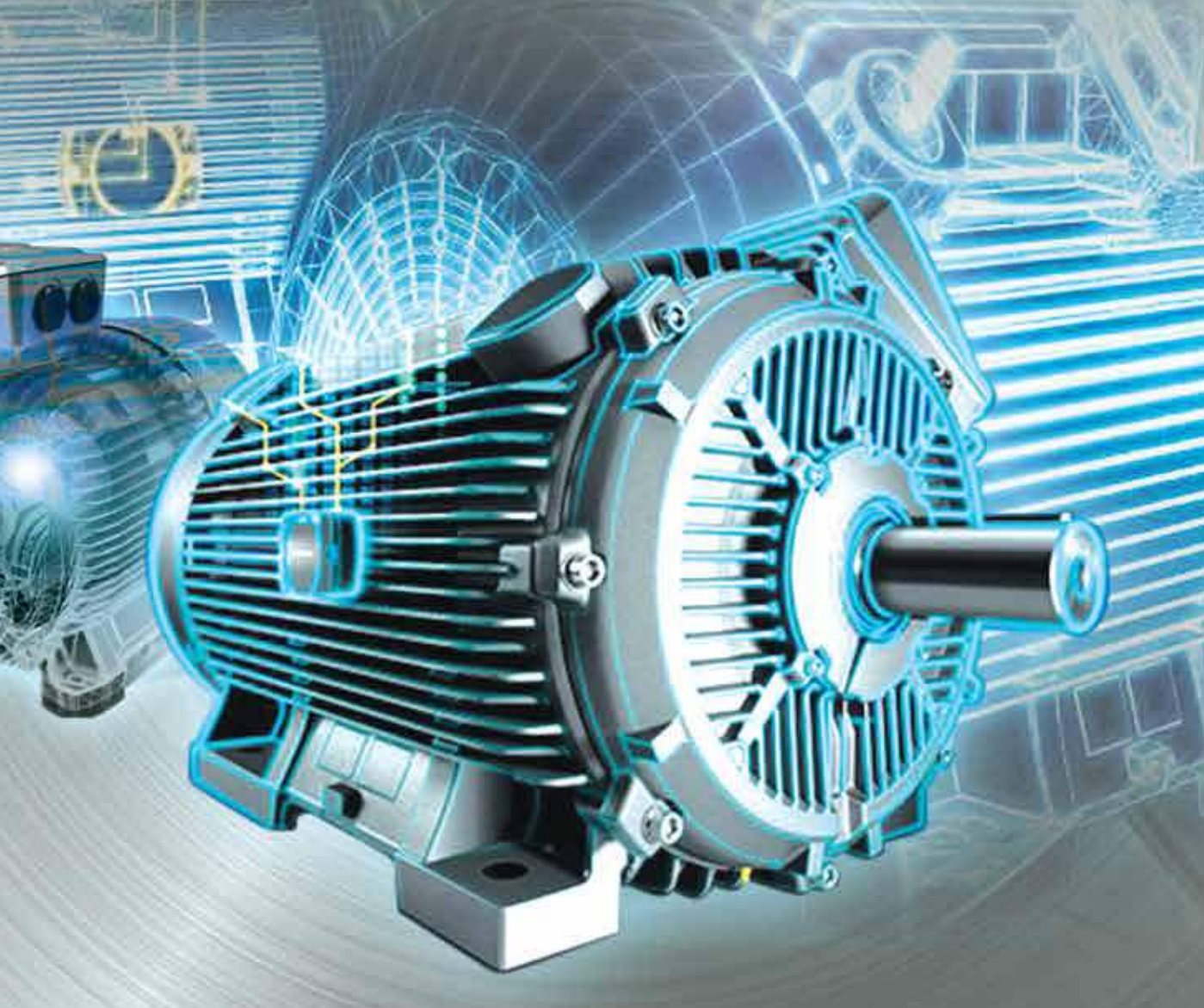


เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง

(DC Machines)



บทพนธ์ บุตรเจริญกุล
สายัณต์ ชื่นอารมย์

140.-

เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง (DC Machines)

กลุ่มอาชีพพลังงาน ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์

ISBN 978-616-495-330-7

พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2569

จำนวนที่พิมพ์ 3,000 เล่ม

เรียบเรียงโดย

นฤพนธ์ นุตเจริญกุล
สายันต์ ชื่นอารมย์

จัดพิมพ์และจำหน่ายโดย...



วังอักษร



บริษัท วังอักษร จำกัด

69/3 ถนนอรุณอมรินทร์ แขวงวัดอรุณ

เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ 10600

โทร. 0-2472-3293-4

Mobile 08-8585-1521

Facebook : สำนักพิมพ์ วังอักษร

e-Mail : wangaksorn9@gmail.com

http://www.wangaksorn.com

Line ID : wangaksorn

FREE

e-book แต่ละบทเรียน
ในรูปแบบ QR Code

บริษัท วังอักษร จำกัด
ขอสงวนลิขสิทธิ์

ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537
และพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์เพิ่มเติม พ.ศ. 2565
ห้ามมิให้ทำการคัดลอก ดัดแปลง แก้ไขเนื้อหา
หรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนไม่ว่ารูปแบบใด
ชื่อและเครื่องหมายการค้าอื่น ๆ ที่อ้างอิงในหนังสือ
ฉบับนี้ เป็นลิขสิทธิ์โดยชอบด้วยกฎหมาย
ของเจ้าของแต่ละราย
บริษัทฯ มิได้อ้างความเป็นเจ้าของแต่อย่างใด



ตารางกำหนดการจัดการเรียนรู้

วิชา เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง

(DC Machines)

ครั้งที่	รายการ		จำนวนชั่วโมง		
	ทฤษฎี	ปฏิบัติ	ท	ป	รวม
1	บทเรียนที่ 1 แม่เหล็กไฟฟ้าและทฤษฎีแม่เหล็ก	ใบงานที่ 1.1 สมบัติแม่เหล็ก ใบงานที่ 1.2 การเหนี่ยวนำ	1	3	4
2	บทเรียนที่ 2 แม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐาน	ใบกิจกรรมที่ 2.1 ความซึมซาบได้	1	3	4
3	บทเรียนที่ 3 วงจรแม่เหล็ก	ใบกิจกรรมที่ 3.1 วงจรแม่เหล็ก	1	3	4
4	บทเรียนที่ 4 พื้นฐานเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง	ใบกิจกรรมที่ 4.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (1) ใบกิจกรรมที่ 4.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (2)	1	3	4
5	บทเรียนที่ 5 เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง	ใบงานที่ 5.1 ถอดและประกอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก	1	3	4
6	บทเรียนที่ 6 อาร์เมเจอร์และคอมมิวเทชัน	ใบกิจกรรมที่ 6.1 การพันขดลวดอาร์เมเจอร์	1	3	4
7	บทเรียนที่ 7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	ใบกิจกรรมที่ 7.1 ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	1	3	4
8 - 11	บทเรียนที่ 8 คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	ใบงานที่ 8.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกวงจร ใบงานที่ 8.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบซินด์ ใบงานที่ 8.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบซีรีย์ ใบงานที่ 8.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบคอมพาวด์ซอร์ตซินด์	4	12	16



ครั้งที่	รายการ		จำนวนชั่วโมง		
	ทฤษฎี	ปฏิบัติ	ท	ป	รวม
12 - 14	บทเรียนที่ 9 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเบื้องต้น	ใบงานที่ 9.1 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขั้วขึ้น ใบงานที่ 9.2 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบซีรีย์	4	8	12
15	บทเรียนที่ 10 การหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	ใบกิจกรรมที่ 10.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้านของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	1	3	4
16	บทเรียนที่ 11 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	ใบงานที่ 11.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	1	3	4
17	บทเรียนที่ 12 สปีดเรกูลेशनและการบำรุงรักษา	ใบกิจกรรมที่ 12.1 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	1	3	4
18	ประเมินผลสัมฤทธิ์การเรียนรู้ระดับรายวิชา		1	3	4
รวม			19	53	72



คำนำ

บริษัท วังอักษร จำกัด ได้จัดทำหนังสือวิชา **เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง (DC Machines)** เพื่อใช้
บูรณาการและประกอบการเรียนการสอน ตามหลักสูตรอาชีวศึกษา (สอศ.) หลักสูตรส่งเสริมการเรียนรู้
(สกร.) หลักสูตรอุดมศึกษา ผู้สนใจในการพัฒนาการเรียนรู้และทักษะ

หนังสือเล่มนี้ประกอบด้วยเนื้อหาสาระ ใบกิจกรรม ใบงาน แบบฝึกหัด แบบทดสอบคู่ขนาน
มีจุดประสงค์ในการยกระดับผู้เรียนให้เรียนทฤษฎีและปฏิบัติ เพื่อเสริมสร้างทักษะ ประสิทธิภาพ
และการประยุกต์ใช้ได้จริง โดยเน้นกระบวนการเรียนรู้ที่มีคุณธรรม จริยธรรม จรรยาบรรณวิชาชีพ และ
กิจนิสัยในการทำงาน เพื่อสร้างสมรรถนะตามความต้องการของสถานประกอบการ เนื้อหาในหนังสือ
เล่มนี้แบ่งออกเป็น 12 บทเรียน คือ **บทเรียนที่ 1 แม่เหล็กไฟฟ้าและทฤษฎีแม่เหล็ก** **บทเรียนที่ 2**
แม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐาน **บทเรียนที่ 3 วงจรแม่เหล็ก** **บทเรียนที่ 4 พื้นฐานเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง**
บทเรียนที่ 5 เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง **บทเรียนที่ 6 อาร์เมเจอร์รีแอ็กชันและคอมมิวเทชัน** **บทเรียน**
ที่ 7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง **บทเรียนที่ 8 คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง**
บทเรียนที่ 9 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเบื้องต้น **บทเรียนที่ 10 การหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง**
บทเรียนที่ 11 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และ**บทเรียนที่ 12 สปีดเรกูเลชันและการบำรุง**
รักษา

หนังสือเล่มนี้มีเนื้อหาที่ทันสมัย ตามแผนการพัฒนาศึกษาด้านวิชาชีพ ซึ่งสอดคล้องกับ
ยุทธศาสตร์ชาติและแผนการศึกษาแห่งชาติ เพื่อให้ผู้เรียนมีผลลัพธ์การเรียนรู้และสมรรถนะตามมาตรฐาน
ฝีมือแรงงานแห่งชาติ กรมพัฒนาฝีมือแรงงาน สาขาอาชีพช่างไฟฟ้าอุตสาหกรรม ระดับ 1

นฤพนธ์ นุตเจริญกุล
สายัณต์ ชื่นอารมย์

สารบัญ



บทเรียนที่ 1 แม่เหล็กไฟฟ้าและทฤษฎีแม่เหล็ก

1

1.1 สนามแม่เหล็ก.....	2
1.2 การเกิดสนามแม่เหล็ก.....	3
1.3 สนามแม่เหล็กกรอบขดลวด.....	5
1.4 การเหนี่ยวนำ.....	6
1.5 ความหนาแน่นและความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	7
ใบงานที่ 1.1 สมบัติแม่เหล็ก.....	11
ใบงานที่ 1.2 การเหนี่ยวนำ.....	13
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 1.....	15



บทเรียนที่ 2 แม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐาน

18

2.1 ความซึมซาบได้.....	19
2.2 ความต้านทานแม่เหล็ก.....	24
2.3 วงจรแม่เหล็ก.....	26
ใบกิจกรรมที่ 2.1 ความซึมซาบได้.....	28
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 2.....	31



บทเรียนที่ 3 วงจรแม่เหล็ก

33

3.1 ฮิสเตอร์ซิส.....	34
3.2 วงจรแม่เหล็ก.....	36
3.3 การคำนวณวงจรแม่เหล็กอนุกรม.....	37
3.4 การคำนวณวงจรแม่เหล็กขนาน.....	40
ใบกิจกรรมที่ 3.1 วงจรแม่เหล็ก.....	44
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 3.....	49



บทเรียนที่ 4 พื้นฐานเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง

51

4.1 ความหมายและชนิดของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง.....	52
4.2 กฎของเลนซ์.....	56
4.3 แรงภายในตัวนำเดี่ยว.....	57
ใบกิจกรรมที่ 4.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (1)	61
ใบกิจกรรมที่ 4.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (2)	64
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 4.....	66



บทเรียนที่ 5 เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง

69

5.1 โครงสร้าง.....	70
5.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวด.....	75
5.3 การทำงานของคอมมิวเตเตอร์.....	77
5.4 แปรรงถ่าน.....	78
5.5 คอมมิวเทชัน.....	79
5.6 ขดลวดอาร์เมเจอร์.....	80
ใบงานที่ 5.1 ถอดและประกอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก.....	84
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 5.....	86



บทเรียนที่ 6 อาร์เมเจอร์และคอมมิวเทชัน

89

6.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	90
6.2 ตัวเลขและพิตช์.....	92
6.3 การพันขดลวดแบบซิมเพล็กซ์แลป.....	94
6.4 การพันขดลวดแบบแลป.....	100
6.5 การพันขดลวดแบบซิมเพล็กซ์เวฟ.....	101
6.6 การพันขดลวดแบบเวฟ.....	105
6.7 อาร์เมเจอร์รีแอ็กชัน.....	106
6.8 คอมมิวเทชัน.....	109
ใบกิจกรรมที่ 6.1 การพันขดลวดอาร์เมเจอร์.....	115
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 6.....	118



บทเรียนที่ 7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

121

7.1 วงจรเทียบเคียง.....	122
7.2 ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	123
7.3 สมการของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	127
7.4 แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้ว.....	132
ใบกิจกรรมที่ 7.1 ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	139
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 7.....	141



บทเรียนที่ 8 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

145

8.1 โวลเตจเรกูเลชัน.....	146
8.2 ประสิทธิภาพ.....	147
8.3 การสูญเสีย.....	147
8.4 คุณลักษณะ.....	148
ใบงานที่ 8.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกวงจร.....	165
ใบงานที่ 8.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขั้ว.....	168
ใบงานที่ 8.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบซีรีย์.....	170
ใบงานที่ 8.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบคอมพาวด์ชอร์ตขั้ว.....	172
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 8.....	174



บทเรียนที่ 9 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเบื้องต้น

177

9.1 ความรู้พื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	178
9.2 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	181
9.3 วงจรไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	182
ใบงานที่ 9.1 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขั้ว.....	190
ใบงานที่ 9.2 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบซีรีย์.....	193
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 9.....	196



บทเรียนที่ 10 การหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

199

10.1 พฤติการณ์เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง.....	200
10.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้าน.....	201
10.3 แรงบิด.....	208
10.4 อาร์เมเจอร์รีแอ็กชัน.....	215
10.5 การหมุน.....	217
ใบกิจกรรมที่ 10.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้านของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	220
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 10.....	224



บทเรียนที่ 11 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

226

11.1 คุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	227
11.2 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	238
ใบงานที่ 11.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	248
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 11.....	251



บทเรียนที่ 12 สปีดเรกูลേഷันและการบำรุงรักษา

254

12.1 สปีดเรกูลേഷัน.....	255
12.2 ประสิทธิภาพ.....	257
12.3 การบำรุงรักษา.....	261
ใบกิจกรรมที่ 12.1 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	264
แบบฝึกหัดบทเรียนที่ 12.....	267



คำศัพท์ประจำบทเรียน

270



บรรณานุกรม

276

บทเรียนที่ 1

แม่เหล็กไฟฟ้าและทฤษฎีแม่เหล็ก
ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับไฟฟ้า

หัวข้อหลัก

- 1.1 สนามแม่เหล็ก
- 1.2 การเกิดสนามแม่เหล็ก
- 1.3 สนามแม่เหล็กกรอบขดลวด
- 1.4 การเหนี่ยวนำ
- 1.5 ความหนาแน่นและความเข้มสนามแม่เหล็ก

สแกนเพื่อดู
e-book
4 ลี



ผลลัพธ์การเรียนรู้ระดับบทเรียน

ทดสอบและใช้งานสมบัติแม่เหล็ก และการเหนี่ยวนำในวงจรแม่เหล็ก



แนวคิดหลัก

แม่เหล็กไฟฟ้าหรือแม่เหล็กที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีหลักการ คือ การนำกระแสไฟฟ้าป้อนเข้าไปในขดลวดที่พันรอบแกนเหล็ก ทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กเหนี่ยวนำในขดลวด ส่งผลให้แกนเหล็กนั้นกลายเป็นแม่เหล็กชั่วคราวขณะเดียวกันจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบ ๆ แกนเหล็กนั้น

ทฤษฎีแม่เหล็กศึกษาเกี่ยวกับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก และความเข้มสนามแม่เหล็กส่งผลให้ทราบถึงสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำ



สมรรถนะการเรียนรู้

คำนวณหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้าได้ถูกต้อง



จุดประสงค์การเรียนรู้

1. อธิบายหลักการของการเหนี่ยวนำระหว่างแม่เหล็กและไฟฟ้าได้ถูกต้อง
2. อธิบายปรากฏการณ์เกี่ยวกับกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้ถูกต้อง
3. อธิบายอำนาจสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบขดลวดได้ถูกต้อง
4. คำนวณความหนาแน่นสนามแม่เหล็กได้ถูกต้อง



เนื้อหาสาระ

แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnets) หมายถึง อำนาจแม่เหล็กที่เกิดจากปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัตถุตัวนำ กล่าวคือ เมื่อมีการปล่อยให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัตถุตัวนำ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบ ๆ ตัวนำนั้น

แม่เหล็กที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า หมายถึง การนำกระแสไฟฟ้าป้อนเข้าไปในขดลวดที่พันรอบแกนเหล็ก (อำนาจสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น) ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด แกนเหล็กดังกล่าวจึงกลายเป็นแม่เหล็กชั่วคราว ขณะเดียวกันจึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบ ๆ แกนเหล็กนั้น ถ้ามีการเคลื่อนที่ของขดลวดอีกชุดหนึ่งตัดผ่านในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ก็จะส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีปริมาณเท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปล่อยออกมา

หลักการทฤษฎีแม่เหล็กและแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานไฟฟ้ากำลังที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกลไฟฟ้า ซึ่งหนังสือเล่มนี้พิจารณาไปที่เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current Machines or DC Machines)

เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ

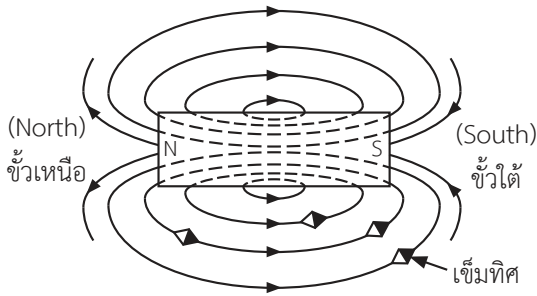
1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Generator)
2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเครื่องกลที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่ตรงกันข้ามกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง กล่าวคือ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล

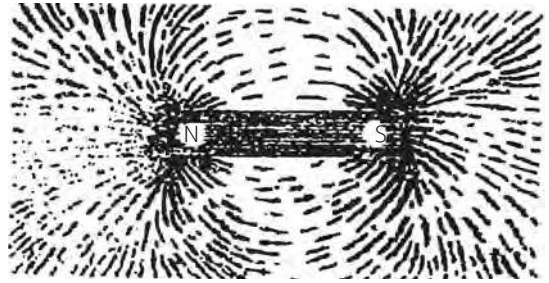
1.1

สนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) หมายถึง ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Fluxes) หลายเส้นที่เกิดขึ้นรอบ ๆ แท่งแม่เหล็ก (Magnet Bar) แสดงดังรูปที่ 1.1 ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กแต่ละเส้นจะไหลออกจากขั้วเหนือ (North Pole) ของแท่งแม่เหล็กไปหาขั้วใต้ (South Pole) ของแท่งแม่เหล็กไปครบวงจร (Close Loop) ที่ขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กอีกครั้ง โดยปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กบอกถึงแม่เหล็กกว่ามีการดูดหรือผลักมาก - น้อยต่างกัน กล่าวคือ แม่เหล็กที่มีแรงดึงดูดหรือแรงผลักมากจะทำให้มีปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ในทำนองตรงข้าม แม่เหล็กที่มีแรงดึงดูดหรือแรงผลักน้อยจะทำให้มีปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กลดลง



รูปที่ 1.1 สนามแม่เหล็กรอบ ๆ แท่งแม่เหล็ก

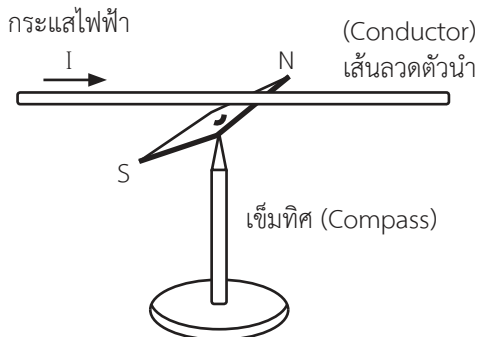


รูปที่ 1.2 ผงตะไบเหล็กรอบ ๆ แท่งแม่เหล็ก

เมื่อมีการทดสอบแม่เหล็กโดยใช้ผงตะไบเหล็กโรยรอบ ๆ แม่เหล็ก ดังรูปที่ 1.2 สังเกตเห็นการเรียงตัวผงตะไบเหล็กตามแนวทางเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างขั้วแม่เหล็กทั้งสอง กล่าวคือ บริเวณใกล้ขั้วแม่เหล็กทั้งเหนือและใต้จะมีผงตะไบเหล็กอัดแน่นมาก แสดงว่ามีสนามแม่เหล็กมากขึ้น แต่บริเวณที่ห่างขั้วแม่เหล็กทั้งสอง พบว่าผงตะไบเหล็กมีความหนาแน่นน้อยลง แสดงว่ามีสนามแม่เหล็กลดลง

1.2 การเกิดสนามแม่เหล็ก

ปี ค.ศ. 1820 นักวิทยาศาสตร์ชาวเดนมาร์กชื่อ **แฮนส์ คริสเตียน เออร์สเตด (Hans Christian Oersted)** ค้นพบปรากฏการณ์สำคัญ คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กรอบตัวนำนั้น กล่าวคือ เมื่อนำเส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปวางเหนือเข็มทิศ จะทำให้เข็มทิศเกิดการบ่ายเบนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาก็ได้ (เข็มทิศบ่ายเบนไปในตำแหน่งที่ตั้งฉากกับเส้นลวดตัวนำ) แสดงในรูปที่ 1.3 (ก) ขึ้นอยู่กับทิศทางกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเส้นลวดตัวนำ ส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Generates) ไฟฟ้าขึ้น นั่นหมายความว่า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ ย่อมทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำนั้น



(ก) เข็มทิศบ่ายเบนในตำแหน่งที่ตั้งฉากกับเส้นลวดตัวนำ



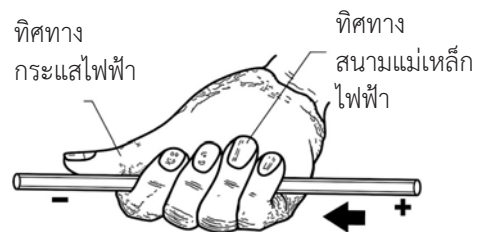
(ข) เส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าซึ่งทางถูกแสดงด้วยเครื่องหมายกากบาท

รูปที่ 1.3 เออร์สเตดค้นพบปรากฏการณ์กระแสไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

กรณีที่ยึดตามความยาวเส้นลวดตัวนำเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลเข้า (ไหลจากผู้เรียนเข้าไปในกระดาษ) แสดงด้วยเครื่องหมายกากบาท $\otimes$ ดังรูปที่ 1.3 (ข) พบว่า สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีทิศทางการหมุนวนตามเข็มนาฬิกา และเส้นประวงกลมแสดงเส้นแรงแม่เหล็กรอบ ๆ ตัวนำ

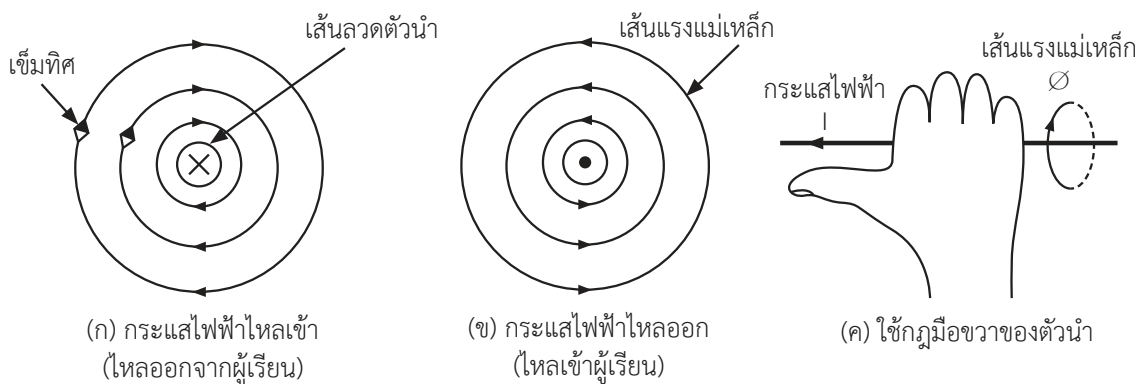
หัวลูกศรที่ใช้ในวงจรไฟฟ้า มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าไปตามความยาวสายไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อต้องการแสดงภาพพื้นที่หน้าตัดสายไฟฟ้ากรณีที่มีทิศทางกระแสไฟฟ้า มีลักษณะไหลเข้า (ไหลออกจากผู้เรียน) จะใช้เครื่องหมายกากบาท $\otimes$ (Cross) แทนหัวลูกศร แต่ถ้าต้องการแสดงภาพพื้นที่หน้าตัดสายไฟฟ้ากรณีที่มีทิศทางกระแสไฟฟ้ามีลักษณะไหลออก (ไหลเข้าผู้เรียน) จะใช้เครื่องหมายจุด $\odot$ (Dot) แทนหัวลูกศร

ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางกระแสไฟฟ้า ในเส้นลวดตัวนำกับทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กรอบ ๆ เส้นลวดตัวนำ อธิบายได้โดยใช้กฎมือขวาของตัวนำ (Righthand Rule of Conductor) แสดงในรูปที่ 1.4 และรูปที่ 1.5 กล่าวคือ ทิศทางกระแสไฟฟ้ามาจากหัวแม่มือ และทิศทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบ ๆ เส้นลวดตัวนำมาจากปลายมือทั้งสี่ที่กำรอบตัวนำ

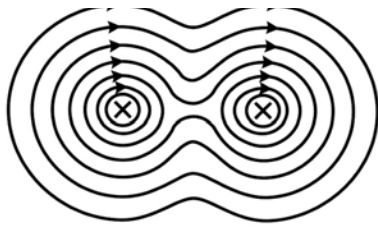


รูปที่ 1.4 กฎมือขวาของตัวนำ

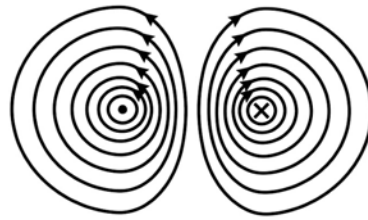
อย่างไรก็ตาม อำนาจสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีปริมาณมากขึ้นหรือน้อยลงขึ้นอยู่กับทิศทางกระแสไฟฟ้าเป็นสำคัญ กล่าวคือ เมื่อนำเส้นลวดตัวนำ 2 เส้นที่มีกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวกัน (ปริมาณกระแสไฟฟ้ามากขึ้น) วางใกล้กันดังรูปที่ 1.6 (ก) พบว่า ทิศทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารอบตัวนำทั้งสองมีทิศทางเดียวกัน อำนาจสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการดึงดูดลวดตัวนำทั้งสองเส้นเคลื่อนที่เข้าหากัน



รูปที่ 1.5 ทิศทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบตัวนำ



(ก) ทิศทางสนามแม่เหล็กรอบตัวนำทั้งสอง
มีทิศทางเดียวกัน



(ข) ทิศทางสนามแม่เหล็กรอบตัวนำทั้งสอง
มีทิศทางตรงกันข้าม

รูปที่ 1.6 อำนาจสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับทิศทางกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ

กรณีที่นำเส้นลวดตัวนำ 2 เส้นที่มีกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางตรงกันข้าม (ปริมาณกระแสไฟฟ้าน้อยลง) วางใกล้กันดังรูปที่ 1.6 (ข) ทำให้ผลรวมเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าวัดตัวนำทั้งสองมีความหนาแน่นมากตรงช่องระหว่างลวดตัวนำทั้งสองเส้น จึงทำให้เกิดแรงผลักระหว่างกันและกัน ส่งผลให้ลวดตัวนำทั้งสองเส้นแยกตัวออกจากกัน

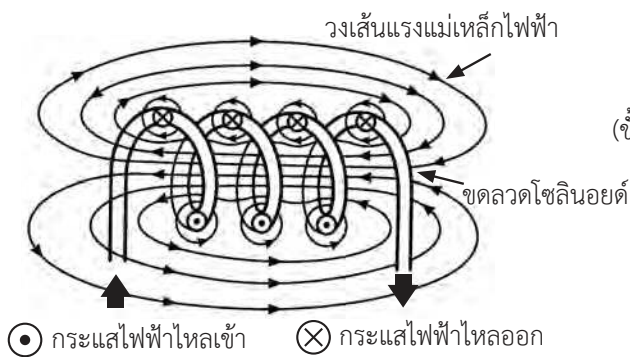
บทสรุปคือ เมื่อนำตัวนำ 2 ชุดวางขนานกันแล้วมีกระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางเดียวกัน จะเกิดแรงดูดซึ่งกันและกัน ในทำนองตรงกันข้าม เมื่อนำตัวนำ 2 ชุดวางขนานกันแล้วกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางตรงข้ามกัน จะเกิดแรงผลักซึ่งกันและกัน

1.3 สนามแม่เหล็กรอบขดลวด

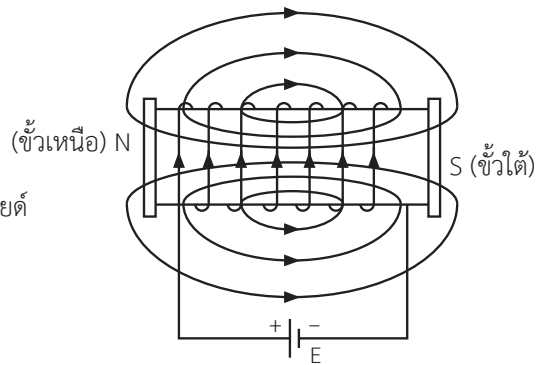
เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ซึ่งอำนาจสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบ ๆ เส้นลวดตัวนำจะเกิดขึ้นทุกจุดตลอดความยาวของเส้นลวดตัวนำ

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยวงจรแม่เหล็กไฟฟ้าซ้อนกันหลายวง โดยมีจุดศูนย์กลางร่วมกันคือ เส้นลวดตัวนำ กรณีที่นำเส้นลวดตัวนำพันเป็นขดลวดโซลินอยด์ (Solenoid) แกนอากาศดังรูปที่ 1.7 แล้วนำปลายทั้งสองของขดลวดต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตามทิศทางที่แสดงไว้ ลักษณะเช่นนี้จึงส่งผลให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดแต่ละรอบจะคล้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของรอบที่อยู่ติดกัน ส่งผลให้ผลรวมเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าทุกรอบทั้งหมดดังกล่าว ทำให้ขดลวดโซลินอยด์กลายเป็นแม่เหล็กถาวร โดยปลายด้านซ้ายของขดลวดเป็นขั้วเหนือ ส่วนปลายที่เหลือของขดลวดเป็นขั้วใต้

พิจารณารูปที่ 1.8 แสดงการพันขดลวดรอบแกนเหล็ก แล้วต่อปลายขดลวดเข้ากับแบตเตอรี่ E แกนเหล็กจะมีคุณสมบัติคล้ายแม่เหล็กถาวร หัวลูกศรแสดงทิศทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ทำให้ปลายแกนเหล็กด้านซ้ายเป็นขั้วเหนือ ส่วนปลายเหล็กอีกข้างหนึ่งเป็นขั้วใต้ แต่ถ้าเกิดการกลับทิศทางกระแสไฟฟ้าในขดลวด (กลับขั้วแบตเตอรี่) จะส่งผลให้ทิศทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีทิศทางตรงกันข้ามกับของเดิม กล่าวคือ ปลายแกนเหล็กด้านซ้ายที่เป็นขั้วเหนือก็จะกลายเป็นขั้วใต้ และปลายแกนเหล็กด้านขวาที่เป็นขั้วใต้ก็จะกลายเป็นขั้วเหนือ

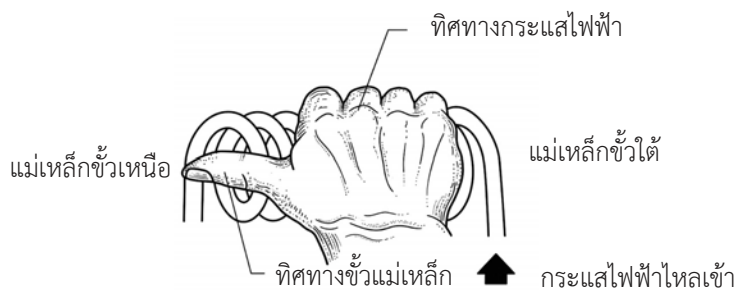


รูปที่ 1.7 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 1.8 กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

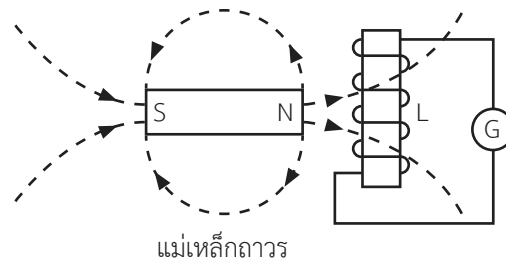
เมื่อทราบทิศทางกระแสไฟฟ้าที่ไหลได้ในขดลวด สามารถหาขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้โดยใช้กฎมือขวาของขดลวด (Righthand Rule for Coil) ดังรูปที่ 1.9 ซึ่งกล่าวว่า ให้กำขดลวดด้วยมือขวา โดยให้นิ้วทั้งสี่ (นิ้วชี้ นิ้วกลาง นิ้วนาง และนิ้วก้อย) ชี้ทิศทางกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด นิ้วหัวแม่มือให้ยื่นออกไปแล้วขนานกับแกนขดลวดจะชี้ไปทางแม่เหล็กขั้วเหนือ (ทิศทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในขดลวด) ส่วนปลายขดลวดที่เหลือจะเป็นแม่เหล็กขั้วโลกใต้



รูปที่ 1.9 ใช้กฎมือขวาหาขั้วแม่เหล็ก

1.4 การเหนี่ยวนำ

ปี ค.ศ. 1831 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ค้นพบหลักการเหนี่ยวนำ (Induction) ของแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นการนำปลายขดลวด L ต่อเข้ากับแอมมิเตอร์ที่มีความไวสูง (High Sensitive Ammeter) หรือกัลวานอมิเตอร์ (Galvanometer) แสดงดังรูปที่ 1.10 จากนั้นนำแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) เคลื่อนที่เข้าใกล้ขดลวด L พบว่า เข็มของกัลวานอมิเตอร์จะบ่ายเบนไปในทิศทางใดทางหนึ่ง (สมมติเคลื่อนที่ทางซ้ายบนหน้าปัดกัลวานอมิเตอร์) แสดงว่าเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด L แต่ถ้าหลังจากการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กถาวรหยุดลง เข็มของกัลวานอมิเตอร์จะกลับมายังที่ศูนย์ตามเดิม



รูปที่ 1.10 ทดลองหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวด

ในกรณีตรงกันข้าม ถ้านำขั้วแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ออกจากขดลวด L เข็มของกัลวานอมิเตอร์จะบ่ายเบนในทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรก (เคลื่อนที่ทางขวาบนหน้าปัดกัลวานอมิเตอร์) แสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด L มีทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรกเช่นกัน

อย่างไรก็ตาม ถ้าจับขั้วแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง เข็มของกัลวานอมิเตอร์ก็จะบ่ายเบนมาก ส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด L ก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย

ผลการทดลองของไมเคิล ฟาราเดย์ เกี่ยวกับการหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดสรุปได้ดังนี้คือ

1. เมื่อลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดเส้นแรงแม่เหล็ก (หรือเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดลวดตัวนำ) จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในลวดตัวนำ
2. ทิศทางแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับทิศทางสนามแม่เหล็กและทิศทางลวดตัวนำซึ่งเคลื่อนที่สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก
3. ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วที่ลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดหรือถูกตัดโดยเส้นแรงแม่เหล็ก

การศึกษาวงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit) เป็นการเรียนรู้แนวหรือเส้นทางที่เส้นแรงแม่เหล็กส่วนใหญ่ไหลผ่าน ได้แก่ ส่วนที่เป็นอากาศและส่วนที่เป็นสารแม่เหล็ก ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนที่ไม่ไหลตามทิศทางที่กำหนด เรียกว่า **เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage Flux)**

1.5

ความหนาแน่นและความเข้มสนามแม่เหล็ก

การกำหนดพื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่าน จะทำให้ทราบปริมาณที่แน่นอนของเส้นแรงแม่เหล็ก เรียกว่า **ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density)** มีหน่วยเป็นเทสลา (Tesla, T) หรือ เวเบอร์ (Weber) ต่อตารางเมตร (m^2) เขียนว่า (Wb/m^2)

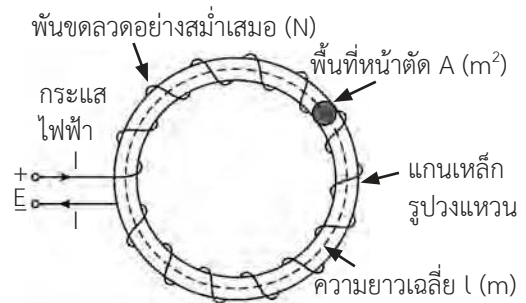
กำหนด A คือ พื้นที่หน้าตัดวงจรมแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

B คือ สนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา (T)

Φ คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์ (Wb)

$$\text{จะได้ } B = \frac{\Phi}{A} \quad \dots\dots\dots(1.1)$$

พิจารณารูปที่ 1.11 แสดงวงจรขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กทรงปวงแหวน (Toroid) แล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไป ทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force) หรือ m.m.f ส่งผลให้เกิดความสามารถในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดขึ้น โดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กนี้เป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้า (I) ที่ไหลผ่านขดลวดกับจำนวนรอบ (N) ของขดลวด ซึ่งแรงเคลื่อนแม่เหล็กมีหน่วยเป็นแอมแปร์ - เทิร์นส์



รูปที่ 1.11 วงจรขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กทรงปวงแหวน

- กำหนด I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)
 N คือ จำนวนรอบขดลวด มีหน่วยเป็นรอบ (Turns) หรือเทิร์นส์ (t)
 F คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นแอมแปร์ - เทิร์นส์ (At)

$$\text{จะได้ } F = N \times I \quad \dots\dots\dots(1.2)$$

ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity) เรียกอีกอย่างว่า **แรงแม่เหล็ก (Magnetising Force)** หมายถึง แรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวของวงจรแม่เหล็ก ซึ่งวงจรแม่เหล็กที่มีเส้นแรงแม่เหล็กสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 1.11 จะมีค่าของแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวคงที่ตลอดแนวของเส้นแรงแม่เหล็กนั้น ทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ตลอดแนวของเส้นแรงแม่เหล็กนั้นด้วย โดยหน่วยของความเข้มสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นแอมแปร์ - เทิร์นส์/เมตร (At/m)

- กำหนดให้ l คือ ความยาวของวงจรแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเมตร (m)
 H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นแอมแปร์ - เทิร์นส์/เมตร (At/m)

$$\text{จะได้ } H = \frac{F}{l} = \frac{N \times I}{l} \quad \dots\dots\dots(1.3)$$

ตัวอย่างที่ 1.1 จงคำนวณหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อใช้ผลิตเส้นแรงแม่เหล็ก 0.012 Wb ส่งข้ามช่องว่างอากาศยาว 1.75 mm มีพื้นที่ยังผล (Effective Area) 150 cm²

วิธีทำ

- พื้นที่ช่องว่างอากาศ (A) = 150 cm²
 ความยาว 1 m = 100 cm
 พื้นที่ 1 m² = 100 × 100 cm² = 10,000 cm²
 จาก 10,000 cm² = 1 m²

$$\text{พื้นที่ช่องว่างอากาศ } 150 \text{ cm}^2 = \frac{150}{10,000} \text{ m}^2 = 0.015 \text{ m}^2$$

$$\text{จะได้ } A = 0.015 \text{ m}^2$$

$$2. \text{ โจทย์กำหนดเส้นแรงแม่เหล็ก } (\Phi) = 0.012 \text{ Wb}$$

$$3. \text{ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก } (B) = \frac{\Phi}{A} = \frac{0.012}{0.015}$$

$$B = 0.80 \text{ T}$$

ดังนั้น ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 0.80 T

ตอบ

ตัวอย่างที่ 1.2 ขดลวดชุดหนึ่งมี 220 รอบ ถูกพันอย่างสม่ำเสมอรอบวงแหวนไม้ที่มีความยาวของเส้นรอบวง 80 cm วงแหวนไม้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอด 6 cm² จงหาความเข้มสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด 3 A

วิธีทำ

$$1. \text{ ความยาวเส้นรอบวงของวงแหวนไม้ } (l) = 80 \text{ cm} = 0.8 \text{ m}$$

$$2. \text{ โจทย์กำหนด ขดลวดมี 220 รอบ } (N = 220)$$

$$\text{กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด } 3 \text{ A } (I = 3 \text{ A})$$

$$3. \text{ ความเข้มสนามแม่เหล็ก } (H) = \frac{N \times I}{l} = \frac{220 \times 3}{0.8}$$

$$H = 825 \text{ At/m}$$

ดังนั้น ขดลวดชุดนี้มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเท่ากับ 825 At/m

ตอบ



สรุปสาระสำคัญ

- แม่เหล็กไฟฟ้า หมายถึง อำนาจแม่เหล็กที่เกิดจากปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัตถุตัวนำ กล่าวคือ เมื่อมีการปล่อยให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัตถุตัวนำ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบ ๆ ตัวนำนั้น
- เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง มี 2 แบบ คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเครื่องกลที่เปลี่ยนจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะทำหน้าที่ตรงข้ามกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง กล่าวคือ จะเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล
- สนามแม่เหล็ก หมายถึง ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กหลายเส้นที่เกิดขึ้นรอบ ๆ แท่งแม่เหล็ก
- เออร์สเตดค้นพบปรากฏการณ์สำคัญ คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบตัวนำนั้น และเมื่อนำเส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปวางเหนือเข็มทิศ

6. อำนาจสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับทิศทางกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ โดยเมื่อนำเส้นลวดตัวนำ 2 ชุด วางขนานกัน แล้วทำให้กระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวกัน จะเกิดแรงดูดซึ่งกันและกัน แต่ถ้าเมื่อนำเส้นลวดตัวนำ 2 ชุด วางขนานกันแล้วทำให้กระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางตรงข้ามกันจะเกิดแรงผลักซึ่งกันและกัน

7. เมื่อปล่อยปริมาณกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านเส้นลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยอำนาจสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำ จะเกิดขึ้นทุกจุดตลอดความยาวของเส้นลวดตัวนำ ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบด้วยวงจรแม่เหล็กไฟฟ้าซ้อนกันหลายวง และมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน คือ เส้นลวดตัวนำ

8. ไมเคิล ฟาราเดย์ ค้นพบหลักการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นการนำแท่งแม่เหล็กขั้วเหนือและขั้วใต้จำนวน 1 แท่ง (แม่เหล็กถาวร) มาวางใกล้กับขดลวดตัวนำ โดยปลายของขดลวดตัวนำทั้งสองต่อเข้ากับแอมมิเตอร์ พบว่าเข็มของแอมมิเตอร์จะบ่ายเบนไปในทิศทางใดทางหนึ่ง นั่นคือเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดตัวนำ

9. สนามแม่เหล็ก (B) มาจากอัตราส่วนระหว่างเส้นแรงแม่เหล็ก (Φ) ต่อพื้นที่หน้าตัดวงจรแม่เหล็ก (A) นั่นคือ $B = \frac{\Phi}{A}$

10. แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (F) มาจากผลคูณระหว่างจำนวนรอบของขดลวด (N) กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด (I) นั่นคือ $F = N \times I$

11. ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) มาจากอัตราส่วนระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อความยาวของวงจรแม่เหล็ก (l) นั่นคือ $H = \frac{F}{l} = \frac{N \times I}{l}$



ใบงานที่ 1.1 สมบัติแม่เหล็ก

ชื่อ - สกุล..... สาขา/ชั้น/กลุ่ม.....
วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....เวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที กำหนดส่งงาน.....



ผลลัพธ์การปฏิบัติ

ทดสอบสมบัติแม่เหล็ก



จุดประสงค์การเรียนรู้

1. ทดสอบวัตถุที่ทำจากเหล็กด้วยแม่เหล็กได้ถูกต้อง
2. ทดสอบวัตถุที่ไม่ใช่เหล็กด้วยแม่เหล็กได้ถูกต้อง
3. ทดสอบขั้วแม่เหล็กและทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองชุดได้ถูกต้อง

แบบประเมินผล
ใบงานที่ 1.1



เครื่องมือและอุปกรณ์

- | | | | |
|--------------------|--------|--------------------|--------|
| 1. แท่งแม่เหล็กแบน | 2 แท่ง | 4. เข็มหมุด | 1 อัน |
| 2. แท่งพลาสติก | 1 แท่ง | 5. คลิปหนีบกระดาษ | 1 อัน |
| 3. ตะปู | 1 ตัว | 6. กระดาษแข็งสีขาว | 1 แผ่น |



ขั้นตอนการปฏิบัติ

1. นำแท่งแม่เหล็กแบนวางใกล้กับวัตถุที่ทำจากเหล็ก ได้แก่ ตะปู คลิปหนีบกระดาษ และเข็มหมุด แม่เหล็กจะ.....(ดูด/ไม่ดูด) กับวัตถุที่ทำจากเหล็กดังกล่าว
2. นำแท่งแม่เหล็กแบนวางเข้าใกล้แท่งพลาสติก สังเกตว่าแม่เหล็กดูดหรือไม่.....
3. วัตถุที่แม่เหล็กดูด คือ.....แสดงว่าสิ่งเหล่านี้เป็น..... และวัตถุที่แม่เหล็กไม่ดูด คือ.....แสดงว่าสิ่งเหล่านี้เป็น.....
4. นำแท่งแม่เหล็กชุดที่ 1 วางกับกระดาษแข็ง นำแท่งแม่เหล็กชุดที่ 2 อีกข้างหนึ่งวางใกล้ ๆ โดยหันขั้วเหนือเข้าหากัน ดังรูปที่ 1.1.1 แม่เหล็กทั้ง 2 ชุดจะ (ดูดกัน/ผลักกัน) บันทึกผลการทดลองลงในตารางที่ 1.1.1



รูปที่ 1.1.1 นำแท่งแม่เหล็กขั้วเหนือทั้งสองเข้าหากัน

5. วางแท่งแม่เหล็กชุดที่ 1 ไว้อย่างเดิม แล้วหันขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็กชุดที่ 2 วางใกล้กับขั้วเหนือของแม่เหล็กชุดที่ 1 ดังรูปที่ 1.1.2 แม่เหล็กทั้ง 2 ชุดจะ(ดูดกัน/ผลักกัน) บันทึกผลการทดลองลงในตารางที่ 1.1.1



รูปที่ 1.1.2 วางขั้วเหนือของแม่เหล็กชุดที่ 1 ใกล้กับขั้วใต้ของแม่เหล็กชุดที่ 2

6. วางขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็กชุดที่ 1 ใกล้กับขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็กชุดที่ 2 ดังรูปที่ 1.1.3 แม่เหล็กทั้ง 2 ชุดจะ(ดูดกัน/ผลักกัน) บันทึกผลการทดลองลงในตารางที่ 1.1.1



รูปที่ 1.1.3 วางขั้วใต้ของแม่เหล็กทั้งสองชุดใกล้กัน

ตารางที่ 1.1.1 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างแท่งแม่เหล็ก 1 กับแท่งแม่เหล็ก 2

การวางแท่งแม่เหล็ก 1 กับแท่งแม่เหล็ก 2	ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น (ดูดกัน/ผลักกัน)
1. นำแท่งแม่เหล็กขั้วเหนือทั้งสองเข้าหากัน	
2. ขั้วเหนือของแม่เหล็กชุดที่ 1 ใกล้กับขั้วใต้ของแม่เหล็กชุดที่ 2	
3. นำแท่งแม่เหล็กขั้วใต้ทั้งสองเข้าหากัน	



คำถามท้ายการปฏิบัติ

- แม่เหล็กจะดูดกันได้เกิดจากสาเหตุอะไร
- แม่เหล็กจะผลักกันได้เกิดจากสาเหตุอะไร



สรุปผลการปฏิบัติ

.....

.....

.....



ใบงานที่ 1.2

การเหนี่ยวนำ

ชื่อ - สกุล..... สาขา/ชั้น/กลุ่ม.....
วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....เวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที กำหนดส่งงาน.....



ผลลัพธ์การปฏิบัติ

ประกอบชิ้นส่วนและทดสอบใช้วงจรเหนี่ยวนำด้วยความรอบคอบ ปลอดภัย และมีความรับผิดชอบ



จุดประสงค์การเรียนรู้

1. สาธิตการต่อวงจรการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้าได้ถูกต้อง
2. ทดสอบการนำแท่งแม่เหล็กถาวรพุ่งเข้าที่แกนกลางของขดลวดเหนี่ยวนำ
3. ทดสอบการนำแท่งแม่เหล็กถาวรพุ่งออกจากแกนกลางของขดลวดเหนี่ยวนำ



เครื่องมือและอุปกรณ์

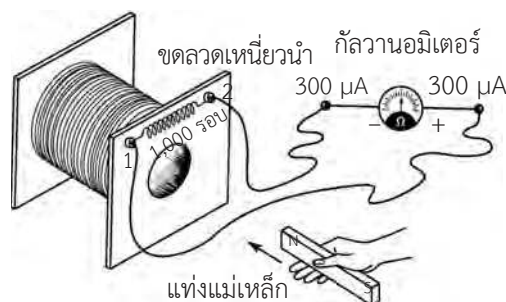
- | | |
|-----------------------------------|--------|
| 1. ขดลวดเหนี่ยวนำชุดตุ๊กตุงูมิ | 1 ชุด |
| 2. แท่งแม่เหล็กถาวร | 1 แท่ง |
| 3. กัลวานอมิเตอร์ $\pm 300 \mu A$ | 1 ตัว |
| 4. สายต่อวงจร | 2 เส้น |

แบบประเมินผล
ใบงานที่ 1.2



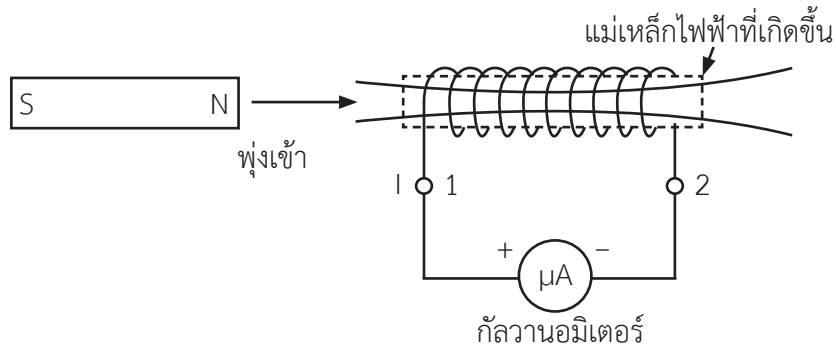
ขั้นตอนการปฏิบัติ

1. ต่อวงจรตามรูปที่ 1.2.1



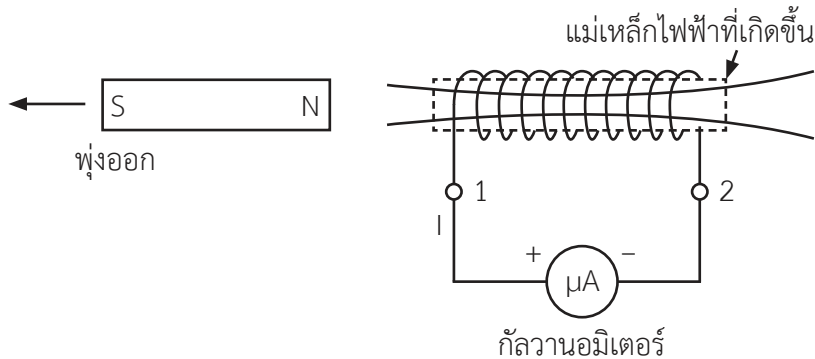
รูปที่ 1.2.1 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า

2. นำขั้วเหนือแท่งแม่เหล็กถาวรพุ่งเข้าหาแกนกลางของขดลวดเหนี่ยวนำ สังเกตเข็มของกัลวานอมิเตอร์.....(ป้ายเบนทางซ้าย/ป้ายเบนทางขวา) แล้วใส่ทิศทางการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำลงในรูปที่ 1.2.2



รูปที่ 1.2.2 แม่เหล็กขั้วเหนือพุ่งเข้าหาแกนกลางขดลวด

3. นำขั้วเหนือแท่งแม่เหล็กถาวรพุ่งออกจากแกนกลางของขดลวดเหนี่ยวนำ สังเกตเข็มของกัลวานอมิเตอร์ (ป้ายเบนทางซ้าย/ป้ายเบนทางขวา) แล้วใส่ทิศทางการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กในรูปที่ 1.2.3



รูปที่ 1.2.3 แม่เหล็กขั้วเหนือพุ่งออกจากแกนกลางขดลวด



คำถามท้าทายการปฏิบัติ

1. กัลวานอมิเตอร์ที่ป้ายเบนได้ เกิดจากสาเหตุอะไร
2. แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นได้อย่างไร



สรุปผลการปฏิบัติ

.....

.....

.....

.....

.....

แบบฝึกหัดบทเรียนที่

1



ตอนที่ 1 จงตอบคำถามต่อไปนี้

1. แรงเคลื่อนแม่เหล็กของวงจรถดลวดที่พันรอบแกนเหล็กวงแหวนเกิดขึ้นได้อย่างไร
2. แม่เหล็กที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าหมายถึงอะไร
3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแตกต่างจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอย่างไร
4. ขดลวด 145 รอบ ถูกพันสมำเสมอรอบวงแหวนพลาสติก มีความยาวเส้นรอบวงเท่ากับ 50 cm วงแหวนพลาสติกมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอดเท่ากับ 10 cm^2 จงหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดเท่ากับ 10 A
5. จงคำนวณหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อใช้ผลิตเส้นแรงแม่เหล็กขนาด 0.05 Wb ส่งข้ามช่องว่างอากาศยาว 2.75 mm มีพื้นที่ยังผล 250 cm^2



ตอนที่ 2 จงเลือกคำตอบที่ถูกต้องที่สุดเพียงคำตอบเดียว

1. แท่งแม่เหล็กจะดูดหรือผลักกันขึ้นอยู่กับข้อใด
 - ก. ความเข้มสนามแม่เหล็ก
 - ข. ขั้วเหนือกับขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็ก
 - ค. ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็ก
 - ง. ความเข้มสนามแม่เหล็กกับปริมาณเส้นแรงแม่เหล็ก
2. แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดเกิดขึ้นได้อย่างไร
 - ก. เกิดจากการนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าป้อนเข้าไปในขดลวดที่พันรอบแกนอากาศ
 - ข. เกิดจากการนำกระแสไฟฟ้าป้อนเข้าไปในขดลวดที่พันรอบแกนอากาศ
 - ค. เกิดจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวด
 - ง. เกิดจากการนำกระแสไฟฟ้าป้อนเข้าไปในขดลวดที่พันรอบแกนเหล็ก
3. ขดลวดชุดหนึ่งมี 6,000 รอบ ถูกพันสมำเสมอรอบวงแหวนไม้ที่มีความยาวเส้นรอบวง 80 cm วงแหวนไม้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอด 6 cm^2 จงหาความเข้มสนามแม่เหล็ก เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดเท่ากับ 1.65 A
 - ก. 12,374 At/m
 - ข. 12,375 At/m
 - ค. 12,376 At/m
 - ง. 12,377 At/m

แบบทดสอบ
คุณาน

4. ข้อใดกล่าว**ไม่ถูกต้อง**จากการทดลองของไมเคิล ฟาราเดย์ เกี่ยวกับการหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวด
- ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นสัดส่วนผกผันกับความเร็วที่ขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดหรือถูกตัดโดยเส้นแรงแม่เหล็ก
 - เส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดลวดตัวนำ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในลวดตัวนำ
 - ทิศทางแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับทิศทางสนามแม่เหล็กและทิศทางลวดตัวนำซึ่งเคลื่อนที่สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก
 - ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วที่ลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดโดยเส้นแรงแม่เหล็ก
5. ข้อใดกล่าวถูกต้องเกี่ยวกับการใช้กฎมือขวาหาขั้วแม่เหล็ก
- กำขดลวดด้วยมือขวา นิ้วชี้และนิ้วกลางชี้ทิศทางกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด
 - กำขดลวดด้วยมือขวา นิ้วหัวแม่มือชี้ไปทางแม่เหล็กขั้วเหนือ
 - กำขดลวดด้วยมือซ้าย นิ้วหัวแม่มือชี้ไปทางแม่เหล็กขั้วใต้
 - กำขดลวดด้วยมือขวา นิ้วหัวแม่มือชี้ไปทางแม่เหล็กขั้วเหนือ
6. การกำหนดพื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่าน ทำให้ทราบปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่แน่นอน มีความหมายตรงกับข้อใด
- พื้นที่หน้าตัดของวงจรมแม่เหล็ก
 - ความเข้มสนามแม่เหล็ก
 - ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด
 - ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก
7. แรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวของวงจรมแม่เหล็กหมายถึงอะไร
- ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก
 - ปริมาตรของสนามแม่เหล็ก
 - ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็ก
 - ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากข้อมูลนี้จงตอบคำถามข้อ 8 - 9

พื้นที่ยังผล 120 cm^2 ใช้เพื่อผลิตเส้นแรงแม่เหล็ก 35 mWb ส่งข้ามช่องว่างอากาศยาว 17.5 mm

8. พื้นที่ช่องว่างอากาศมีกี่ตารางเมตร
- 0.12 m^2
 - 0.012 m^2
 - 0.0012 m^2
 - 0.00012 m^2
9. ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่าไร
- 2.90 T
 - 2.91 T
 - 2.92 T
 - 2.93 T

10. ความเข้มสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับอะไร

- ก. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดรอบแกนเหล็ก และความยาววงจรมแม่เหล็ก
- ข. ความยาววงจรมแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้า และจำนวนรอบขดลวด
- ค. จำนวนรอบขดลวดที่พันบนแกนเหล็ก และความยาววงจรมแม่เหล็ก
- ง. ความยาววงจรมแม่เหล็ก แรงเคลื่อนแม่เหล็ก และจำนวนรอบขดลวด



ตอนที่ 3 จงอธิบายคำศัพท์ต่อไปนี้

1. Electromagnets
2. Magnetic Flux
3. Field Lines
4. Righthand Rule of Conductor
5. Magnetic Flux Density
6. Magnetomotive Force
7. Magnetising Force
8. Solenoid Wire
9. Magnet Bar
10. North Pole and South Pole

บทเรียนที่ 2

แม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐาน
ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับไฟฟ้า

หัวเรื่องหลัก

2.1 ความซึมซาบได้

2.2 ความต้านทานแม่เหล็ก

2.3 วงจรแม่เหล็ก



ผลลัพธ์การเรียนรู้ระดับบทเรียน

ประยุกต์ใช้ความรู้เกี่ยวกับแม่เหล็กไฟฟ้าพื้นฐานในการแก้ปัญหา



แนวคิดหลัก

ความซึมซาบได้ หมายถึง คุณสมบัติตัวกลางที่จะยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านเข้าไปได้ง่ายหรือยาก มี 2 ชนิด คือ ความซึมซาบได้ของสุญญากาศ และความซึมซาบได้สัมพัทธ์ ความต้านทานแม่เหล็กของวงจรแม่เหล็กจะมีปริมาณมากขึ้นหรือน้อยลง ขึ้นอยู่กับเส้นแรงแม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้า คือ วงจรแม่เหล็กจะอาศัยเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กถูกสร้างขึ้นครั้งหนึ่งแล้ว ระบบแม่เหล็กก็ไม่ต้องการพลังงานอีกต่อไป ส่วนวงจรไฟฟ้าจะต้องใช้พลังงานเพื่อรักษาการไหลของกระแสไฟฟ้าไว้ในวงจรตลอดเวลา



สมรรถนะการเรียนรู้

คำนวณหาความต้านทานแม่เหล็กจากวงจรแม่เหล็ก ขยายความและอธิบายเกี่ยวกับความซึมซาบได้และความซึมซาบได้สัมพัทธ์



จุดประสงค์การเรียนรู้

1. อธิบายความหมายของความซึมซาบของสุญญากาศ และความซึมซาบสัมพัทธ์ได้ถูกต้อง
2. อธิบายค่าคงที่ของแม่เหล็กเมื่อพิจารณาในวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กได้ถูกต้อง
3. คำนวณหาความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ความเข้มสนามแม่เหล็ก และเส้นแรงแม่เหล็กจากวงจรขดลวดได้ถูกต้อง
4. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็ก
5. เปรียบเทียบและสรุปความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบได้สัมพัทธ์กับความเข้มสนามแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กต่างชนิดกันได้ถูกต้อง
6. คำนวณหาความต้านทานแม่เหล็กจากวงจรแม่เหล็กได้ถูกต้อง
7. เปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้าได้ถูกต้อง

สแกนเพื่อดู
e-book
4 ลิ





เนื้อหาสาระ

หน่วยที่ 2 นี้เป็นการศึกษาเพิ่มเติมจากเรื่องทฤษฎีแม่เหล็ก ได้แก่ ความซึมซาบได้ ความต้านทานแม่เหล็ก และการเปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้า

ความซึมซาบได้ (Permeability) หมายถึง คุณสมบัติตัวกลางที่จะยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านเข้าไปได้ง่ายหรือยาก มี 2 ชนิด คือ ความซึมซาบได้ของสุญญากาศ และความซึมซาบได้สัมพัทธ์

ความซึมซาบได้ของสุญญากาศ หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กต่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

ความซึมซาบได้สัมพัทธ์ หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตได้ในวัสดุสารแม่เหล็กต่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตได้ในสุญญากาศ (ในแกนที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก) โดยใช้ความเข้มของสนามแม่เหล็กค่าเดียวกัน

ความต้านทานแม่เหล็ก คือ ความต้านทานแม่เหล็กของวงจรแม่เหล็ก เรียกว่า **รีลักแตนซ์ (Reluctance)** ขึ้นอยู่กับเส้นแรงแม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

ลักษณะเด่นของวงจรไฟฟ้าจะต้องใช้พลังงานเพื่อรักษาการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร ขณะที่วงจรแม่เหล็กพบว่า เส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกผลิตขึ้นครั้งหนึ่งก็จะไม่ต้องการพลังงานอีกต่อไป

2.1

ความซึมซาบได้

2.1.1 ความซึมซาบได้

ความซึมซาบได้ (Permeability) หมายถึง คุณสมบัติตัวกลางที่จะยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านเข้าไปได้ง่ายหรือยาก ซึ่งความซึมซาบได้ของสุญญากาศ (Permeability of Free Space) แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างสนามแม่เหล็ก (B) ต่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ซึ่งความซึมซาบได้ของสุญญากาศหรือเรียกว่า **ค่าคงที่ของแม่เหล็ก (Magnetic Constant)** เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ μ_0 มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรี/เมตร (H/m)

จะได้ ค่าคงที่ของแม่เหล็ก (μ_0) เมื่อพิจารณาในวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กสุญญากาศหรืออากาศดังนี้

$$\mu_0 = \frac{B}{H} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

สมการที่ 2.1 หาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้ดังนี้

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{B}{4\pi \times 10^{-7}} \text{ At/m} \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

ตัวอย่างที่ 2.1 ขดลวดชุดหนึ่งมี 250 รอบ พันสม่ำเสมอรอบวงแหวนไม้ที่มีความยาวของเส้นรอบวง 40 cm พื้นที่หน้าตัดของวงแหวนไม้เท่ากับ 3 cm^2 และกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดเท่ากับ 5 A จงคำนวณหา

1. ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H)
2. สนามแม่เหล็ก (B)
3. จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด (Φ)

วิธีทำ

$$\begin{aligned}
 1. \text{ ความยาวเส้นรอบวงของวงแหวนไม้} &= 40 \text{ cm} = \frac{40}{100} = 0.4 \text{ m} \\
 \text{ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H)} &= \frac{N \times I}{l} = \frac{250 \times 5}{0.4} \\
 &= 3,125 \text{ At/m} \\
 2. \text{ สนามแม่เหล็ก (B)} &= H \times \mu_0 = 3,125 \times 4\pi \times 10^{-7} \\
 &= 3,125 \times 4 \times \frac{22}{7} \times 10^{-7} \\
 &= 3.93 \times 10^{-3} \text{ T} \\
 3. \text{ พื้นที่หน้าตัดวงแหวนไม้ (A)} &= 3 \text{ cm}^2 = \frac{3}{10,000} \text{ m}^2 \\
 &= 3 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \\
 \text{เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด (\Phi)} &= A \times B = 3 \times 10^{-4} \times 3.93 \times 10^{-3} \\
 &= 1.18 \times 10^{-6} \text{ Wb} \quad \text{ตอบ}
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 2.2 ขดลวดชุดหนึ่งใช้ผลิตเส้นแรงแม่เหล็ก 0.023 Wb ส่งข้ามช่องว่างอากาศยาว 3.5 mm มีพื้นที่ช่องว่างอากาศ 150 cm^2 จงคำนวณหาแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ใช้ส่งข้ามช่องว่างอากาศนี้

วิธีทำ

$$\begin{aligned}
 1. \text{ พื้นที่ของช่องว่างอากาศ (A)} &= 150 \text{ cm}^2 = \frac{150}{10,000} \text{ m}^2 \\
 &= 0.015 \text{ m}^2 \\
 2. \text{ สนามแม่เหล็ก (B)} &= \frac{\Phi}{A} = \frac{0.023}{0.015} \\
 &= 1.53 \text{ T} \\
 3. \text{ ความเข้มสนามแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ (H)} &= \frac{B}{\mu_0} = \frac{1.53}{4\pi \times 10^{-7}} \\
 &= \frac{1.53}{4 \times \frac{22}{7} \times 10^{-7}} \\
 &= 1,217,045.46 \text{ At/m}
 \end{aligned}$$