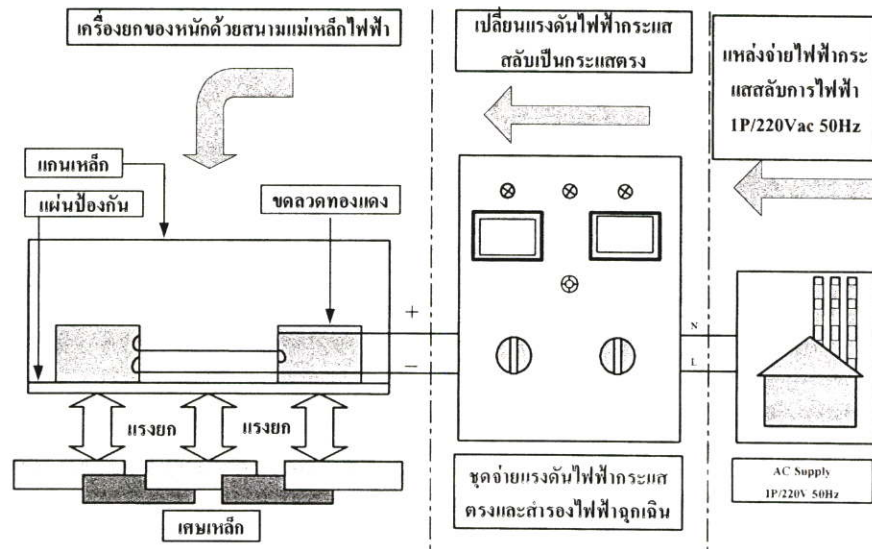
จากรูป 4.10 (ตาราง ง.3, ง.4) เป็นการทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักในสภาวะไม่มีโหลด ซึ่งทดสอบเปรียบเทียบกับ การทดสอบยกแผ่นเหล็กในสภาวะมีโหลดที่พิกัดกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่เท่ากันในแต่ละพิกัด โดยพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ยกแผ่นเหล็กในสภาวะมีโหลดจะมีค่าสูงกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ยกแผ่นเหล็กในสภาวะไม่มีโหลด

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบยกแผ่นเหล็กในสภาวะไม่มีโหลด พบว่าเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจะส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้า และพิกัดกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงซึ่งมีผลต่อขีดความสามารถในการยกแผ่นเหล็ก โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน $79 V_{dc}$ การยกแผ่นเหล็กในสภาวะมีโหลดซึ่งสามารถยกแผ่นเหล็กน้ำหนัก 250 kg ได้จะต้องใช้กระแสไฟฟ้า 1.62 A และกำลังไฟฟ้า 127.98 W ซึ่งสูงกว่าการยกแผ่นเหล็กในสภาวะไม่มีโหลด 30.86% ทั้งนี้เนื่องจากเกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในรูปของความร้อนและขดลวดสนาม โดยความร้อนเกิดขึ้นจากขดลวดภายในตัวเครื่องซึ่งส่งผ่านความร้อนมาที่แผ่นป้องกัน ซึ่งเป็นหน้าสัมผัสของเครื่องยกของหนักที่สัมผัสกับแผ่นเหล็กในขณะทำการทดสอบในสภาวะมีโหลดทำให้เกิดความร้อนสะสมสูงในบริเวณดังกล่าว และความร้อนที่เกิดจากขดลวดสนามซึ่งอยู่ในรูป $I^2 R$ ทั้งนี้จึงทำให้การทดสอบยกแผ่นเหล็กในสภาวะมีโหลดต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูงกว่าในสภาวะไม่มีโหลด

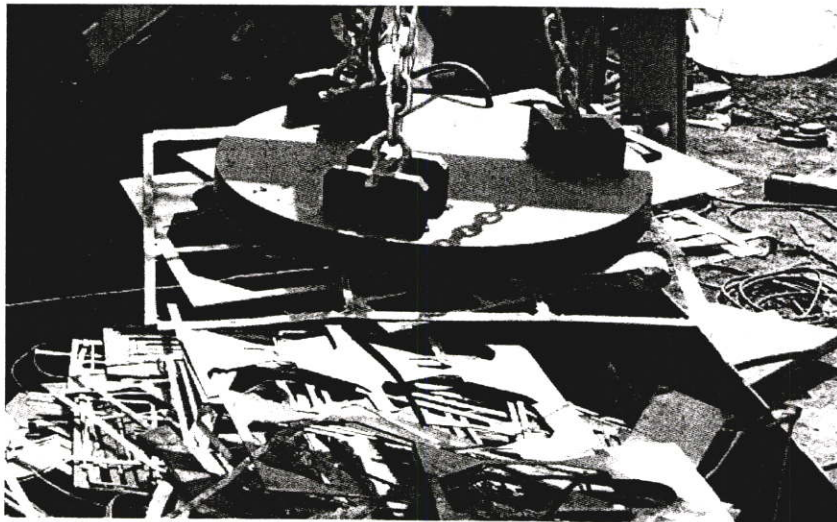
4.4 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการยกเศษเหล็ก

เป็นการทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการยกเศษเหล็กเพื่อหาค่าของแรงดันและกระแส และค่าพลังงานที่ใช้ต่อน้ำหนักเศษเหล็กที่ยกได้ซึ่งจะทำการทดสอบ โดยการวางเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าลงบนกองเศษเหล็กจากนั้นทำการปรับค่าของแรงดันไฟฟ้าขึ้นสูงสุดถึงค่าพิกัด จากนั้นจะทำการยกตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ซึ่งตัวเครื่องอยู่ในสภาวะที่เกิดการสร้างสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าขึ้นจึงทำให้สามารถยกเศษเหล็กติดขึ้นมาพร้อมกัน หลังจากนั้นจึงทำการปรับลดค่าของแรงดันลงจนเมื่อถึงค่าหนึ่งที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ไม่สามารถที่จะยกน้ำหนักของเศษเหล็กได้เศษเหล็กก็จะร่วงลงสู่พื้นซึ่งจะทำการบันทึกค่าของแรงดัน และกระแสก่อนที่แผ่นเหล็กจะร่วงลงสู่พื้นไว้โดยจะทำการทดลองในลักษณะเช่นนี้ และเพิ่มน้ำหนักของเศษเหล็กจนถึงค่าที่ไม่สามารถเพิ่มระดับแรงดันได้แล้วบันทึกผล



รูปที่ 4.11 วงจรการทดสอบยกเศษเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.11 เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า จ่ายให้กับชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงและชุดเบตเตอร์รีชาร์ตเจอร์ ชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง จะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้เครื่องใช้กำลังไฟฟ้าที่ได้รับในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในการยกเศษเหล็กแสดงการต่อชุดทดสอบดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การทดสอบยกเศษเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

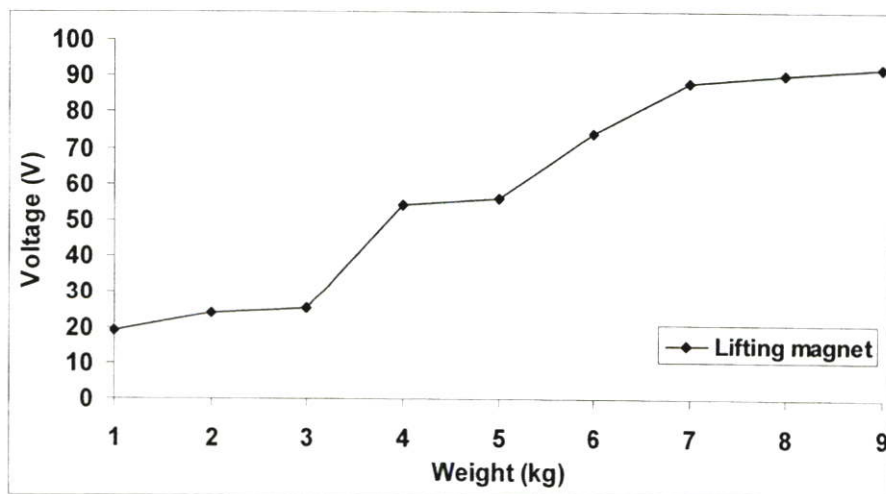
1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0-110 V_{dc} พร้อมชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน 96 V_{dc}

2. ต้นแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
3. เครื่องชั่งดิจิตอล 0-30 ตัน
4. เครื่องชั่ง 0-120 kg
5. รถโฟลคลิฟต์ 0-3 ตัน

ขั้นตอนการทดสอบ

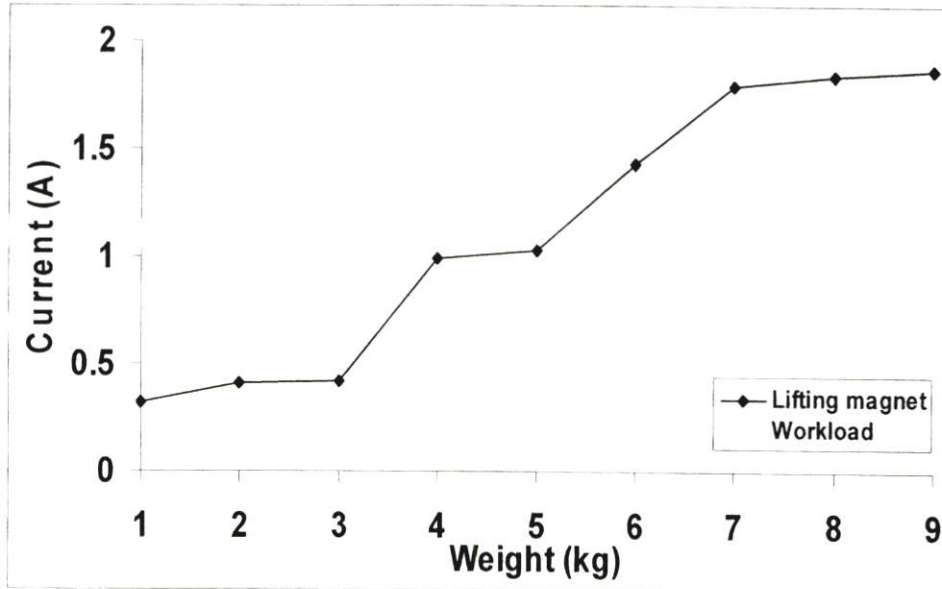
1. นำโซ่ที่ยึดตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแขวนกับแกนรับน้ำหนักของรถโฟลคลิฟต์
2. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าฉุกเฉินเข้ากับเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
3. วางเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าลงบนกองเศษเหล็กทดสอบซึ่งทำการชั่งน้ำหนักก่อนทดสอบโดยกำหนดน้ำหนักเหล็กของแต่ละกองไว้ที่ 1-10 kg
4. ปรับแรงดันที่ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าสูงสุด
5. บังคับแกนรับน้ำหนักที่รถโฟลคลิฟต์ซึ่งแขวนเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้เลื่อนขึ้นซึ่งในตอนนี้จะมีเศษเหล็กติดขึ้นมาที่เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
6. ปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้ลดลงจนถึงค่าที่เศษเหล็กร่วงลงสู่พื้นทำการบันทึกผลการทดสอบ
7. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 2- ข้อ 6 โดยเพิ่มน้ำหนักเศษเหล็ก

ผลการทดสอบ



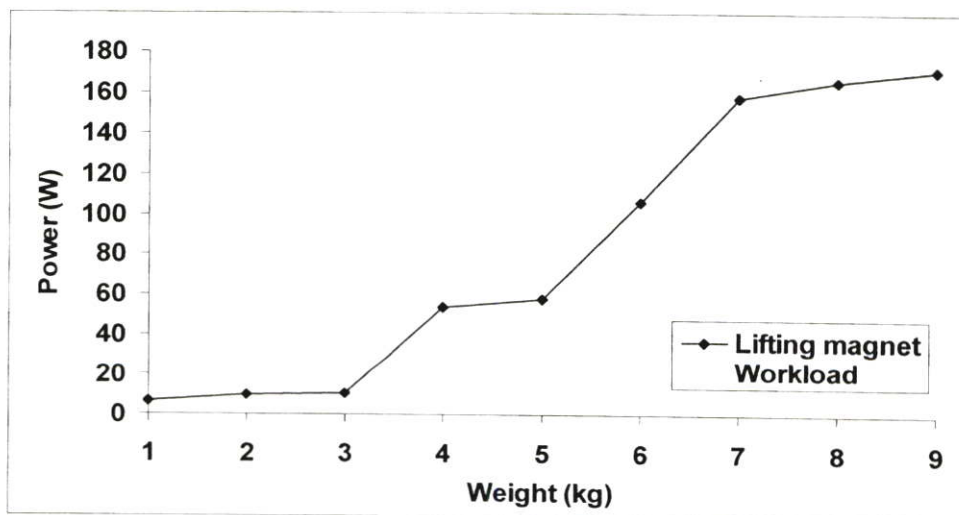
รูปที่ 4.13 ค่าระดับแรงดันที่ใช้ทดสอบต่อการยกเศษเหล็กที่น้ำหนัก 1-9 kg

จากรูป 4.13 (ตาราง ง.5) เป็นการทดสอบขีดความสามารถในการยกเศษเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทดสอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ พบว่าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 92 V_{dc} เครื่องสามารถยกเศษเหล็กที่น้ำหนัก 9 kg ได้



รูปที่ 4.14 ค่าระดับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบต่อการยกเศษเหล็กที่น้ำหนัก 1-9 kg

จากรูป 4.14 (ตาราง ง.5) เป็นการทดสอบขีดความสามารถในการยกเศษเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทดสอบที่ระดับกระแสไฟฟ้าต่างๆ พบว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้า 1.86 A เครื่องสามารถยกเศษเหล็กที่น้ำหนัก 9 kg ได้



รูปที่ 4.15 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบต่อน้ำหนักเศษเหล็ก 1-9 kg

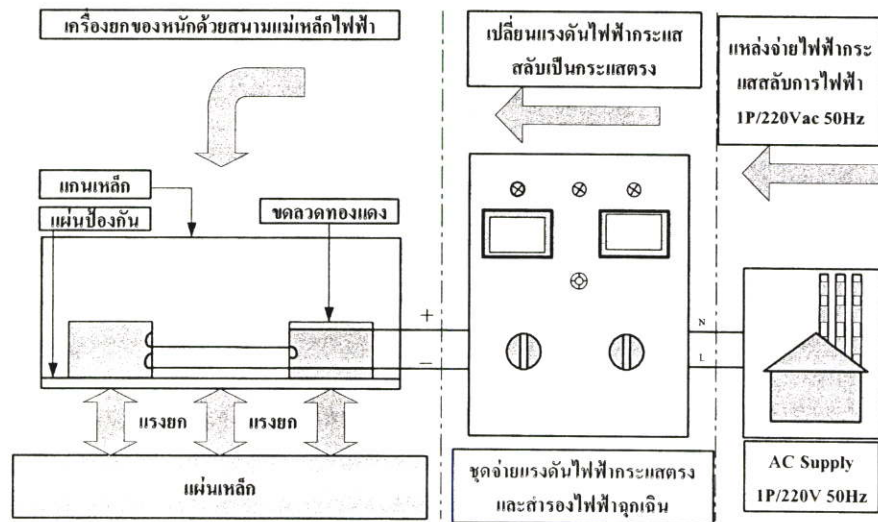
จากรูป 4.15 (ตาราง ง.5) เป็นการทดสอบขีดความสามารถในการยกเศษเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทดสอบที่พิกัดกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ พบว่า ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 171.12 W เครื่องสามารถยกเศษเหล็กที่น้ำหนัก 9 kg ได้ซึ่งพิกัดกำลังไฟฟ้ามีผลต่อขีดความสามารถในการยกเศษเหล็ก โดยที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงจะมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงทำให้ขีดความสามารถในการยกแผ่นเหล็กสูงตาม

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่าเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อขีดความสามารถในการยกแผ่นเหล็ก โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุด $92 V_{dc}$ จะมีขีดความสามารถในการยกเศษเหล็กที่น้ำหนักเหล็ก 9 kg คิดเป็น $19 W/kg$ ซึ่งน้อยกว่าการยกแผ่นเหล็กทั้งนี้ขลวดที่รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้เกิดการเหนียวนำที่แกนเหล็ก ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าขั้วเหนือขึ้นที่พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก และเกิดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าขั้วใต้ขึ้นที่พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งจากแกนเหล็กขั้วเหนือไปยังแกนเหล็กขั้วใต้ ซึ่งเมื่อแนวเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตัดผ่านแผ่นเหล็กก็ จะทำให้เกิดแรงยกแผ่นเหล็กขึ้นแต่เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ไม่สามารถที่จะตัดผ่านชิ้นเศษเหล็กซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอนได้สม่ำเสมอทั่วพื้นผิวหน้าสัมผัสระหว่างเศษเหล็กและแผ่นป้องกันของเครื่องจึงทำให้เกิดช่องว่างอากาศมากซึ่งจากสมการที่ 3.8 เมื่อ I_g ซึ่งเป็นช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงในการยกมีค่าต่ำลง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแรงในการยกเศษเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าน้อยกว่าแรงในการยกแผ่นเหล็ก

4.5 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่

เป็นการทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการยกแผ่นเหล็กกรณีกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่สูงสุด $80 V_{dc}$, $70 V_{dc}$ และในกรณีที่กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ $45 V_{dc}$ โดยจะทำการปรับแรงดันไฟฟ้าให้มีค่า $80 V_{dc}$ จากนั้นเพิ่มน้ำหนักแผ่นเหล็กขึ้นทำการบันทึกค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า รวมถึงค่าน้ำหนักที่เพิ่มจนถึงค่าที่เครื่องยกของหนักไม่สามารถยกแผ่นเหล็กได้ จึงหยุดทำการทดสอบและเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าลงเป็น $70 V_{dc}$ และ $45 V_{dc}$ โดยทำการทดสอบซ้ำเหมือนการทดสอบที่ $80 V_{dc}$ แล้วบันทึกผลการทดสอบ



รูปที่ 4.16 วงจรการทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
ในกรณีกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่

จากรูปที่ 4.16 เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าจ่ายให้กับชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง และชุดแบตเตอรี่รีชาร์ตเจอร์ ชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงจะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ให้กับเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใช้กำลังไฟฟ้าที่ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในการยกแผ่นเหล็ก แสดงการต่อชุดทดสอบดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 การทดสอบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีกำหนดแรงดันไฟฟ้าคงที่

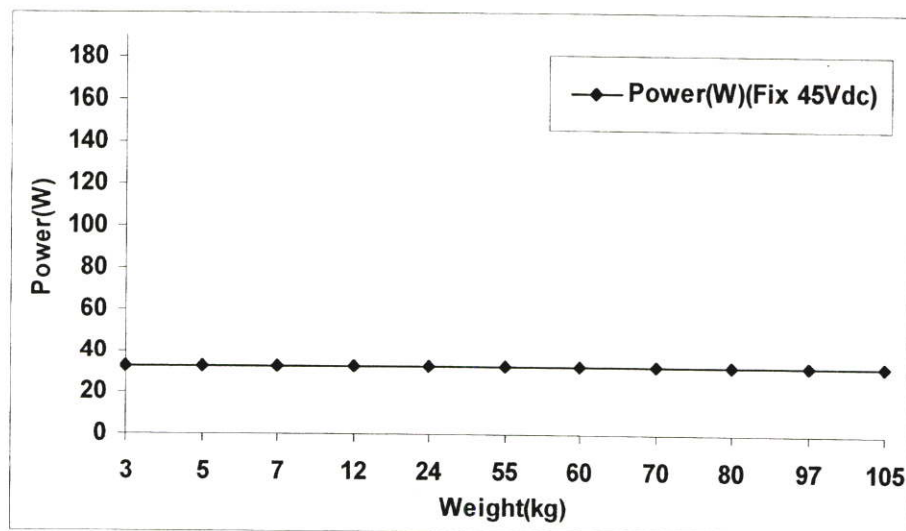
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0-110 V_{dc} พร้อมชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำรอง
ฉุกเฉิน 96 V_{dc}
2. ต้นแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
3. เครื่องชั่ง 0-120 kg
4. เครื่อง Capacity 2 ตัน

ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำโซ่ที่ยึดตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแขวนกับเครน
2. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าฉุกเฉินเข้ากับ
เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
3. วางเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าลงบนแผ่นเหล็กทดสอบโดยให้
หน้าสัมผัสแผ่นป้องกันวางอยู่บนแผ่นเหล็กซึ่งทำการชั่งน้ำหนักก่อนทดสอบโดย
น้ำหนักที่ได้จะ ได้ตามขนาดแผ่นเหล็กที่มีอยู่จริง
4. ปรับแรงดันที่ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่า 80 V_{dc}
5. ดึงโซ่ที่รอกเพื่อให้ตัวเครื่องที่มีแผ่นเหล็กติดอยู่ลอยขึ้นบันทึกผลค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้
และน้ำหนักแผ่นเหล็กจากนั้นทำการเพิ่มน้ำหนักแผ่นเหล็กจนเครื่องไม่สามารถยกได้
จึงทำการเปลี่ยนค่าแรงดันเป็น 70 V_{dc} และ 45 V_{dc} แล้วทำตามขั้นตอนในข้อ 2-5

ผลการทดสอบ



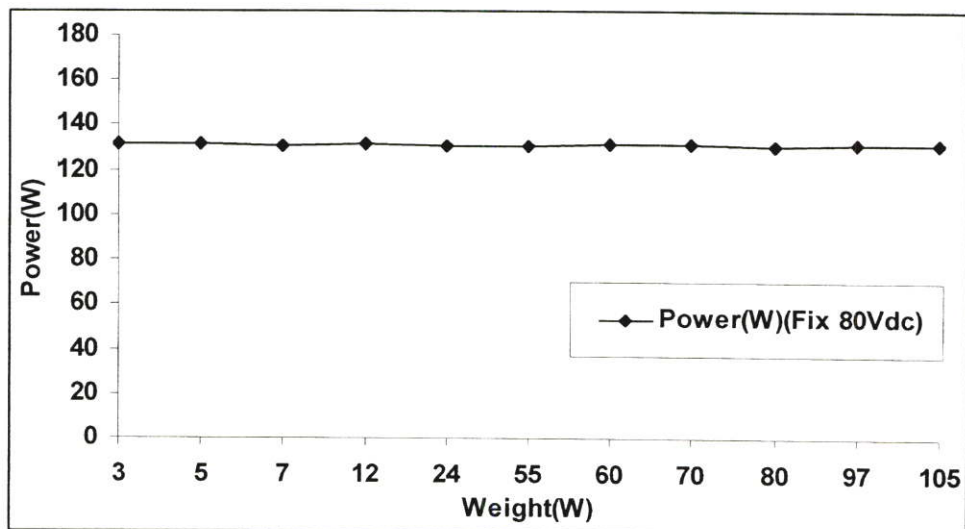
รูปที่ 4.18 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในต่อน้ำหนักแผ่นเหล็กที่เพิ่มขึ้นที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 45 V_{dc}

จากรูป 4.18 (ตาราง ง.6) เป็นการทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีกำหนดแรงดันไฟฟ้าคงที่ 45 V_{dc} โดยจากการทดสอบจะพบว่าเมื่อเพิ่มน้ำหนักแผ่นเหล็กขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้จะมีค่าคงที่



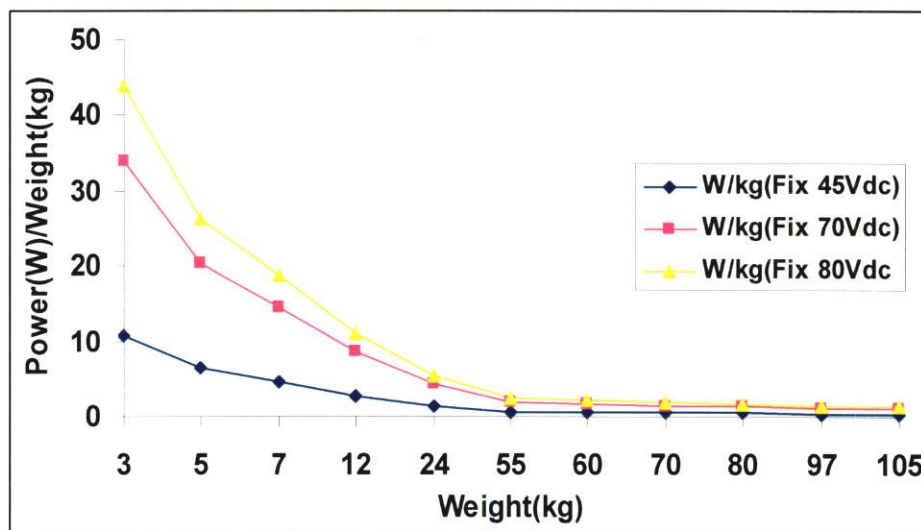
รูปที่ 4.19 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อน้ำหนักแผ่นเหล็กที่เพิ่มขึ้นที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 70 V_{dc}

จากรูป 4.19 (ตาราง ง.7) เป็นการทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีกำหนดแรงดันไฟฟ้าคงที่ 70 V_{dc} โดยจากการทดสอบจะพบว่าเมื่อเพิ่มน้ำหนักแผ่นเหล็กขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้จะมีค่าคงที่



รูปที่ 4.20 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อน้ำหนักแผ่นเหล็กที่เพิ่มขึ้นที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 80 V_{dc}

จากรูป 4.20 (ตาราง ง.8) เป็นการทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีกำหนดแรงดันไฟฟ้าคงที่ 80 V_{dc} โดยจากการทดสอบจะพบว่าเมื่อเพิ่มน้ำหนักแผ่นเหล็กขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้จะมีค่าคงที่



รูปที่ 4.21 ค่า (W/kg) ต่อน้ำหนักแผ่นเหล็กที่เพิ่มขึ้นที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 45 V_{dc} , 70 V_{dc} และ 80 V_{dc}

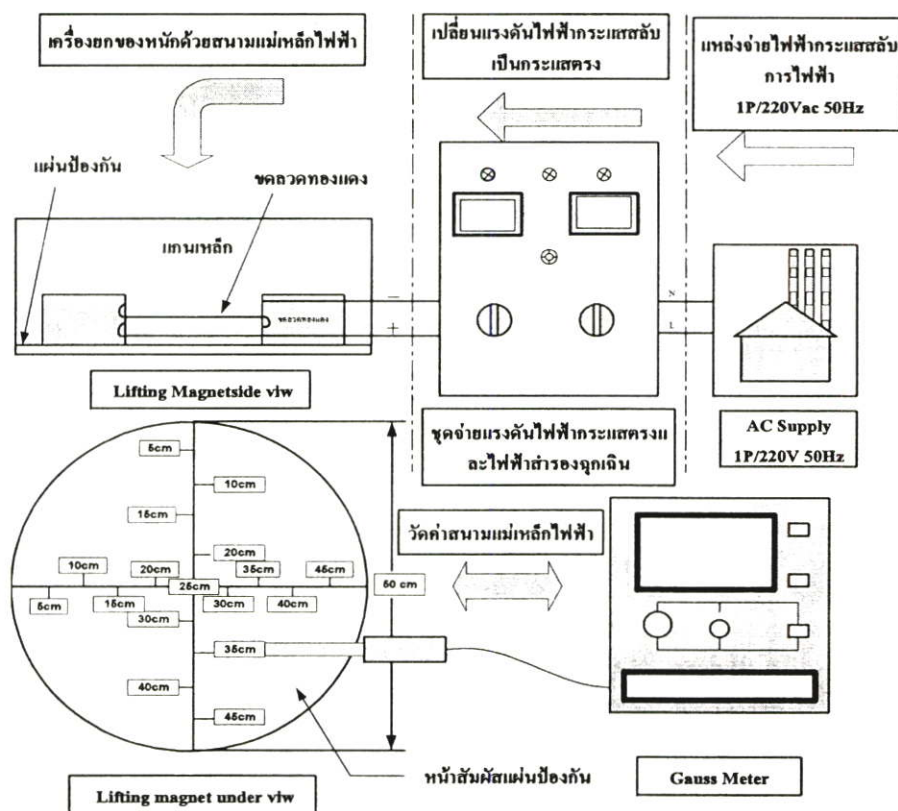
วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบในกรณีกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ 45 V_{dc} พบว่าเมื่อเพิ่มน้ำหนักแผ่นเหล็กขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ 32.4 W และในกรณีที่กำหนดค่าระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่ 70 V_{dc} เมื่อเพิ่มน้ำหนักแผ่นเหล็กขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ 101.5 W รวมถึงในกรณีที่กำหนดค่าระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่ 80 V_{dc} เมื่อเพิ่มน้ำหนักแผ่นเหล็กขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ 131.2 W โดยที่เมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อน้ำหนักแผ่นเหล็กที่ยกได้ของทั้ง 3 กรณีมาเปรียบเทียบกับการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักที่ยกได้พบว่าอัตราส่วน (W/kg) มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มน้ำหนักขึ้นนั้นหมายความว่า ประสิทธิภาพในการยกแผ่นเหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักที่ยกเพิ่มขึ้นดังนั้นในการใช้งานเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แบบวงกลมขนาดเล็กเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุดควรที่จะปรับค่าแรงดันที่ใช้ให้สัมพันธ์กับน้ำหนักที่ต้องการยก

4.6 การทดสอบวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

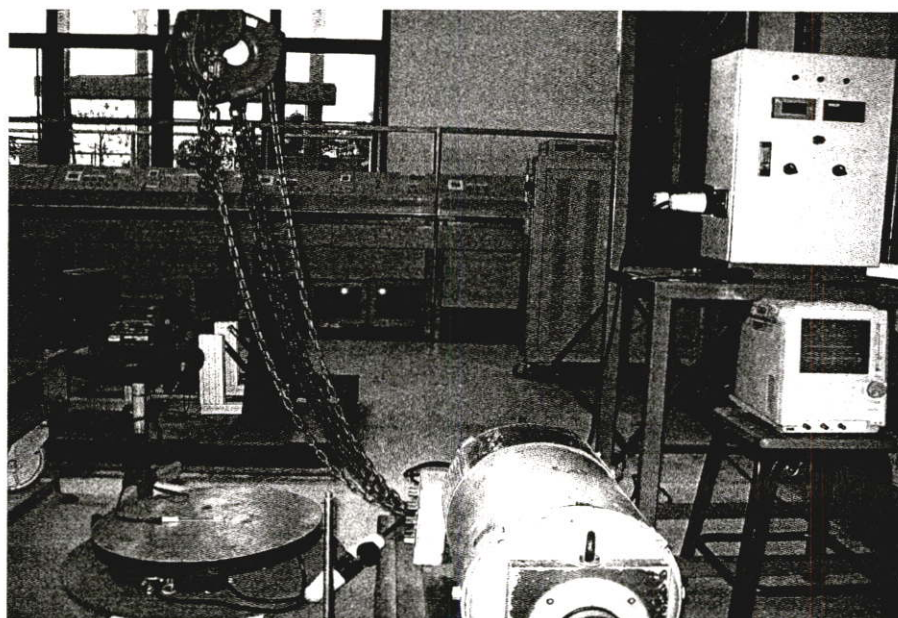
เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น บริเวณหน้าสัมผัสของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งถูกปิดด้วยแผ่นป้องกันซึ่งจะต้องสัมผัสกับพื้นผิวของแผ่นเหล็กหรือเศษเหล็ก เพื่อหาว่าพื้นผิวแผ่นป้องกันส่วนใดมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

สูงซึ่งจะทำการทดสอบโดยการใช้ Gauss Meter วัดบริเวณพื้นผิวหน้าสัมผัสของแผ่นป้องกันโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วปรับระดับแรงดันที่ 10 V_{dc} , 40 V_{dc} และ 90 V_{dc} ซึ่งแต่ละค่าระดับแรงดันจะแบ่งแบ่งการวัดเป็นสองแกนคือในแนวแกน Y และ แนวแกน X เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องยกของหนักเท่ากับ 50 เซนติเมตรจึงทำให้สามารถแบ่งพื้นผิวหน้าสัมผัสของแผ่นป้องกันได้เป็น 10 ส่วนที่เท่ากันแล้วทำการบันทึกผล



รูปที่ 4.22 วงจรการทดสอบวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูป 4.22 เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าจ่ายให้กับชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงและชุดเบตเตอร์รีซาร์ตเจอร์ ชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นกระแสตรงจะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเครื่องจะใช้กำลังไฟฟ้า ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและกระจายเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือ ซึ่งเป็นพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในสู่ขั้วแม่เหล็กขั้วใต้ที่เป็นพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอกจะนั้นจะใช้ Gauss Meter ในการวัดค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทดสอบดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.23 การทดสอบวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

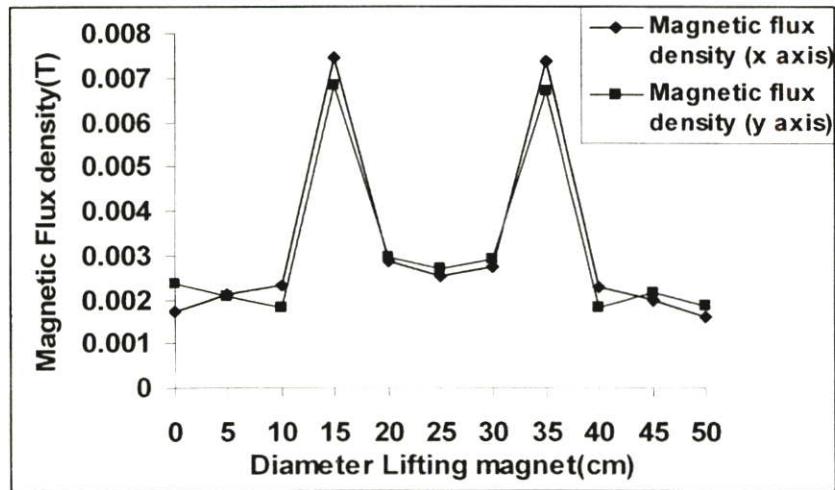
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0-110 V_{dc} พร้อมชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำรอง
ฉุกเฉิน 96 V_{dc}
2. ดินแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
3. เครื่อง Capacity 2 ตัน
4. Gauss Meter

ขั้นตอนการทดสอบ

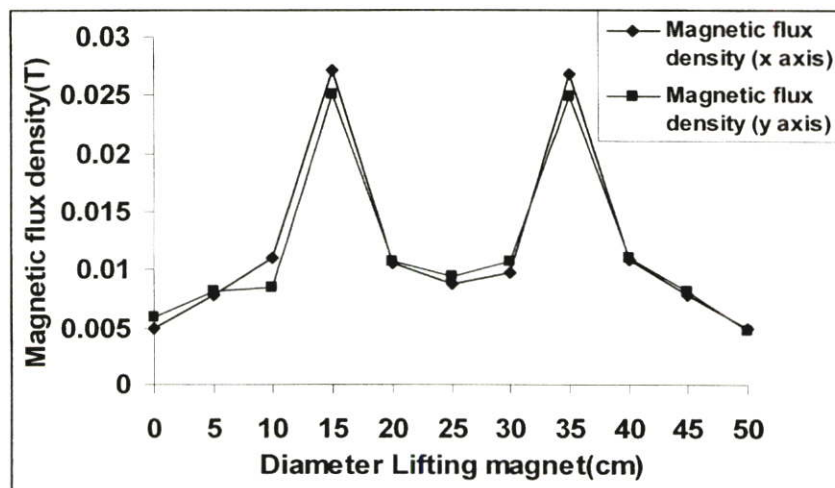
1. นำโซ่ที่ยึดตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแขวนกับรอกที่ติดกับเครน
จากนั้นดึงโซ่ที่รอกเพื่อให้เครื่องลอยสูงขึ้นจากพื้นประมาณ 50 cm
2. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าฉุกเฉินเข้ากับ
เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
3. ปรับแรงดันที่ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่า 10 V_{dc}
4. นำหัววัดของ Gauss Meter มาทำการ Set zero จากนั้นนำไปวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก
โดยวัดที่พื้นผิวหน้าสัมผัสของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งปิด
ด้วยแผ่นป้องกันตามแกน X และ แกน Y ซึ่งได้ทำการแบ่งเป็น 10 ส่วนโดยแบ่งส่วนละ
5 เซนติเมตรบันทึกความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น
5. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 2- ข้อ 4 โดยเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าเป็น 40 V_{dc} และ 90 V_{dc}
ตามลำดับบันทึกผลการทดลอง

ผลการทดสอบ



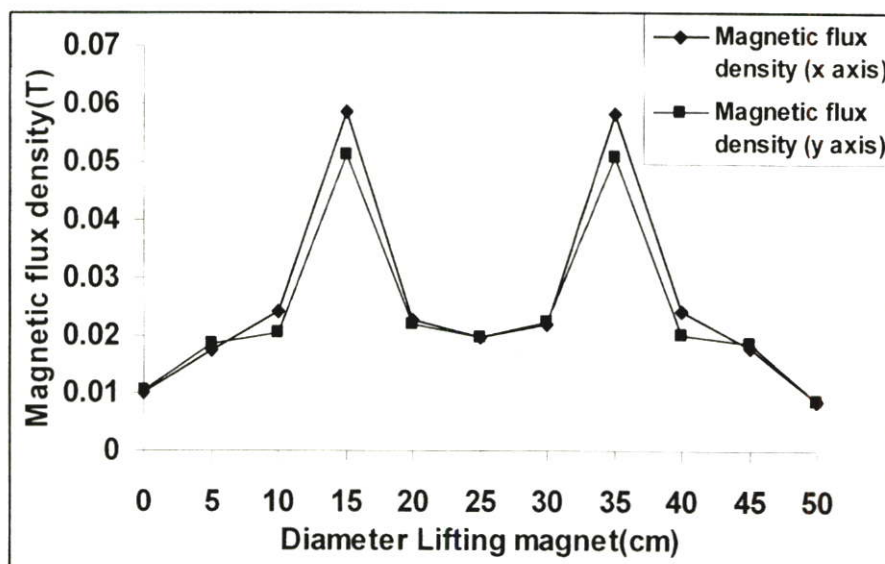
รูปที่ 4.24 ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณพื้นผิวหน้าสัมผัสของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 10 V_{dc} กระแสไฟฟ้า 0.13 A

จากรูป 4.24 (ตาราง ง.9) เป็นการทดสอบวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณพื้นผิวหน้าสัมผัสของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 10 V_{dc} กระแสไฟฟ้า 0.13 A โดยวัดในแนวแกน X และแกน Y ที่ระยะห่างช่วงละ 5 cm โดยพบว่าที่ระยะห่าง 10-20 cm และ 30-40 cm ของทั้งสองแกนจะมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง ทั้งนี้เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีขดลวดทองแดงพันอยู่ จึงทำให้บริเวณดังกล่าวมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงกว่าช่วงอื่น ๆ ในแกนเดียวกัน



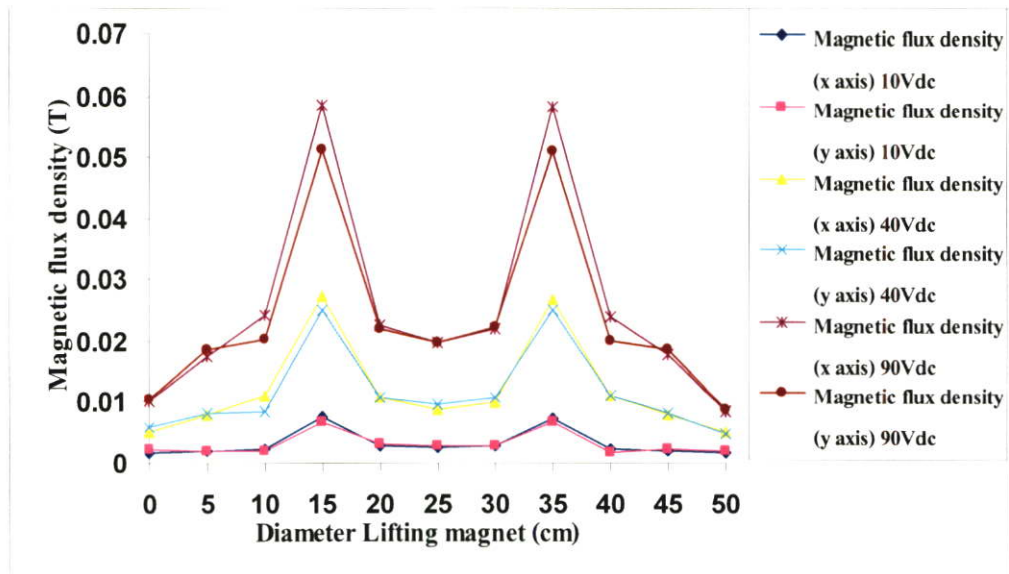
รูปที่ 4.25 ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณพื้นผิวหน้าสัมผัสของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 40 V_{dc} กระแสไฟฟ้า 0.68 A

จากรูป 4.25 (ตาราง ง.10) เป็นการทดสอบวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณพื้นผิวหน้า สัมผัสของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $40 V_{dc}$ กระแสไฟฟ้า $0.68A$ โดยวัดในแนวแกน X และแกน Y ที่ระยะห่างช่วงละ $5 cm$ โดยพบว่าที่ระยะห่าง $10-20 cm$ และ $30-40 cm$ ของทั้งสองแกนจะมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง ทั้งนี้เนื่องมาจากเป็นบริเวณที่มีขดลวดทองแดงพันอยู่ จึงทำให้บริเวณดังกล่าวมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงกว่าช่วงอื่น ๆ ในแกนเดียวกัน



รูปที่ 4.26 ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณพื้นผิวหน้าสัมผัสของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $90 V_{dc}$ กระแสไฟฟ้า $1.39 A$

จากรูปที่ 4.26 (ตาราง ง.11) เป็นการทดสอบวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณพื้นผิวหน้า สัมผัสของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $90 V_{dc}$ กระแสไฟฟ้า $1.39 A$ โดยวัดในแนวแกน X และแกน Y ที่ระยะห่างช่วงละ $5 cm$ โดยพบว่าที่ระยะห่าง $10-20 cm$ และ $30-40 cm$ ของทั้งสองแกนจะมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง ทั้งนี้เนื่องมาจากเป็นบริเวณที่มีขดลวดทองแดงพันอยู่จึงทำให้บริเวณดังกล่าวมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงกว่าช่วงอื่น ๆ ในแกนเดียวกัน



รูปที่ 4.27 ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่หน้าสัมผัสของเครื่องที่ระดับแรงดันไฟฟ้า

10 V_{dc}, 40 V_{dc} และ 90 V_{dc} กระแสไฟฟ้า 0.13 A, 0.68 A และ 1.39 A

จากรูป 4.27 (ตาราง ง.9, ง.10, ง.11) เป็นการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณพื้นผิวหน้าสัมผัสของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 10 V_{dc}, 40 V_{dc} และ 90 V_{dc} กระแสไฟฟ้า 0.13 A, 0.68 A และ 1.39 A โดยวัดในแนวแกน X และแกน Y ที่ระยะห่างช่วงละ 5 cm โดยพบว่าที่ระยะห่าง 10-20 cm และ 30-40 cm ของทั้งสองแกนจะมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง ทั้งนี้เนื่องมาจากเป็นบริเวณที่มีขดลวดทองแดงพันอยู่ จึงทำให้บริเวณดังกล่าวมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงกว่าช่วงอื่นๆ ในแกนเดียวกัน

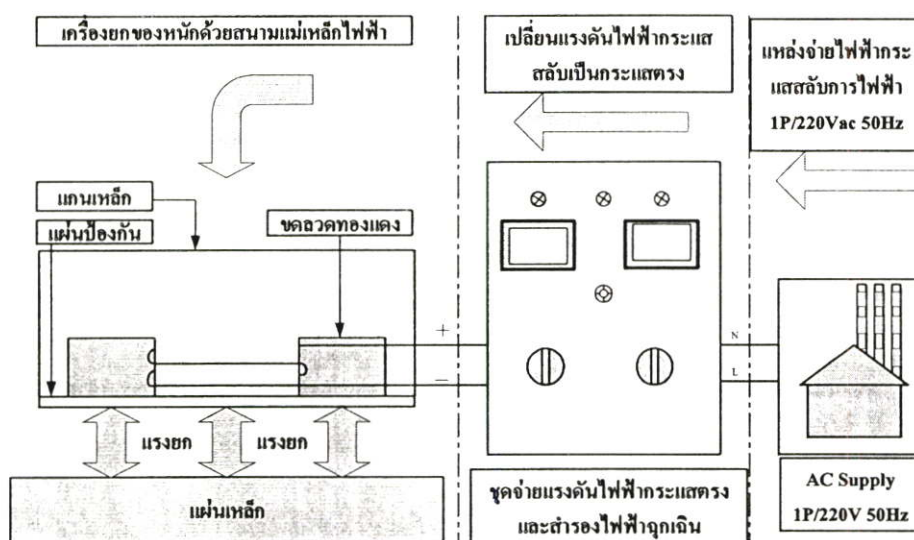
วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่าเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง จะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กโดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 90 V_{dc} จะมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด 0.0508 (T) หรือเพิ่มขึ้น 86.81% เมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 10 V_{dc} ในแกนเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดซึ่งพันอยู่บริเวณระยะห่างที่ 10-20 cm และ 30-40 cm ทั้งในแกน X และแกน Y ของพื้นผิวหน้าสัมผัสของเครื่อง จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าขั้วเหนือขึ้นบริเวณพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก และเกิดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าขั้วใต้ขึ้นบริเวณพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงใน ซึ่งจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งจากขั้วแกนเหล็กขั้วเหนือไปยังขั้วแกนเหล็กขั้วใต้ซึ่งเมื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กก็จะสูงขึ้นตาม โดยจะพบว่าที่ระดับแรงดัน ไฟฟ้าเดียวกันค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่าสูงในช่วง ระยะห่างที่ 10-20 cm และ 30-40 cm ทั้งในแกน X และ

แกน Y ทั้งนี้เนื่องมาจากบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีขดลวดพันอยู่จะทำให้มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ

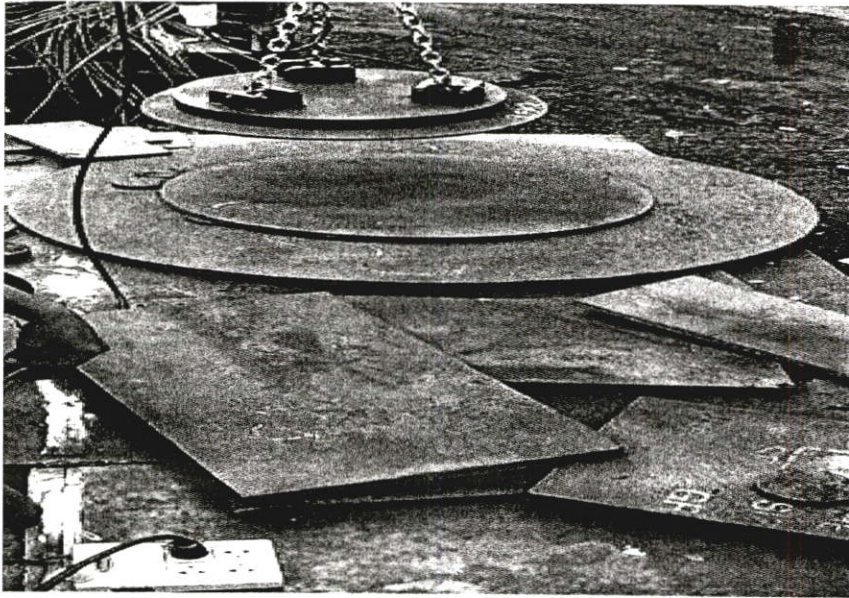
4.7 การทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าพิกัดแรงดัน ไฟฟ้ารวมถึงน้ำหนักที่เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถที่จะทำการยกแผ่นเหล็กได้โดยไม่ล้วงหล่นในขณะที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากการไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับเครื่องได้ โดยเนื่องจากต้องการให้ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งภายในมีระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินรวมอยู่ด้วย สามารถที่จะทำการเคลื่อนย้ายไปทำการทดสอบในอุตสาหกรรมได้สะดวกจึงออกแบบให้ใช้แบตเตอรี่แห่ง 12 V_{dc} จำนวน 8 ลูกโดยให้ระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินสามารถที่จะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำรองได้ 96 V_{dc} โดยสามารถแสดงวงจรการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 วงจรการทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน

จากรูปที่ 4.28 เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าจ่ายให้กับชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง และชุดแบตเตอรี่รีชาร์ตเจอร์ ชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงจะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ให้กับเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใช้กำลังไฟฟ้าที่ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในการยกแผ่นเหล็ก โดยเมื่อทำการตัดแหล่งจ่ายจากการไฟฟ้าออกเครื่องยกของหนักจะต้องทำงานได้ตามปกติโดยแผ่นเหล็กทดสอบไม่ล้วงหล่นแสดงการทดสอบดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.29 การทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

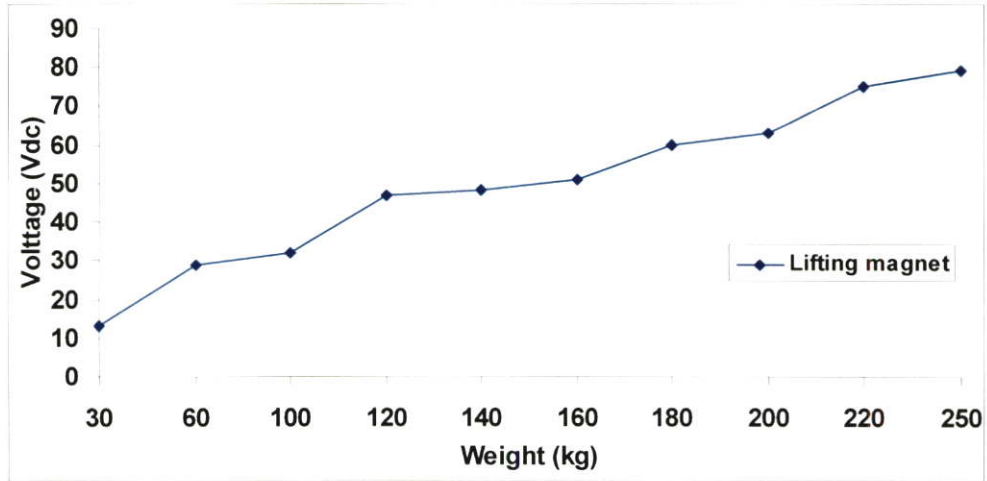
1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0-110 V_{dc} พร้อมชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน 96 V_{dc}
2. ต้นแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
3. เครื่องชั่งดิจิตอล 0-30 ตัน
4. เครื่องชั่ง 0-120 kg
5. รถโฟลคลิฟต์ 0-3 ตัน

ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำโซ่ที่ยึดตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแขวนกับแกนรับน้ำหนักของรถโฟลคลิฟต์
2. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าฉุกเฉินเข้ากับเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
3. วางเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าลงบนแผ่นเหล็กทดสอบ โดยให้หน้าสัมผัสแผ่นป้องกันวางอยู่บนแผ่นเหล็กซึ่งทำการชั่งน้ำหนักก่อนทดสอบโดยน้ำหนักที่ได้จะได้ตามขนาดแผ่นเหล็กที่มีอยู่จริง
4. ปรับแรงดันที่ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่า 13 V_{dc}
5. บังคับแกนรับน้ำหนักที่รถโฟลคลิฟต์ซึ่งแขวนเครื่องยกของหนักให้เลื่อนขึ้นซึ่งจะมีแผ่นเหล็กติดขึ้นมาที่เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

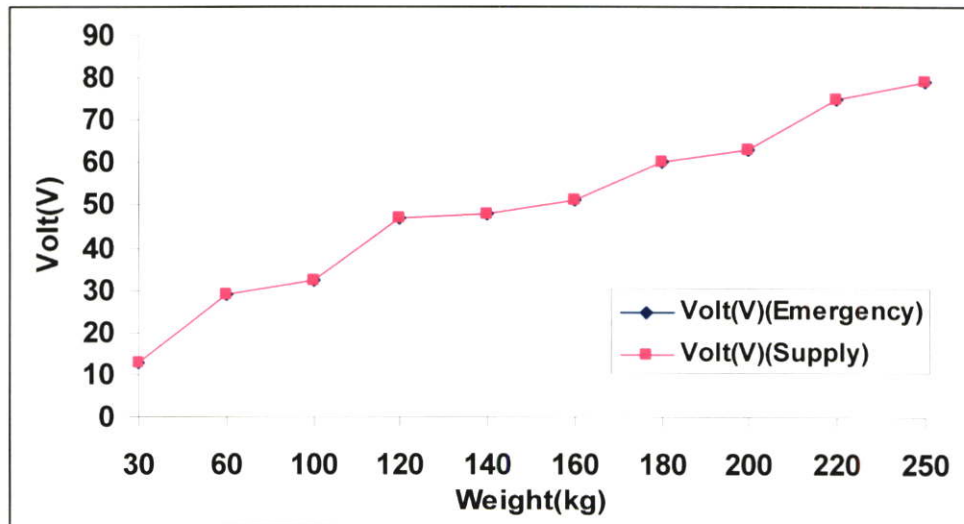
6. ตัดแหล่งจ่ายจากการไฟฟ้าออกจากชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทำการบันทึกผล
7. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 2- ข้อ 6 โดยเพิ่มน้ำหนักแผ่นเหล็กจนถึง 250 kg

ผลการทดสอบ



รูปที่ 4.30 แรงดันไฟฟ้าและน้ำหนักที่ได้จากการทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน

จากรูปที่ 4.30 จะแสดงให้เห็นระดับแรงดันไฟฟ้า และพิกัดน้ำหนักที่ระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินสามารถที่จะจ่ายให้กับเครื่องยกของหนักได้โดยที่แผ่นเหล็กทดสอบไม่ล่วงหล่น



รูปที่ 4.31 การเปรียบเทียบระหว่างระดับแรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินสามารถจ่ายให้กับเครื่องยกของหนักได้กับระดับแรงดันไฟฟ้าปกติที่เครื่องสามารถทำงานได้

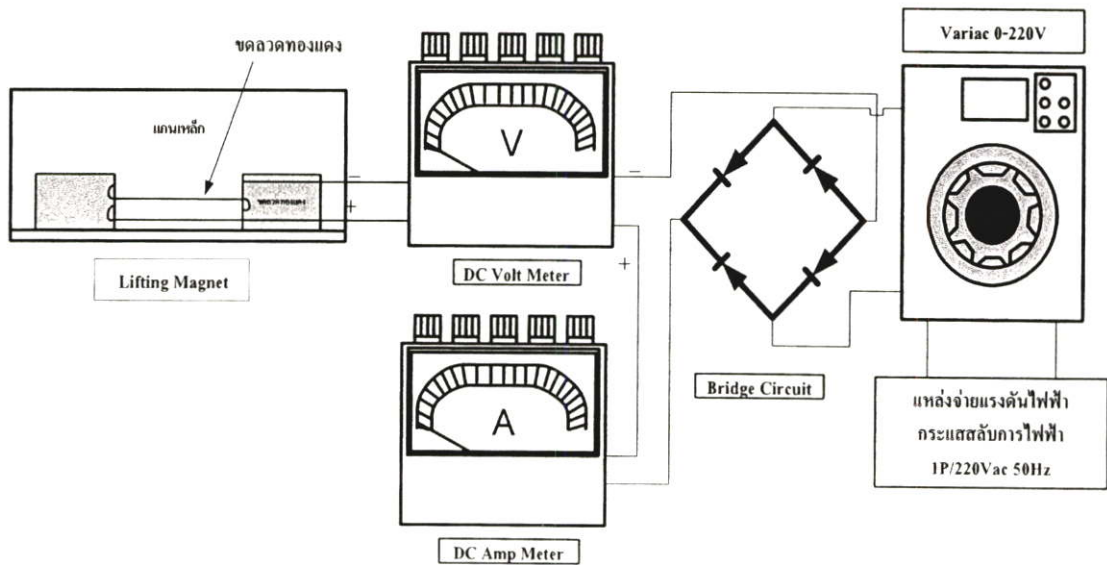
จากรูปที่ 4.31 (ตาราง ง.1) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างระดับแรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินสามารถจ่ายให้กับเครื่องของหนักได้กับระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ที่เครื่องสามารถทำงานได้โดยจะพบว่าระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุดที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า $79 V_{dc}$ ที่น้ำหนักแผ่นเหล็กสูงสุด 250 kg

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินพบว่าสามารถทำงานได้ในขณะที่เครื่องของหนักยกแผ่นเหล็กสูงสุดที่ 250 kg ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $79 V_{dc}$ ทั้งนี้เนื่องมาจากการกำหนดจำนวนแบตเตอรี่ที่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้า $12 V_{dc}$ กระแสไฟฟ้า 5A/hr ให้มีจำนวน 8 ลูกเพื่อให้ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีน้ำหนักเบา และสะดวกในการเคลื่อนย้ายไปทดสอบในอุตสาหกรรมโดยเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าปกติที่เครื่องสามารถให้ยกแผ่นเหล็กได้ จะสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินให้กับเครื่องได้ในช่วง $79 V_{dc}$ ที่การยกน้ำหนักสูงสุด 250 kg ซึ่งถ้าต้องการให้เครื่องยกของหนักยกแผ่นเหล็กพิกัดน้ำหนักมากกว่า 250 kg โดยไม่ล้วงหล่นเมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าปกติไม่สามารถจ่ายได้จะต้องออกแบบให้ระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน จ่ายแรงดันได้ไม่น้อยกว่า $79 V_{dc}$ จึงจะสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้เพียงพอในกรณีที่ต้องการให้ยกน้ำหนักที่มากกว่า 250 kg

4.8 การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดด้วยวิธี V-I Method

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของขดลวดทองแดงซึ่งพันอยู่ในตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยจะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งผ่านมาจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่าน Variac แล้วผ่านวงจรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Bridge Circuit) จากนั้นส่งผ่านมายังขดลวดทองแดงซึ่งอยู่ในตัวเครื่องยกของหนัก และทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้โดยใช้ (DC VoltMeter) และวัดค่ากระแสไฟฟ้าจาก (DC AmpMeter) จากนั้นจะนำผลที่ได้ไปคำนวณหาค่าความชันซึ่งจะเป็นค่าความต้านทานที่แท้จริงของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กต้นแบบที่จัดสร้างขึ้น โดยสามารถแสดงวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานขดลวดด้วยวิธี V-I Method

จากรูป 4.32 เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าจ่ายเข้าสู่ Variac และผ่านเข้าสู่วงจรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง (Bridge Circuit) จากนั้นจะส่งผ่านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปยังตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งภายในมีขดลวดทองแดงพันอยู่โดยจะทำการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ตัวขดลวดทองแดงตั้งแต่ 0.15-1.5 A ซึ่งได้จากการปรับ Variac ต่อจากนั้นจะทำการวัดค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้โดยใช้ (DC VoltMeter) และวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนได้จาก (DC AmpMeter) จากนั้นบันทึกผลการทดสอบเพื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณหาค่าความชัน ซึ่งเป็นค่าความต้านทานจริงของขดลวดทองแดงซึ่งอยู่ภายในตัวเครื่องยกของหนัก



รูปที่ 4.33 การทดสอบ V-I Method

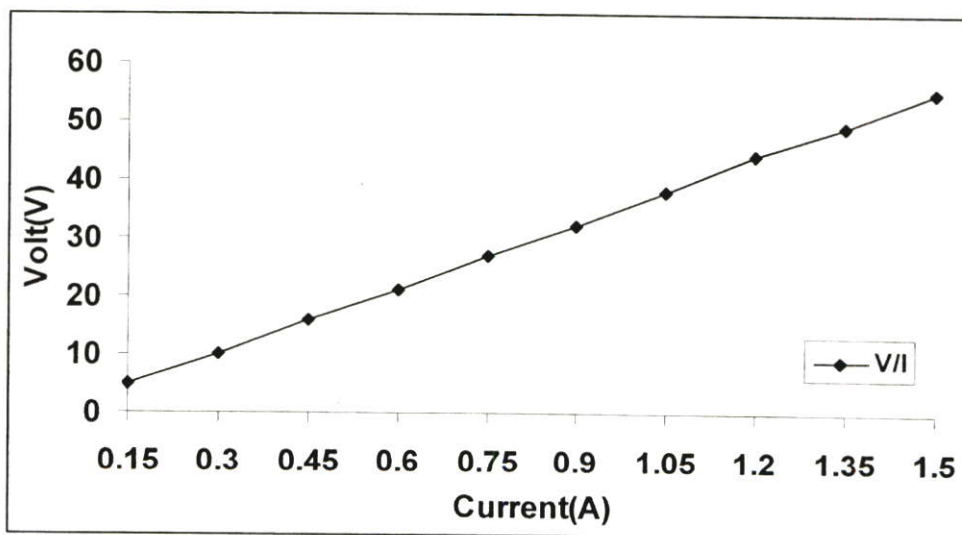
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. Variac 0-220 V_{ac}
2. ต้นแบบเครื่องยกขออนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
3. เกรน Capacity 2 ตัน
4. DC Amp Meter
5. DC Volt Meter

ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำโซ่ที่ยึดตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแขวนกับรอกที่ติดกับเกรน
2. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ Variac ในด้านอินพุทและต่อด้านเอาต์พุทจาก Variac เข้าสู่วงจรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
3. ต่อด้านเอาต์พุทของชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับขดลวดซึ่งอยู่ภายในเครื่องยกของหนักโดยต่อผ่าน DC Volt Meter และ DC Amp Meter
4. ปรับ Variac ให้ได้ค่ากระแสที่ 0.15 A บันทึกค่าแรงดัน และกระแสที่ได้
5. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 4 โดยเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้าจนถึงกระแสพิคัดที่ 1.5 A

ผลการทดสอบ



รูปที่ 4.34 อัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อกระแสไฟฟ้า

จากผลการทดสอบ (ตาราง ง.2) สามารถนำค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการอ่านค่า DC Volt Meter และ DC Amp Meter มาทำการพล็อตกราฟรูป 4.34 ซึ่งจากกราฟที่ได้จะพบว่าเส้นกราฟจะเป็นเส้นตรงที่มีลักษณะความชันคงที่ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานที่จะได้จากผลการทดสอบจะเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งสามารถหาได้โดยการหาความชัน $\left(\frac{\Delta V}{\Delta I}\right)$ ของกราฟ บริเวณช่วงใดช่วงหนึ่งของเส้นตรงซึ่งในที่นี้จะใช้จุดที่มีค่าแรงดันไฟฟ้า V1 คือ 32 V_{dc} และ V2 คือ 38 V_{dc} และใช้จุดที่มีค่ากระแสไฟฟ้า I1 คือ 0.9 A และ I2 คือ 1.05 A ในการคำนวณหาความชันซึ่งจะได้ความชันหรือค่าความต้านทานเท่ากับ 40 โอห์ม

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบโดยทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและค่ากระแสไฟฟ้านั้นสามารถนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาพล็อตเป็นกราฟระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าซึ่งผลจากกราฟที่ได้จะพบว่ามีความเป็นเส้นตรงสม่ำเสมอซึ่งสามารถนำกราฟที่ได้มาทำการคำนวณหาความชันซึ่งเป็นค่าความต้านทานของขดลวดทองแดง ซึ่งอยู่ภายในตัวเครื่องยกของหนักโดยจากการคำนวณหาความชันจะได้ความความชันหรือค่าความความต้านทานเท่ากับ 40 โอห์มโดยเมื่อนำไปเทียบกับค่าความต้านทานซึ่งได้จากการออกแบบที่มีค่า 44.67 โอห์มจะพบว่าค่าที่ได้จากการหาความชันจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบ 10.45% ทั้งนี้ค่าที่แตกต่างกันอาจเกิดจากกรรมวิธีในการพันขดลวดรวมไปถึงคุณสมบัติของลวดทองแดงที่แตกต่างกันของแต่ละผู้ผลิต

4.9 การทดสอบจำลองสถานะการใช้งานโดยใช้โปรแกรม Maxwell SV

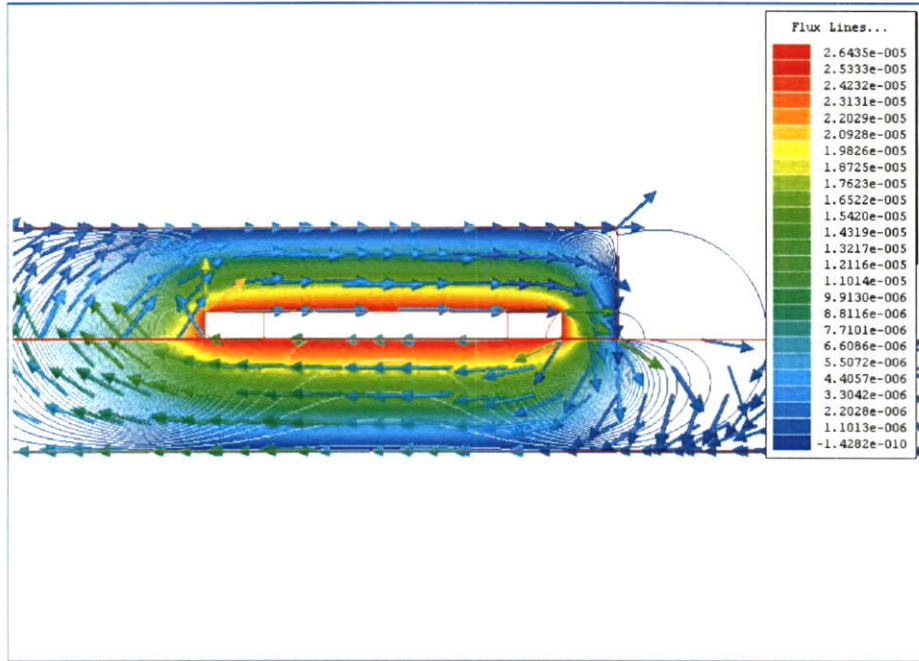
เป็นการทดสอบเพื่อดูแนวโน้มการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux) และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นซึ่งเดินทางจากขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือสู่ขั้วแม่เหล็กใต้ รวมถึงการดูค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density) ที่เกิดขึ้นจากการใช้งานเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งจะใช้โปรแกรม Maxwell SV ในการจำลองสถานะดังกล่าวโดยสามารถแบ่งหัวข้อการจำลองได้ดังนี้

4.9.1 การจำลองการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กและทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก

เป็นการจำลองเพื่อดูแนวโน้มการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการใช้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งได้ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบเพื่อจำลองการยกเหล็กแผ่นที่น้ำหนัก 250 kg และเศษเหล็กน้ำหนัก 9 kg โดยในการจำลองจะกำหนดกระแสที่ใช้เท่ากับ 1.5 A สำหรับการยกแผ่นเหล็ก และกำหนดกระแส 1.86 A สำหรับการยกเศษเหล็ก ซึ่งขนาดของตัวเครื่องในการจำลองจะเท่ากับขนาดที่

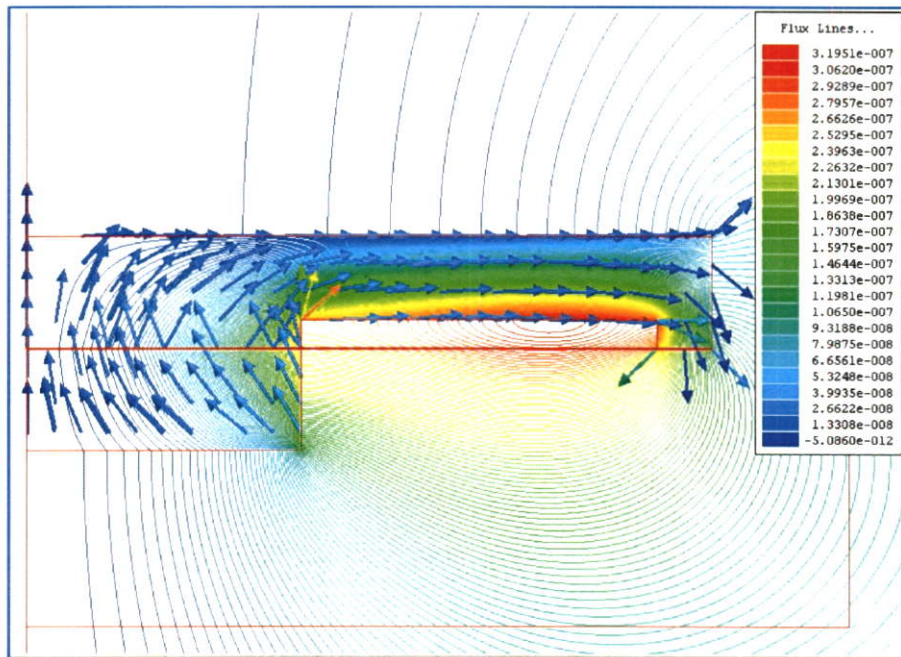
ออกแบบสร้างจริง โดยจำลองให้แสดงผลในลักษณะรูปสมมาตรแบบ 2 มิติ ซึ่งสามารถแสดงผลการจำลองได้ดังนี้

ผลการจำลอง



รูปที่ 4.35 การจำลองการยกแผ่นเหล็ก 250 kg

จากรูปที่ 4.35 แสดงการจำลองการเกิดเส้นแรงแม่เหล็ก รวมถึงทิศทางของเส้นแรงที่เดินทางจากขั้วแม่เหล็กเหนือสู่ขั้วแม่เหล็กใต้ อันเกิดจากการยกแผ่นเหล็ก ของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก



รูปที่ 4.36 การจำลองการยกเศษเหล็ก 9 kg

จากรูปที่ 4.36 แสดงการจำลองการเกิดเส้นแรงแม่เหล็ก และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เดินทางจากขั้วแม่เหล็กเหนือสู่ขั้วแม่เหล็กใต้ รวมเส้นแรงแม่เหล็กทั่วไหลอันเกิดจากการยกเศษเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก

วิเคราะห์ผลการจำลอง

จากรูปที่ 4.35 แสดงให้เห็นถึงแนวเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการจำลองการใช้งานเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยกำหนดน้ำหนักแผ่นเหล็กที่ยกคือ 250 kg และกำหนดกระแสไฟฟ้าที่ป้อนในโปรแกรมเท่ากับ 1.5 A โดยแนวเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่เดินทางจากขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือ ซึ่งเป็นพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอกไปสู่ขั้วแม่เหล็กใต้คือพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงใน อันเกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น โดยสามารถดูทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กได้จากหัวลูกศร ทั้งนี้จากการออกแบบให้แกนเหล็กวงในมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก จึงทำให้แนวเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากพื้นที่หน้าตัดทั้งสอง ซึ่งวิ่งตัดผ่านแผ่นเหล็กมีความสม่ำเสมอและมีความหนาแน่นสูงบริเวณขดลวดซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจึงทำให้เกิดแรงในการยกแผ่นเหล็กที่สมบูรณ์และมีเส้นแรงแม่เหล็กทั่วไหลน้อย

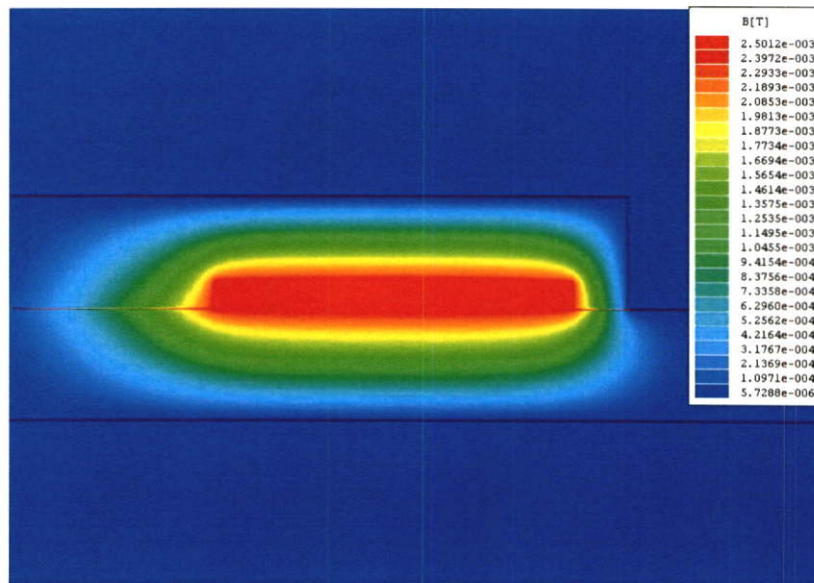
จากรูปที่ 4.36 แสดงให้เห็นถึงแนวเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการจำลองการใช้งานเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยกำหนดน้ำหนักเศษเหล็กที่ยกคือ 9 kg และกำหนดกระแสไฟฟ้าที่ป้อนในโปรแกรมเท่ากับ 1.86 A โดยแนวเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่เดินทาง

จากขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือ ซึ่งเป็นพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอกไปสู่ขั้วแม่เหล็กใต้คือพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในอันเกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ขดลวด เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยสามารถดูทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก ได้จากหัวลูกศรทั้งนี้เนื่องจากการจำลองการยกเศษเหล็ก ซึ่งมีพื้นผิวหน้าสัมผัสน้อยกว่าพื้นผิวหน้าสัมผัสของเครื่องยกของหนักทำให้เกิดเป็นวงจรแม่เหล็กที่ไม่สมบูรณ์ขึ้น และเกิดช่องว่างอากาศมากจนเป็นสาเหตุทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลจำนวนมากดังนั้นแรงในการยกเศษเหล็กจึงมีค่าน้อย

4.9.2 การจำลองความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

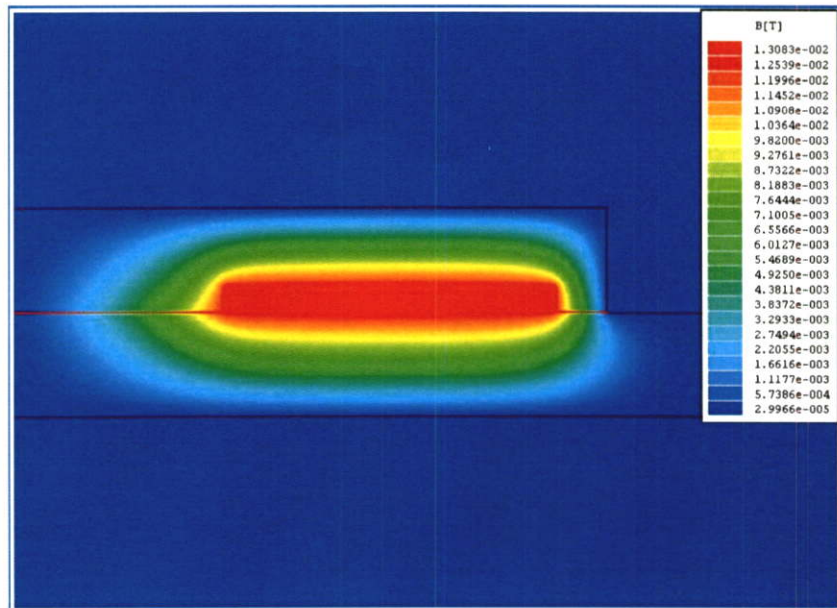
เป็นการจำลองเพื่อดูค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น จากการใช้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กโดยเปรียบเทียบผลกับค่าที่ได้จากการวัดจริงในหัวข้อ 4.6 ซึ่งเป็นการวัดเพื่อหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการใช้งานเครื่องที่ระดับพิกัดแรงดันต่างๆ ซึ่งทั้งนี้จะกำหนดค่ากระแสในการจำลองเท่ากับค่ากระแสที่ใช้ในการวัดหาค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กคือ 0.13A, 0.68, และ 1.34A และแสดงผลเป็นรูปสมมาตร 2 มิติโดยสามารถแสดงผลการจำลองดังนี้

ผลการจำลอง



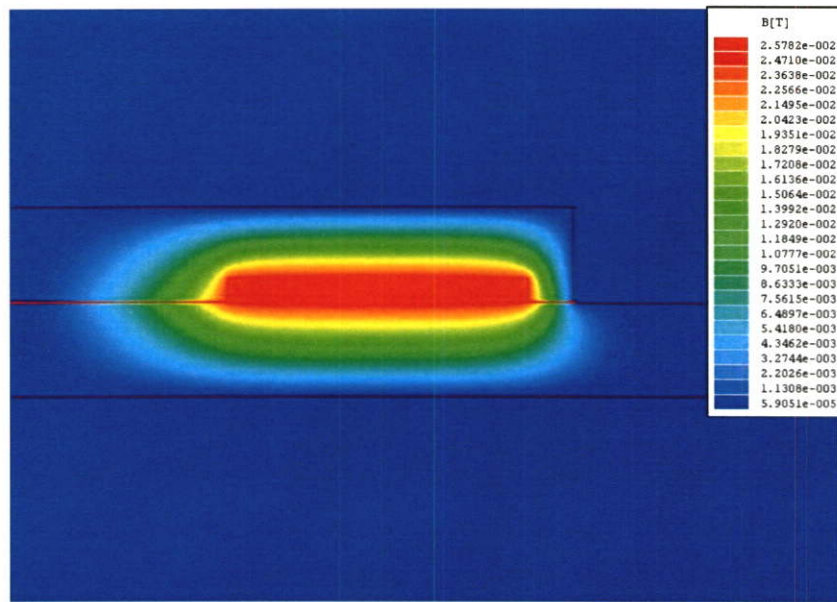
รูปที่ 4.37 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่กระแส 0.13 A

จากรูปที่ 4.37 แสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการจำลอง โดยการใช้โปรแกรม Maxwell SV ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.13 A



รูปที่ 4.38 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่กระแส 0.68 A

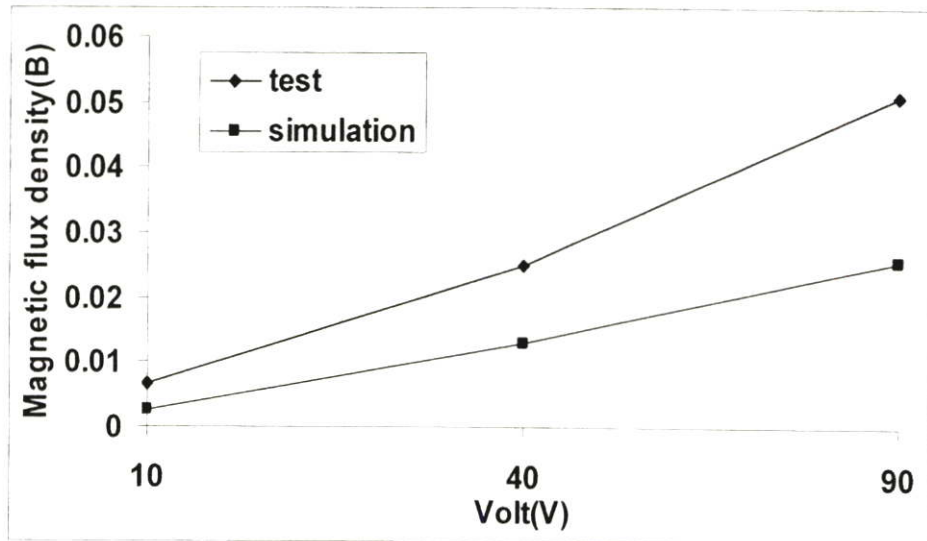
จากรูปที่ 4.38 แสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองโดยการใช้โปรแกรม Maxwell SV ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.68 A



รูปที่ 4.39 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่กระแส 1.34 A

จากรูปที่ 4.39 แสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองโดยการใช้โปรแกรม Maxwell SV ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1.34 A

จากค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากผลการจำลอง และที่ได้จากการทดสอบในหัวข้อ 4.6 สามารถแสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองกับค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดสอบจริง(ตาราง ง.9, ง.10, ง.11) ดังนี้



รูปที่ 4.40 ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างการทดสอบกับการจำลอง

จากรูปที่ 4.40 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบกับค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $10 V_{dc}$, $40 V_{dc}$ และ $90 V_{dc}$

วิเคราะห์ผลการจำลองและการเปรียบเทียบการทดสอบกับการจำลอง

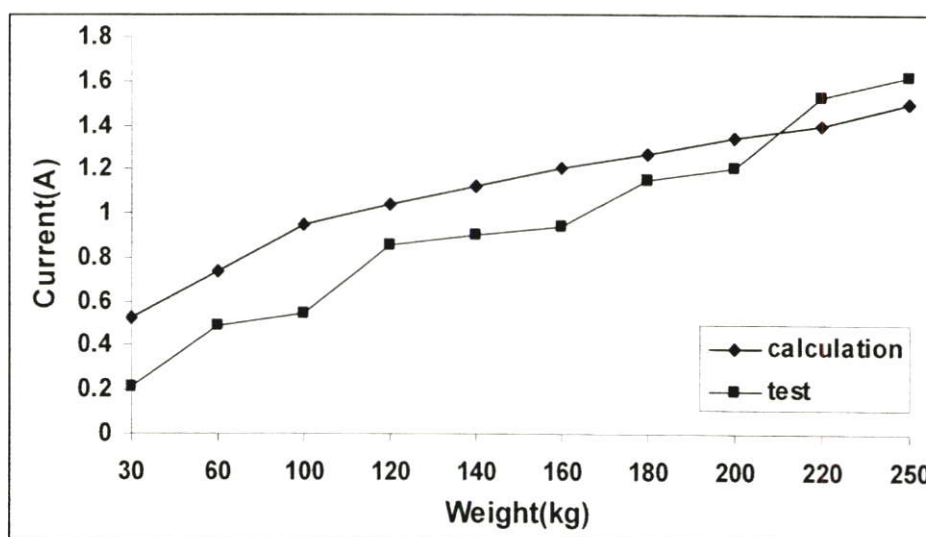
จากรูปที่ 4.37, 4.38 และ 4.39 จะแสดงให้เห็นความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการจำลองการใช้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการยกแม่เหล็ก 250 kg โดยการป้อนค่ากระแสไฟฟ้า 0.13 A, 0.68 A และ 1.34 A โดยจากรูปทั้งสามจะเห็นได้ว่าบริเวณขดลวดซึ่งแสดงด้วยสีแดงจะมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดและรองลงมาคือ สีเขียวซึ่งทั้งนี้เนื่องจากบริเวณนี้เป็นบริเวณที่ให้กำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเมื่อทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กก็จะสูงขึ้นตาม ซึ่งจากการออกแบบบริเวณที่มีสีแดงและเขียวจะมีพื้นที่อยู่เกือบเต็มพื้นที่แกนเหล็ก และแผ่นเหล็กทดสอบซึ่งทำให้เกิดแรงในการยกที่สมบูรณ์จากการออกแบบ

จากรูปที่ 4.40 เป็นกราฟการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบที่วัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเปรียบเทียบกับ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองโดยจะพบว่าค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบ จะมีค่าสูงกว่าค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการจำลอง ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบมี

ค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการจำลองอาจเกิด และการวัด, คุณสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกันในโปรแกรม กับที่ใช้งานจริง

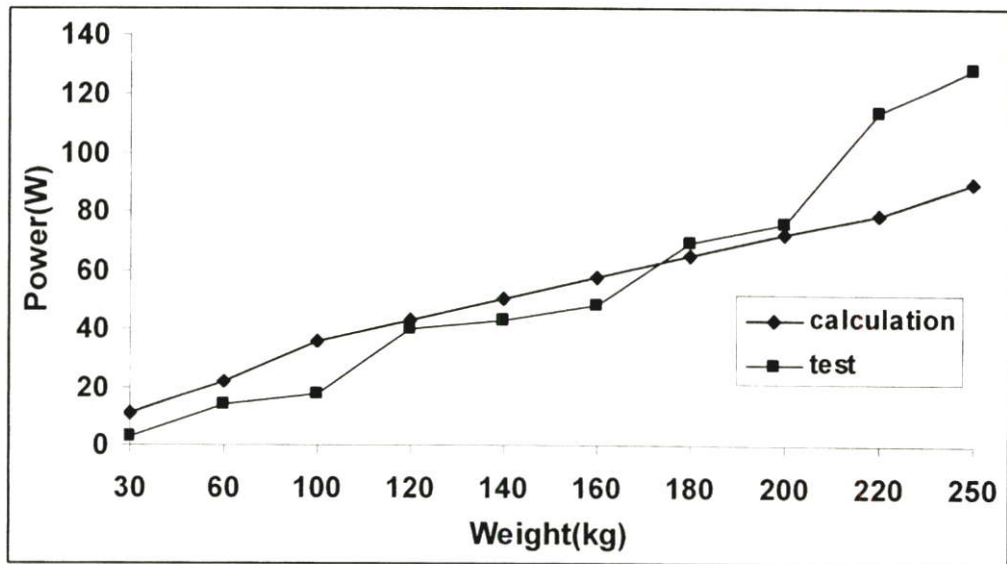
4.10 การเปรียบเทียบผลการออกแบบกับการทดสอบใช้งานจริงของเครื่องยกของหนัก ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก

เป็นการการนำค่าแรงดัน และกระแสรวมถึงกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการยกแผ่นเหล็กที่ได้จากการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม มาทำการเปรียบเทียบกับค่าแรงดันและกระแสรวมถึงกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการใช้งานจริง เพื่อที่จะหาค่าความผิดพลาดเพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไข และพัฒนาการออกแบบเครื่องยกของหนักที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไป โดยในการเปรียบเทียบจะใช้น้ำหนักที่ยกแผ่นเหล็กในการใช้งานจริง มาเป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟ (ตาราง ง.12, ง.13) ได้ดังนี้



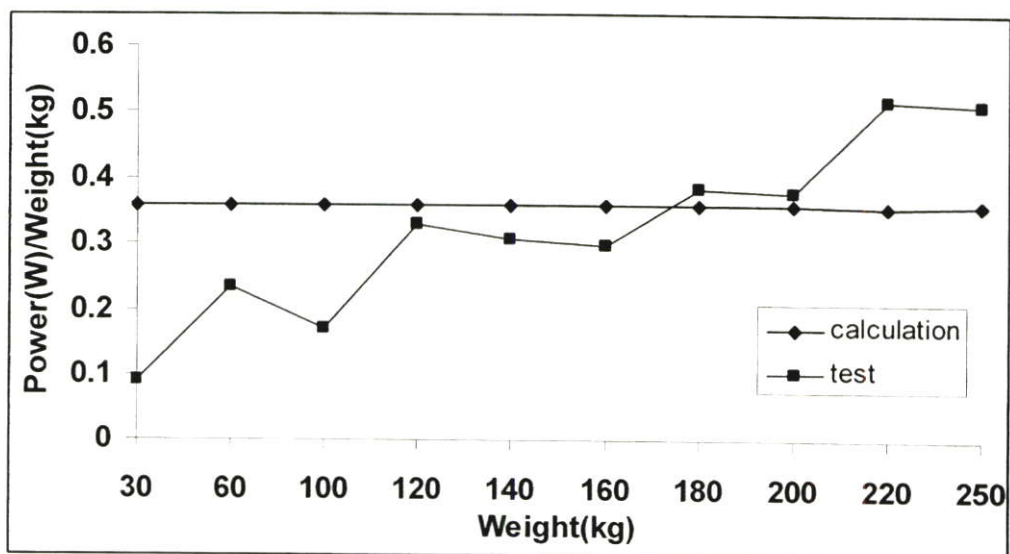
รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบกระแสที่ใช้จากการคำนวณกับการทดสอบใช้งานจริง

จากรูป 4.41 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมในการยกแผ่นเหล็กที่น้ำหนักตั้งแต่ 30-250 kg โดยเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบกับการทดสอบโดยจากกราฟพบว่าค่ากระแสที่ได้จากการออกแบบจะมีค่า 0.52 A ในการยกแผ่นเหล็ก 30 kg ซึ่งสูงกว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบใช้งานจริงซึ่งใช้ 0.21 A ที่น้ำหนักทดสอบเดียวกันและกระแสไฟฟ้าที่ใช้จากการออกแบบจะมีค่า 1.5 A ในการยกแผ่นเหล็ก 250 kg ซึ่งต่ำกว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบใช้งานจริงซึ่งใช้ 1.62 A ในการยกที่น้ำหนักเดียวกัน



รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ใช้จากการคำนวณกับการทดสอบใช้งานจริง

จากรูป 4.42 (ตาราง ง.12, ง.13) แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมในการยกแผ่นเหล็กที่น้ำหนักตั้งแต่ 30-250 kg โดยเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบกับการทดสอบโดยจากกราฟพบว่าค่ากำลังที่ได้จากการออกแบบจะมีค่า 10.8 W ในการยกแผ่นเหล็ก 30 kg ซึ่งสูงกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบใช้งานจริงซึ่งใช้ 2.73 W ที่น้ำหนักทดสอบเดียวกันและกำลังไฟฟ้าที่ใช้จากการออกแบบจะมีค่า 90 W ในการยกแผ่นเหล็ก 250 kg ซึ่งต่ำกว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบใช้งานจริงซึ่งใช้ 127.98 W ในการยกที่น้ำหนักเดียวกัน



รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบใช้งานจริง

จากรูปที่ 4.43 (ตาราง ง.12, ง.13) แสดงค่ากำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกได้ของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กที่พิกัดน้ำหนักตั้งแต่ 30-250 kg โดยเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบกับการทดสอบ ซึ่งจากกราฟพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกได้ที่ได้จากการออกแบบในช่วงน้ำหนัก 30-120 kg จะมีค่าเริ่มสูงขึ้นแต่ยังไม่คงที่แต่ในการยกแผ่นเหล็กในช่วงน้ำหนัก 120-200 kg พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกได้จะเริ่มคงที่ประมาณ 0.33 W/kg โดยที่ในช่วงน้ำหนัก 200 - 250 kg นั้นพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อน้ำหนักที่ยกได้จะมีค่าสูงมากกว่าค่าที่คำนวณ

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากรูปที่ 4.41, 4.42 และ 4.43 เป็นการเปรียบเทียบผลการออกแบบกับการทดสอบใช้งานจริงของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก โดยจากการเปรียบเทียบพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบในการยกแผ่นเหล็กที่น้ำหนัก 30-200 kg จะมีค่ากำลังไฟฟ้า 10.8-72.038 W ซึ่งต่ำกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบใช้งานจริงคือ 2.73-75.6 W โดยที่ช่วงพิกัดน้ำหนักยก 200 kg ค่ากำลังไฟฟ้าจากการออกแบบจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ 4.7% แต่ในช่วงการยกที่พิกัดน้ำหนัก 200-250 kg พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าสูงกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบ ที่พิกัดน้ำหนักยกที่ 250 kg ถึง 29.67% โดยถ้าพิจารณาจากค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อน้ำหนักที่เครื่องสามารถยกได้ จะพบว่าในช่วงการยกน้ำหนักที่ 30-120 kg ค่ากำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกได้จากการทดสอบจะมีค่าเริ่มสูงขึ้นโดยยังไม่คงที่ แต่เมื่อถึงช่วงการยกที่พิกัดน้ำหนัก 120-200 kg จะพบว่าอัตราส่วนการใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกได้จากการทดสอบจะค่อนข้างคงที่ประมาณ 0.33 (W/kg) ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณจะพบว่าอัตราส่วนการใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกจะมีค่าคงที่นั่นหมายความว่า ประสิทธิภาพในการยกเหล็กของเครื่องซึ่งถ้าพิจารณาในช่วงน้ำหนักยกตั้งแต่ 200-250 kg จะพบว่าอัตราส่วนการใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกได้ จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งเกิดจากสาเหตุการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นในการใช้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก ที่จัดสร้างให้มีอัตราส่วนการใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกสูงสุดจะ ต้องใช้งานที่พิกัดการยกที่น้ำหนัก 120-200 kg จึงจะสามารถใช้งานเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

5.1 บทนำ

จากการศึกษาออกแบบและจัดสร้างรวมถึงทำการทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการมุ่งเน้นที่จะออกแบบและจัดสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กต้นแบบที่สามารถออกแบบได้ โดยใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบที่ได้สร้างขึ้นรวมถึงสามารถจำลองสถานะของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการใช้งานเครื่องได้ นอกจากนี้ได้ออกแบบและจัดสร้างชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง พร้อมด้วยระบบสำรองไฟฟ้าฉุกเฉินเพื่อให้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบ สามารถนำไปใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมโดยสามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบในหัวข้อการทดสอบต่างๆดังนี้

5.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

5.2.1 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็ก

ไฟฟ้าในการยกแผ่นเหล็ก

จากการทดสอบพบว่า เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อขีดความสามารถในการยกแผ่นเหล็ก โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $79 V_{dc}$ กระแสไฟฟ้า $1.62 A$ โดยคิดเป็นการใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ $127.98 W$ จะมีขีดความสามารถในการยกแผ่นเหล็กที่น้ำหนัก $250kg$ คิดเป็นการใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่สามารถยกได้เท่ากับ $0.5 W/kg$ ทั้งนี้เนื่องมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่อง โดยขดลวดที่รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่แกนเหล็ก ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าขั้วเหนือขึ้นที่พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอกและเกิดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าขั้วใต้ขึ้นที่พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในของเครื่องซึ่งจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งจากขั้วแม่เหล็กเหนือ ตัดผ่านพื้นที่หน้าตัดแผ่นเหล็กผ่านไปสูขั้วแม่เหล็กใต้ ซึ่งเมื่อแนวเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตัดผ่านแผ่นเหล็กก็จะทำให้เกิดแรงในการยกแผ่นเหล็กขึ้น

5.2.2 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็ก

ไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลด

จากการทดสอบยกแผ่นเหล็กในสถานะไม่มีโหลด พบว่าเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจะส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าและพิกัดกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีผลต่อขีดความสามารถในการยกแผ่นเหล็ก โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ $79 V_{dc}$ การยกแผ่นเหล็กในสถานะมีโหลดซึ่งสามารถยกแผ่นเหล็กน้ำหนัก 250 kg ได้จะต้องใช้กระแสไฟฟ้า 1.62 A และกำลังไฟฟ้า 127.98 W ซึ่งในสถานะไม่มีโหลดที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $79 V_{dc}$ จะใช้กระแสไฟฟ้า 1.12 A กำลังไฟฟ้า 88.48 W ทั้งนี้การยกแผ่นเหล็กในสถานะมีโหลดจะใช้กำลังไฟฟ้าสูงกว่าการยกแผ่นเหล็ก ในสถานะไม่มีโหลด 30.86% ทั้งนี้เนื่องจาก เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในรูปของความร้อนและขดลวดสนาม โดยความร้อนเกิดขึ้นจากขดลวดภายในตัวเครื่อง ซึ่งส่งผ่านความร้อนมาที่แผ่นป้องกันซึ่งเป็นหน้าสัมผัสของเครื่องยกของหนักที่สัมผัสกับแผ่นเหล็ก ในขณะที่การทดสอบในสถานะมีโหลดทำให้เกิดความร้อนสะสมสูงในบริเวณดังกล่าว และความร้อนที่เกิดจากขดลวดสนามซึ่งอยู่ในรูป I^2R ทั้งนี้จึงทำให้การทดสอบยกแผ่นเหล็กในสถานะมีโหลด ต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูงกว่าในสถานะไม่มีโหลด

5.2.3 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็ก

ไฟฟ้าในการยกเศษเหล็ก

จากการทดสอบพบว่า เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อขีดความสามารถในการยกเศษเหล็ก โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุด $92 V_{dc}$ กระแสไฟฟ้า 1.86 A จะมีขีดความสามารถในการยกเศษเหล็กที่น้ำหนักเหล็ก 9 kg คิดเป็น 171.12 W หรือใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่สามารถยกได้เท่ากับ 19 W/kg ซึ่งน้อยกว่าการยกแผ่นเหล็กทั้งนี้เนื่องมาจากขดลวดที่รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่แกนเหล็ก ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าขั้วเหนือขึ้นที่พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก และเกิดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าขั้วใต้ขึ้นที่พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งจากแกนเหล็กขั้วเหนือไปยังแกนเหล็กขั้วใต้ ซึ่งเมื่อแนวเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตัดผ่านแผ่นเหล็กก็จะทำให้เกิดแรงยกแผ่นเหล็กขึ้น แต่เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นไม่สามารถที่จะตัดผ่านชิ้นเศษเหล็ก ซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอนได้สม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวหน้าสัมผัสระหว่างเศษเหล็ก และแผ่นป้องกันของเครื่องจึงทำให้เกิดช่องว่างอากาศมากซึ่งจากสมการที่ 3.8 เมื่อ I_g ซึ่งเป็นช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงในการยกมีค่าต่ำลงดังนั้นจึงสรุปได้ว่า แรงในการยกเศษเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าน้อยกว่าแรงในการยกแผ่นเหล็ก

5.2.4 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็ก

ไฟฟ้า ในกรณีกำหนดค่าแรงดันคงที่

จากการทดสอบในกรณีกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ $45 V_{dc}$ พบว่าเมื่อเพิ่มน้ำหนักแผ่นเหล็กขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ $32.4 W$ และในกรณีที่กำหนดค่าระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่ $70 V_{dc}$ เมื่อเพิ่มน้ำหนักแผ่นเหล็กขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ $101.5 W$ รวมถึงในกรณีที่กำหนดค่าระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่ $80 V_{dc}$ เมื่อเพิ่มน้ำหนักแผ่นเหล็กขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ $131.2 W$ โดยที่เมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อน้ำหนักแผ่นเหล็กที่ยกได้ของทั้ง 3 กรณีมาเปรียบเทียบกับกราฟที่เพิ่มขึ้นของน้ำหนักที่ยกได้พบว่าอัตราส่วน (W/kg) มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มน้ำหนักขึ้นนั้นหมายความว่า ประสิทธิภาพในการยกแผ่นเหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักที่ยกเพิ่มขึ้นดังนั้นในการใช้งานเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แบบวงกลมขนาดเล็กเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุดควรที่จะปรับค่าแรงดันที่ใช้ให้สัมพันธ์กับน้ำหนักที่ต้องการยกหรือควรมีการพัฒนาเอาหลักการของ flux sensor เข้ามาใช้เพื่อให้เครื่องยกของหนักสามารถใช้พลังงานได้ตามน้ำหนักเหล็กที่เปลี่ยนแปลงจากการยกเหล็กหลาย ๆ ขนาดเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการใช้งานสูงสุด

5.2.5 การทดสอบวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

จากการทดสอบพบว่าเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง จะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $90 V_{dc}$ กระแสไฟฟ้า $1.39 A$ จะมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด $0.0508 (T)$ หรือเพิ่มขึ้น 86.81% เมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $10 V_{dc}$ กระแสไฟฟ้า $0.13 A$ ในแกนเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดซึ่งพันอยู่บริเวณระยะห่างที่ $10-20$ เซนติเมตรและ $30-40$ เซนติเมตรทั้งในแกน X และแกน Y ของพื้นผิวหน้าสัมผัสของเครื่อง จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าขั้วเหนือขึ้นบริเวณพื้นที่ หน้าตัดแกนเหล็กวงนอกและเกิดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าขั้วใต้ขึ้นบริเวณพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงใน ซึ่งจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งจากพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กขั้วเหนือไปยังพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กขั้วใต้ ซึ่งเมื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กก็จะสูงขึ้นตาม โดยจะพบว่าที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเดียวกันค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่าสูงในช่วง ระยะห่างที่ $10-20$ เซนติเมตรและ $30-40$ เซนติเมตรทั้งในแกน X และแกน Y ทั้งนี้เนื่องมาจากบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีขดลวดพันอยู่และเป็นบริเวณกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจึงทำให้มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงกว่าบริเวณอื่นๆ

5.2.6 การทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน

จากการทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินพบว่าสามารถทำงานได้ในขณะที่เครื่องยกของหนักยกแผ่นเหล็กสูงสุดที่ 250 kg ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 79 V_{dc} ทั้งนี้เนื่องมาจากการกำหนดจำนวนแบตเตอรี่ที่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้า 12 V_{dc} กระแสไฟฟ้า 5A/hr ให้มีจำนวน 8 ลูกเพื่อให้ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีน้ำหนักเบา และสะดวกในการเคลื่อนย้ายไปทดสอบในอุตสาหกรรมโดยเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าปกติที่เครื่องสามารถชักแผ่นเหล็กได้ จะสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินให้กับเครื่องได้ในช่วง 79 V_{dc} ที่ยกน้ำหนักสูงสุด 250 kg ซึ่งถ้าต้องการให้เครื่องยกของหนักยกแผ่นเหล็กพิกัดน้ำหนักมากกว่า 250 kg โดยไม่ล้วงหล่นเมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าปกติไม่สามารถจ่ายได้ จะต้องออกแบบให้ระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินจ่ายแรงดันได้ไม่น้อยกว่า 79 V_{dc} ซึ่งในการใช้งานระบบสำรองไฟฟ้าฉุกเฉินนั้น โดยปกติแล้วจะต้องสำรองให้ได้ประมาณ 15 นาทีเพื่อที่จะทำการเคลื่อนย้ายเหล็กนำไปวางยังที่ปลอดภัย แต่ในการทดสอบนี้ระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้สูงกว่า โดยแบตเตอรี่แต่ละลูกสามารถที่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าได้นานถึง 5.5A/hr นั้นหมายความว่าระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินที่ออกแบบไว้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพ

5.2.7 การทดสอบหาค่าความต้านทานจากขดลวดด้วยวิธี V-I Methode

จากผลการทดสอบสามารถนำค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ได้มาทำการพล็อตกราฟซึ่งจากกราฟที่ได้จะพบว่าเส้นกราฟจะเป็นเส้นตรงที่มีลักษณะความชันคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานที่จะได้จากการทดสอบจะเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งสามารถหาได้โดยการหา $\left(\frac{\Delta V}{\Delta I}\right)$ ของกราฟบริเวณช่วงใดช่วงหนึ่งของเส้นตรงซึ่งในที่นี้จะใช้จุดที่มีค่าแรงดันไฟฟ้า V1 คือ 32 V_{dc} และ V2 คือ 38V_{dc} และใช้จุดที่มีค่ากระแสไฟฟ้า I1 คือ 0.9 A และ I2 คือ 1.05 A ในการคำนวณหาความชันซึ่งจะได้ความชันหรือค่าความต้านทานเท่ากับ 40 โอห์ม

จากการทดสอบโดยทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและค่ากระแสไฟฟ้านั้นสามารถนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาพล็อตเป็นกราฟระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าซึ่งผลจากกราฟที่ได้จะพบว่ามีความเป็นเส้นตรงสม่ำเสมอ โดยสามารถนำกราฟที่ได้มาทำการคำนวณหาค่าความชันซึ่งเป็นค่าความต้านทานของขดลวดทองแดง ซึ่งอยู่ภายในตัวเครื่องยกของหนักทั้งนี้จากการคำนวณหาค่าความชันจะได้ความความชัน หรือค่าความความต้านทานเท่ากับ 40 โอห์มโดยเมื่อนำไปเทียบกับค่าความต้านทานซึ่งได้จากการออกแบบที่มีค่า 44.67 โอห์มจะพบว่าค่าที่ได้จากการหาความชันจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบ 10.45% ทั้งนี้ค่าที่แตกต่างกันอาจเกิดจากกรรมวิธีในการพันขดลวดรวมไปถึงคุณสมบัติของลวดทองแดงที่แตกต่างกันของแต่ละผู้ผลิต

5.2.8 การทดสอบจำลองสภาวะการใช้งานโดยใช้โปรแกรม MAXWELL SV

5.2.8.1 การจำลองการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กและทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก

จากการจำลองการยกแผ่นเหล็กแสดงให้เห็นถึง แนวเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการใช้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยกำหนดน้ำหนักแผ่นเหล็กที่ยกคือ 250 kg และกำหนดกระแสไฟฟ้าที่ป้อนในโปรแกรมเท่ากับ 1.5 A โดยแนวเส้นแรงที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่พุ่งทางจากขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือ ซึ่งเป็นพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอกไปสู่ขั้วแม่เหล็กใต้ซึ่งเป็นพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงใน อันเกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น โดยสามารถดูทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กได้จาก หัวลูกศร ทั้งนี้จากการออกแบบให้แกนเหล็กวงในมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก จึงทำให้แนวเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากพื้นที่หน้าตัดทั้งสอง ซึ่งวิ่งตัดผ่านแผ่นเหล็กมีความสม่ำเสมอและมีความหนาแน่นสูงบริเวณขดลวด ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจึงทำให้เกิดแรงในการยกแผ่นเหล็กที่สมบูรณ์ และมีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลน้อย

จากการจำลองการยกเศษเหล็ก แสดงให้เห็นถึงแนวเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการใช้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยกำหนดน้ำหนักเศษเหล็กที่ยกคือ 9 kg และกำหนดกระแสไฟฟ้าที่ป้อนในโปรแกรมเท่ากับ 1.86 A โดยแนวเส้นแรงที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่เดินทางจากขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือ ซึ่งเป็นพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอกไปสู่ขั้วแม่เหล็กใต้คือพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในอันเกิดจากการเหนี่ยวนำ ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยสามารถดูทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กได้จากหัวลูกศร ทั้งนี้เนื่องจากการจำลองการยกเศษเหล็กซึ่งมีพื้นผิวหน้าสัมผัสน้อยกว่าพื้นผิวหน้าสัมผัสของเครื่องยกของหนักทำให้เกิดเป็นวงจรมแม่เหล็กที่ไม่สมบูรณ์ขึ้น และเกิดช่องว่างอากาศมากจนเป็นสาเหตุทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลจำนวนมากดังนั้นแรงในการยกเศษเหล็กจึงมีค่าน้อย

5.2.8.2 การจำลองความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

จากการจำลองจะแสดงให้เห็นความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการใช้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการยกแผ่นเหล็ก 250 kg โดยการป้อนค่ากระแสไฟฟ้า 0.13 A, 0.68 A และ 1.34 A โดยจะเห็นได้ว่าบริเวณขดลวดซึ่งแสดงด้วยสีแดงจะมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดและรองลงมาคือสีเขียว ซึ่งทั้งนี้เนื่องมาจากบริเวณนี้เป็นบริเวณที่ให้กำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเมื่อทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กก็จะสูงขึ้นตามซึ่งทำให้เกิดแรงในการยกที่สมบูรณ์จากการออกแบบ

จากกราฟเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง ผลการทดสอบที่วัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการจำลอง โดยจะพบว่าค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบ จะมีค่าสูงกว่าค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการจำลอง ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูง

กว่าค่าที่ได้จากการจำลองอาจเกิด เครื่องมือวัด และการวัด, รวมถึงคุณสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกัน ในโปรแกรมกับที่ใช้งานจริง

5.2.9 การเปรียบเทียบผลการออกแบบกับการทดสอบใช้งานจริงของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก

เป็นการนำขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบใช้งานจริงมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการออกแบบโดยสามารถแสดงผลดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบใช้งานจริงกับการออกแบบ

กระแสไฟฟ้า (A)		น้ำหนัก แผ่น เหล็ก (kg)	กำลังไฟฟ้า (W)		กำลังไฟฟ้า/ กิโลกรัม(W)/(kg)	
ทดสอบ	คำนวณ		ทดสอบ	คำนวณ	ทดสอบ	คำนวณ
0.21	0.519	30	2.73	10.81	0.091	0.36
0.49	0.735	60	14.21	21.60	0.236	0.36
0.54	0.949	100	17.28	36.02	0.1728	0.36
0.85	1.039	120	39.95	43.247	0.33	0.36
0.9	1.123	140	43.2	50.445	0.308	0.36
0.94	1.2	160	47.94	57.6	0.299	0.36
1.15	1.273	180	69	64.87	0.383	0.36
1.2	1.342	200	75.6	72.038	0.378	0.36
1.52	1.4	220	114	78.4	0.518	0.356
1.62	1.5	250	127.98	90	0.512	0.36

จากตารางที่ 5.1 เมื่อเปรียบเทียบการออกแบบกับการทดสอบใช้งานจริงของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะพบว่า

1. ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบในการยกแผ่นเหล็ก 30-200 kg จะมีค่ากำลังไฟฟ้า 10.8-72 W ซึ่งโดยเฉลี่ยสูงกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบคือ 2.73-75.6 W โดยที่ช่วงพิกัดน้ำหนักยก 200 kg ค่ากำลังไฟฟ้าจากการออกแบบจะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ 4.7%

2. ในช่วงการยกที่น้ำหนักตั้งแต่ 200-250 kg พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าจากการทดสอบจะมีค่าสูงกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบที่น้ำหนักยก 250 kg อยู่ 29.67%
3. ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อน้ำหนักที่เครื่องสามารถยกได้ในช่วงการยกน้ำหนักที่ 30-120 kg ค่าที่ได้จะมีค่าเริ่มสูงขึ้น โดยยังไม่คงที่แต่เมื่อถึงช่วงการยกที่น้ำหนัก 120-200 kg จะพบว่าอัตราส่วนการใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกได้จากการทดสอบค่อนข้างคงที่ประมาณ 0.33 (W/kg) ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าจากการคำนวณจะพบว่าอัตราส่วนการใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกจะมีค่าคงที่
4. เมื่อพิจารณาในช่วงน้ำหนักยกตั้งแต่ 200 - 250 kg จะพบว่าอัตราส่วนการใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกได้จะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งเกิดจากสาเหตุการอิมิตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
5. ดังนั้นในการใช้เครื่องให้มีอัตราส่วนการใช้กำลังไฟฟ้า ต่อน้ำหนักที่ยกให้เหมาะสมจะต้องใช้งานที่น้ำหนัก 120-200 kg จึงจะสามารถใช้งานเครื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

5.3 สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบ และจัดสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก พร้อมด้วยชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่รวมระบบจ่ายไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินไว้ นอกจากนี้ยังได้ทำการสร้างโปรแกรมช่วยในการออกแบบตัวเครื่อง ซึ่งสามารถแสดงภาพขนาดต่าง ๆ ของตัวเครื่องเป็นกราฟฟิค 2 มิติ และค่าพารามิเตอร์สำคัญซึ่งจำเป็นในการจัดสร้างตัวเครื่องทั้งนี้ยังได้ทำการจำลองสถานะการใช้งานตัวเครื่อง เพื่อดูการกระจายเส้นแรงแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ซึ่งเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นสามารถยกแผ่นเหล็กได้สูงสุด 250 kg โดยใช้กำลังไฟฟ้า 127.98 W หรือคิดเป็นกำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกได้เท่ากับ 0.5 W/kg และยกเศษเหล็กได้สูงสุด 9 กิโลกรัม โดยใช้กำลังไฟฟ้า 171.12 W หรือคิดเป็นกำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกได้เท่ากับ 19 W/kg ซึ่งจากการออกแบบได้ออกแบบให้เครื่องสามารถยกแผ่นเหล็กได้ 250 kg โดยใช้กำลังไฟฟ้า 90 W หรือคิดเป็นการใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกได้เท่ากับ 0.36 W/kg จากการใช้งานจริงเครื่องสามารถใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกได้ โดยเฉลี่ยต่ำกว่าการออกแบบในช่วงการยกแผ่นเหล็กน้ำหนัก 30-200 kg แต่จะมีประสิทธิภาพในการยกสูงสุดในช่วงน้ำหนักยกที่ 120-200 kg ซึ่งมีอัตราการใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกคงที่ประมาณ 0.33 (W/kg) ซึ่งในการทดสอบได้นำเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมไปทดสอบใช้งานจริงในอุตสาหกรรมไม่ว่าจะเป็นการทดสอบยกแผ่นเหล็ก, การทดสอบยกเศษเหล็ก และการทดสอบระบบจ่ายไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินซึ่งสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องได้ในขณะที่เครื่องกำลังใช้งานอยู่ โดยที่แผ่นเหล็กทดสอบไม่ร่วงหล่นที่น้ำหนักเหล็กทดสอบสูงสุด 250 kg รวมถึงการทดสอบในห้องทดลองโดยจากการทดสอบต่าง ๆ เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กต้นแบบ สามารถใช้งานในอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี โดยใช้อัตราส่วนการใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกต่ำ

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการออกแบบ

จากการศึกษาเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม ได้ทำการสร้างโปรแกรมช่วยในการออกแบบตัวเครื่องขึ้น โดยใช้โปรแกรม Visual Basic หลังจากนั้นได้ทำการทดลองใช้งานโปรแกรม โดยกำหนดน้ำหนักที่ต้องการให้เครื่องยกของหนักสามารถยกได้สูงสุดคือ 250 kg และกำหนดกระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 1.5 A ซึ่งจากการใช้งานโปรแกรมได้แสดงผลค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญคือพื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำเท่ากับ 0.5 mm^2 โดยได้เลือกใช้ลวดทองแดงตัวนำชนิด S.W.G เบอร์ 21 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 0.5189 mm^2 ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 67.5 V_{dc} กำลังไฟฟ้า 101.39 W จำนวนรอบที่พันขดลวดเท่ากับ 1303.71 รอบ เส้นผ่านศูนย์กลางตัวเครื่อง 0.5 m พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงใน และแกนเหล็กวงนอกเท่ากับ 0.03014 mm^2 ความกว้างร่องสลีต 0.132 m ความสูงร่องสลีต 0.0128 m และความสูงของเครื่องเท่ากับ 0.033 m จากนั้นได้นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปจัดสร้างตัวเครื่อง

โดยทำการจัดสร้างเครื่องยกของหนัก ซึ่งสามารถสรุปผลการจัดสร้างคือการเลือกใช้เหล็ก SS41 (เหล็กเหนียว) ในการทำแกนเหล็กโดยเป็นเหล็กแผ่นกลมหนา 4 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 cm แล้วนำมาเจาะร่องสลีตโดยมีความลึก 1.2 cm ความกว้าง 13 cm ซึ่งเมื่อเจาะล่องแล้วจะสามารถแบ่งพื้นผิวหน้าสัมผัสของแกนเหล็ก เป็นแกนเหล็กวงในซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm และแกนเหล็กวงนอกซึ่งมีความหนาจากขอบแกนเหล็ก 2 cm เพื่อบรรจุขดลวดที่ภายในพื้นผิวขดลวดทองแดง SWG เบอร์ 21 จำนวน 1300 รอบ โดยหลังจากที่บรรจุขดลวดลงในร่องสลีตแล้วจะเททับด้วยอีพ็อกซี่เพื่อป้องกันการลัดวงจรและยึดให้ขดลวดติดกับแกนเหล็ก หลังจากนั้นปิดทับด้วยแผ่นอลูมิเนียม จากนั้นทำการยึดชุดโซ่รับน้ำหนักที่สามารถรับน้ำหนักได้ 1 ตันโดยเครื่องที่ออกแบบมีพิกัดในการยกเหล็กน้ำหนักสูงสุด 250 kg ใช้แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 70 V_{dc} กระแสไฟฟ้าสูงสุด 1.5 A คิดเป็นการใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่เครื่องสามารถยกได้ 0.42 W/kg

จากนั้นได้จัดสร้างชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและระบบสำรองไฟฟ้าฉุกเฉิน โดยได้จัดสร้างชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีพิกัดสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุด 110 V_{dc} กระแสไฟฟ้าสูงสุด 5 A โดยเลือกใช้วงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส ครึ่งลูกคลื่นซึ่งใช้ เอสซีอาร์ เป็นตัวนำกระแส นอกจากนี้ได้ทำการสร้างระบบสำรองไฟฟ้าฉุกเฉินที่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเครื่องได้ทันที ในกรณีที่แหล่งจ่ายปกติไม่

สามารถจ่ายได้โดยออกแบบให้ใช้แบตเตอรี่แห่งจำนวน 8 ลูก สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุด $96 V_{dc}$ กระแสไฟฟ้าสูงสุด 5 A

จากนั้นได้จำลองการใช้งานโดยใช้โปรแกรม Maxwell SV โดยจากการจำลองยกแผ่นเหล็กสามารถแสดงให้เห็นถึง แนวเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นโดยจะมีลักษณะที่พุ่งทางจากขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือ ซึ่งเป็นพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอกไปสู่ขั้วแม่เหล็กใต้ ซึ่งเป็นพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงใน อันเกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจากการออกแบบให้แกนเหล็กวงในมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก จึงทำให้แนวเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น มีความสม่ำเสมอและมีความหนาแน่นสูงบริเวณขดลวดซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดแรงในการยกแผ่นเหล็กที่สมบูรณ์และมีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลน้อยและจากการจำลองการยกเศษเหล็กซึ่งมีพื้นผิวหน้าสัมผัสน้อยกว่าพื้นผิวหน้าสัมผัสของเครื่องยกของหนักทำให้เกิดเป็นวงจรแม่เหล็กที่ไม่สมบูรณ์ขึ้น และเกิดช่องว่างอากาศมากจนเป็นสาเหตุทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลจำนวนมากดังนั้นแรงในการยกเศษเหล็กจึงมีค่าน้อย

จากนั้นได้ทำการจำลอง เพื่อดูความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการใช้เครื่องยกของหนักโดยจะเห็นได้ว่าบริเวณขดลวดจะมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด ซึ่งทั้งนี้เนื่องมาจากเป็นบริเวณที่ให้กำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเมื่อทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจะสูงขึ้น ซึ่งจากการออกแบบให้ความกว้างร่องสลีตมีค่ามากจึงทำให้แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีพื้นที่มากทำให้เกิดแรงในการยกสูง

6.2 สรุปผลการทดสอบใช้งานในอุตสาหกรรม

จากการทดสอบโดยการยกแผ่นเหล็กพบว่าเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อความสามารถในการยกแผ่นเหล็กโดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $79 V_{dc}$ กระแสไฟฟ้า 1.62 A โดยคิดเป็นการใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 127.98 W จะมีขีดความสามารถในการยกแผ่นเหล็กที่น้ำหนัก 250 kg คิดเป็นการใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่สามารถยกได้เท่ากับ 0.5 W/kg

จากการทดสอบโดยการยกเศษเหล็กพบว่าเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อขีดความสามารถในการยกเศษเหล็กโดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุด $92 V_{dc}$ กระแสไฟฟ้า 1.86 A จะมีขีดความสามารถในการยกเศษเหล็กที่น้ำหนักเหล็ก 9 kg คิดเป็น 171.12 W หรือใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่สามารถยกได้เท่ากับ 19 W/kg ซึ่งมีความสามารถในการยกเศษเหล็กได้น้อยกว่าการยกแผ่นเหล็กทั้งนี้เนื่องมาจากช่องว่างอากาศมีค่ามากจึงทำให้แรงในการยกมีค่าต่ำลง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแรงในการยกเศษเหล็กของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าน้อยกว่าแรงในการยกแผ่นเหล็ก นั้นหมายความว่าในการยกเศษเหล็กเครื่องยกของหนักจะต้องใช้พลังงานในการยกมากกว่าการยกแผ่นเหล็ก

6.3 สรุปผลเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบใช้งานจริงกับการออกแบบ

จากผลการเปรียบเทียบการออกแบบกับการทดสอบใช้งานจริง ของเครื่องยกของหนักโดยพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบในการยกแผ่นเหล็กที่น้ำหนัก 30-200 kg จะมีค่ากำลังไฟฟ้า 10.81-72 W ซึ่งโดยเฉลี่ยสูงกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบใช้งานจริงคือ 2.73-75.6 W โดยที่ช่วงพิกัดน้ำหนักยก 200 kg กำลังไฟฟ้าจากการออกแบบจะมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการทดสอบ 4.7% แต่ในช่วงการยกที่พิกัดน้ำหนักตั้งแต่ 200-250 kg พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบที่พิกัดน้ำหนักยก 250 kg อยู่ 29.67% โดยถ้าพิจารณาจากค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อน้ำหนักที่เครื่องสามารถยกได้จะพบว่าในช่วงการยกน้ำหนักที่ 30-120 kg ค่ากำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกได้จากการทดสอบจะมีค่าเริ่มสูงขึ้น โดยยังไม่คงที่แต่เมื่อถึงช่วงการยกที่พิกัดน้ำหนัก 120-200 kg จะพบว่าอัตราส่วนการใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกได้จากการทดสอบจะค่อนข้างคงที่ประมาณ 0.33 (W/kg) ซึ่งเมื่อเทียบกับที่ได้จากการคำนวณจะพบว่าอัตราส่วนการใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกจะมีค่าคงที่ นั้นหมายความว่าประสิทธิภาพในการยกของเครื่องซึ่งถ้าพิจารณาในช่วงน้ำหนักยกตั้งแต่ 200-250 kg จะพบว่าอัตราส่วนการใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกได้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากสาเหตุการอึดตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นในการใช้เครื่องให้มีประสิทธิภาพสูงสุดจะต้องใช้งานที่พิกัดการยกที่น้ำหนัก 120-200 kg จึงจะสามารถใช้งานเครื่องได้โดยใช้อัตราส่วนการใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกต่ำ ซึ่งผลจากการทดสอบทำให้เครื่องยกของหนักที่ได้ออกแบบและจัดสร้าง สามารถใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกต่ำโดยมาจากการออกแบบให้พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงในและพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอก มีพื้นที่เท่ากันเพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กสามารถกระจายได้ทั่วถึงและสม่ำเสมอ รวมถึงการออกแบบให้แผ่นป้องกันซึ่งใช้แทนช่องว่างอากาศมีความหนาแน่นที่สุด โดยที่ไม่ทำให้คุณสมบัติในการป้องกันขดลวดขาดไป ซึ่งทั้งหมดนี้จึงทำให้เครื่องยกของหนักที่จัดสร้างขึ้นจากการออกแบบสามารถที่จะนำไปใช้งานเพื่อยกแผ่นเหล็กในอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดีโดยใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกต่ำ

6.4 คุณสมบัติของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

- DC = 70(Volt), 1.5(Amp), 105(Watt)
- ความสามารถในการยกแผ่นเหล็ก 250 kg
- ความสามารถในการยกเศษเหล็ก 9 kg
- ระบบสำรองไฟฟ้าฉุกเฉินจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 96 V_{dc}, กระแสไฟฟ้า 5 A ต่อเนื่อง 1 ชั่วโมง

6.5 สรุปผลการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.5.1 สามารถสร้างเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แบบวงกลมขนาดเล็กต้นแบบพร้อมด้วยชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่รวมระบบจ่ายไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินโดยการทดสอบระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องได้ ในขณะที่เครื่องกำลังใช้งาน โดยที่แผ่นเหล็กทดสอบไม่ร่วงหล่น

6.5.2 ทำการสร้างโปรแกรมช่วยในการออกแบบตัวเครื่องซึ่งสามารถแสดงภาพขนาดต่างๆ ของตัวเครื่องเป็นกราฟฟิก 2 มิติ และค่าพารามิเตอร์สำคัญซึ่งจำเป็นในการจัดสร้างตัวเครื่อง

6.5.3 ได้ทำการจำลองสถานะการใช้งานตัวเครื่อง เพื่อดูการกระจายเส้นแรงแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

6.5.4 เครื่องที่จัดสร้างสามารถยกแผ่นเหล็กน้ำหนัก 250 kg ได้โดยใช้กระแสไฟฟ้า 1.62 A แรงดันไฟฟ้า 79 V_{dc} เมื่อคิดเป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อน้ำหนักที่ยกได้เท่ากับ 0.5 W/kg โดยช่วงที่เครื่องสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดจะอยู่ในช่วงการยกน้ำหนัก 120-200 kg ซึ่งใช้อัตราส่วน W/kg ประมาณ 0.33 (W/kg)

6.5.5 เครื่องที่จัดสร้างสามารถยกเศษเหล็กน้ำหนัก 9 kg ได้โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 92 V_{dc} กระแสไฟฟ้า 1.86 A เมื่อคิดเป็นอัตราส่วน W/kg จะเท่ากับ 19 W/kg ซึ่งใช้มากกว่าการยกแผ่นเหล็กน้ำหนัก 250 kg 38 เท่า ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากพื้นผิวสัมผัสระหว่างหน้าสัมผัสของเครื่องกับหน้าสัมผัสของเศษเหล็กมีความไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้เกิดช่องว่างอากาศมาก และกลายเป็นวงจรแม่เหล็กที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเมื่อค่าของช่องว่างอากาศมีค่าสูงขึ้นจะทำให้แรงในการยกมีค่าต่ำลง

ในการใช้งานโปรแกรมออกแบบเพื่อนำเครื่องยกของหนัก ไปใช้ในการยกเศษเหล็กในอุตสาหกรรมจำเป็นจะต้องทำการออกแบบตัวเครื่องให้มีพิกัดกำลังไฟฟ้าที่สูง แต่ในกรณีต้องการออกแบบเพื่อใช้สำหรับยกแผ่นเหล็ก เครื่องต้นแบบที่จัดสร้างสามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดีโดยใช้อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกค่าที่ช่วงการยกน้ำหนัก 120 - 200 kg

6.6 แนวทางการพัฒนา และข้อเสนอแนะ

ควรมีการนำเอาเทคนิคการใช้ Flux sensor [11] เข้ามาช่วยในการออกแบบเพื่อให้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถใช้กำลังไฟฟ้าได้ ตามน้ำหนักเหล็กที่ต้องยกจริงเพื่อช่วยในการประหยัดการใช้พลังงานซึ่งในการใช้งานเครื่องปกติจะต้องปรับการใช้กำลังไฟฟ้าให้มีค่าสูงสุดในการใช้งานทั้งนี้จะเป็นประโยชน์ในการใช้งานเครื่องกับการยกเหล็กที่มีน้ำหนักต่างกัน

ควรมีการนำเอาหลักการ Optimization [12] เข้ามาช่วยในการออกแบบตัวแกนเหล็กและขดลวดเพื่อให้ได้แกนเหล็ก และขดลวดที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งอาจจะเน้นการออกแบบให้ตัวเครื่องมี

น้ำหนักน้อยที่สุดสามารถยกน้ำหนักเหล็กได้สูงสุด หรือออกแบบให้สามารถใช้พลังงานได้ต่ำสุด เป็นต้นซึ่งจะเป็นการพัฒนาในส่วนของโปรแกรมการออกแบบที่ได้สร้างขึ้น

ควรมีการพัฒนาให้เครื่องสามารถใช้งานได้กับรถโฟลคลิฟต์ ซึ่งเป็นรถที่มีใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปโดยเฉพาะในโรงงานที่มีการเก็บเหล็ก หรือเศษเหล็กจำนวนมากซึ่งใช้รถโฟลคลิฟต์ในการขนแผ่นเหล็ก โดยถ้าสามารถติดตั้งเครื่องกับรถได้จะเป็นประโยชน์กับโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องใช้รถโฟลคลิฟต์ในการขนย้ายแผ่นเหล็ก และเศษเหล็กอย่างยิ่ง

อย่างไรก็ตามผู้จัดทำวิทยานิพนธ์หวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลการทดลองค้นคว้าเรื่องการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กนี้ จะเป็นประโยชน์และแนวทางต่อผู้อ่านและผู้สนใจในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสามารถนำไปพัฒนา และศึกษาค้นคว้าต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] L.Dawes, "**Dawes Electrical Engineering**", McGraw-Hill , Inc., Tokyo, 1955.
- [2] Hay&Hughes, "**Introduction To Electrical Engineering**," McGraw-Hill, United States of America, 1968.
- [3] กรุง ลือวัฒนา, รัชต์ มั่งมีชัย, ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล. "**การศึกษาและออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กเพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรม**,"การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28, ตุลาคม 2548, หน้า 601-604.
- [4] James McIntyre, "**Technical Terms**," แพร์พิทยาอินเตอร์เนชั่นแนล หจก, 2523.
- [5] Abraham Marcus, "**Electricity For Technicians**," Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.United States of America ,1968.
- [6] Laughton, M.A.and Say, M.G. "**Electrical Engineer's Reference Book**," Butterworth & Co(Publishers), London, 1985.
- [7] ผศ. อุคมศักดิ์ ยั่งยืน "**Power Electronics I**," ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าวิทยาเขตธนบุรี, 2528
- [8] ธนาพันธุ์ แสนสุข, "**การศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นแม่เหล็กโดยวิธีทดสอบแบบแผ่นเดียว**" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2548.
- [9] A.Bruce Carlson David G. Gisser "**Electrical Engineering Concepts and Applications**," Addison-Wesley Publishing Company, United States of America, 1981.
- [10] "**เครื่องจักรไฟฟ้า 1**," ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
- [11] Ki-Hyeon Park, Dong Eon Kim, Seong-Hoom Jeong,and Bongkoo Kang, "**Laminated Magnetic Flux Sensor For Thick-Steel-Plate Control**," IEEE Trans. on Industrial Electrics, Vol.50,No.2.,pp. 379-384, 2003 .
- [12] ธีรพล โพธิ์พงษ์วัฒนะ, วีระศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์, ชัยวุฒิ ถัสธรอุทัย."**การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กประสิทธิภาพสูงโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม**," การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, พฤศจิกายน 2544, หน้า 287-292.

ภาคผนวก

ภาคผนวก_ก คู่มือการใช้งานโปรแกรมการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วย

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก

ภาคผนวก_ข คู่มือการใช้งานเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ

วงกลมขนาดเล็ก

ภาคผนวก_ค คู่มือการใช้งานโปรแกรม MAXWELL SV

ภาคผนวก_ง ตารางผลการทดสอบ

ภาคผนวก_จ Source code

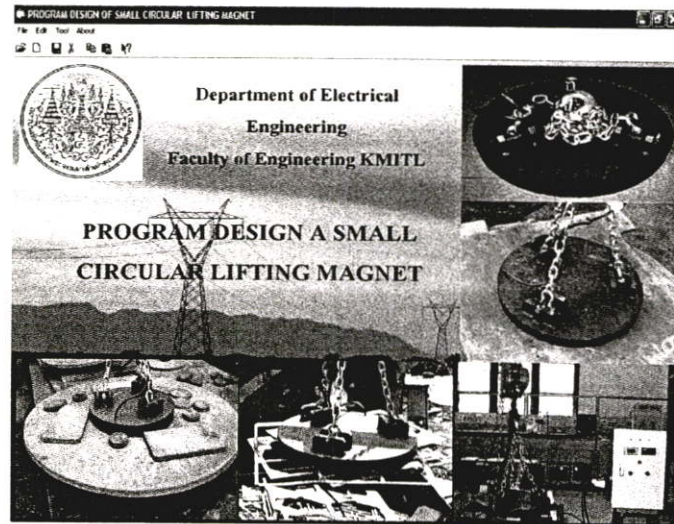
ภาคผนวก_ฉ บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

ภาคผนวก ก.

**คู่มือการใช้งานโปรแกรมการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วย
สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก**

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก

1. เปิดโปรแกรมการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กจะปรากฏหน้าจอเริ่มเข้าสู่โปรแกรมดังนี้



รูปที่ ก.1 หน้าจอเริ่มเข้าโปรแกรมการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก

2. ทำการ click File และเลือกที่ new จากนั้น โปรแกรมจะเข้าสู่หน้าจอต่อไปโดยในหน้าจอนี้จะกำหนดน้ำหนักที่ต้องการให้เครื่องสามารถยกได้ในช่อง LIFTING CAPACITY เท่ากับ 0.25ตัน เลือกค่าช่องว่างอากาศในช่อง AIRGAP เท่ากับ 2 mm และกำหนดค่าของกระแสไฟฟ้าที่ต้องการใช้ในช่อง CURRENT เท่ากับ 1.5A ซึ่งสามารถแสดงหน้าจอดังนี้

INFORMATION				A.W.G	S.W.G	Diameter(M)	Diameter(mm)	Sectional area(Cu Mils)	Sectional area...
LIFTING CAPACITIES	0.25	tons		5/0	464	11.706	715.296		
AIRGAP	2.0 mm			4/0	460	11.694	711.600		
CURRENT	1.5	A		5/0	432	10.913	686.624		
				3/0	409.6	10.404	667.712		
				4/0	408	10.160	660.000		
				3/0	372	9.440	598.656		
				2/0	364.8	9.266	573.075		
				2/0	348	8.829	531.104		0
				0	324.9	8.250	485.562		0
				0	324	8.230	484.976		0
				1	300	7.629	490.000		0
				1	295.3	7.340	463.634		0
				2	276	7.010	436.176		0
				3	250	6.401	413.504		0
				4	232	5.933	373.024		0
				3	229.4	5.877	369.624		0
				5	212	5.385	344.344		0
				4	204.3	5.189	331.728		0
				6	190	4.827	306.861		0
				5	181.6	4.621	293.088		0
				6	176	4.470	283.676		0
				6	162	4.175	267.244		0
				8	160	4.064	258.600		0
				7	144.3	3.645	208.822		0
				8	144	3.658	207.736		0
				8	128.5	3.285	185.512		0
				10	120	3.251	181.384		0

รูปที่ ก.2 หน้าจอรับค่าน้ำหนักที่ยก, ช่องว่างอากาศ และกระแสไฟฟ้า

3. หลังจากนั้น Click OK โปรแกรมจะทำการคำนวณ และแสดงค่าพื้นที่หน้าตัดขดลวดตัวนำในช่อง AREA CONDUCTOR เท่ากับ 0.5 mm^2 จากนั้นทำการป้อนค่าชนิดขดลวดตัวนำ (TYPE OF CONDUCTOR) เท่ากับ S.W.G, เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดตัวนำ (DIAMETER OF DUCTOR) เท่ากับ 0.8128 mm และขนาดพื้นที่หน้าตัดขดลวดตัวนำ (AREA OF CONDUCTOR) เท่ากับ 0.5189 mm^2 ซึ่งค่าทั้งสามมาจากตารางสาย ในโปรแกรมโดยสามารถแสดงหน้าจอดังนี้

INFORMATION				Diameter(mm)	Sectional area(Cu.ML)	Sectional area(sq.in.)	Sectional area(sq.mm)	Weight...
LIFTING CAPACITIES	0.25	tons.		1.626	4.096	0.003217		2.075
AIRGAP	20 mm			1.450	3.257	0.002598		1.650
CURRENT	1.5	A		1.422	3.136	0.002463		1.505
AREA CONDUCTOR	5	sq. mm.		1.291	2.583	0.002029		1.309
TYPE OF CONDUCTOR	S.W.G			1.219	2.304	0.001910		1.167
DIAMETER OF CONDUCTOR (NEW)	0.8128	mm.		1.150	2.048	0.001608		1.037
AREA OF CONDUCTOR (NEW)	0.5189	sq. mm.		1.024	1.624	0.001275		0.8226
				1.016	1.600	0.001257		0.8107
				0.9144	1.296	0.001018		0.8576
				0.9116	1.288	0.001012		0.8529
				0.8120	1.024	0.0008042		0.5189
				0.8110	1.021	0.0080019		0.5174
				0.7229	890	0.008362		0.4195
				0.7112	794	0.0067598		0.2573
				0.6438	642.6	0.0069047		0.2256
				0.6096	576	0.0064524		0.23915
				0.5723	509.4	0.0064001		0.2561
				0.5663	484	0.0062881		0.2452
				0.5106	404	0.0062173		0.2047
				0.5090	400	0.0063142		0.2027
				0.4572	324	0.0062545		0.1642
				0.4547	320.4	0.0062516		0.1629
				0.4166	289	0.0062113		0.1363
				0.4049	254.1	0.0061996		0.1298
				0.3759	219	0.0061720		0.1110
				0.3606	201.6	0.0061583		0.1021

รูปที่ ก.3 หน้าจอรบค่าชนิด, เส้นผ่านศูนย์กลาง และพื้นที่หน้าตัดขดลวดตัวนำ

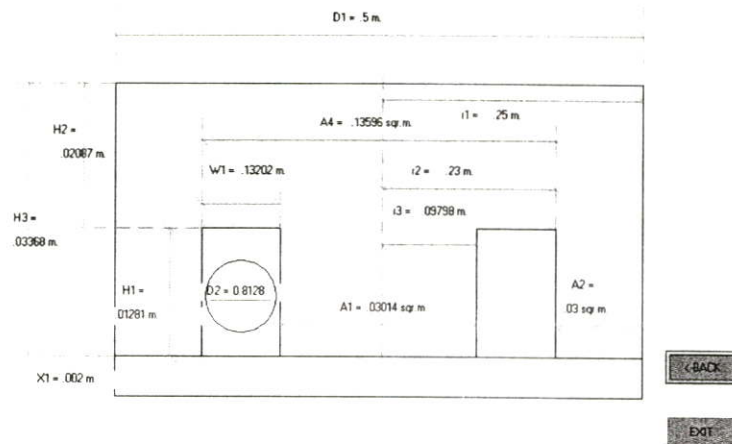
4. หลังจากนั้นทำการ Click NEXT โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ และแสดงในหน้าจอดังนี้

RESULTANT					
LIFTING		tons.	CURRENT		A
DIAMETER OF LIFTING MAGNET (D1)		m	NUMBER OF TURNS		turn
AREA OF CROSSSECTION LIFTING MAGNET (A1)		sq. m.	TYPE OF CONDUCTOR		
AREA OF CROSSSECTION LIFTING MAGNET (A2)		sq. m.	AREA OF CONDUCTOR (NEW)		sq. mm.
AIRGAP (G1)		m	DIAMETER OF CONDUCTOR NEW (D2)		mm
MAGNETOMOTIVE FORCE (mmf)		(A·t)	HIGH OF SLOT (H1)		m
VOLTAGE		V	WIDTH OF SLOT (W1)		m
POWER		W	HIGHT OF CORE (H2)		m
			HIGHT OF LIFTING MAGNET (H3)		m

รูปที่ ก.4 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

5. จากรูป ก.4 เป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญซึ่งใช้ในการจัดสร้างเครื่อง โดยหลังจากนั้นทำการ Click NEXT โปรแกรมจะแสดงขนาดของเครื่องเป็นภาพ 2 มิติสามารถแสดงหน้าจอดังนี้

FIGURE OF DIMENSION



รูปที่ ก.5 ขนาดของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการใช้โปรแกรม

6. จากค่าที่ได้จากการใช้โปรแกรมการออกแบบสามารถนำค่าพารามิเตอร์ และขนาดของเครื่องไปใช้ในการจัดสร้างเครื่องต่อไป

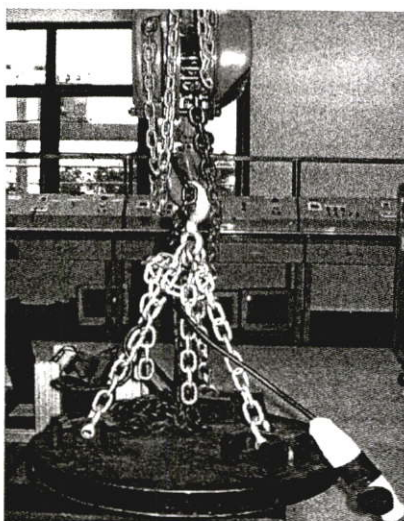
ภาคผนวก ข.

**คู่มือการใช้งานชุดเครื่องยกของหนักด้วยสนามเหล็กไฟฟ้าแบบ
วงกลมขนาดเล็ก**

ขั้นตอนการใช้งานชุดเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก

1. การติดตั้งตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าพร้อมด้วยชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

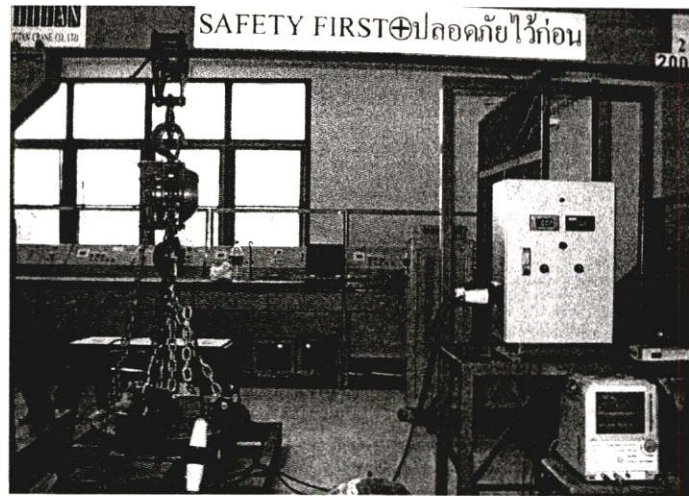
- นำชุดโซ่รับน้ำหนักที่ยึดติดกับตัวเครื่องขึ้นแขวนกับรอกซึ่งติดอยู่กับเครน
- นำตู้ควบคุมซึ่งเป็นชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงติดตั้งในบริเวณที่ปลอดภัยแก่การใช้งานซึ่งควรจะต้องอยู่ห่างจากบริเวณที่ติดตั้งตัวเครื่องและระยะการทำงานของเครน
- ต่อสายไฟด้านอินพุตจากชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเป็นด้าน AC เข้ากับแหล่งจ่ายไฟของการไฟฟ้า
- ต่อสายไฟด้านเอาต์พุตจากชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเป็นด้าน DC เข้ากับขั้วต่อสายซึ่งติดกับตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ ข.1 แสดงการนำโซ่รับน้ำหนักที่ยึดติดกับตัวเครื่องโดยแขวนกับรอกซึ่งติดอยู่กับเครน

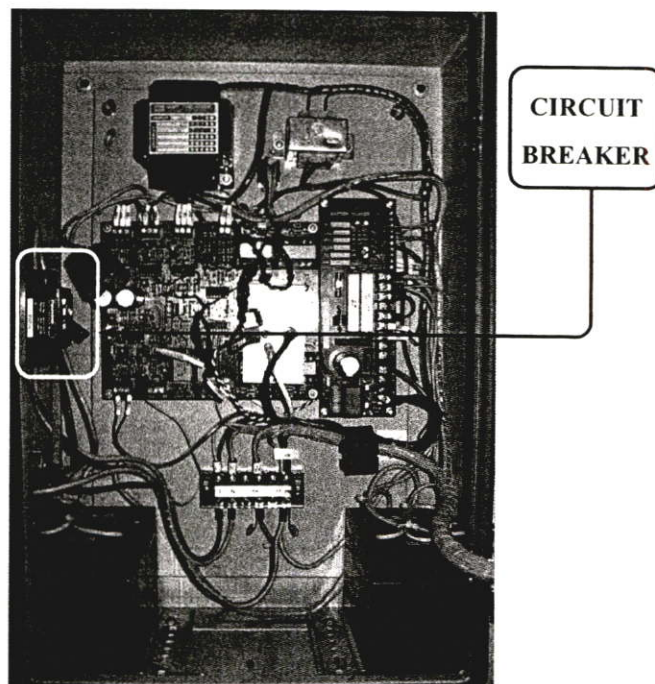


รูปที่ ข.2 แสดงการต่อสายไฟด้านเอาต์พุตจากชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเป็นด้าน DC เข้ากับขั้วต่อสายซึ่งติดกับตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

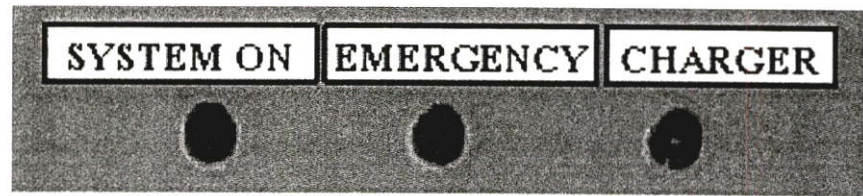


รูปที่ ข.3 แสดงการติดตั้งตัวเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าพร้อมด้วยชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งอยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน

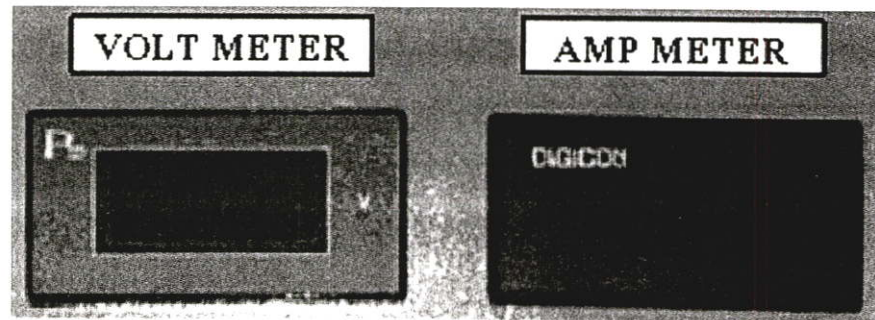
2. การเริ่มต้นใช้งานใช้งานชุดเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม
 - เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ภายในตู้ควบคุมหลอดไฟ SYSTEM ON จะสว่างขึ้น หลอดไฟ CHARGER จะกระพริบ (แสดงสถานะการชาร์จ ของชุดแบตเตอรี่ชาร์จเจอร์ภายในตู้ควบคุม) หลอดไฟ EMERGENCY จะยังไม่สว่างในสถานะปกติ
 - หน้าจอของ โวลต์มิเตอร์ และ แอมมิเตอร์สว่างขึ้นอยู่ในสถานะพร้อมทำงาน



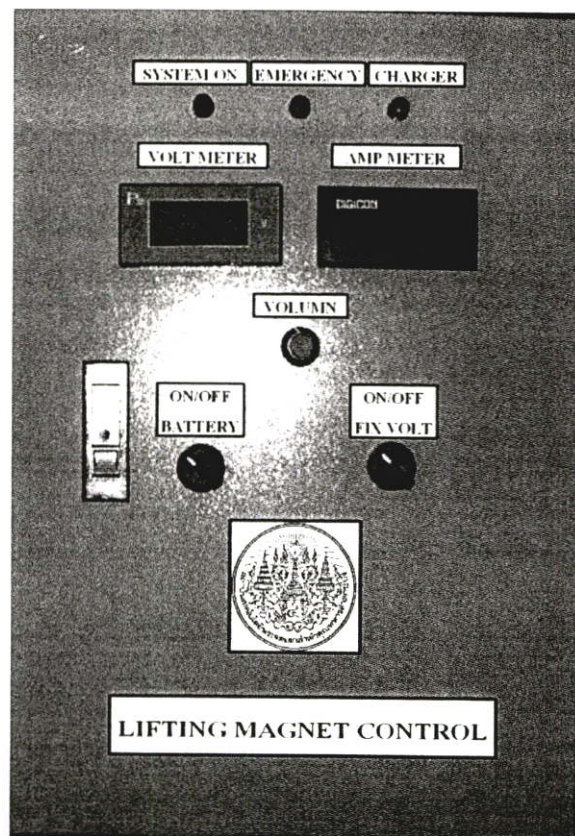
รูปที่ ข.4 แสดงตำแหน่งเซอร์กิตเบรกเกอร์



รูปที่ ข.5 แสดงหลอดไฟ SYSTEM ON, EMERGENCY และ CHARGER หน้าตู้ควบคุม

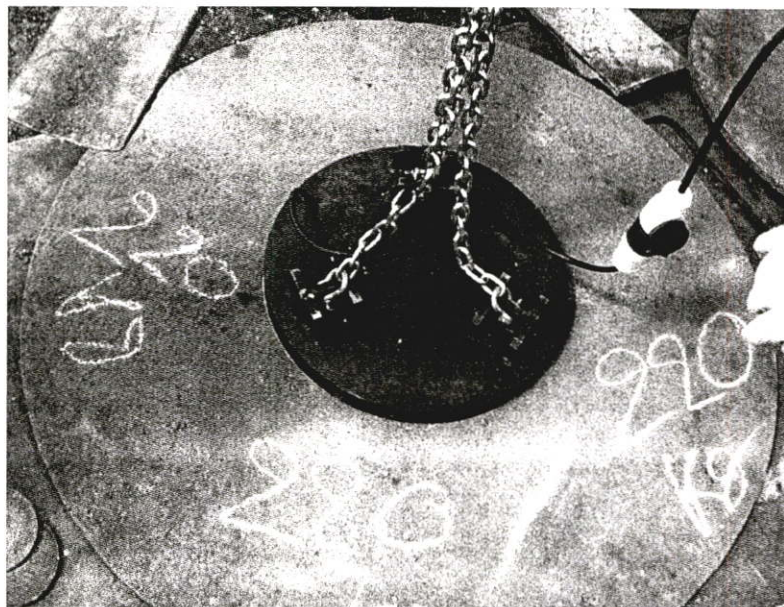


รูปที่ ข.6 แสดงหน้าจอ VOLT METER และ AMP METER



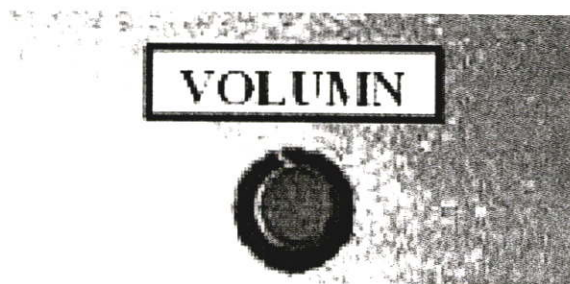
รูปที่ ข.7 แสดงหน้าตู้ควบคุมเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม

- วางเครื่องยกของหนักลงบนแผ่นเหล็กทดสอบ



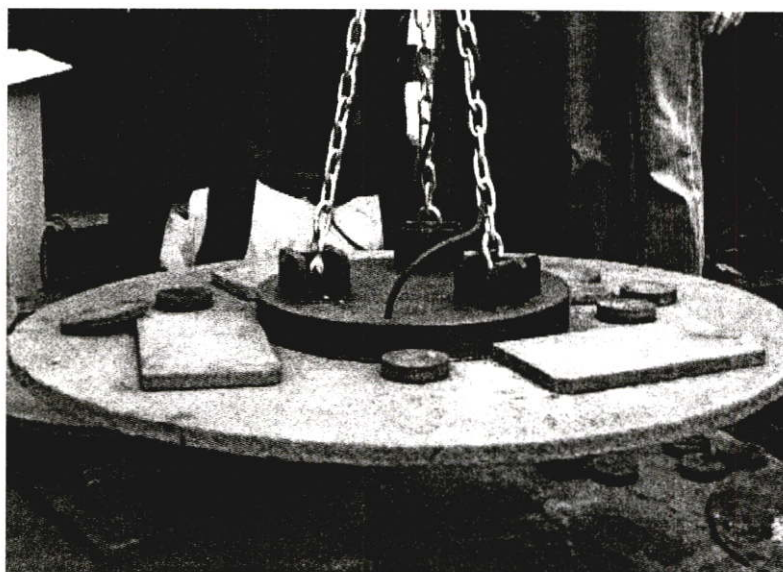
รูปที่ ข.8 แสดงการวางเครื่องยกของหนักลงบนแผ่นเหล็กทดสอบ

- ปรับ VOLUMN ซึ่งจะเป็นการปรับการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับตัวเครื่องโดยสามารถปรับได้ที่ระดับพิกัดแรงดัน 0-110 V_{dc} ซึ่งจะโดยสามารถดูค่าระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เพิ่มขึ้นจากการปรับได้จาก VOLT METER และสามารถดูกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากการปรับแรงดันได้จาก AMP METER ที่หน้าตู้ควบคุมซึ่งจะแสดงผลเป็นทศนิยม 2 ตำแหน่ง

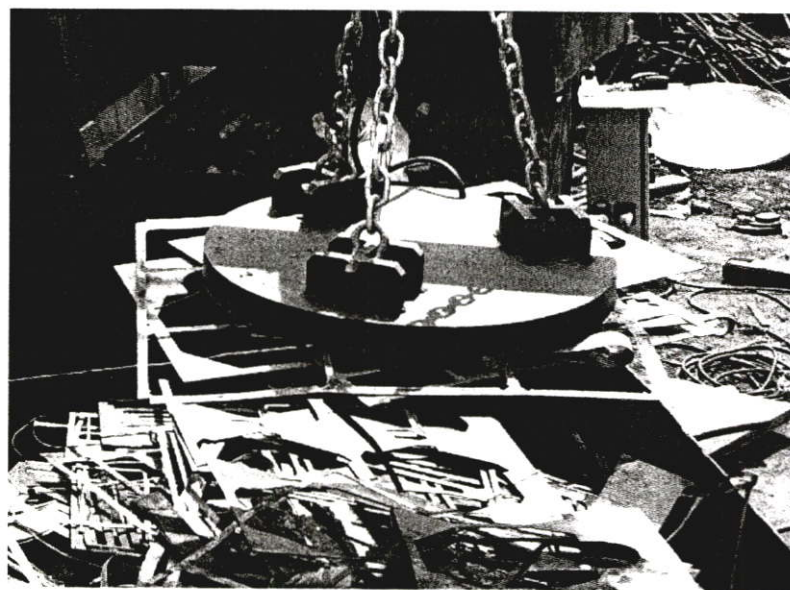


รูปที่ ข.9 แสดง VOLUMN สำหรับปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

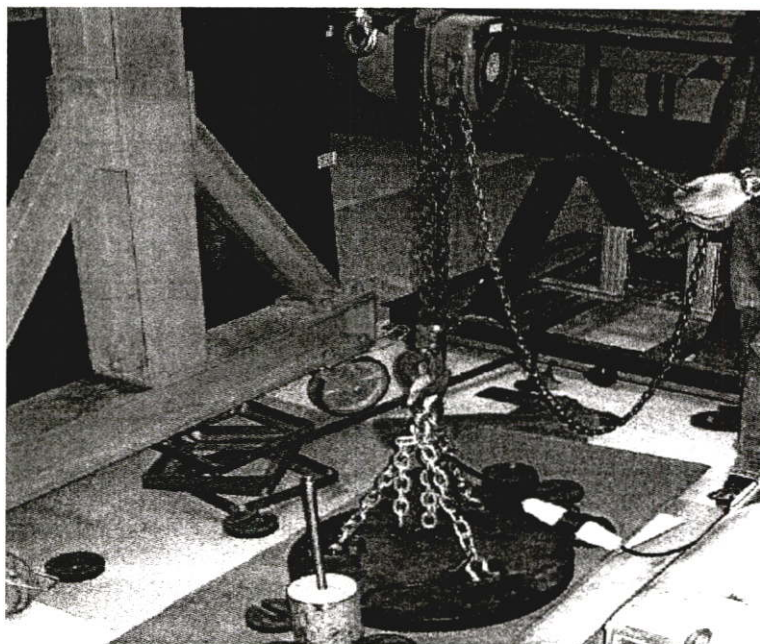
- ทำการยกตัวเครื่องยกของหนักโดยการบังคับเครนหรือดิ่งโซ่ที่รอก (ขึ้นอยู่กับความพร้อมของแต่ละโรงงาน) ซึ่งในขณะนี้ได้ยึดติดกับแผ่นเหล็ก อันเกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นโดยเมื่อแผ่นเหล็กลอยสูงขึ้นจากพื้นในระดับที่ใช้งานหลังจากนั้นจึงทำการเคลื่อนย้ายโดยการบังคับเครนเพื่อนำแผ่นเหล็กที่ยกขึ้นไปไว้ในตำแหน่งที่ต้องการต่อไป (ในกรณีการยกหรือคัดแยกเศษเหล็กลักษณะการใช้งาน เช่นเดียวกันกับการยกแผ่นเหล็ก)



รูปที่ ข.10 แสดงการยกแผ่นเหล็ก โดยการใช้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ ข.11 แสดงการยกเศษเหล็ก โดยการใช้เครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ ข.12 แสดงการดึงโซ่จากตัวรอกซึ่งแขวนชุดโซ่รับน้ำหนักของตัวเครื่องยกของหนักด้วย
สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดูดติดแผ่นเหล็กทดสอบไว้เพื่อให้ลอยสูงขึ้นก่อนทำการ
เคลื่อนย้ายไปสู่ตำแหน่งที่ต้องการ

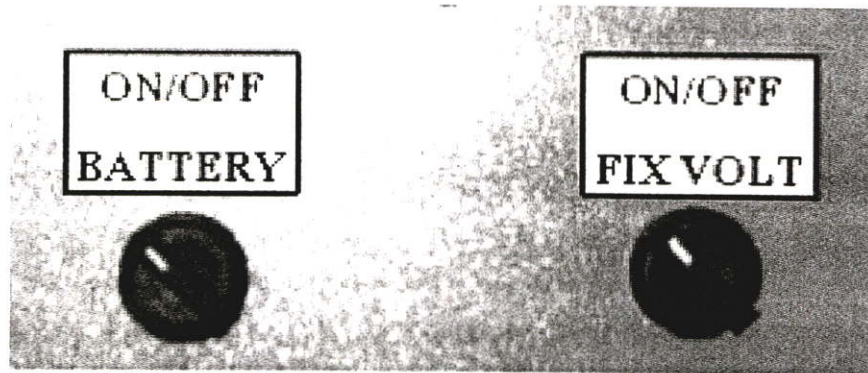
- เมื่อเคลื่อนย้ายแผ่นเหล็ก ไปไว้ยังตำแหน่งที่ต้องการ และวางแผ่นเหล็กลงกับพื้นแล้วหลังจากนั้นทำการปรับลดระดับแรงดันลงโดยการปรับ VOLUMN และอ่านค่าจาก VOLT METER ให้ระดับแรงดันลดลงอยู่ที่พิกัด $0 V_{dc}$ จากนั้นจึงสามารถนำตัวเครื่องกลับไปยังตำแหน่งเดิมเพื่อเริ่ม งานใหม่

3. การทำงานในกรณีที่แหล่งจ่ายจากการไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายไฟได้

- ในกรณีที่เกิดปัญหาแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายไฟได้ในขณะที่เครื่องกำลังยกแผ่นเหล็กหรือกำลังเคลื่อนย้ายแผ่นเหล็ก ระบบสำรองไฟฟ้าฉุกเฉินจะทำงานโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงจากแบตเตอรี่เข้าสู่ตัวเครื่องอย่างรวดเร็ว โดยที่จะไม่ทำให้แผ่นเหล็กที่ถูกเครื่องยกไว้ ล่วงหล่นสู่พื้น อันอาจเกิดความเสียหายต่อแผ่นเหล็กหรือเครื่องจักรอื่นที่กำลังทำงานอยู่รวมถึงผู้ปฏิบัติงานในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งชุดจ่ายไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้นานเกินกว่า 1 ชม ซึ่งในการทำงานจริงต้องการเวลาสำหรับการเคลื่อนย้ายแผ่นเหล็กจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่งเพียง 5-15 นาทีเท่านั้นโดยในขณะที่ระบบทำงาน หลอดไฟ SYSTEM ON แล CHARGER จะดับลง แต่หลอดไฟ EMERGENCY จะสว่างแทน และสามารถอ่านค่าระดับแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้จาก VOLT METER และ AMP METER เช่นเดิม (เนื่อง จากเป็นการสร้างเครื่องต้นแบบ ดังนั้นเพื่อให้ระบบที่สร้างมีความคล่องตัว จึงได้กำหนดให้ใช้แรงดันไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินจาก

แบตเตอรี่ 96 V_{dc} ซึ่งจะใช้จำนวนแบตเตอรี่เพียง 8 ลูกเพื่อให้สามารถติดตั้งไว้ในตู้ควบคุมได้ทั้งหมดโดยมีน้ำหนักเบาและสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก) จนเมื่อระบบไฟฟ้ากลับเข้าสู่สภาวะปกติ ระบบการจ่ายไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินจากแบตเตอรี่จะหยุดลงและแหล่งจ่ายไฟฟ้าปกติจะจ่ายเข้าสู่ตัวเครื่องเช่นเดิม

- สวิตช์ ON/OFF BATTERY มีหน้าที่ เปิด และ ปิด ระบบสำรองไฟฟ้าฉุกเฉิน และชาร์ตแบตเตอรี่
- สวิตช์ ON/OFF FIX VOLT มีหน้าที่ เปิด และ ปิด ระบบจำกัดแรงดันซึ่งในการใช้งานจริงจะไม่ใช้การปรับแรงดันแต่จะใช้ค่าแรงดันสูงสุดดังนั้นจึงได้ออกแบบระบบนี้ไว้เพื่อจำลองการใช้งานที่ต้องการจ่ายแรงดันสูงสุดโดยไม่ต้องปรับ VOLUMN ซึ่งทำขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบเท่านั้น



รูปที่ ข.13 แสดง สวิตช์ ON/OFF BATTERY และ ON/OFF FIX VOLT

ภาคผนวก ค.

คู่มือการใช้โปรแกรม Maxwell SV

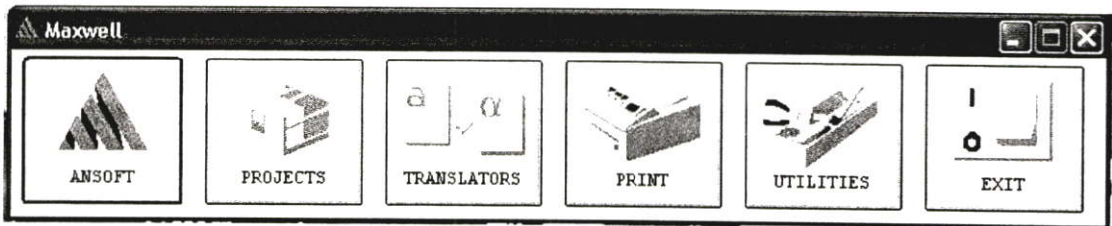
1. การใช้งานโปรแกรม MAXWELL SV

- ที่หน้าจอคอมพิวเตอร์จะมีไอคอนโปรแกรมดังนี้



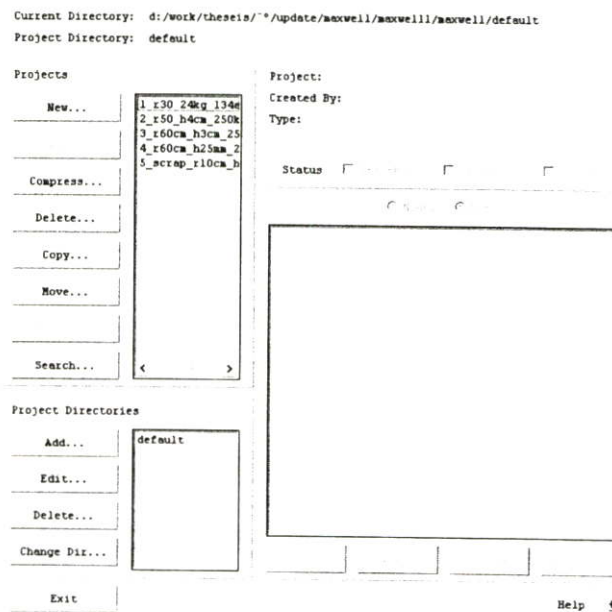
รูปที่ ค.1 แสดงไอคอนโปรแกรม Maxwell SV

- จากหน้าจอคอมพิวเตอร์เมื่อทำการ Double Click ไอคอน Maxwell SV ขึ้นมาจะปรากฏหน้าจอดังนี้



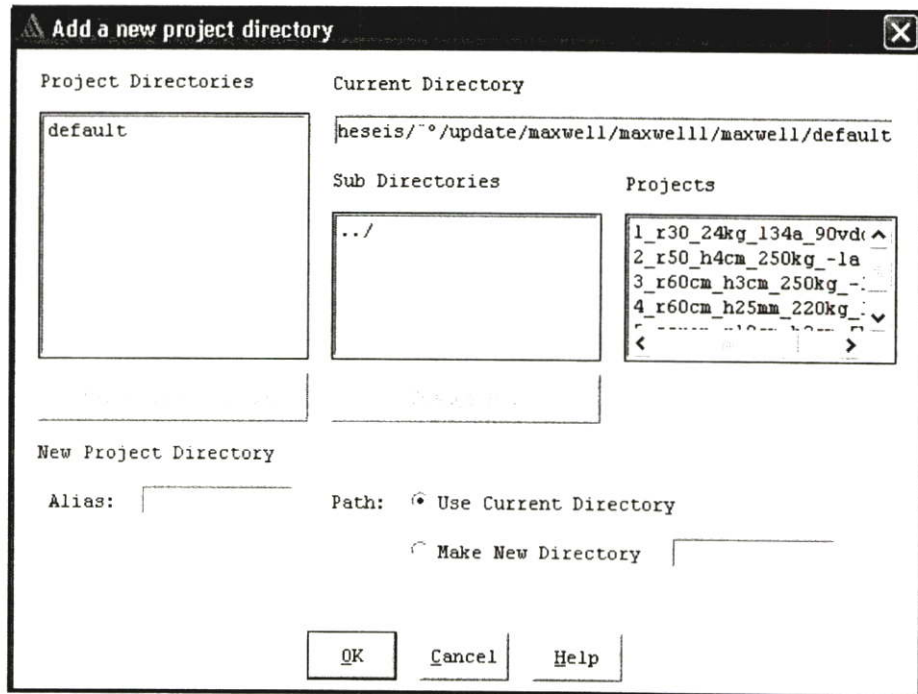
รูปที่ ค.2 แสดงหน้าต่าง Maxwell SV

- จากหน้าจอนี้ทำการ Click ที่หน้าต่าง PROJECT โดยเมื่อทำการ Click ที่หน้าต่างแล้วจะปรากฏหน้าต่าง Maxwell Project ดังนี้



รูปที่ ค.3 แสดงหน้าต่าง Maxwell Project

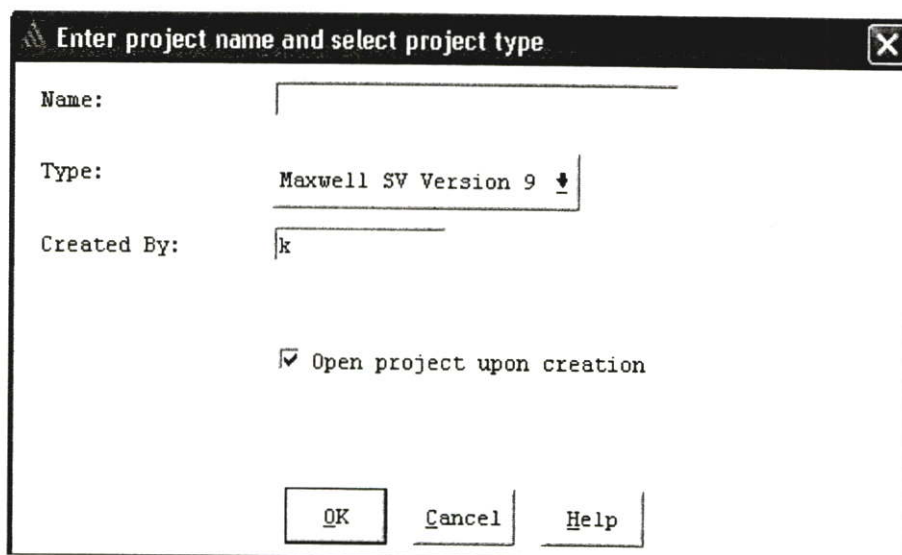
- ทำการ Click ที่ Add... ในส่วนของ Project Directories แล้วจะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาดังนี้



รูปที่ ก.4 หน้าต่าง Add a new project directory

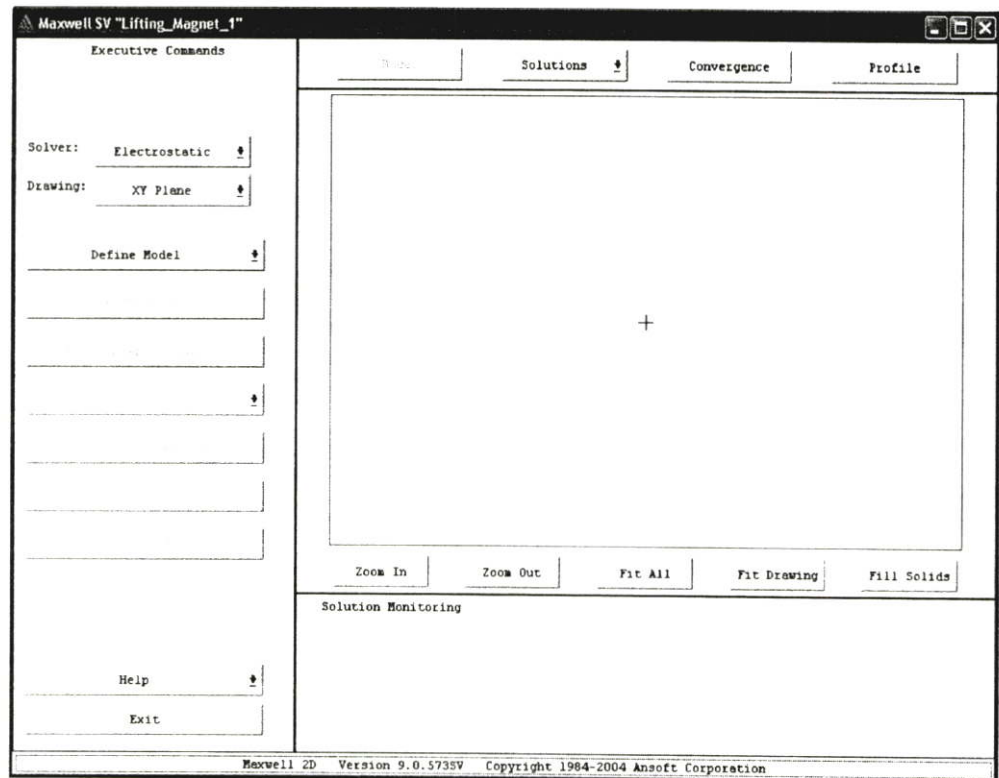
- ที่หน้าต่างนี้ในส่วน New Project Directory ที่ช่อง Alias: ให้พิมพ์ getting started SV จากนั้น Click OK

- จากนั้นจะขึ้นหน้าต่าง Maxwell Project ในส่วน Project นั้นทำการเลือกที่ New...



รูปที่ ก.5 หน้าต่าง Enter project name and select project type

- ที่ช่อง Name: นั้นทำการใส่ชื่อซึ่งชื่อนี้จะเป็นชื่ออะไรก็ได้ โดยในที่นี้จะทำการใส่ชื่อเป็น Lifting magnet 1 จากนั้นทำการ Click OK โดยจะปรากฏหน้าจอดังนี้



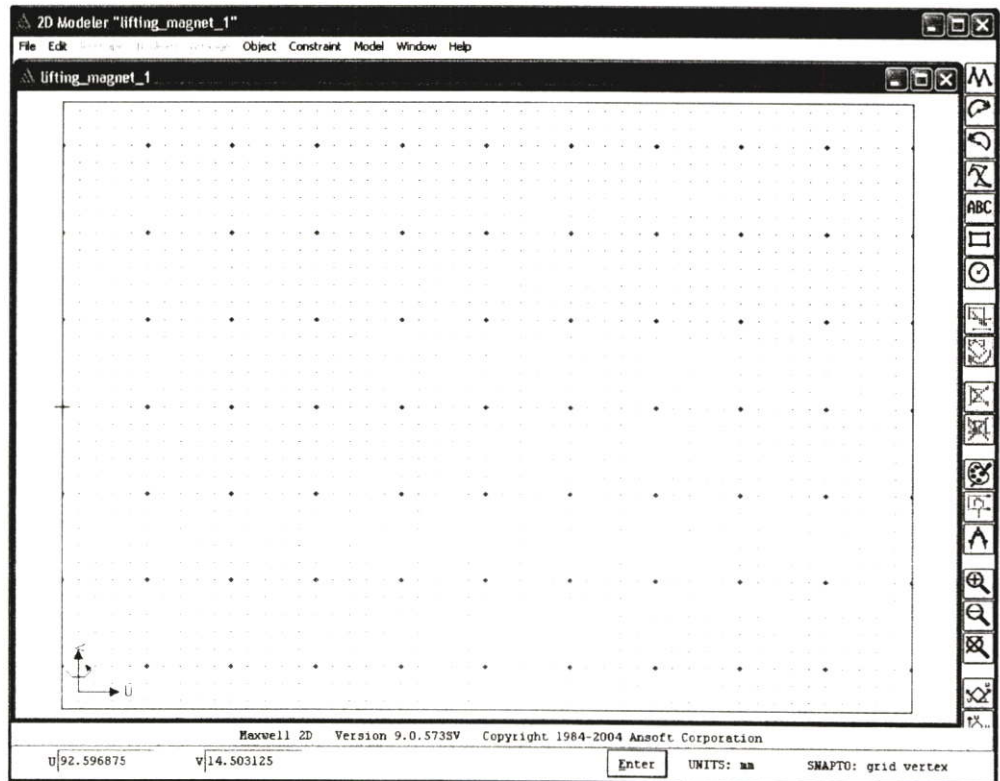
รูปที่ ค.6 แสดงหน้าจอ Maxwell SV Lifting magnet 1

- จากนั้นในส่วนของ Executive Commands จะ Set ที่

Solver: Magnetostatic

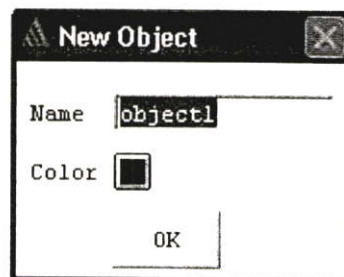
Drawing: ทำการ Click แล้วเลือก RZ Plane

Define Model: ทำการ Click แล้วเลือก Draw Model... โดยเมื่อทำการ Set ค่าต่างๆ เรียบร้อยแล้วก็จะปรากฏหน้าจอดังนี้



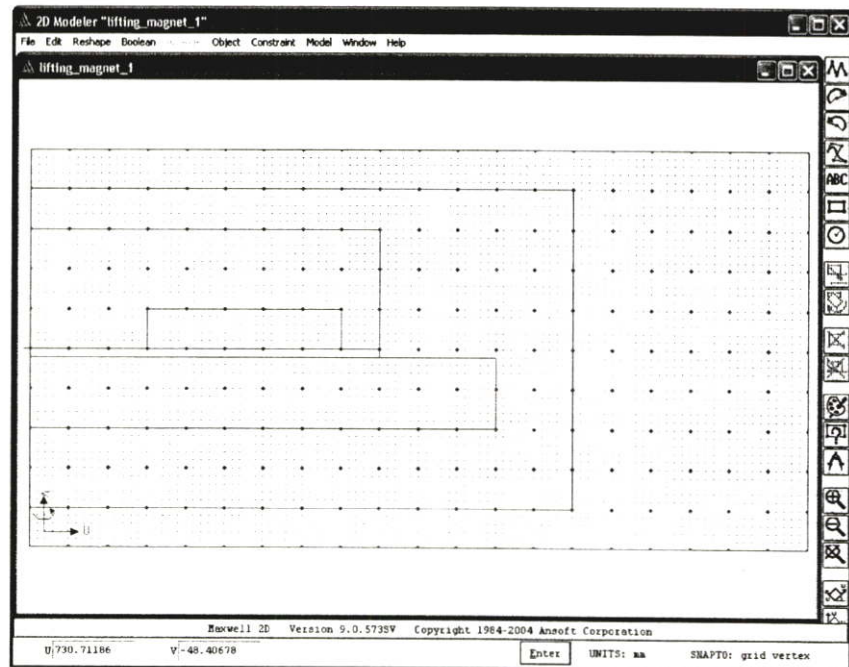
รูปที่ ค.7 แสดงหน้าจอ 2D Modeler Lifting magnet 1

- จากนั้นทำการวาดรูปโดยมี Tool bar ต่างๆ ในการวาดรูป ซึ่งในที่นี้จะทำการวาด Lifting magnet ซึ่งเมื่อวาดเสร็จแต่ละส่วนจะมีหน้าจอ New object ปรากฏขึ้นมาซึ่งจะเป็นการตั้งชื่อ Object โดยถ้าต้องการตั้งชื่อใหม่ก็ให้ทำการพิมพ์ชื่อใหม่ลงไป แต่ถ้าไม่ต้องการตั้งชื่อ โปรแกรมก็จะตั้งชื่อให้โดยอัตโนมัติซึ่งจะมีหน้าจอดังนี้



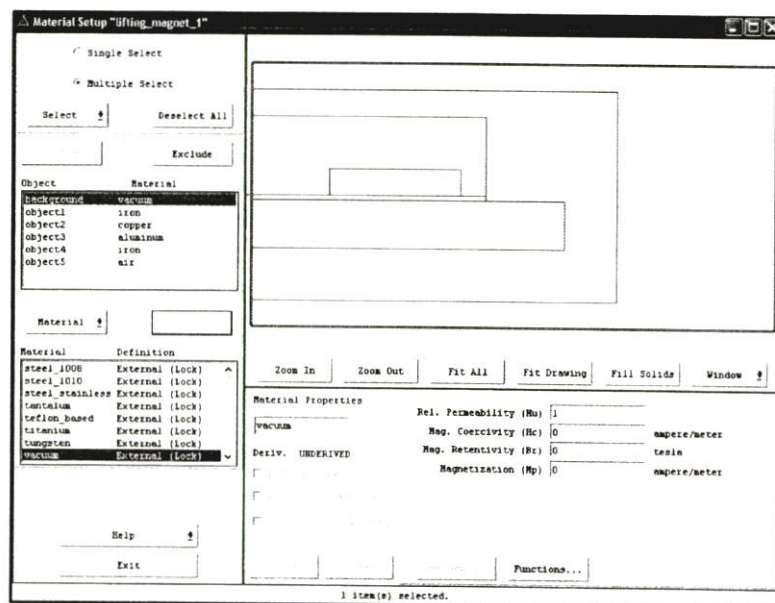
รูปที่ ค.8 แสดงหน้าจอ New Object

- หลังจากวาดรูปเสร็จจะได้รูปดังนี้







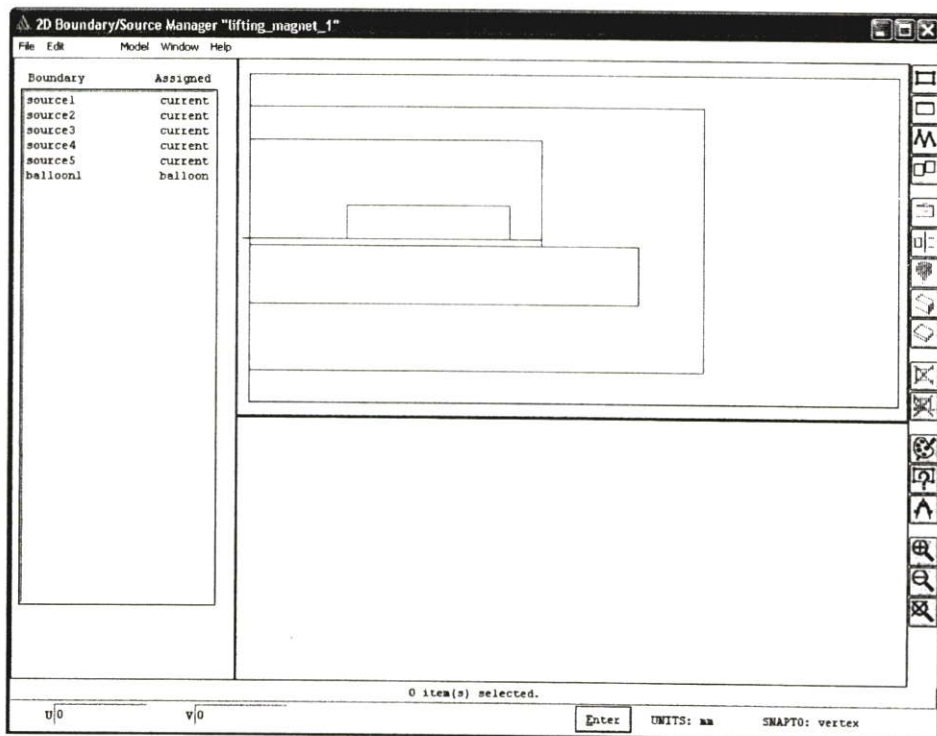
รูปที่ ก.9 แสดงรูป Lifting magnet ที่วาดเสร็จ

- เมื่อทำการวาดรูปเสร็จให้ Click – File – Exit – Yes หลังจากนั้น จะขึ้นหน้าจอเพื่อให้ Setup Materials โดยทำการเลือก Object1 และ 4 ให้เป็น iron ส่วน Object2 กำหนดให้เป็น copper Object3 กำหนดให้เป็น aluminum และ Object5 กำหนดให้เป็น air และ Background โปรแกรมจะกำหนดให้เป็น vacuum โดยเมื่อกำหนดจะแสดงหน้าจอดังนี้



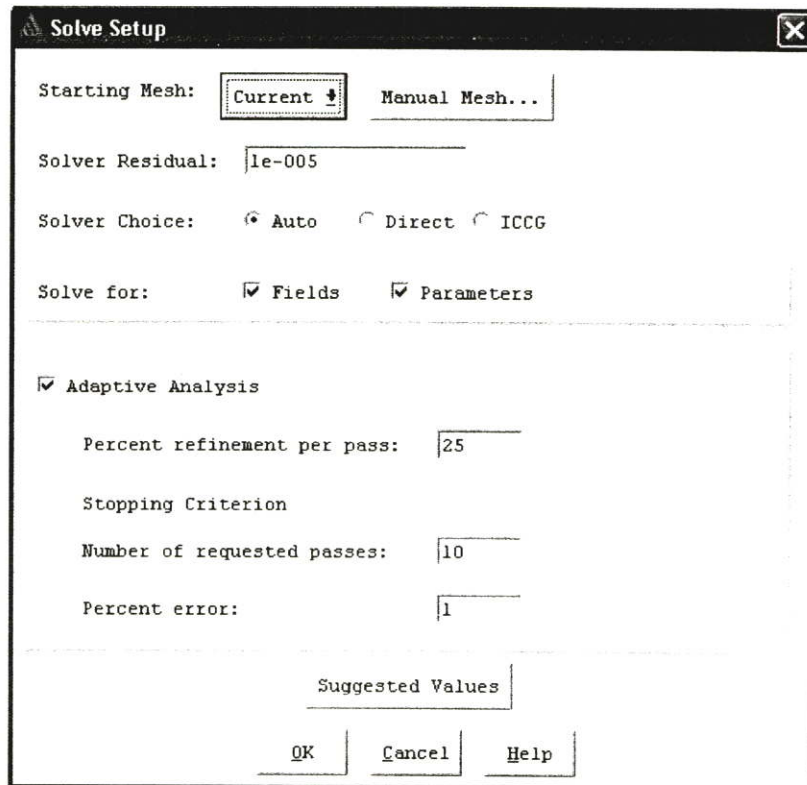
รูปที่ ก.10 หน้าจอการ Setup Materials

- จากนั้นทำการ Click – Exit – Yes ซึ่งปรากฏหน้าต่างสำหรับทำการ Setup Boundaries/Sources ให้ทำการ Click ไอคอน Setup Boundaries/Sources จากนั้นทำการ Click ซ้ายที่  ก็จะเป็นลูกศรแล้วนำไป Click ที่ช่อง Object1 จากนั้น Click ขวา ก็จะปรากฏ  ให้ทำการ Click แล้วจะเห็นว่าในช่อง value มีค่าเท่ากับ 0 ให้ทำการ Click Assign จากนั้น Object2 ซึ่งเป็น copper ซึ่งเราจะต้องทำการใส่ค่ากระแสให้ใส่ค่า 1 ในช่อง value จากนั้น Click Assign หลังจากนั้น Object อื่น ทำเช่นเดียวกับ Object 1 จนมาถึง Background เมื่อทำการ Click ซ้ายที่  ก็จะเป็นหัวลูกศรแล้วนำไป Click ที่เส้น Background จากนั้นทำการ Click ขวาจะปรากฏ  ทำการ Click แล้ว Assign ซึ่งจะได้หน้าต่างดังนี้



รูปที่ ก.11 แสดงหน้าจอ Boundaries/Sources

ต่อจากนั้นจึง Click – Exit – Yes เพื่อเข้าสู่หน้าจอ Setup Solution Option โดยทำการ Click ที่ starting Mesh เลือก Current และที่ Percent refinement per pass เลือก 25 จากนั้นทำการ Click OKซึ่งจะปรากฏหน้าต่างดังนี้



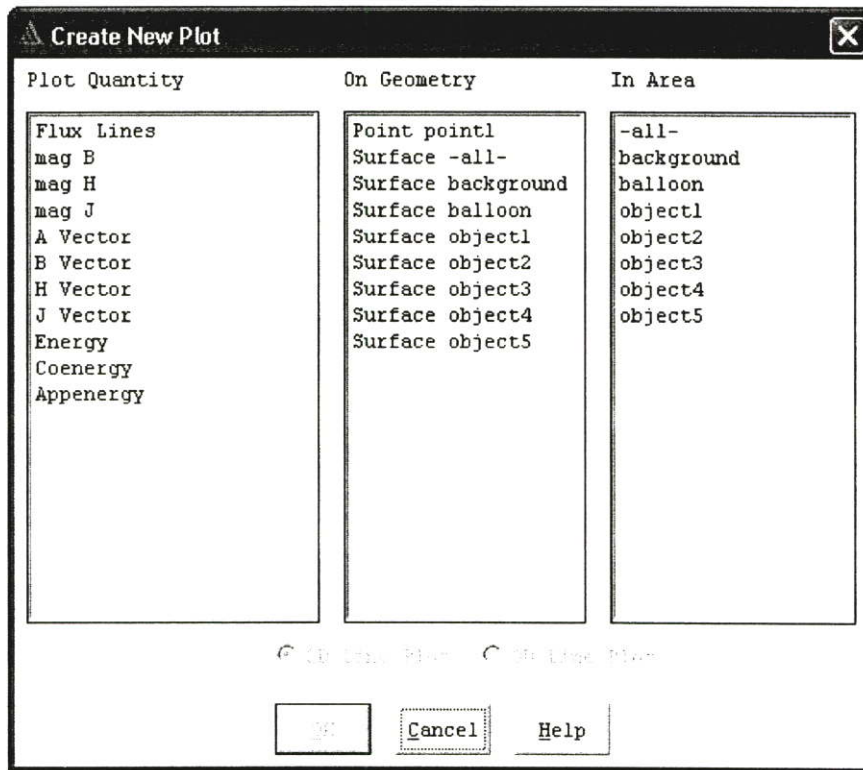
รูปที่ ค.12 แสดงหน้าจอ Solve Setup

- จากนั้นทำการ Click OK แล้วให้ทำการ Click Convergence ต่อจากนั้น Click Solve โปรแกรมจะทำการ Run เพื่อหาค่า Energy Error (%) ออกมาโดยจะแสดงหน้าจอดังนี้

CONVERGENCE DATA					
Number of passes:	Pass	Triangles	Total Energy(J)	Energy Error(%)	
Completed 10	1	105	3.86876E-006	137.2031	
Remaining 0	2	156	4.02901E-006	93.7200	
	3	230	4.11201E-006	62.9831	
	4	340	4.15390E-006	38.0744	
Convergence criteria:	5	509	4.17580E-006	14.1030	
Target Error: 1%	6	760	4.18449E-006	9.2120	
Energy Error: 2.08%	7	1134	4.19536E-006	7.0812	
Delta Energy: 0.053%	8	1698	4.19875E-006	4.3645	
	9	2540	4.20310E-006	3.3228	
	10	3797	4.20532E-006	2.0795	

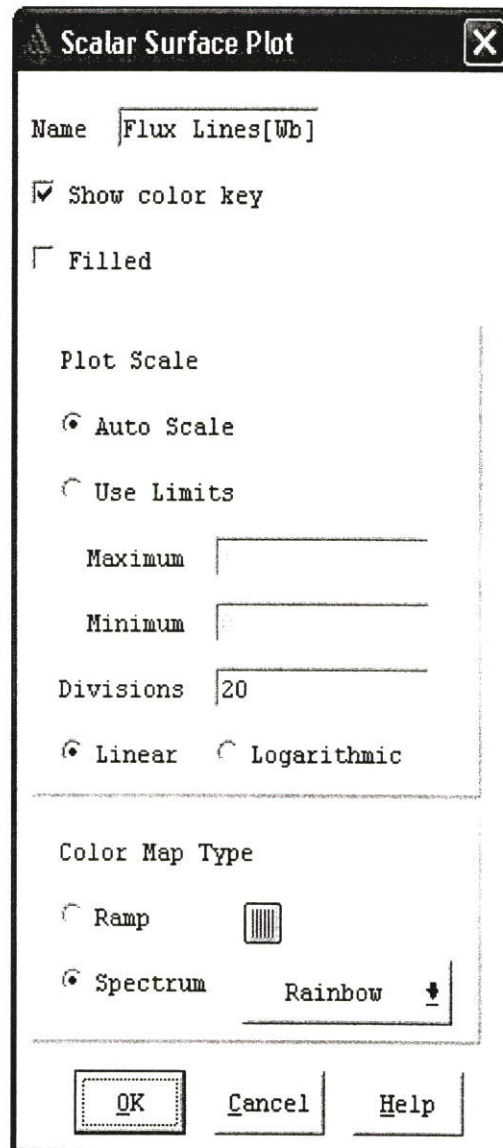
รูปที่ ค.13 แสดงค่า Energy Error (%)

- จากนั้นเมื่อโปรแกรม Run เสร็จก็ให้ทำการ Click Post Process แล้วทำการ Click Plot-Field จะได้หน้าจอดังนี้



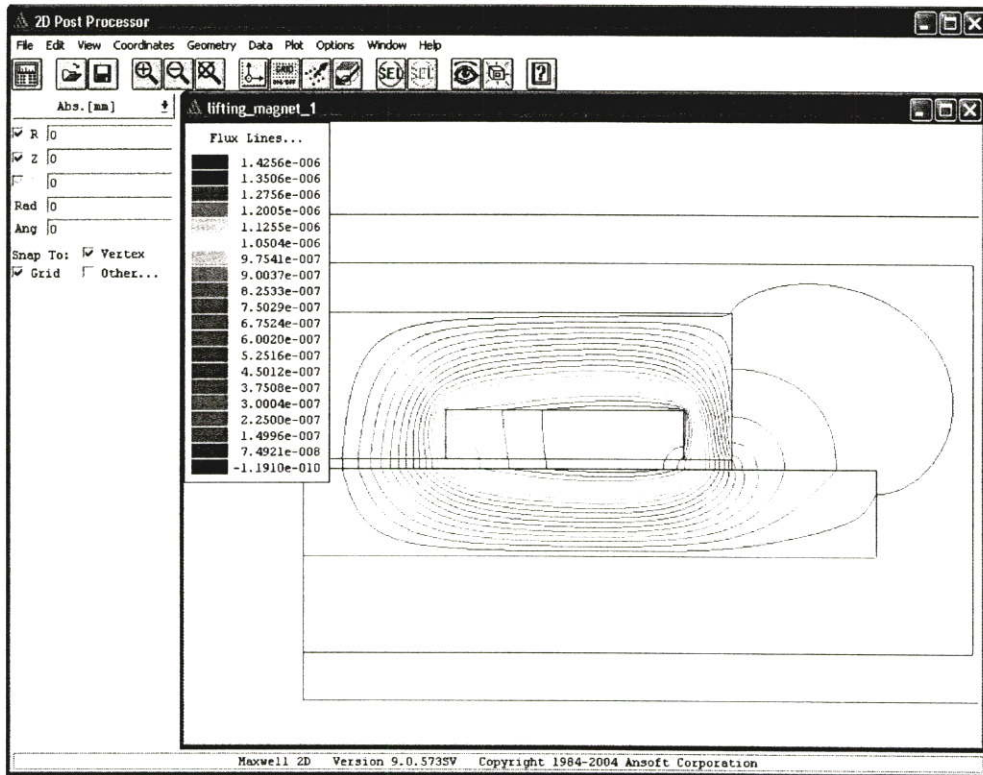
รูปที่ ก.14 แสดงหน้าจอ Create New Plot

- ในการจำลองเส้นแรงแม่เหล็กให้เลือก Flux Line ที่ช่อง Plot Quantity และที่ชื่อ On Geometry ให้เลือก Surface all จากนั้นทำการ Click OK จะขึ้นหน้า Scalar Surface Pot ให้เอาเครื่องหมาย ถูกที่ Filled ออก และที่ช่อง Division ให้ใส่ค่า 20 ซึ่งเป็นค่าจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการให้แสดงซึ่งเมื่อทำการกำหนดค่าแล้วจะมีหน้าจอดังนี้



รูปที่ ค.15 แสดงหน้าจอ Scalar Surface Plot

- จากนั้นทำการ Click OK ก็จะได้เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาโดยสามารถเทียบค่าเส้นสีที่ปรากฏได้ดังรูป



รูปที่ ค.16 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการใช้โปรแกรม Maxwell SV

ภาคผนวก ง.
ตารางผลการทดสอบ

ตารางที่ ง.1 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
ในการยกแผ่นเหล็กน้ำหนัก 30-250 kg

แรงดันไฟฟ้า (V_{dc})	กระแสไฟฟ้า (A)	น้ำหนักแผ่น เหล็ก (kg)	กำลังไฟฟ้า (W)	กำลังไฟฟ้า/ กิโลกรัม(W)/(kg)
13	0.21	30	2.73	0.091
29	0.49	60	14.21	0.236
32	0.54	100	17.28	0.1728
47	0.85	120	39.95	0.33
48	0.9	140	43.2	0.308
51	0.94	160	47.94	0.299
60	1.15	180	69	0.383
63	1.2	200	75.6	0.378
75	1.52	220	114	0.518
79	1.62	250	127.98	0.512

ตารางที่ ง.2 การทดสอบหาค่าความต้านทานขดลวดด้วยวิธี V-I Method

แรงดันไฟฟ้า (V_{dc})	กระแสไฟฟ้า (A)
5	0.15
10	0.3
16	0.45
21	0.6
27	0.75
32	0.9
38	1.05
44	1.2
49	1.35
55	1.5
R	40(Ω)

ตารางที่ 3.3 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
ในสถานะไม่มีโหลด ที่แรงดันทดสอบ $13 - 79V_{dc}$

แรงดันไฟฟ้า (V_{dc})	กระแสไฟฟ้า (A)	น้ำหนักแผ่น เหล็ก (kg)	กำลังไฟฟ้า (W)	กำลังไฟฟ้า/ กิโลกรัม (W)/(kg)
13	0.1	0	1.3	0.043
29	0.29	0	8.41	0.14
32	0.33	0	10.56	0.1056
47	0.57	0	26.79	0.223
48	0.58	0	27.84	0.198
51	0.62	0	31.62	0.197
60	0.75	0	45	0.25
63	0.81	0	51.03	0.255
75	1.09	0	81.75	0.37
79	1.12	0	88.48	0.353

ตารางที่ ๓.4 การทดสอบเปรียบเทียบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการยกแผ่นเหล็ก 30-250 kg กับสถานะไม่มีโหลด

แรงดันไฟฟ้า (V_{dc})		กระแสไฟฟ้า (A)		น้ำหนัก (kg)		กำลังไฟฟ้า (W)		การใช้ กำลังไฟฟ้า ในการยก แผ่นเหล็ก/ สถานะไม่ มีโหลด (%)
ยกแผ่น เหล็ก	ไม่มี โหลด	ยกแผ่น เหล็ก	ไม่มี โหลด	แผ่น เหล็ก	ไม่มี โหลด	ยกแผ่น เหล็ก	ไม่มี โหลด	
13	13	0.21	0.1	30	0	2.73	1.3	110
29	29	0.49	0.29	60	0	14.21	8.41	68.96
32	32	0.54	0.33	100	0	17.28	10.56	63.63
47	47	0.85	0.57	120	0	39.95	26.79	49.12
48	48	0.9	0.58	140	0	43.2	27.84	55.17
51	51	0.94	0.62	160	0	47.94	31.62	51.61
60	60	1.15	0.75	180	0	69	45	53.33
63	63	1.2	0.81	200	0	75.6	51.03	48.148
75	75	1.52	1.09	220	0	114	81.75	39.44
79	79	1.62	1.12	250	0	127.98	88.48	44.64

ตารางที่ ๓.5 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
ในการยกเศษเหล็กน้ำหนัก 1-9 kg

แรงดันไฟฟ้า (V_{dc})	กระแสไฟฟ้า (A)	น้ำหนักเศษเหล็ก (kg)	กำลังไฟฟ้า (W)	กำลังไฟฟ้า/ กิโลกรัม(W)/(kg)
19	0.32	1	6.08	6.08
24	0.41	2	9.84	4.92
25	0.42	3	10.5	3.5
54	0.99	4	53.46	13.36
56	1.03	5	57.68	11.536
74	1.43	6	105.82	17.63
88	1.79	7	157.52	22.50
90	1.84	8	165.6	20.7
92	1.86	9	171.12	19.01

ตารางที่ ๓.6 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
ในกรณีกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ $45V_{dc}$

แรงดันไฟฟ้า (V_{dc})	กระแสไฟฟ้า (A)	น้ำหนักเศษเหล็ก (kg)	กำลังไฟฟ้า (W)	กำลังไฟฟ้า/ กิโลกรัม(W)/(kg)
45	0.72	3	32.4	10.8
45	0.72	5	32.4	6.48
45	0.72	7	32.4	4.628
45	0.72	12	32.4	2.7
45	0.72	24	32.4	1.35
45	0.71	55	31.95	0.58
45	0.72	60	32.4	0.54
45	0.72	70	32.4	0.462
45	0.72	80	32.4	0.405
45	0.72	97	32.4	0.334
45	0.72	105	32.4	0.308

ตารางที่ ง.7 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
ในกรณีกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ $70V_{dc}$

แรงดันไฟฟ้า (V_{dc})	กระแสไฟฟ้า (A)	น้ำหนักเศษเหล็ก (kg)	กำลังไฟฟ้า (W)	กำลังไฟฟ้า/ กิโลกรัม(W)/(kg)
70	1.45	3	101.5	33.83
70	1.45	5	101.5	20.3
70	1.44	7	100.8	14.4
70	1.45	12	101.5	8.45
70	1.45	24	101.5	4.22
70	1.44	55	100.8	1.83
70	1.44	60	100.8	1.68
70	1.45	70	101.5	1.45
70	1.45	80	101.5	1.26
70	1.45	97	101.5	1.04
70	1.44	105	100.8	0.96

ตารางที่ ๓.8 การทดสอบขีดความสามารถของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
ในกรณีกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ $80V_{dc}$

แรงดันไฟฟ้า (V_{dc})	กระแสไฟฟ้า (A)	น้ำหนักเศษเหล็ก (kg)	กำลังไฟฟ้า (W)	กำลังไฟฟ้า/ กิโลกรัม(W)/(kg)
80	1.64	3	131.2	43.73
80	1.64	5	131.2	26.24
80	1.63	7	130.4	18.62
80	1.64	12	131.2	10.93
80	1.63	24	130.4	5.43
80	1.63	55	130.4	2.37
80	1.64	60	131.2	2.18
80	1.64	70	131.2	1.87
80	1.63	80	130.4	1.63
80	1.64	97	131.2	1.35
80	1.64	105	131.2	1.249

ตารางที่ 9.9 การทดสอบวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของเครื่องยกของหนักด้วย
สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $10V_{dc}$

แรงดันไฟฟ้า (V_{dc})	กระแสไฟฟ้า (A)	ระยะห่างที่เส้น ผ่านศูนย์กลาง พื้นที่ผิวสัมผัส โหลด (cm)	ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (T)	
			แกน (X)	แกน (Y)
10	0.13	0	0.00173	0.00236
		5	0.0021	0.00208
		10	0.00233	0.00183
		15	0.00745	0.00683
		20	0.00285	0.00296
		25	0.00253	0.0027
		30	0.00273	0.0029
		35	0.00735	0.0067
		40	0.00228	0.00179
		45	0.002	0.00213
		50	0.00158	0.00187

ตารางที่ ง.10 การทดสอบวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของเครื่องยกของหนักด้วย
สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $40V_{dc}$

แรงดันไฟฟ้า (V_{dc})	กระแสไฟฟ้า (A)	ระยะห่างที่เส้น ผ่านศูนย์กลาง พื้นที่ผิวสัมผัส โหลด (cm)	ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (T)	
			แกน (X)	แกน (Y)
40	0.68	0	0.00493	0.00593
		5	0.0078	0.00815
		10	0.01098	0.00853
		15	0.0272	0.0251
		20	0.01006	0.01063
		25	0.00870	0.00943
		30	0.00978	0.01076
		35	0.0268	0.0249
		40	0.0109	0.011
		45	0.00783	0.00819
		50	0.00498	0.00477

ตารางที่ ง.11 การทดสอบวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของเครื่องยกของหนักด้วย
สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า $90V_{dc}$

แรงดันไฟฟ้า (V_{dc})	กระแสไฟฟ้า (A)	ระยะห่างที่เส้น ผ่านศูนย์กลาง พื้นที่ผิวสัมผัส โพลด (cm)	ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (T)	
			แกน (X)	แกน (Y)
90	1.39	0	0.01015	0.01029
		5	0.0175	0.0185
		10	0.0242	0.0202
		15	0.0586	0.0511
		20	0.0225	0.022
		25	0.01963	0.01976
		30	0.0218	0.0223
		35	0.0582	0.0508
		40	0.024	0.020
		45	0.0178	0.01853
		50	0.00853	0.00868

ตารางที่ ง.12 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกได้ระหว่างการทดสอบกับการคำนวณ

แรงดันไฟฟ้า (V_{dc})		กระแสไฟฟ้า (A)		น้ำหนัก แผ่น เหล็ก (kg)	กำลังไฟฟ้า (W)		กำลังไฟฟ้า/ กิโลกรัม(W)/(kg)	
ทดสอบ	คำนวณ	ทดสอบ	คำนวณ		ทดสอบ	คำนวณ	ทดสอบ	คำนวณ
13	20.796	0.21	0.519	30	2.73	10.81	0.091	0.36
29	29.4	0.49	0.735	60	14.21	21.60	0.236	0.36
32	37.96	0.54	0.949	100	17.28	36.02	0.1728	0.36
47	41.592	0.85	1.039	120	39.95	43.247	0.33	0.36
48	44.92	0.9	1.123	140	43.2	50.445	0.308	0.36
51	48	0.94	1.2	160	47.94	57.6	0.299	0.36
60	50.94	1.15	1.273	180	69	64.87	0.383	0.36
63	53.68	1.2	1.342	200	75.6	72.038	0.378	0.36
75	56	1.52	1.4	220	114	78.4	0.518	0.356
79	60	1.62	1.5	250	127.98	90	0.512	0.36

ตารางที่ ง.13 การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักของเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมต้นแบบ

น้ำหนัก (kg)	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้า (V_{dc})	กำลังไฟฟ้า (W)	กำลังไฟฟ้า/ กิโลกรัม(W)/(kg)
30	0.5199	20.796	10.81	0.36
60	0.735	29.4	21.60	0.36
100	0.949	37.96	36.02	0.36
120	1.0398	41.59	43.247	0.36
140	1.123	44.92	50.445	0.36
160	1.2	48	57.6	0.36
180	1.27	50.94	64.87	0.36
200	1.342	53.68	72.038	0.36
220	1.4	56	78.4	0.356
250	1.5	60	90	0.36

ภาคผนวก_จ

Source code

```
Private Sub Combo2_Click()  
If Combo2.Text = "A.W.G" Or Combo2.Text = "S.W.G" Then  
    Text2.Visible = True  
    Text3.Visible = True  
    Label8.Visible = True  
    Label9.Visible = True  
    Label10.Visible = True  
    Label11.Visible = True  
End If  
End Sub
```

```
Private Sub Command1_Click()  
Dim I As Byte  
I = 0  
'Combo2.Enabled = True  
'Text2.Enabled = True  
'Text3.Enabled = True
```

```
LC = Val(Text1.Text)  
D1 = Sqr(LC)  
r1 = D1 / 2  
r2 = (r1 - 0.02)  
A5 = (r1 * r1) * 3.14  
A4 = (r2 * r2) * 3.14  
  
A2 = A5 - A4  
A1 = A2  
r3 = Sqr(A1 / 3.14)  
A3 = A4 - A1
```

$$A4 = (r1 * r1) * 3.14$$

$$A3 = (r2 * r2) * 3.14$$

$$A2 = A4 - A3$$

On Error GoTo CHECK

Select Case Combo1.Text

Case "0.5 mm."

$$X1 = 0.0005$$

Case "1.5 mm."

$$X1 = 0.0015$$

Case "2.0 mm."

$$X1 = 0.002$$

Case "3.0 mm."

$$X1 = 0.003$$

End Select

$$AIR1 = X1 / (0.000001256 * A1)$$

$$AIR2 = X1 / (0.000001256 * A2)$$

$$SAIR1 = AIR1 + AIR2$$

$$SSAIR1 = SAIR1 * SAIR1$$

$$SUM1 = 1 / SSAIR1$$

$$SUM2 = 1 / SSAIR1$$

$$SSUM1 = SUM1 / (0.000002512 * A1)$$

$$SSUM2 = SUM2 / (0.000002512 * A2)$$

```
total = SSUM1 + SSUM2
```

```
NI = (LC * 1000 * 9.8) / total
```

```
NII = Sqr(NI)
```

```
NIII = NII * 1.35
```

```
'Power = (D1 * D1) * 4
```

```
'II = (Power * 1000) / 220
```

```
II = Val(Text4.Text)
```

```
AA = (II / 2) / 2
```

```
N = NIII / (II / 2)
```

```
RR = (((r2 - r3) / 2) + r3) * 6.28 * NIII
```

```
RRR = (RR * 0.0000000172) / (AA * 0.000001)
```

```
Label12.Caption = Left(Str(AA), 7)
```

```
V = II * RRR
```

```
P = II * V
```

```
If I = 0 Then
```

```
Label5.Visible = True
```

```
Label6.Visible = True
```

```
Label7.Visible = True
```

```
'Label8.Visible = True
```

```
'Label9.Visible = True
```

```
'Label10.Visible = True
```

```
'Label11.Visible = True
```

```
Label12.Visible = True
```

```
    Combo2.Visible = True
    'Text2.Visible = True
    'Text3.Visible = True
End If

Text2.Text = ""
Text3.Text = ""

CHECK:
    If Text1.Text = "" Then
        MsgBox "make sure your information", vbExclamation + vbOKOnly, "Error"
        On Error Resume Next
        I = 1
    End If
End Sub

Private Sub Command2_Click()
    Dim r As String
    Dim s As String

    Form1.Hide
    Form2.Show
    Form2.Label2.Caption = Text1.Text
    Form2.Label5.Caption = Left(Str(D1), 7)
    Form2.Label8.Caption = Format(A1, "#####")
    Form2.Label11.Caption = Format(A2, "#####")
    Form2.Label14.Caption = Str(X1)
    Form2.Label32.Caption = Combo2.Text
    Form2.Label37.Caption = Text2.Text
    Form2.Label20.Caption = Left(Str(V), 5)
    Form2.Label23.Caption = Format(P, "####.##")
```

```
Form2.Label26.Caption = Left(Str(II), 5)
Form2.Label29.Caption = Format(N, "####.##")
Form2.Label34.Caption = Text3.Text
Form2.Label37.Caption = Text2.Text
Form2.Label17.Caption = Format(NIII, "#.#####")
    subH1 = (Val(Text3.Text) / 0.4) * N
    subH11 = r2 - r3
    H1 = (subH1 / subH11) / 1000000

Form2.Label40.Caption = Format(H1, "#.#####")
    subH2 = A1 / (6.28 * r2)
    H2 = subH2
    H3 = H1 + H2
Form2.Label46.Caption = Format(H2, "#.#####")

    'r = Left(Str(r2), 6)
    's = Left(Str(r3), 6)

    W1 = r2 - r3

Form2.Label43.Caption = Format(W1, "#.#####")
Form2.Label49.Caption = Format(H3, "#.#####")

End Sub
```

```
Private Sub Command3_Click()
```

```
Text5.Text = A2
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
```

```
With MSFlexGrid1
```

```
.TextMatrix(0, 0) = "A.W.G"
```

```
.TextMatrix(0, 1) = "S.W.G"
```

```
.ColWidth(2) = 1100
```

```
.ColWidth(3) = 1100
```

```
.ColWidth(4) = 1700
```

```
.ColWidth(5) = 1700
```

```
.ColWidth(6) = 1900
```

```
.ColWidth(7) = 1500
```

```
.ColWidth(8) = 1400
```

```
.RowHeight(0) = 400
```

```
.TextMatrix(0, 2) = "Diameter(Mil.)"
```

```
.TextMatrix(0, 3) = "Diameter(mm.)"
```

```
.TextMatrix(0, 4) = "Sectional area(Cir.Mil.)"
```

```
.TextMatrix(0, 5) = "Sectional area(sq.in.)"
```

```
.TextMatrix(0, 6) = "Sectional area(sq.mm.)"
```

```
.TextMatrix(0, 7) = "Weight(lb/1,000ft)"
```

```
.TextMatrix(0, 8) = "Weight(kg/km)"
```

```
.TextMatrix(1, 0) = "-"
```

```
.TextMatrix(1, 1) = "7/0"
```

```
.TextMatrix(1, 2) = "500"
```

```
.TextMatrix(1, 3) = "12.700"
```

```
.TextMatrix(1, 4) = "250,000"
```

```
.TextMatrix(1, 5) = "0.1964"
```

.TextMatrix(1, 6) = "126.7"

.TextMatrix(1, 7) = "756.9"

.TextMatrix(1, 8) = "1,126"

.TextMatrix(2, 0) = "-"

.TextMatrix(2, 1) = "6/0"

.TextMatrix(2, 2) = "464"

.TextMatrix(2, 3) = "11.786"

.TextMatrix(2, 4) = "215,296"

.TextMatrix(2, 5) = "0.1691"

.TextMatrix(2, 6) = "109.1"

.TextMatrix(2, 7) = "651.7"

.TextMatrix(2, 8) = "969.9"

.TextMatrix(3, 0) = "4/0"

.TextMatrix(3, 1) = "-"

.TextMatrix(3, 2) = "460"

.TextMatrix(3, 3) = "11.684"

.TextMatrix(3, 4) = "211,600"

.TextMatrix(3, 5) = "0.1662"

.TextMatrix(3, 6) = "107.2"

.TextMatrix(3, 7) = "640.5"

.TextMatrix(3, 8) = "953"

.TextMatrix(4, 0) = "-"

.TextMatrix(4, 1) = "5/0"

.TextMatrix(4, 2) = "432"

.TextMatrix(4, 3) = "10.973"

.TextMatrix(4, 4) = "186,624"

.TextMatrix(4, 5) = "0.1466"

.TextMatrix(4, 6) = "94.56"

.TextMatrix(4, 7) = "565"

.TextMatrix(4, 8) = "840.6"

.TextMatrix(5, 0) = "3/0"

.TextMatrix(5, 1) = "-"

.TextMatrix(5, 2) = "409.6"

.TextMatrix(5, 3) = "10.404"

.TextMatrix(5, 4) = "167,772"

.TextMatrix(5, 5) = "0.1318"

.TextMatrix(5, 6) = "85.03"

.TextMatrix(5, 7) = "508"

.TextMatrix(5, 8) = "755.9"

.TextMatrix(7, 0) = "-"

.TextMatrix(7, 1) = "4/0"

.TextMatrix(7, 2) = "400"

.TextMatrix(7, 3) = "10.160"

.TextMatrix(7, 4) = "160,000"

.TextMatrix(7, 5) = "0.1257"

.TextMatrix(7, 6) = "81.07"

.TextMatrix(7, 7) = "484.5"

.TextMatrix(7, 8) = "720.7"

.TextMatrix(8, 0) = "-"

.TextMatrix(8, 1) = "3/0"

.TextMatrix(8, 2) = "372"

.TextMatrix(8, 3) = "9.440"

.TextMatrix(8, 4) = "138,834"

.TextMatrix(8, 5) = "0.1087"

.TextMatrix(8, 6) = "70.12"

.TextMatrix(8, 7) = "418.9"

.TextMatrix(8, 8) = "623.4"

.TextMatrix(9, 0) = "2/0"
.TextMatrix(9, 1) = "-"
.TextMatrix(9, 2) = "364.8"
.TextMatrix(9, 3) = "9.266"
.TextMatrix(9, 4) = "133,079"
.TextMatrix(9, 5) = "0.1045"
.TextMatrix(9, 6) = "67.42"
.TextMatrix(9, 7) = "402.7"
.TextMatrix(9, 8) = "599.4"

.TextMatrix(10, 0) = "-"
.TextMatrix(10, 1) = "2/0"
.TextMatrix(10, 2) = "348"
.TextMatrix(10, 3) = "8.839"
.TextMatrix(10, 4) = "121,104"
.TextMatrix(10, 5) = "0.09512"
.TextMatrix(10, 6) = "61.36"
.TextMatrix(10, 7) = "366.6"
.TextMatrix(10, 8) = "545.5"

.TextMatrix(11, 0) = "0"
.TextMatrix(11, 1) = "-"
.TextMatrix(11, 2) = "324.9"
.TextMatrix(11, 3) = "8.250"
.TextMatrix(11, 4) = "105,560"
.TextMatrix(11, 5) = "0.08291"
.TextMatrix(11, 6) = "53.49"
.TextMatrix(11, 7) = "319.5"
.TextMatrix(11, 8) = "475.5"

.TextMatrix(13, 0) = "-"
.TextMatrix(13, 1) = "0"

.TextMatrix(13, 2) = "324"
.TextMatrix(13, 3) = "8.230"
.TextMatrix(13, 4) = "104,976"
.TextMatrix(13, 5) = "0.08245"
.TextMatrix(13, 6) = "53.19"
.TextMatrix(13, 7) = "317.8"
.TextMatrix(13, 8) = "472.8"

.TextMatrix(14, 0) = "-"
.TextMatrix(14, 1) = "1"
.TextMatrix(14, 2) = "300"
.TextMatrix(14, 3) = "7.629"
.TextMatrix(14, 4) = "90,000"
.TextMatrix(14, 5) = "0.07069"
.TextMatrix(14, 6) = "45.60"
.TextMatrix(14, 7) = "272.4"
.TextMatrix(14, 8) = "405.4"

.TextMatrix(15, 0) = "1"
.TextMatrix(15, 1) = "-"
.TextMatrix(15, 2) = "289.3"
.TextMatrix(15, 3) = "7.348"
.TextMatrix(15, 4) = "83,694"
.TextMatrix(15, 5) = "0.06573"
.TextMatrix(15, 6) = "42.41"
.TextMatrix(15, 7) = "253.3"
.TextMatrix(15, 8) = "377"

.TextMatrix(16, 0) = "-"
.TextMatrix(16, 1) = "2"
.TextMatrix(16, 2) = "276"
.TextMatrix(16, 3) = "7.010"

.TextMatrix(16, 4) = "76,176"
.TextMatrix(16, 5) = "0.05983"
.TextMatrix(16, 6) = "39.60"
.TextMatrix(16, 7) = "230.6"
.TextMatrix(16, 8) = "343.2"

.TextMatrix(17, 0) = "-"
.TextMatrix(17, 1) = "3"
.TextMatrix(17, 2) = "252"
.TextMatrix(17, 3) = "6.401"
.TextMatrix(17, 4) = "63,504"
.TextMatrix(17, 5) = "0.04988"
.TextMatrix(17, 6) = "32.18"
.TextMatrix(17, 7) = "192.2"
.TextMatrix(17, 8) = "286.1"

.TextMatrix(19, 0) = "-"
.TextMatrix(19, 1) = "4"
.TextMatrix(19, 2) = "232"
.TextMatrix(19, 3) = "5.893"
.TextMatrix(19, 4) = "53,824"
.TextMatrix(19, 5) = "0.04227"
.TextMatrix(19, 6) = "27.27"
.TextMatrix(19, 7) = "162.9"
.TextMatrix(19, 8) = "242.4"

.TextMatrix(20, 0) = "3"
.TextMatrix(20, 1) = "-"
.TextMatrix(20, 2) = "229.4"
.TextMatrix(20, 3) = "5.827"
.TextMatrix(20, 4) = "52,624"
.TextMatrix(20, 5) = "0.04133"

.TextMatrix(20, 6) = "26.66"

.TextMatrix(20, 7) = "159.3"

.TextMatrix(20, 8) = "237"

.TextMatrix(21, 0) = "-"

.TextMatrix(21, 1) = "5"

.TextMatrix(21, 2) = "212"

.TextMatrix(21, 3) = "5.385"

.TextMatrix(21, 4) = "44,944"

.TextMatrix(21, 5) = "0.3530"

.TextMatrix(21, 6) = "22.77"

.TextMatrix(21, 7) = "136"

.TextMatrix(21, 8) = "202.4"

.TextMatrix(22, 0) = "4"

.TextMatrix(22, 1) = "-"

.TextMatrix(22, 2) = "204.3"

.TextMatrix(22, 3) = "5.189"

.TextMatrix(22, 4) = "41,728"

.TextMatrix(22, 5) = "0.03278"

.TextMatrix(22, 6) = "21.15"

.TextMatrix(22, 7) = "126.3"

.TextMatrix(22, 8) = "188"

.TextMatrix(23, 0) = "-"

.TextMatrix(23, 1) = "6"

.TextMatrix(23, 2) = "192"

.TextMatrix(23, 3) = "4.877"

.TextMatrix(23, 4) = "36.861"

.TextMatrix(23, 5) = "0.02895"

.TextMatrix(23, 6) = "18.65"

.TextMatrix(23, 7) = "111.6"

.TextMatrix(23, 8) = "168.3"

.TextMatrix(25, 0) = "5"

.TextMatrix(25, 1) = "-"

.TextMatrix(25, 2) = "181.9"

.TextMatrix(25, 3) = "4.621"

.TextMatrix(25, 4) = "33,088"

.TextMatrix(25, 5) = "0.02599"

.TextMatrix(25, 6) = "16.77"

.TextMatrix(25, 7) = "100.2"

.TextMatrix(25, 8) = "149.1"

.TextMatrix(26, 0) = "-"

.TextMatrix(26, 1) = "7"

.TextMatrix(26, 2) = "176"

.TextMatrix(26, 3) = "4.470"

.TextMatrix(26, 4) = "30,976"

.TextMatrix(26, 5) = "0.02333"

.TextMatrix(26, 6) = "15.70"

.TextMatrix(26, 7) = "93.77"

.TextMatrix(26, 8) = "129.6"

.TextMatrix(27, 0) = "6"

.TextMatrix(27, 1) = "-"

.TextMatrix(27, 2) = "162"

.TextMatrix(27, 3) = "4.115"

.TextMatrix(27, 4) = "26,244"

.TextMatrix(27, 5) = "0.02061"

.TextMatrix(27, 6) = "13.40"

.TextMatrix(27, 7) = "79.43"

.TextMatrix(27, 8) = "118.2"

.TextMatrix(28, 0) = "-"
.TextMatrix(28, 1) = "8"
.TextMatrix(28, 2) = "160"
.TextMatrix(28, 3) = "4.064"
.TextMatrix(28, 4) = "25,600"
.TextMatrix(28, 5) = "0.02011"
.TextMatrix(28, 6) = "13.17"
.TextMatrix(28, 7) = "77.50"
.TextMatrix(28, 8) = "115.30"

.TextMatrix(29, 0) = "7"
.TextMatrix(29, 1) = "-"
.TextMatrix(29, 2) = "144.3"
.TextMatrix(29, 3) = "3.665"
.TextMatrix(29, 4) = "20,822"
.TextMatrix(29, 5) = "0.01635"
.TextMatrix(29, 6) = "10.55"
.TextMatrix(29, 7) = "63.01"
.TextMatrix(29, 8) = "93.79"

.TextMatrix(31, 0) = "-"
.TextMatrix(31, 1) = "9"
.TextMatrix(31, 2) = "144"
.TextMatrix(31, 3) = "3.658"
.TextMatrix(31, 4) = "20,736"
.TextMatrix(31, 5) = "0.01629"
.TextMatrix(31, 6) = "10.52"
.TextMatrix(31, 7) = "62.78"
.TextMatrix(31, 8) = "93.52"

.TextMatrix(32, 0) = "8"
.TextMatrix(32, 1) = "-"

.TextMatrix(32, 2) = "128.5"
.TextMatrix(32, 3) = "3.265"
.TextMatrix(32, 4) = "16,512"
.TextMatrix(32, 5) = "0.01297"
.TextMatrix(32, 6) = "8.368"
.TextMatrix(32, 7) = "49.99"
.TextMatrix(32, 8) = "74.39"

.TextMatrix(33, 0) = "-"
.TextMatrix(33, 1) = "10"
.TextMatrix(33, 2) = "128"
.TextMatrix(33, 3) = "3.251"
.TextMatrix(33, 4) = "16,384"
.TextMatrix(33, 5) = "0.01287"
.TextMatrix(33, 6) = "8.302"
.TextMatrix(33, 7) = "49.60"
.TextMatrix(33, 8) = "73.81"

.TextMatrix(34, 0) = "-"
.TextMatrix(34, 1) = "11"
.TextMatrix(34, 2) = "116"
.TextMatrix(34, 3) = "2.946"
.TextMatrix(34, 4) = "13,456"
.TextMatrix(34, 5) = "0.01057"
.TextMatrix(34, 6) = "6.818"
.TextMatrix(34, 7) = "40.74"
.TextMatrix(34, 8) = "60.61"

.TextMatrix(35, 0) = "9"
.TextMatrix(35, 1) = "-"
.TextMatrix(35, 2) = "114.4"
.TextMatrix(35, 3) = "2.906"

.TextMatrix(35, 4) = "13,087"

.TextMatrix(35, 5) = "0.01028"

.TextMatrix(35, 6) = "6.632"

.TextMatrix(35, 7) = "39.62"

.TextMatrix(35, 8) = "58.96"

.TextMatrix(37, 0) = "-"

.TextMatrix(37, 1) = "12"

.TextMatrix(37, 2) = "104"

.TextMatrix(37, 3) = "2.642"

.TextMatrix(37, 4) = "10,816"

.TextMatrix(37, 5) = "0.008495"

.TextMatrix(37, 6) = "5.481"

.TextMatrix(37, 7) = "32.74"

.TextMatrix(37, 8) = "48.73"

.TextMatrix(38, 0) = "10"

.TextMatrix(38, 1) = "-"

.TextMatrix(38, 2) = "101.9"

.TextMatrix(38, 3) = "2.588"

.TextMatrix(38, 4) = "10,384"

.TextMatrix(38, 5) = "0.008156"

.TextMatrix(38, 6) = "5.262"

.TextMatrix(38, 7) = "31.43"

.TextMatrix(38, 8) = "46.78"

.TextMatrix(39, 0) = "-"

.TextMatrix(39, 1) = "13"

.TextMatrix(39, 2) = "92"

.TextMatrix(39, 3) = "2.337"

.TextMatrix(39, 4) = "8,464"

.TextMatrix(39, 5) = "0.006648"

.TextMatrix(39, 6) = "4.289"

.TextMatrix(39, 7) = "25.62"

.TextMatrix(29, 8) = "38.13"

.TextMatrix(40, 0) = "11"

.TextMatrix(40, 1) = "-"

.TextMatrix(40, 2) = "90.74"

.TextMatrix(40, 3) = "2.305"

.TextMatrix(40, 4) = "8,234"

.TextMatrix(40, 5) = "0.006467"

.TextMatrix(40, 6) = "4.172"

.TextMatrix(40, 7) = "24.92"

.TextMatrix(40, 8) = "37.09"

.TextMatrix(41, 0) = "12"

.TextMatrix(41, 1) = "-"

.TextMatrix(41, 2) = "80.81"

.TextMatrix(41, 3) = "2.053"

.TextMatrix(41, 4) = "6.530"

.TextMatrix(41, 5) = "0.005129"

.TextMatrix(41, 6) = "3.309"

.TextMatrix(41, 7) = "19.77"

.TextMatrix(41, 8) = "29.42"

.TextMatrix(43, 0) = "-"

.TextMatrix(43, 1) = "14"

.TextMatrix(43, 2) = "80"

.TextMatrix(43, 3) = "2.032"

.TextMatrix(43, 4) = "6,400"

.TextMatrix(43, 5) = "0.005027"

.TextMatrix(43, 6) = "3.243"

.TextMatrix(43, 7) = "19.37"

.TextMatrix(43, 8) = "28.83"

.TextMatrix(44, 0) = "-"

.TextMatrix(44, 1) = "15"

.TextMatrix(44, 2) = "72"

.TextMatrix(44, 3) = "1.329"

.TextMatrix(44, 4) = "5,184"

.TextMatrix(44, 5) = "0.004072"

.TextMatrix(44, 6) = "2.627"

.TextMatrix(44, 7) = "18.46"

.TextMatrix(44, 8) = "27.36"

.TextMatrix(45, 0) = "13"

.TextMatrix(45, 1) = "-"

.TextMatrix(45, 2) = "71.96"

.TextMatrix(45, 3) = "1.828"

.TextMatrix(45, 4) = "5,178"

.TextMatrix(45, 5) = "0.004067"

.TextMatrix(45, 6) = "2.624"

.TextMatrix(45, 7) = "15.67"

.TextMatrix(45, 8) = "23.33"

.TextMatrix(46, 0) = "14"

.TextMatrix(46, 1) = "-"

.TextMatrix(46, 2) = "64.08"

.TextMatrix(46, 3) = "1.628"

.TextMatrix(46, 4) = "4,106"

.TextMatrix(46, 5) = "0.003225"

.TextMatrix(46, 6) = "2.081"

.TextMatrix(46, 7) = "12.43"

.TextMatrix(46, 8) = "18.50"

.TextMatrix(47, 0) = "-"
.TextMatrix(47, 1) = "16"
.TextMatrix(47, 2) = "64"
.TextMatrix(47, 3) = "1.626"
.TextMatrix(47, 4) = "4,096"
.TextMatrix(47, 5) = "0.003217"
.TextMatrix(47, 6) = "2.075"
.TextMatrix(47, 7) = "12.40"
.TextMatrix(47, 8) = "18.45"

.TextMatrix(49, 0) = "15"
.TextMatrix(49, 1) = "-"
.TextMatrix(49, 2) = "57.07"
.TextMatrix(49, 3) = "1.450"
.TextMatrix(49, 4) = "3,257"
.TextMatrix(49, 5) = "0.002558"
.TextMatrix(49, 6) = "1.650"
.TextMatrix(49, 7) = "9.859"
.TextMatrix(49, 8) = "14.67"

.TextMatrix(50, 0) = "-"
.TextMatrix(50, 1) = "17"
.TextMatrix(50, 2) = "56"
.TextMatrix(50, 3) = "1.422"
.TextMatrix(50, 4) = "3,136"
.TextMatrix(50, 5) = "0.002463"
.TextMatrix(50, 6) = "1.589"
.TextMatrix(50, 7) = "9.493"
.TextMatrix(50, 8) = "14.13"

.TextMatrix(51, 0) = "16"
.TextMatrix(51, 1) = "-"

.TextMatrix(51, 2) = "50.32"
.TextMatrix(51, 3) = "1.291"
.TextMatrix(51, 4) = "2,583"
.TextMatrix(51, 5) = "0.002029"
.TextMatrix(51, 6) = "1.309"
.TextMatrix(51, 7) = "7.320"
.TextMatrix(51, 8) = "11.64"

.TextMatrix(52, 0) = "-"
.TextMatrix(52, 1) = "18"
.TextMatrix(52, 2) = "48"
.TextMatrix(52, 3) = "1.219"
.TextMatrix(52, 4) = "2,304"
.TextMatrix(52, 5) = "0.001810"
.TextMatrix(52, 6) = "1.167"
.TextMatrix(52, 7) = "6.976"
.TextMatrix(52, 8) = "10.38"

.TextMatrix(53, 0) = "17"
.TextMatrix(53, 1) = "-"
.TextMatrix(53, 2) = "45.26"
.TextMatrix(53, 3) = "1.150"
.TextMatrix(53, 4) = "2,048"
.TextMatrix(53, 5) = "0.001608"
.TextMatrix(53, 6) = "1.037"
.TextMatrix(53, 7) = "6.197"
.TextMatrix(53, 8) = "9.219"

.TextMatrix(55, 0) = "18"
.TextMatrix(55, 1) = "-"
.TextMatrix(55, 2) = "40.20"
.TextMatrix(55, 3) = "1.024"

.TextMatrix(55, 4) = "1,624"

.TextMatrix(55, 5) = "0.001275"

.TextMatrix(55, 6) = "0.8226"

.TextMatrix(55, 7) = "4.914"

.TextMatrix(55, 8) = "7.313"

.TextMatrix(56, 0) = "-"

.TextMatrix(56, 1) = "19"

.TextMatrix(56, 2) = "40"

.TextMatrix(56, 3) = "1.016"

.TextMatrix(56, 4) = "1,600"

.TextMatrix(56, 5) = "0.001257"

.TextMatrix(56, 6) = "0.8107"

.TextMatrix(56, 7) = "4.845"

.TextMatrix(56, 8) = "7.207"

.TextMatrix(57, 0) = "-"

.TextMatrix(57, 1) = "20"

.TextMatrix(57, 2) = "36"

.TextMatrix(57, 3) = "0.9144"

.TextMatrix(57, 4) = "1,296"

.TextMatrix(57, 5) = "0.001018"

.TextMatrix(57, 6) = "0.6576"

.TextMatrix(57, 7) = "3.923"

.TextMatrix(57, 8) = "5.838"

.TextMatrix(58, 0) = "19"

.TextMatrix(58, 1) = "-"

.TextMatrix(58, 2) = "35.89"

.TextMatrix(58, 3) = "0.9116"

.TextMatrix(58, 4) = "1,288"

.TextMatrix(58, 5) = "0.001012"

.TextMatrix(58, 6) = "0.6529"

.TextMatrix(58, 7) = "3.900"

.TextMatrix(58, 8) = "5.304"

.TextMatrix(59, 0) = "-"

.TextMatrix(59, 1) = "21"

.TextMatrix(59, 2) = "32"

.TextMatrix(59, 3) = "0.8128"

.TextMatrix(59, 4) = "1,024"

.TextMatrix(59, 5) = "0.0008042"

.TextMatrix(59, 6) = "0.5189"

.TextMatrix(59, 7) = "3.099"

.TextMatrix(59, 8) = "4.613"

.TextMatrix(61, 0) = "20"

.TextMatrix(61, 1) = "-"

.TextMatrix(61, 2) = "31.96"

.TextMatrix(61, 3) = "0.8118"

.TextMatrix(61, 4) = "1,021"

.TextMatrix(61, 5) = "0.0008019"

.TextMatrix(61, 6) = "0.5174"

.TextMatrix(61, 7) = "3.091"

.TextMatrix(61, 8) = "4.600"

.TextMatrix(62, 0) = "21"

.TextMatrix(62, 1) = "-"

.TextMatrix(62, 2) = "28.46"

.TextMatrix(62, 3) = "0.7229"

.TextMatrix(62, 4) = "810"

.TextMatrix(62, 5) = "0.0006362"

.TextMatrix(62, 6) = "0.4105"

.TextMatrix(62, 7) = "2.452"

.TextMatrix(62, 8) = "3.649"

.TextMatrix(63, 0) = "-"

.TextMatrix(63, 1) = "22"

.TextMatrix(63, 2) = "28"

.TextMatrix(63, 3) = "0.7112"

.TextMatrix(63, 4) = "784"

.TextMatrix(63, 5) = "0.0006158"

.TextMatrix(63, 6) = "0.3973"

.TextMatrix(63, 7) = "2.373"

.TextMatrix(63, 8) = "3.532"

.TextMatrix(64, 0) = "22"

.TextMatrix(64, 1) = "-"

.TextMatrix(64, 2) = "25.35"

.TextMatrix(64, 3) = "0.6438"

.TextMatrix(64, 4) = "642.6"

.TextMatrix(64, 5) = "0.0005047"

.TextMatrix(64, 6) = "0.3256"

.TextMatrix(64, 7) = "1.945"

.TextMatrix(64, 8) = "2.895"

.TextMatrix(65, 0) = "-"

.TextMatrix(65, 1) = "23"

.TextMatrix(65, 2) = "24"

.TextMatrix(65, 3) = "0.6096"

.TextMatrix(65, 4) = "576"

.TextMatrix(65, 5) = "0.0004524"

.TextMatrix(65, 6) = "0.2919"

.TextMatrix(65, 7) = "1.744"

.TextMatrix(65, 8) = "2.595"

.TextMatrix(67, 0) = "23"
.TextMatrix(67, 1) = "-"
.TextMatrix(67, 2) = "22.57"
.TextMatrix(67, 3) = "0.5723"
.TextMatrix(67, 4) = "509.4"
.TextMatrix(67, 5) = "0.0004001"
.TextMatrix(67, 6) = "0.2581"
.TextMatrix(67, 7) = "1.542"
.TextMatrix(67, 8) = "2.295"

.TextMatrix(68, 0) = "-"
.TextMatrix(68, 1) = "24"
.TextMatrix(68, 2) = "22"
.TextMatrix(68, 3) = "0.5583"
.TextMatrix(68, 4) = "484"
.TextMatrix(68, 5) = "0.0003801"
.TextMatrix(68, 6) = "0.2452"
.TextMatrix(68, 7) = "1.465"
.TextMatrix(68, 8) = "2.180"

.TextMatrix(69, 0) = "24"
.TextMatrix(69, 1) = "-"
.TextMatrix(69, 2) = "20.10"
.TextMatrix(69, 3) = "0.5106"
.TextMatrix(69, 4) = "404"
.TextMatrix(69, 5) = "0.0003173"
.TextMatrix(69, 6) = "0.2047"
.TextMatrix(69, 7) = "1.223"
.TextMatrix(69, 8) = "1.820"

.TextMatrix(70, 0) = "-"
.TextMatrix(70, 1) = "25"

.TextMatrix(70, 2) = "20"
.TextMatrix(70, 3) = "0.5080"
.TextMatrix(70, 4) = "400"
.TextMatrix(70, 5) = "0.0003142"
.TextMatrix(70, 6) = "0.2027"
.TextMatrix(70, 7) = "1.211"
.TextMatrix(70, 8) = "1.802"

.TextMatrix(71, 0) = "-"
.TextMatrix(71, 1) = "26"
.TextMatrix(71, 2) = "18"
.TextMatrix(71, 3) = "0.4572"
.TextMatrix(71, 4) = "324"
.TextMatrix(71, 5) = "0.0002545"
.TextMatrix(71, 6) = "0.1642"
.TextMatrix(71, 7) = "0.9809"
.TextMatrix(71, 8) = "1.460"

.TextMatrix(73, 0) = "25"
.TextMatrix(73, 1) = "-"
.TextMatrix(73, 2) = "17.90"
.TextMatrix(73, 3) = "0.4547"
.TextMatrix(73, 4) = "320.4"
.TextMatrix(73, 5) = "0.0002516"
.TextMatrix(73, 6) = "0.1623"
.TextMatrix(73, 7) = "0.9697"
.TextMatrix(73, 8) = "1.443"

.TextMatrix(74, 0) = "-"
.TextMatrix(74, 1) = "27"
.TextMatrix(74, 2) = "16.4"
.TextMatrix(74, 3) = "0.4166"

.TextMatrix(74, 4) = "269"
.TextMatrix(74, 5) = "0.0002113"
.TextMatrix(74, 6) = "0.1363"
.TextMatrix(74, 7) = "0.1844"
.TextMatrix(74, 8) = "1.212"

.TextMatrix(75, 0) = "26"
.TextMatrix(75, 1) = "-"
.TextMatrix(75, 2) = "15.94"
.TextMatrix(75, 3) = "0.4049"
.TextMatrix(75, 4) = "254.1"
.TextMatrix(75, 5) = "0.0001996"
.TextMatrix(75, 6) = "0.1288"
.TextMatrix(75, 7) = "0.7693"
.TextMatrix(75, 8) = "1.145"

.TextMatrix(76, 0) = "-"
.TextMatrix(76, 1) = "28"
.TextMatrix(76, 2) = "14.8"
.TextMatrix(76, 3) = "0.3759"
.TextMatrix(76, 4) = "219"
.TextMatrix(76, 5) = "0.0001720"
.TextMatrix(76, 6) = "0.1110"
.TextMatrix(76, 7) = "0.6629"
.TextMatrix(76, 8) = "0.9868"

.TextMatrix(77, 0) = "27"
.TextMatrix(77, 1) = "-"
.TextMatrix(77, 2) = "14.20"
.TextMatrix(77, 3) = "0.3606"
.TextMatrix(77, 4) = "201.6"
.TextMatrix(77, 5) = "0.0001583"

.TextMatrix(77, 6) = "0.1021"

.TextMatrix(77, 7) = "0.6101"

.TextMatrix(77, 8) = "0.9077"

.TextMatrix(79, 0) = "-"

.TextMatrix(79, 1) = "29"

.TextMatrix(79, 2) = "13.6"

.TextMatrix(79, 3) = "0.3454"

.TextMatrix(79, 4) = "185"

.TextMatrix(79, 5) = "0.0001453"

.TextMatrix(79, 6) = "0.09372"

.TextMatrix(79, 7) = "0.5600"

.TextMatrix(79, 8) = "0.8332"

.TextMatrix(80, 0) = "28"

.TextMatrix(80, 1) = "-"

.TextMatrix(80, 2) = "12.64"

.TextMatrix(80, 3) = "0.3211"

.TextMatrix(80, 4) = "159.8"

.TextMatrix(80, 5) = "0.0001253"

.TextMatrix(80, 6) = "0.08097"

.TextMatrix(80, 7) = "0.4837"

.TextMatrix(80, 8) = "0.7198"

.TextMatrix(81, 0) = "-"

.TextMatrix(81, 1) = "30"

.TextMatrix(81, 2) = "12.4"

.TextMatrix(81, 3) = "0.3150"

.TextMatrix(81, 4) = "153.8"

.TextMatrix(81, 5) = "0.0001208"

.TextMatrix(81, 6) = "0.07791"

.TextMatrix(81, 7) = "0.4656"

.TextMatrix(81, 8) = "0.6926"

.TextMatrix(82, 0) = "32"

.TextMatrix(82, 1) = "-"

.TextMatrix(82, 2) = "7.950"

.TextMatrix(82, 3) = "0.2019"

.TextMatrix(82, 4) = "63.20"

.TextMatrix(82, 5) = "0.00004964"

.TextMatrix(82, 6) = "0.03203"

.TextMatrix(82, 7) = "0.1913"

.TextMatrix(82, 8) = "0.2847"

.TextMatrix(83, 0) = "-"

.TextMatrix(83, 1) = "36"

.TextMatrix(83, 2) = "7.6"

.TextMatrix(83, 3) = "0.1930"

.TextMatrix(83, 4) = "57.76"

.TextMatrix(83, 5) = "0.00004536"

.TextMatrix(83, 6) = "0.02927"

.TextMatrix(83, 7) = "0.1748"

.TextMatrix(83, 8) = "0.2602"

.TextMatrix(85, 0) = "33"

.TextMatrix(85, 1) = "-"

.TextMatrix(85, 2) = "7.080"

.TextMatrix(85, 3) = "0.1798"

.TextMatrix(85, 4) = "50.13"

.TextMatrix(85, 5) = "0.00003937"

.TextMatrix(85, 6) = "0.02540"

.TextMatrix(85, 7) = "0.1517"

.TextMatrix(85, 8) = "0.2258"

.TextMatrix(86, 0) = "-"
.TextMatrix(86, 1) = "37"
.TextMatrix(86, 2) = "6.8"
.TextMatrix(86, 3) = "0.1727"
.TextMatrix(86, 4) = "46.24"
.TextMatrix(86, 5) = "0.00003632"
.TextMatrix(86, 6) = "0.02343"
.TextMatrix(86, 7) = "0.1400"
.TextMatrix(86, 8) = "0.2083"

.TextMatrix(87, 0) = "34"
.TextMatrix(87, 1) = "-"
.TextMatrix(87, 2) = "6.305"
.TextMatrix(87, 3) = "0.1601"
.TextMatrix(87, 4) = "39.75"
.TextMatrix(87, 5) = "0.00003122"
.TextMatrix(87, 6) = "0.02014"
.TextMatrix(87, 7) = "0.1203"
.TextMatrix(87, 8) = "0.1790"

.TextMatrix(88, 0) = "-"
.TextMatrix(88, 1) = "38"
.TextMatrix(88, 2) = "6"
.TextMatrix(88, 3) = "0.1524"
.TextMatrix(88, 4) = "36"
.TextMatrix(88, 5) = "0.00002827"
.TextMatrix(88, 6) = "0.01824"
.TextMatrix(88, 7) = "0.1090"
.TextMatrix(88, 8) = "0.1622"

.TextMatrix(89, 0) = "35"
.TextMatrix(89, 1) = "-"

.TextMatrix(89, 2) = "5.615"
.TextMatrix(89, 3) = "0.1426"
.TextMatrix(89, 4) = "31.53"
.TextMatrix(89, 5) = "0.00002476"
.TextMatrix(89, 6) = "0.01597"
.TextMatrix(89, 7) = "0.09543"
.TextMatrix(89, 8) = "0.1420"

.TextMatrix(91, 0) = "-"
.TextMatrix(91, 1) = "39"
.TextMatrix(91, 2) = "5.2"
.TextMatrix(91, 3) = "0.1321"
.TextMatrix(91, 4) = "27.04"
.TextMatrix(91, 5) = "0.00002124"
.TextMatrix(91, 6) = "0.01370"
.TextMatrix(91, 7) = "0.08186"
.TextMatrix(91, 8) = "0.1218"

.TextMatrix(92, 0) = "36"
.TextMatrix(92, 1) = "-"
.TextMatrix(92, 2) = "5.000"
.TextMatrix(92, 3) = "0.1270"
.TextMatrix(92, 4) = "25"
.TextMatrix(92, 5) = "0.00001963"
.TextMatrix(92, 6) = "0.01267"
.TextMatrix(92, 7) = "0.07565"
.TextMatrix(92, 8) = "0.1126"

.TextMatrix(93, 0) = "-"
.TextMatrix(93, 1) = "40"
.TextMatrix(93, 2) = "4.8"
.TextMatrix(93, 3) = "0.1219"

.TextMatrix(93, 4) = "23.04"

.TextMatrix(93, 5) = "0.00001810"

.TextMatrix(93, 6) = "0.01167"

.TextMatrix(93, 7) = "0.06976"

.TextMatrix(93, 8) = "0.1037"

.TextMatrix(94, 0) = "37"

.TextMatrix(94, 1) = "-"

.TextMatrix(94, 2) = "4.453"

.TextMatrix(94, 3) = "0.1131"

.TextMatrix(94, 4) = "19.83"

.TextMatrix(94, 5) = "0.00001557"

.TextMatrix(94, 6) = "0.01005"

.TextMatrix(94, 7) = "0.06001"

.TextMatrix(94, 8) = "0.08934"

.TextMatrix(95, 0) = "-"

.TextMatrix(95, 1) = "41"

.TextMatrix(95, 2) = "4.4"

.TextMatrix(95, 3) = "0.1118"

.TextMatrix(95, 4) = "19.36"

.TextMatrix(95, 5) = "0.00001521"

.TextMatrix(95, 6) = "0.009810"

.TextMatrix(95, 7) = "0.05812"

.TextMatrix(95, 8) = "0.08721"

.TextMatrix(97, 0) = "-"

.TextMatrix(97, 1) = "42"

.TextMatrix(97, 2) = "4"

.TextMatrix(97, 3) = "0.1016"

.TextMatrix(97, 4) = "16.00"

.TextMatrix(97, 5) = "0.00001257"

.TextMatrix(97, 6) = "0.008107"

.TextMatrix(97, 7) = "0.04845"

.TextMatrix(97, 8) = "0.07207"

.TextMatrix(98, 0) = "38"

.TextMatrix(98, 1) = "-"

.TextMatrix(98, 2) = "3.965"

.TextMatrix(98, 3) = "0.1007"

.TextMatrix(98, 4) = "15.72"

.TextMatrix(98, 5) = "0.00001235"

.TextMatrix(98, 6) = "0.007968"

.TextMatrix(98, 7) = "0.04760"

.TextMatrix(98, 8) = "0.07084"

.TextMatrix(99, 0) = "-"

.TextMatrix(99, 1) = "43"

.TextMatrix(99, 2) = "3.6"

.TextMatrix(99, 3) = "0.09114"

.TextMatrix(99, 4) = "12.96"

.TextMatrix(99, 5) = "0.00001018"

.TextMatrix(99, 6) = "0.006567"

.TextMatrix(99, 7) = "0.03923"

.TextMatrix(99, 8) = "0.05838"

.TextMatrix(100, 0) = "39"

.TextMatrix(100, 1) = "-"

.TextMatrix(100, 2) = "3.531"

.TextMatrix(100, 3) = "0.08969"

.TextMatrix(100, 4) = "12.47"

.TextMatrix(100, 5) = "0.00000009794"

.TextMatrix(100, 6) = "0.006319"

.TextMatrix(100, 7) = "0.03775"

.TextMatrix(100, 8) = "0.05615"

.TextMatrix(102, 0) = "-"

.TextMatrix(102, 1) = "44"

.TextMatrix(102, 2) = "3.2"

.TextMatrix(102, 3) = "0.08138"

.TextMatrix(102, 4) = "10.24"

.TextMatrix(102, 5) = "0.000008042"

.TextMatrix(102, 6) = "0.005819"

.TextMatrix(102, 7) = "0.03099"

.TextMatrix(102, 8) = "0.04613"

.TextMatrix(103, 0) = "40"

.TextMatrix(103, 1) = "-"

.TextMatrix(103, 2) = "3.145"

.TextMatrix(103, 3) = "0.07987"

.TextMatrix(103, 4) = "9.891"

.TextMatrix(103, 5) = "0.000007768"

.TextMatrix(103, 6) = "0.005012"

.TextMatrix(103, 7) = "0.02994"

.TextMatrix(103, 8) = "0.04456"

.TextMatrix(104, 0) = "41"

.TextMatrix(104, 1) = "45"

.TextMatrix(104, 2) = "3.800"

.TextMatrix(104, 3) = "0.07113"

.TextMatrix(104, 4) = "7.842"

.TextMatrix(104, 5) = "0.000006159"

.TextMatrix(104, 6) = "0.003973"

.TextMatrix(104, 7) = "0.02374"

.TextMatrix(104, 8) = "0.03532"

.TextMatrix(105, 0) = "42"
.TextMatrix(105, 1) = "-"
.TextMatrix(105, 2) = "2.494"
.TextMatrix(105, 3) = "0.06334"
.TextMatrix(105, 4) = "6.219"
.TextMatrix(105, 5) = "0.000004884"
.TextMatrix(105, 6) = "0.003151"
.TextMatrix(105, 7) = "0.01882"
.TextMatrix(105, 8) = "0.02801"

.TextMatrix(106, 0) = "-"
.TextMatrix(106, 1) = "46"
.TextMatrix(106, 2) = "2.4"
.TextMatrix(106, 3) = "0.06092"
.TextMatrix(106, 4) = "5.760"
.TextMatrix(106, 5) = "0.000004528"
.TextMatrix(106, 6) = "0.002929"
.TextMatrix(106, 7) = "0.01744"
.TextMatrix(106, 8) = "0.02595"

.TextMatrix(108, 0) = "43"
.TextMatrix(108, 1) = "-"
.TextMatrix(108, 2) = "2.221"
.TextMatrix(108, 3) = "0.05641"
.TextMatrix(108, 4) = "4.932"
.TextMatrix(108, 5) = "0.000003873"
.TextMatrix(108, 6) = "0.002495"
.TextMatrix(108, 7) = "0.01498"
.TextMatrix(108, 8) = "0.02222"

.TextMatrix(109, 0) = "-"
.TextMatrix(109, 1) = "47"

.TextMatrix(109, 2) = "2"
.TextMatrix(109, 3) = "0.05080"
.TextMatrix(109, 4) = "4.000"
.TextMatrix(109, 5) = "0.000003142"
.TextMatrix(109, 6) = "0.002027"
.TextMatrix(109, 7) = "0.01211"
.TextMatrix(109, 8) = "0.01802"

.TextMatrix(110, 0) = "44"
.TextMatrix(110, 1) = "-"
.TextMatrix(110, 2) = "1.987"
.TextMatrix(110, 3) = "0.05023"
.TextMatrix(110, 4) = "3.911"
.TextMatrix(110, 5) = "0.000003072"
.TextMatrix(110, 6) = "0.001982"
.TextMatrix(110, 7) = "0.01184"
.TextMatrix(110, 8) = "0.01762"

.TextMatrix(112, 0) = "45"
.TextMatrix(112, 1) = "-"
.TextMatrix(112, 2) = "1.761"
.TextMatrix(112, 3) = "0.04473"
.TextMatrix(112, 4) = "3.102"
.TextMatrix(112, 5) = "0.000002436"
.TextMatrix(112, 6) = "0.001572"
.TextMatrix(112, 7) = "0.009383"
.TextMatrix(112, 8) = "0.01398"

.TextMatrix(113, 0) = "-"
.TextMatrix(113, 1) = "48"
.TextMatrix(113, 2) = "1.6"
.TextMatrix(113, 3) = "0.0464"

.TextMatrix(113, 4) = "2.560"
.TextMatrix(113, 5) = "0.000002011"
.TextMatrix(113, 6) = "0.001297"
.TextMatrix(113, 7) = "0.007750"
.TextMatrix(113, 8) = "0.01153"

.TextMatrix(114, 0) = "46"
.TextMatrix(114, 1) = "-"
.TextMatrix(114, 2) = "1.563"
.TextMatrix(114, 3) = "0.03984"
.TextMatrix(114, 4) = "2.460"
.TextMatrix(114, 5) = "0.000001931"
.TextMatrix(114, 6) = "0.001246"
.TextMatrix(114, 7) = "0.007446"
.TextMatrix(114, 8) = "0.01108"

.TextMatrix(115, 0) = "47"
.TextMatrix(115, 1) = "-"
.TextMatrix(115, 2) = "1.397"
.TextMatrix(115, 3) = "0.03547"
.TextMatrix(115, 4) = "1.951"
.TextMatrix(115, 5) = "0.000001532"
.TextMatrix(115, 6) = "0.0009884"
.TextMatrix(115, 7) = "0.005904"
.TextMatrix(115, 8) = "0.008787"

.TextMatrix(116, 0) = "48"
.TextMatrix(116, 1) = "-"
.TextMatrix(116, 2) = "1.244"
.TextMatrix(116, 3) = "0.03159"
.TextMatrix(116, 4) = "1.547"
.TextMatrix(116, 5) = "0.000001215"

.TextMatrix(116, 6) = "0.0007838"

.TextMatrix(116, 7) = "0.004683"

.TextMatrix(116, 8) = "0.006968"

.TextMatrix(118, 0) = "-"

.TextMatrix(118, 1) = "49"

.TextMatrix(118, 2) = "1.2"

.TextMatrix(118, 3) = "0.03048"

.TextMatrix(118, 4) = "1.440"

.TextMatrix(118, 5) = "0.000001131"

.TextMatrix(118, 6) = "0.0007297"

.TextMatrix(118, 7) = "0.004359"

.TextMatrix(118, 8) = "0.006437"

.TextMatrix(119, 0) = "49"

.TextMatrix(119, 1) = "-"

.TextMatrix(119, 2) = "1.108"

.TextMatrix(119, 3) = "0.02813"

.TextMatrix(119, 4) = "1.227"

.TextMatrix(119, 5) = ""

.TextMatrix(119, 6) = "0.0006216"

.TextMatrix(119, 7) = "0.003718"

.TextMatrix(119, 8) = "0.005326"

.TextMatrix(120, 0) = "-"

.TextMatrix(120, 1) = "50"

.TextMatrix(120, 2) = "1.00"

.TextMatrix(120, 3) = "0.02540"

.TextMatrix(120, 4) = "1.00"

.TextMatrix(120, 5) = "0.000000007854"

.TextMatrix(120, 6) = "0.0005067"

.TextMatrix(120, 7) = "0.003027"

```
.TextMatrix(120, 8) = "0.004505"
```

```
.TextMatrix(121, 0) = "50"
```

```
.TextMatrix(121, 1) = "-"
```

```
.TextMatrix(121, 2) = "0.986"
```

```
.TextMatrix(121, 3) = "0.02505"
```

```
.TextMatrix(121, 4) = "0.9728"
```

```
.TextMatrix(121, 5) = "0.000000007641"
```

```
.TextMatrix(121, 6) = "0.0004929"
```

```
.TextMatrix(121, 7) = "0.002945"
```

```
.TextMatrix(121, 8) = "0.004382"
```

```
End With
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Text2_Change()
```

```
    If Text2.Text <> "" And Text3.Text <> "" Then
```

```
        Command2.Enabled = True
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Text3_Change()
```

```
    If Text2.Text <> "" And Text3.Text <> "" Then
```

```
        Command2.Enabled = True
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

ภาคผนวก ฉ.
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28

28th Electrical Engineering Conference (EECON 28)



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สารบัญบทความ

สาส์นจากอธิการบดี/คณบดี/ประธาน

กรรมวิธีการประชุม

บทความดีเด่น

บรรยายพิเศษแบบบทความ

Author Index

• ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)

• อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)

• ไฟฟ้ากำลัง (PW)

• ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)

• คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

• การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)

• อิเล็กทรอนิกส์ (EL)

• งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)



- PW086 การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิต่อความดันของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดคู่ขนานน้ำมันขณะจ่ายโหลด
ประภาภรณ์ เกือบวัฒน์ บุญเล็ก สือเคย ศิริวิช ภัคสวน
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 589
- PW087 การทำนายอุณหภูมิจนจะใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวขนาดเล็กลงโดยใช้ต้นแบบอุณหภูมิจน
ชนกวิวัฒน์ ภูมิภาค¹ ชัยวุฒิ ศักดิ์บุญชัย²
¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหาสารคาม
²สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 593
- PW088 การศึกษาการทดสอบแกนเหล็กแบบแผ่นเดี่ยว
ชนนพันธ์ แสนสุข วีระศักดิ์ มังกรวิรัตน์ พิชิต ล้ายอง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 597
- PW089 การศึกษาและออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กเพื่อการใช้งานใน
อุตสาหกรรม
กรุง สือวัฒน์ รัชต มิ่งมั่งชัย ศิริวัฒน์ โภชน์เวชกุล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 601

การศึกษาและออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กเพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรม

A Study and Design of Small Circular Lifting Magnet for Operation in the Industry

กรุง กิ่งวัฒนา, รัชต์ มิ่งมีชัย และ ศิริวัฒน์ โพธิ์เวชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-737-3000 ต่อ 3515, 3931 โทรสาร 02-737-2561

E-mail: s5060105@kmitl.ac.th, kpsiriwa@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาและออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก เพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรม ซึ่งอาศัยหลักการของแรง ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นตัวยกชูดน้ำหนักทดสอบในลักษณะคล้ายการทำงานจริง โดยในการทดสอบจะมีลักษณะของการปล่อยเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งแขวนอยู่กับรอกให้ลงไปสัมผัสกับแผ่นเหล็ก ที่แขวนชูดน้ำหนักทดสอบแล้วทำการจ่ายกระแสไฟฟ้า เข้าไปในขดลวดของ เครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงที่สามารถยกชูดน้ำหนักทดสอบได้ โดยในบทความนี้ได้ทำการออกแบบและ จัดสร้างเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กขึ้นมาสามารถยกชูดน้ำหนักทดสอบที่มีน้ำหนัก 20 Kg มีพิกัดแรงดันแรงไฟฟ้า $10 V_{DC}$ และพิกัดกำลัง $20 W$ โดยผลที่ได้จากการศึกษาทำให้ทราบว่าเรามีมอเตอร์ที่สำคัญ ซึ่งมีผลต่อการออกแบบคือ อัตราแรงของเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าในการยกชูดน้ำหนักทดสอบซึ่งจะนำประโยชน์ที่ได้จากการศึกษาและ ออกแบบไปใช้ในการปรับปรุงเพื่อจัดสร้าง เครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า แบบวงกลม ขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไป

คำสำคัญ : เครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า, สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

Abstract

This paper present the study and design of small circular lifting magnet for operation in the industry, the pinciple is used to appear force from the electrical magnetic field which lift weight test set in real similar operation characteristic. While the testing is showing, lifting magnet is released from the pulley to contact with iron plate which suspend weight test set. Then, current sources input lifting magnet's windings to construct the electrical magnetic field. The result occure force which can be lifted weight test set. In this paper is designed and constructed small circular lifting magnet which can be lifted weight test set, weighs 20Kg by using 10VDC rated voltage and

20W rated power .Therefore, the study result is known that important parameters take effect the design the lifting magnet' s rated of speed to be lifted weight test set which will be bring uses from the study and design to impove for construction high-efficiency small circular lifting magnet

Keywords : Lifting Magnet, Electrical magnetic field

1. คำนำ

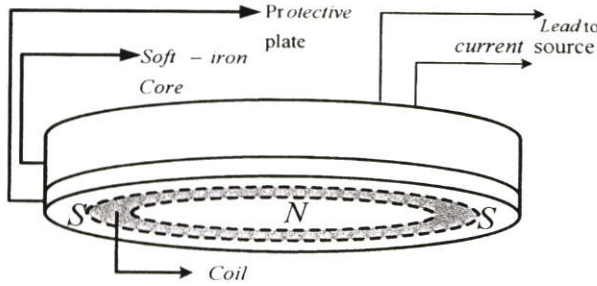
เครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้านั้น ถูกใช้งานในการยกเหล็กที่มีรูปแบบต่างๆ โดยช่วยคลนในเรื่องของเวลาและ ผลกระทบที่เกิดจากการใช้แรงงานคน โดยเครื่องจะมีประโยชน์มากสำหรับการยกแท่งเหล็กไปยังเครื่องรีดเหล็ก[1], การยกทรงเหล็กหรือแผ่นเหล็ก แต่ประโยชน์สูงสุดของเครื่องคือ สามารถลดแรงงานคน เมื่อต้องการที่จะเคลื่อนย้าย เศษเหล็กขนาดเล็กที่กองรวมกันอยู่ไปสู่เดาหลอมซึ่ง เครื่องจะสามารถยกเศษเหล็กขนาดเล็กต่างๆ ได้ปริมาณมากโดยไม่หล่นร่วงระหว่างทางและง่ายกว่าการเคลื่อนย้ายด้วยมือซึ่งปัจจุบันการเคลื่อนย้ายเหล็ก ทำได้หลายรูปแบบเช่น การใช้ Hydraulic clamp อย่างไรก็ตาม เครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า ก็ยังมีรูปร่างที่แตกต่างกันไปตามการใช้งาน บทความนี้เลือกที่จะศึกษาและ ออกแบบสร้าง เครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม[2] เนื่องจากมีขนาดเล็ก โครงสร้างไม่ยุ่งยาก บำรุงรักษาง่าย ต้นทุนต่ำ โดยในอนาคตอาจพัฒนาการออกแบบโครงสร้างแกนเหล็กและ ขดลวดตัวนำด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization)[3] รวมถึงนำเอาวิธีตรวจจับเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux Sensor)[4] มาใช้ในการออกแบบซึ่งจะสามารถจัดสร้างเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีประสิทธิภาพสูงได้

2. ทฤษฎี

2.1 เครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า

เทคนิคการเคลื่อนย้ายเหล็กโดย การใช้เครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็ก ไฟฟ้าอธิบายได้โดย การจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็กวงใน ซึ่งขดลวดนี้จะต้องถูกป้องกันการกระทบจาก

ภายนอกและ เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับขดลวดจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่แกนเหล็กวงใน ส่งผลให้พื้นผิวหน้าสัมผัสแกนเหล็กวงใน กลายสภาพเป็นขั้วแม่เหล็ก(S) และพื้นผิวหน้าสัมผัสแกนเหล็กวงนอกกลายเป็นขั้วแม่เหล็กทิศทางตรงข้ามตามทิศทางการไหลของกระแส ซึ่งขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดย ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะวิ่งจากขั้วเหนือสู่ขั้วใต้ ซึ่งจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวหน้าสัมผัสของเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงยกขึ้น



รูปที่ 1 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า

จากการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนสมการได้ดังนี้

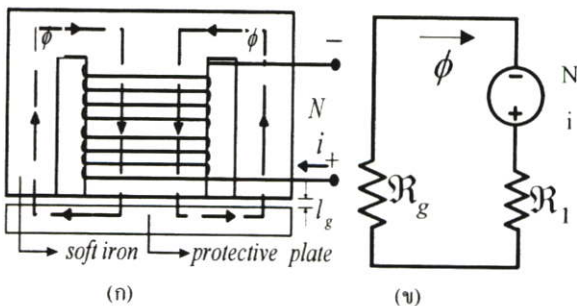
$$dW_{elec} + dW_{mech} = dW_{fld} + dW_{loss} \quad (1)$$

ถ้าไม่คิดการสูญเสียพลังงาน ในระหว่างการเปลี่ยนรูปพลังงานและเป็นการเปลี่ยนรูปจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยที่ $dW_{elec} > 0$ และ $dW_{mech} < 0$ [6] จะได้สมการ

$$dW_{fld} = d\left(\frac{1}{2} \mathcal{R} \phi^2\right) = \frac{1}{2} \frac{\phi^2 dl}{\mu A} + \frac{l \phi d\phi}{\mu A} \quad (2)$$

2.2 แรงที่เกิดจากเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปโครงสร้างพื้นฐาน เขียนเป็นรูปวงจรมแม่เหล็กและวงจรมแม่เหล็กสมมูลได้ดังนี้



รูปที่ 2 วงจรมแม่เหล็ก และวงจรมแม่เหล็กสมมูลของเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ (2) สามารถเขียนสมการได้โดยที่ ค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศมีค่ามากกว่าแกนเหล็ก ($\mathcal{R}_g > \mathcal{R}_c$) ดังนั้นจะได้

$$\phi = \frac{Ni}{\mathcal{R}_g} = \frac{Ni}{\frac{l_g}{\mu_0 A_1} + \frac{l_g}{\mu_0 A_2}} \quad (3)$$

เมื่อทำการรวมสมการทั้งหมดตามสมการที่ (1) และทำการจัดสมมูลของสมการโดยที่ $dW_{mech} = f_{fld} dx$ [6] จะทำให้ได้สมการของแรงที่เกิดจากเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าโดยมีพื้นที่หน้าตัดวงในคือ A_1 และพื้นที่หน้าตัดวงนอก A_2 ดังนี้

$$f_{fld} = \frac{Ni^2}{2\mu_0 A_1} + \frac{Ni^2}{2\mu_0 A_2} \quad (4)$$

สามารถคำนวณหาค่า A_1, A_2, N รวมถึงขนาดลวดตัวนำและค่าของ slot area ได้จากสูตร

$$A_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} \quad \text{โดย } A_1 \approx A_2 \quad (5)$$

$$f_{fld} = Ni = \text{mmf} \quad (6)$$

$$\text{ความหนาแน่นกระแสในตัวนำ} = \frac{\text{current}(A)}{\text{area}(mm^2)} \quad (7)$$

$$R = \rho \frac{l}{a} \quad (8)$$

อัตราส่วนความหนาแน่นของร่อง slot กับพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ

$$= \frac{\text{slot area}(mm^2)}{\text{conductor area}(mm^2)} \quad (9)$$

โดยที่

A_1, A_2 = พื้นที่หน้าตัดของเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าวงใน และวงนอกมีหน่วยเป็น m^2

D_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเหล็กวงในมีหน่วยเป็น m

f_{fld} = แรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า มีหน่วยเป็น นิวตัน(N)

R = ความต้านทานไฟฟ้าของลวดตัวนำมีหน่วยเป็น Ω

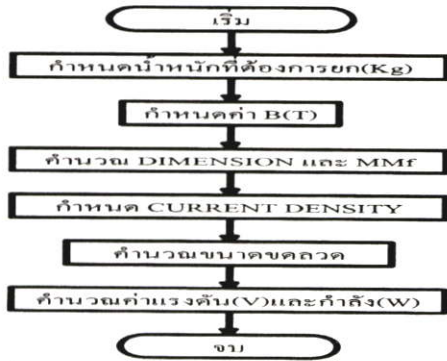
ρ = ความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของวัสดุตัวนำมีหน่วยเป็น $\Omega - m$

a = พื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำมีหน่วยเป็น mm^2

3. การออกแบบ

3.1 การออกแบบสร้างเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า

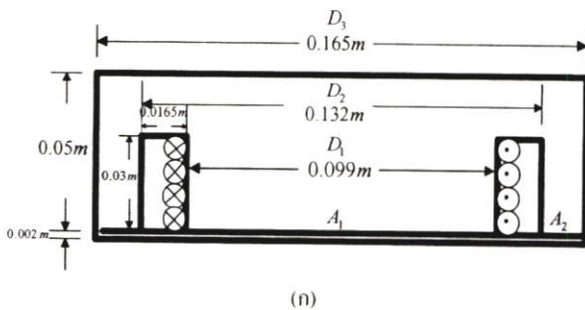
แบบวงกลมขนาดเล็ก



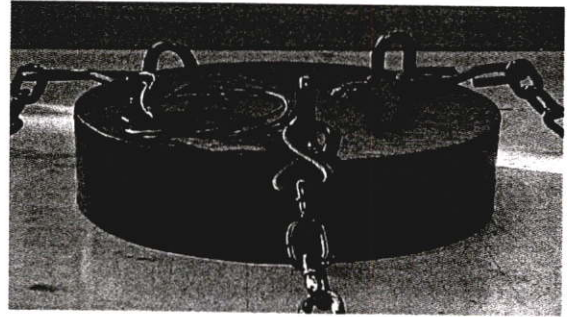
รูปที่ 3 ผังการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า

จากผังการออกแบบในรูปที่ (3) สามารถออกแบบสร้างเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าได้โดย

กำหนดน้ำหนักที่ต้องการยกเท่ากับ 20 Kg กำหนดค่า B เท่ากับ 0.1 T โดยเลือกใช้เหล็กอ่อน (Soft-iron) เป็นโครงสร้างทำการคำนวณขนาดDimensionของเครื่อง โดยเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นผิวหน้าสัมผัสของวงกลมของเครื่องเท่ากับ 16.5 cm ซึ่งนำค่ามาจากรูปที่ใช้งานจริงในอุตสาหกรรมจากนั้นทำการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด A_1 ซึ่งได้เท่ากับ 0.007698 m^2 และ A_2 เท่ากับ 0.0077 m^2 จากสมการที่(5) โดยใช้แผ่นอลูมิเนียม 0.002 m แทนช่องว่างอากาศแล้วคำนวณค่า mmf โดยจะได้ค่าจำนวนรอบขดลวดเท่ากับ 400รอบและ กระแสเท่ากับ 2 A จากสมการที่(4)และ(6)คำนวณขนาดขดลวดตัวนำได้จากสมการที่(7) ซึ่งกำหนดค่าCurrent Density เท่ากับ 4 A/mm^2 และหาค่าความต้านทานได้เท่ากับ $5\ \Omega$ จากสมการที่(8) ดังนั้นจะได้แรงดันที่ใช้เท่ากับ 10 V_{DC} และกำลังที่ใช้เท่ากับ 20 W โดยใช้ลวดทองแดงS.W.Gเบอร์21 จากนั้นหาค่าพื้นที่หน้าตัดของร่องสลิต ซึ่งจะได้เท่ากับ 1.2935 mm^2 จากสมการที่(9)โดยค่าที่ได้ต่างๆ สามารถนำมาออกแบบสร้างเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก ซึ่งมีน้ำหนักของเครื่องรวม 8 Kg และขนาดของเครื่องสามารถแสดงได้ดังรูปที่ (4ก)



(ก)



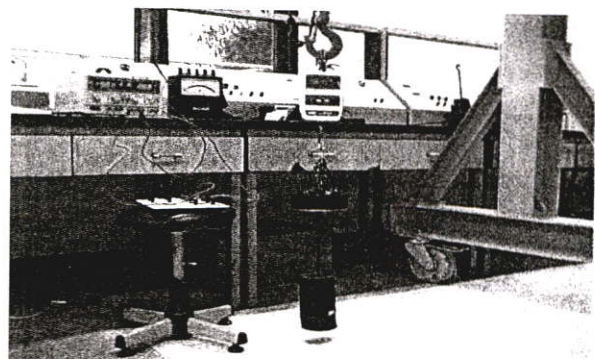
(ข)

รูปที่ 4 เครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบที่ได้จัดสร้างขึ้น

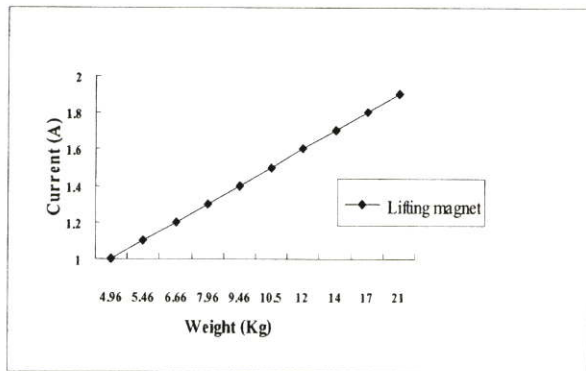
4.การทดสอบ

4.1 การทดสอบเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการยกชุดน้ำหนักทดสอบ

การทดสอบเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า ต้นแบบที่จัดสร้างขึ้นตามภาพใน รูปที่(4ข) โดยทำการยกชุดน้ำหนักทดสอบดังรูปที่(5)เริ่มด้วยการแขวนเครื่องซึ่งน้ำหนักคิจิตอลซึ่งรับโหลดน้ำหนักได้ 30 Kg ไว้กับรอกจากนั้นทำการแขวนแม่เหล็กยกไฟฟ้าไว้ กับเครื่องซึ่งคิจิตอลทำการเซตค่าของ เครื่องซึ่งคิจิตอลให้เท่ากับ 0 Kg ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเครื่องแล้วใช้แอมป์มิเตอร์ วัดค่ากระแสที่จ่ายให้กับเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าทำการทดลอง โดยวางชุดน้ำหนักทดสอบไว้กับพื้นแล้ว ปล่อยแม่เหล็กยกไฟฟ้าซึ่งแขวนอยู่กับเครื่องซึ่งคิจิตอล ที่แขวนอยู่กับรอกลงมาจนถึงแผ่นเหล็กที่แขวนชุดน้ำหนักทดสอบอยู่จ่ายกระแสให้กับเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเริ่มที่ 1 A แรงดัน 5.3 V_{DC} แล้วดึงรอกขึ้นและวางลงทำการเพิ่มน้ำหนักจนแม่เหล็กยกไฟฟ้าไม่สามารถยกชุดน้ำหนักทดสอบได้ จึงทำการบันทึกผล หลังจากนั้นทำการเพิ่มกระแสและ แรงดันเพื่อทดสอบต่อไปโดยทุกช่วงของกระแสจะทดสอบซ้ำ 3 ครั้งซึ่งจากการทดสอบ เมื่อเพิ่มกระแสไปจนถึง 1.9 A แม่เหล็กยกไฟฟ้า สามารถยกชุดน้ำหนักทดสอบ ได้ถึง 20.96 Kg ดังแสดงในกราฟรูปที่ (6)



รูปที่ 5 การทดสอบเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าโดยยกชุดน้ำหนักทดสอบ 10.46Kg



รูปที่ 6 แรงยกชุดน้ำหนักทดสอบที่เพิ่มขึ้นตามกระแสไฟฟ้า

ในการทดสอบชุดน้ำหนักทดสอบ เมื่อปรับกระแสไฟฟ้าไปที่ 2 A เครื่องชั่งดิจิตอลจะไม่สามารถอ่านค่าน้ำหนักที่ชั่งได้เนื่องจากน้ำหนักชุดทดสอบ เมื่อรวมกับน้ำหนักเครื่องยกของหนักแล้วจะมีค่าเกินพิกัดน้ำหนักที่เครื่องชั่งดิจิตอลรับได้

5. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดสอบสามารถสรุปผลและวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

1.จากการออกแบบ ให้เครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า มีพิกัดการยกน้ำหนักที่ 20 Kg ใช้แรงดันไฟฟ้า 10 V_{DC} พิกัดกำลัง 20 W โดยใช้กระแสไฟฟ้า 2 A ซึ่งจากผลการทดสอบเครื่องสามารถยกน้ำหนักได้ 20.96 Kg ที่แรงดัน 10.6 V_{DC} พิกัดกำลัง 20.14 W ใช้กระแส 1.9 A ซึ่งถ้าเทียบที่พิกัดกำลังเท่ากันคือ 20 W จะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักที่ชั่งได้เท่ากับ 3.3%ซึ่งมีค่าน้อยมากจึงทำให้เครื่องสามารถยกน้ำหนักได้ใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้

2.จากการทดสอบการยกชุดน้ำหนักทดสอบ โดยการปล่อยรอกที่แขวนเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าลงมาสัมผัส กับแผ่นเหล็กที่แขวนชุดน้ำหนักทดสอบ ซึ่งวางอยู่กับพื้นแล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่อง เพื่อให้ดูแผ่นเหล็กที่แขวนชุดน้ำหนักทดสอบแล้วดึงรอกที่แขวนขึ้นมานั้น พบว่าการดึงรอกขึ้น ในกรณีที่ไหลลงน้ำหนักเท่ากัน อัตราแรงในการดึงรอกขึ้นมีผลต่อแรงยกที่ได้ ซึ่งในกรณีที่ดึงรอกขึ้นเร็วจะสามารถยกน้ำหนัก ได้น้อยกว่าในกรณีที่ดึงรอกขึ้นช้า

3.จากการทดสอบพบว่าแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งเป็นหน้าสัมผัสของเครื่องที่ต้องติดกับแผ่นเหล็กชุดน้ำหนักทดสอบ มีความเรียบไม่สม่ำเสมอจึงทำให้ค่าน้ำหนักในการยกไม่ตรงตามพิกัดที่ได้ออกแบบไว้

จากการทดสอบโดยจำลอง ตามการใช้งานในอุตสาหกรรมทำให้ทราบถึงงานที่จะพัฒนาต่อไป ซึ่งจะนำเอาความสำคัญของอัตราเร่งมาใช้ในการออกแบบ เพื่อที่จะสามารถพัฒนาสร้างแม่เหล็กยกไฟฟ้าให้มีขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพในการยกสูงขึ้นและใช้พลังงานลดลงซึ่งจะเป็นการลดต้นทุนในด้านวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ได้เป็นอย่างดีต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] L.Dawes, "Dawes Electrical Engineering", McGraw-Hill , Inc., Tokyo, 1955.

[2] Laughton, M.A.and Say, M.G. "Electrical Engineer's Reference Book," Butterworth & Co(Publishers), London, 1985.

[3] ชีรพล โพธิ์พงษ์วิวัฒน์, วีระศักดิ์ วงศ์วิวัติ, ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย. "การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กระสิทธิภาพสูงโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม." การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, พฤศจิกายน 2544, หน้า 287-292.

[4] Ki-Hyeon Park, Dong Eon Kim, Seong-Hoom Jeong,and Bongkoo Kang, "Laminated Magnetic Flux Sensor For Thick-Steel-Plate Control." IEEE Trans. on Industrial Electrics, Vol.50,No.2.,pp. 379-384, 2003 .

[5] Abraham Marcus, "Electricity For Technicians," Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.United States of America ,1968.

[6] Hayt & Hughes, "Introduction To Electrical Engineering," McGraw-Hill, United States of America, 1968.



ประวัติผู้เขียนบทความ

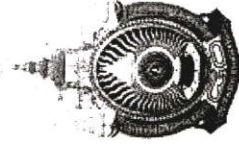
นายชอุทิศ วัฒนภักดี ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปัจจุบันเป็น นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำงานวิจัยด้านระบบแม่เหล็กไฟฟ้า



นายชอุทิศ วัฒนภักดี (รอง) พศ258 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นอาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำงานวิจัยด้านระบบแม่เหล็กไฟฟ้า



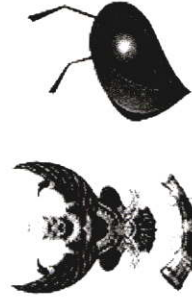
นายศิริวัฒน์ โพธิ์พงษ์วิวัฒน์ ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็น รองศาสตราจารย์ ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำงานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง กวาระระบบไฟฟ้ากำลัง กวาระระบบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและคุณภาพของกำลังไฟฟ้า



30th Electrical Engineering Conference (EECON-30)

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30

25-26 ตุลาคม 2550 ณ โรงแรมเฟลิซิตีเวอร์เนอรัลแควร์เตอร์ท กายูจนบุรี



Member of NSTDA



บทความสาขาไฟฟ้ากำลัง



PW3-5

PW-88	Energy Saving Device of Lighting System
PW-89	Determination of Energy Saving by Using a Lighting Control System with Microcontroller
PW-90	Impacts of Photovoltaic Generation on Short-term Load Forecasting
PW-91	LED Solar Lighting with Energy Saving Mode
PW-92	Unified Glare Rating by Tabular Method
PW-93	Study of P-type Hydrogenated Microcrystalline Silicon Oxide Deposited by Plasma Chemical Vapor Deposition

PW3-6

PW-94	Congestion Management in Electricity Market with AC and DC Power Transfer Distribution Factor (PTDF) for Allocating Congestion Cost for Bilateral Transaction
PW-95	Control of Power Generation with Load Demand in Automotive Charging Systems
PW-96	A prototype of a small circular lifting magnet for industry applications
PW-97	Analysis of Half-Bridge Resonant Inverter with Output Voltage Control for High-Frequency Induction Cooking
PW-98	Optimal Capacitor Installation considering Cost-Benefit

[Back](#)
[Close](#)
[Menu](#)
[Search](#)
[Next](#)

ต้นแบบเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก เพื่อใช้งานในอุตสาหกรรม

A prototype of a small circular lifting magnet for industry applications

กรุง ถิอวัฒนา* รัชต์ มั่งมีชัย** และ ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล*

* คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-326-4550 โทรสาร 02-3264550

E-mail: s5060105@kmitl.ac.th, kpsiriwa@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ ต้นแบบเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก โดยสร้างโปรแกรมช่วยในการออกแบบต้นแบบตัวเครื่อง และทำการทดสอบการใช้งานจริง ในอุตสาหกรรม โปรแกรม Visual basic ถูกนำมาใช้ในการออกแบบชุดกำเนิดสนามแม่เหล็ก และแสดงผลเป็นรูปภาพ 2 มิติพร้อมด้วยพารามิเตอร์ จำนวนรอบของขดลวด และขนาดของขดลวด เครื่องยกน้ำหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบมีพิกัด 250kg พิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 95Vdc กระแส 2A พร้อมระบบสำรองไฟฟ้าฉุกเฉิน จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการออกแบบ และวิเคราะห์สาเหตุความผิดพลาด เพื่อเป็นข้อมูลในการศึกษา และจัดสร้างเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไป

คำสำคัญ: เครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า

Abstract

This paper presents a prototype of small circular lifting magnet by construction of a program for the design of a prototype lifting magnet and testing industry applications. Moreover, Visual basic program is used for the design of electromagnetic circuit and two dimensional graphical displays including a number of turns and dimension coil parameters. This prototype lifting magnet has output 250kg, voltage 95Vdc, current 2A and the emergency supply. Then, the test results are compared with designing and analysis the result of error to bring a data in the study and construction of a small circular lifting magnet is high efficiency.

Keywords: Lifting magnet

1. คำนำ

เนื่องจากในปัจจุบัน โรงงานอุตสาหกรรมภายในประเทศซึ่ง

ดำเนินธุรกิจที่เกี่ยวข้องกับการนำโลหะประเภทแผ่นเหล็ก หรือเศษเหล็ก ไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเหล็กในรูปแบบต่าง ๆ จำเป็นที่จะต้องมีกระบวนการในการเคลื่อนย้ายแผ่นเหล็ก หรือเศษเหล็กเหล่านั้น เช่น การเคลื่อนย้ายแท่งเหล็กไปยังเครื่องรีดเหล็ก[4], การเคลื่อนย้ายเศษเหล็กสู่เตาหลอม ซึ่งกระบวนการในการเคลื่อนย้ายดังที่กล่าวมามากจะเกิดปัญหาอยู่เสมอไม่ว่าจะเป็นด้านการใช้เวลา, แรงงาน และด้านความปลอดภัย จากงานวิจัย[1] ได้มีการศึกษาและออกแบบสร้างเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลม[5] ขนาดเล็กขึ้นซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำผลจากงานวิจัยดังกล่าวมาเป็นข้อมูลในการออกแบบสร้างเครื่องต้นแบบ โดยที่ตัวเครื่องมีโครงสร้างไม่ยุ่งยากบำรุงรักษาง่าย ต้นทุนในการสร้างต่ำนอกจากนี้ได้จัดสร้างชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีระบบจ่ายไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินเพื่อให้เครื่องต้นแบบ สามารถใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรม ทั้งยังได้จัดทำ โปรแกรมช่วยในการออกแบบตัวเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กขึ้น เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยให้สะดวกในการออกแบบ โดยในอนาคตอาจพัฒนาการออกแบบโครงสร้างแกนเหล็ก และขนาดขดลวดด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) [2] รวมถึงนำเอาวิธีตรวจจับเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux Sensor)[3] มาใช้ในการออกแบบ ซึ่งจะสามารถจัดสร้างเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมที่มีประสิทธิภาพสูงได้ ซึ่งทั้งหมดนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับพัฒนาการออกแบบต่อไปในอนาคต

2. การออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

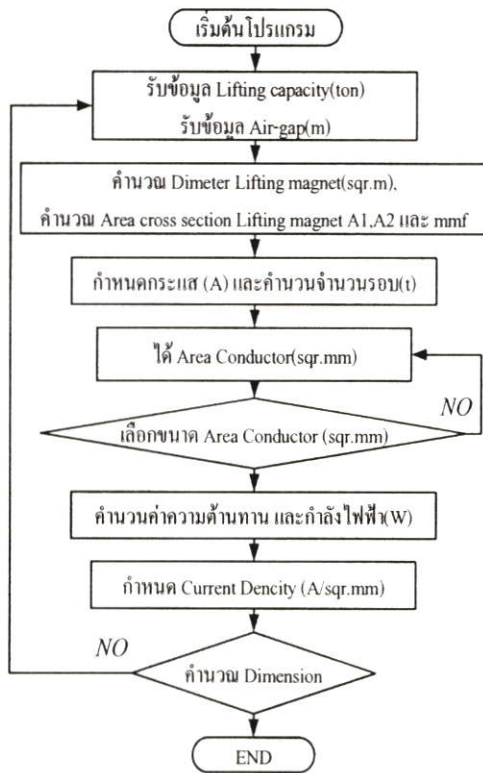
2.1 สมการแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

$$f_{fld} = \frac{N_i^2 \left(\frac{l_g}{\mu_0 A_1} + \frac{l_g}{\mu_0 A_2} \right)^2}{2 \mu_0 A_1} + \frac{N_i^2 \left(\frac{l_g}{\mu_0 A_1} + \frac{l_g}{\mu_0 A_2} \right)^2}{2 \mu_0 A_2} \quad (1)$$

โดยที่ f_{fld} คือ แรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องยกของหนัก มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

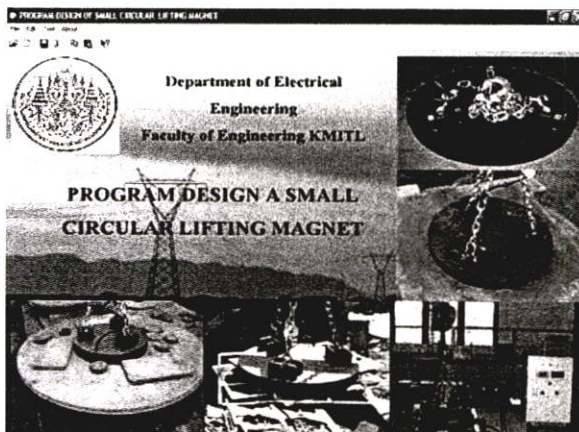
2.2 ลำดับการออกแบบเครื่องยกของหนักโดยใช้โปรแกรม

เพื่อให้เกิดความสะดวกในการออกแบบตัวเครื่องจึงได้ทำการออกแบบโปรแกรม เพื่อใช้ในการออกแบบตัวเครื่องต้นแบบ โดยสามารถแสดงลำดับการทำงานของโปรแกรมได้ดังนี้



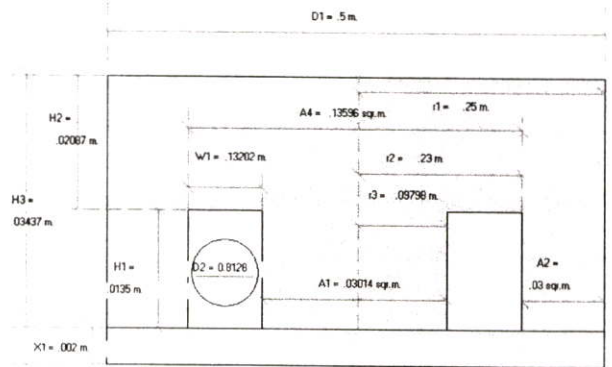
รูปที่ 1 ลำดับการออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็กต้นแบบโดยใช้โปรแกรม

จากลำดับการออกแบบในรูปที่ 1 เมื่อทำการป้อนค่าของน้ำหนักแผ่นเหล็กที่จะยก โดยกำหนดให้สามารถยกน้ำหนักเท่ากับ 250kg โปรแกรมจะทำงาน และแสดงผลเป็นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นในการจัดสร้างตัวเครื่อง โดยแสดงหน้าจอเริ่มต้น โปรแกรมดังนี้



รูปที่ 2 โปรแกรมออกแบบเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า

และเมื่อให้โปรแกรมทำงานต่อโปรแกรมจะสามารถแสดงมิติต่าง ๆ ที่สำคัญของตัวเครื่อง ซึ่งจำเป็นในการจัดสร้างโดยสามารถแสดงผลของโปรแกรมในขั้นสุดท้ายได้ดังนี้



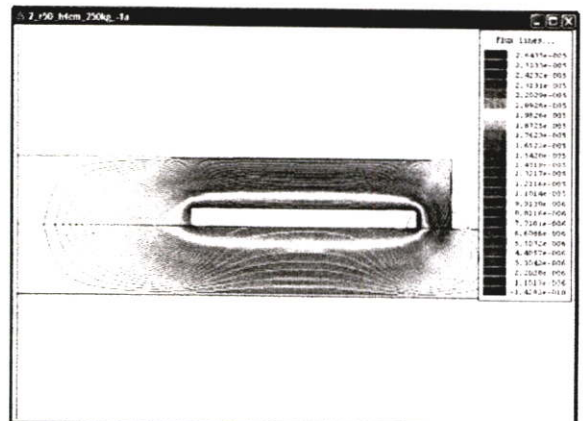
รูปที่ 3 มิติของเครื่องต้นแบบที่ได้จากการใช้โปรแกรม

จากรูปที่ 3 เป็นมิติต่าง ๆ ที่สำคัญของเครื่อง ซึ่งได้จากการใช้โปรแกรม เช่น พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงใน และพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กวงนอกที่มีขนาด 0.03sq.m, พื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำที่มีขนาด 0.8128 sq.mm, เส้นผ่านศูนย์กลางแกนเหล็กที่มีความยาว 0.5m โดยสามารถนำค่าที่ได้จากการใช้โปรแกรมไปจัดสร้างตัวเครื่องต้นแบบต่อไป

3. การจำลองการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม

Maxwell SV

ในการออกแบบตัวเครื่อง หลังจากที่ได้ผลการออกแบบโดยใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบแล้ว จำเป็นที่จะต้องทำการจำลองสถานะการเกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux) ทั้งนี้เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการศึกษา และวิเคราะห์ถึงปรากฏการที่เกิดขึ้น โดยสามารถแสดงผลของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น จากการใส่เครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบที่ได้ทำการออกแบบไว้ ในการยกแผ่นเหล็กน้ำหนัก 250kg แสดงผลการใช้โปรแกรมดังในรูปที่ 4

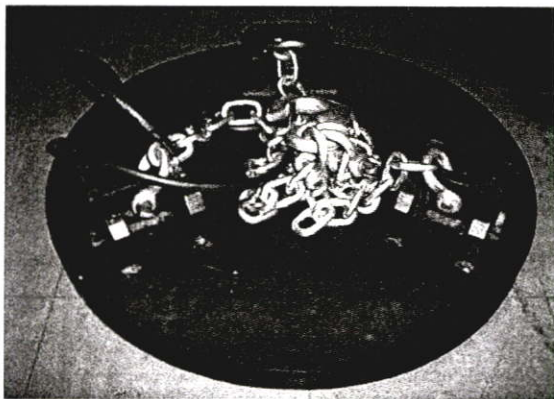


รูปที่ 4 เส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการใช้โปรแกรม Maxwell SV

จากรูปที่ 4 เป็นผลการใช้โปรแกรม Maxwell SV ในการจำลองสภาวะการเกิดเส้นแรงแม่เหล็ก ของเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าโดยแสดงเป็นภาพตัด 2 มิติแบบสมมาตรซึ่งจะแสดงให้เห็นแนวเส้นแรงแม่เหล็ก ที่วิ่งผ่านตัดกับพื้นผิวหน้าสัมผัสแกนเหล็กวงใน และตัดผ่านพื้นผิวหน้าสัมผัสแผ่นเหล็กทดสอบ ผู้พื้นผิวหน้าสัมผัสแกนเหล็กวงนอก[6] โดยเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จะมีการกระจายตัวสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งแกนเหล็กของเครื่องยกของหนัก รวมถึงแผ่นเหล็กทดสอบ ดังนั้นจากผลที่ได้จากการจำลอง จึงสามารถนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรมไปใช้ในการจัดสร้างตัวเครื่องต่อไป

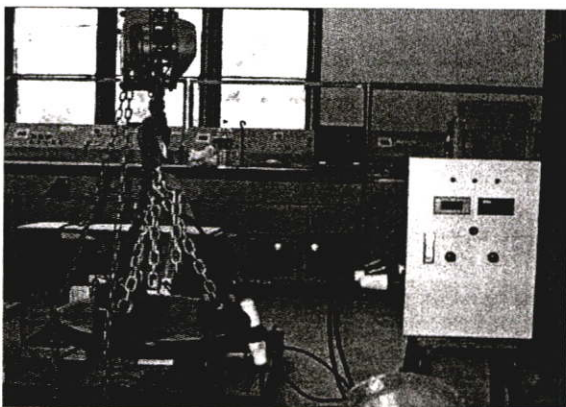
4. การสร้างเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบ

จากผลการออกแบบตัวเครื่อง โดยการใช้โปรแกรมเมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มาแล้วสามารถนำค่าที่ได้ไปทำการจัดสร้างตัวเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตัวเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมต้นแบบ

จากรูปที่ 5 แสดงตัวเครื่องต้นแบบที่ได้จัดสร้างขึ้น ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5m สามารถยกเหล็กน้ำหนักรวม 250kg โดยเมื่อรวมกับชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และชุดจ่ายไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินจะได้ชุดเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบที่พร้อมทดสอบดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ชุดเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมต้นแบบ

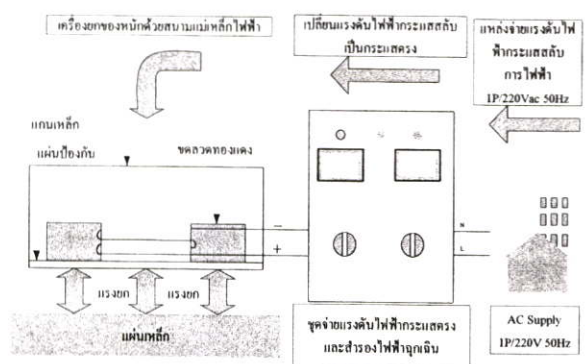
5. การทดสอบเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบ

5.1 การทดสอบเครื่องยกของหนักด้วยการยกแผ่นเหล็ก

เป็นการทดสอบการยกแผ่นเหล็ก เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อน้ำหนักแผ่นเหล็กที่สามารถยกได้ รวมถึงเปรียบเทียบผลการทดสอบกับการออกแบบด้วยโปรแกรม

5.2 การทดสอบเครื่องยกของหนักด้วยการยกเศษเหล็ก

เป็นการทดสอบยกเศษเหล็ก เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อน้ำหนักเศษเหล็กที่สามารถยกได้ แล้วเปรียบเทียบผลกับการยกแผ่นเหล็ก และการออกแบบด้วย โปรแกรม



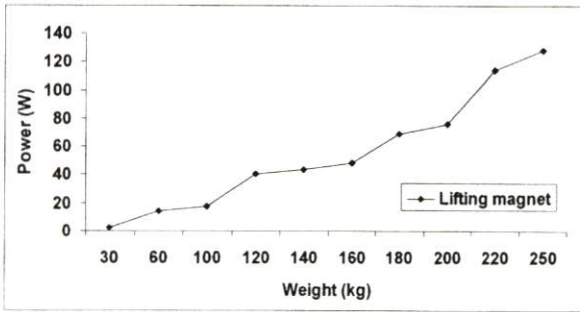
รูปที่ 7 ผังการทดสอบเครื่องยกของหนักด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าต้นแบบ

จากผังการทดสอบสามารถอธิบายได้ โดยต่อด้านอินพุทของชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ และต่อด้านเอาท์พุทของชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เข้ากับตัวเครื่องยกของหนักจากนั้นวางตัวเครื่องลงบนแผ่นเหล็กทดสอบแล้วปรับค่าแรงดันไฟฟ้า ให้มีค่าสูงสุดคือขีดโซรรับน้ำหนักของตัวเครื่องยกของหนัก ซึ่งมีแผ่นเหล็กติดอยู่อันเกิดจากจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้น ภายในตัวเครื่อง ค่อยปรับค่าแรงดันลงจนแผ่นเหล็กล่องหล่นสู่พื้นแล้วบันทึกผล ต่อจากนั้นทำการทดลองซ้ำแต่เพิ่มขนาดของแผ่นเหล็กทดสอบ จนถึงน้ำหนัก 250kg และ 10kg สำหรับเศษเหล็กแล้วจึงหยุดทำการทดสอบ โดยแสดงการทดสอบยกแผ่นเหล็กดังรูปที่ 8

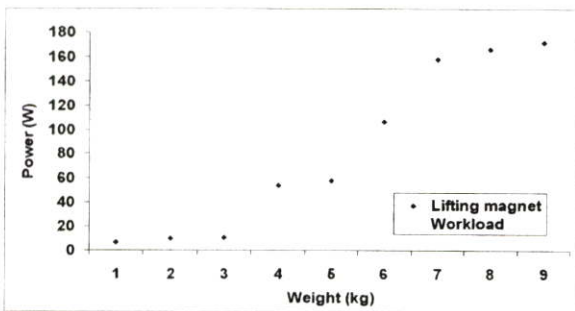


รูปที่ 8 การทดสอบยกแผ่นเหล็กที่น้ำหนัก 250kg

จากการทดสอบการยกแผ่นเหล็ก และเศษเหล็กที่น้ำหนักต่าง ๆ สามารถนำผลที่ได้จากการทดลองมาพล็อตกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตามน้ำหนักแผ่นเหล็ก



รูปที่ 10 กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตามน้ำหนักเศษเหล็ก

6. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.จากการออกแบบเครื่องต้นแบบ ให้สามารถยกแผ่นเหล็ก น้ำหนัก 250kg โดยใช้พิกัดแรงดันไฟฟ้า 95Vdc และพิกัดกระแสไฟฟ้า 2A คิดเป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อน้ำหนักที่ยกได้เท่ากับ 0.76W/kg ซึ่งผลการทดสอบ เครื่องสามารถยกน้ำหนักแผ่นเหล็กที่ 250kg ได้โดยใช้กระแสไฟฟ้า 1.62A แรงดันไฟฟ้า 79Vdc เมื่อคิดเป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อน้ำหนักที่ยกได้เท่ากับ 0.5W/kg ซึ่งทั้งนี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยโปรแกรมจะใช้กำลังไฟฟ้าต่ำกว่า 34%

2.จากการทดสอบโดยการยกเศษเหล็กพบว่าเครื่องสามารถยกน้ำหนักเศษเหล็กได้สูงสุด 9kg แรงดันไฟฟ้า 92Vdc กระแสไฟฟ้า 1.86A เมื่อคิดเป็นกำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ยกได้จะเท่ากับ 19W/kg ซึ่งใช้มากกว่าการยกแผ่นเหล็กน้ำหนัก 250kg ถึง 37 เท่า และมากกว่าการออกแบบด้วยโปรแกรม 24 เท่า ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากพื้นผิวสัมผัสระหว่างหน้าสัมผัสของเครื่องกับหน้าสัมผัสของเศษเหล็ก มีความไม่สม่ำเสมอจนทำให้เกิดช่องว่างอากาศมาก และกลายเป็นวงจรแม่เหล็กที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งเมื่อค่าของช่องว่างอากาศมีค่าสูงขึ้น จะทำให้แรงในการยกมีค่าต่ำลง

7.สรุปผล

ในการใช้งานโปรแกรมออกแบบเพื่อนำเครื่องยกของหนักไปใช้ในการยกเศษเหล็กในอุตสาหกรรม จำเป็นจะต้องทำการออกแบบตัว

เครื่องให้มีพิกัดกำลังไฟฟ้าที่สูง แต่ในกรณีต้องการออกแบบ เพื่อใช้สำหรับยกแผ่นเหล็กในอุตสาหกรรมเครื่องต้นแบบที่จัดสร้างขึ้น จากการออกแบบด้วยโปรแกรม สามารถใช้กำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักได้ต่ำกว่าที่ออกแบบ 34% ซึ่งจากผลการทดสอบเครื่องต้นแบบที่จัดสร้างสามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรุง ลือวัฒนา, รัชต์ มั่งมีชัย, สิริวัฒน์ โพธิเวชกุล. "การศึกษาและออกแบบเครื่องยกของหนัก ด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าแบบวงกลมขนาดเล็ก เพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรม, "การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28, ตุลาคม 2548, หน้า 601 - 604.
- [2] ชีรพล โพธิพงษ์วิวัฒน์, วีระศักดิ์ วงศ์วิจิ, ชัยวุฒิ จัตราอุทัย. "การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก ประสิทธิภาพสูงโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม, "การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, พฤศจิกายน 2544, หน้า 287 - 292.
- [3] Ki - Hyeon Park, Dong Eon Kim, Seong - Hoom Jeong, and Bongkoo Kang, "Laminated Magnetic Flux Sensor For Thick-Steel-Plate Control, " IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.50 ,No.2.,pp. 379 - 384, 2003 .
- [4] L.Dawes, "Dawes Electrical Engineering", McGraw - Hill, Inc., Tokyo, 1955.
- [5] Hay & Hughes, "Introduction To Electrical Engineering," McGraw - Hill, United States of America, 1968.
- [6] Abraham Marcus, "Electricity For Technicians," Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.United States of America ,1968.



ประวัติผู้เขียนบทความ นายกรุง ลือวัฒนา การศึกษา วศ.บ. ไฟฟ้าจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปัจจุบันเป็น นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำงานวิจัยด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



นายรัชต์ มั่งมีชัย ปริญญาโท (ว.ศ.ม.) พ.ศ.2543 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังปัจจุบันเป็นอาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร โดยทำงานวิจัยด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



นายสิริวัฒน์ โพธิเวชกุล จากสถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนใจทางด้าน วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ระบบไฟฟ้ากำลัง, ด้านพลังงานทดแทน และการใช้ไอโซนเพื่อสิ่งแวดล้อม

ประวัติผู้เขียน



นายกรุง ลือวัฒนา สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปี 2544 ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังปี 2545 ปัจจุบันทำงานเป็นวิศวกรประจำ บริษัท ACME INTERNATIONAL (THAILAND)