

หม้อแปลงไฟฟ้า



เหมาะสำหรับใช้ประกอบการเรียนระดับ ปวช.
ประเภทวิชาอุตสาหกรรม สาขาวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง



สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

โชยชาญ หินเกิด

หม้อแปลงไฟฟ้า



โดย
ไชยชาญ หินเกิด



สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

195 บาท

หม้อแปลงไฟฟ้า

โดย...ไชยชาญ หินเกิด



ราคา 195 บาท

พิมพ์ครั้งที่ 1	เมษายน	2559
พิมพ์ครั้งที่ 2	พฤษภาคม	2559
พิมพ์ครั้งที่ 3	กรกฎาคม	2565

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ

ไชยชาญ หินเกิด.

หม้อแปลงไฟฟ้า. -- พิมพ์ครั้งที่ 3. -- กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2565.

240 หน้า.

1. หม้อแปลงไฟฟ้า. I. ชื่อเรื่อง.

621.314

ISBN 978-974-443-818-8

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ (ฉบับเพิ่มเติม) พ.ศ. 2558 โดย สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

ห้ามลอกเลียนไม่ว่าส่วนใดส่วนหนึ่งของหนังสือเล่มนี้ไม่ว่าในรูปแบบใด ๆ

นอกจากจะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร

จัดพิมพ์โดย สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.

สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

5-7 ซอยสุขุมวิท 29 ถนนสุขุมวิท แขวงคลองเตยเหนือ เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110

โทร. 0-2258-0320 (6 เลขหมายอัตโนมัติ), 0-2259-9160 (10 เลขหมายอัตโนมัติ)

ติดต่อสำนักพิมพ์ book4u@tpa.or.th

ติดต่อสั่งซื้อหนังสือ www.tpabook.com

จัดจำหน่ายโดย บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน)

อาคารทีซีไอเอฟ ทาวเวอร์ ชั้น 19 เลขที่ 1858/87-90

ถนนบางนา-ตราด แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260

โทร. 0-2739-8000, 0-2739-8222 โทรสาร 0-2739-8356-9

www.se-ed.com

“ถ้าหนังสือมีข้อผิดพลาดเนื่องจากการพิมพ์ให้นำมาแลกเปลี่ยนได้ที่สมาคมฯ” โทร. 0-2258-0320 ต่อ 1560, 1570

■ ผู้จัดการฝ่ายสำนักพิมพ์ สุกัญญา จาตุการ บรรณาธิการบริหาร วัลภา ลิขิตานนท์ กองบรรณาธิการ รินดา คันธวร, พรรณพิมล กิจไพฑูรย์, แสงเงิน นาคพัฒน์ ผู้จัดการแผนกศิลปกรรม ศิริรุช อิศรางกูร ณ อยุธยา ศิลปกรรม อนิล พญเกียรติคุณ ออกแบบปก ชารินี คุตตะสิงค์

■ พิมพ์ที่ : หจก. ที.เอส.บี. โปรดักส์

เกี่ยวกับ สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.

สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) หรือ ส.ส.ท. ก่อตั้งอย่างเป็นทางการในวันที่ 24 มกราคม พ.ศ. 2516 จากความตั้งใจมุ่งมั่น ความร่วมมือร่วมใจ และความเสียสละ ท่วมเทกำลังกายและกำลังใจของกลุ่มบุคคลที่เคยไปศึกษาและดูงานโดยทุน ABK & AOTS ณ ประเทศญี่ปุ่น โดยมี ฯพณฯ สมหมาย สุนทรະกุล เป็นประธานคณะกรรมการก่อตั้ง และสำเร็จด้วยความช่วยเหลืออย่างดีจาก อาจารย์ โกอิชิ โฮซุมิ อดีตประธานกรรมการ สมาคมความร่วมมือทางเศรษฐกิจ ไทย-ญี่ปุ่น (JTECS) ทั้งนี้ได้รับความช่วยเหลือทางด้านเงินทุนจากกระทรวงการต่างประเทศและอุตสาหกรรม (METI) ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งไม่มีพันธผูกพันใด ๆ เพื่อใช้จ่ายในการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ

สำหรับ สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. จัดตั้งขึ้นเมื่อ พ.ศ. 2516 พร้อม ๆ กับการก่อตั้งสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) โดยใช้ชื่อว่า โครงการตำรา เพื่อมุ่งส่งเสริมให้มีตำราภาษาไทยเกี่ยวกับเทคโนโลยีต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับอาชีวศึกษา ซึ่งในขณะนั้นยังมีอยู่จำกัดให้แพร่หลายขึ้น เพื่อยกระดับมาตรฐานการศึกษาในสายวิชาชีพซึ่งเป็นกำลังสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมไทย

ในระยะ 4-5 ปี หลังจากการก่อตั้งสมาคมฯ โครงการตำราได้เปลี่ยนชื่อเป็น โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม และได้ขยายกิจกรรมเป็นส่วนตำราสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม ในปี พ.ศ. 2539 พร้อม ๆ กับการขยายขอบข่ายหนังสือที่จัดพิมพ์ให้ครอบคลุมหนังสือด้านการบริหารจัดการธุรกิจ อุตสาหกรรม และจิตวิทยา-การพัฒนาตนเอง รวมถึงคณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์ ทั้งที่เป็นงานเขียนและงานแปล ภายใต้ชื่อ สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อถ่ายทอดและเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่างๆ ให้แก่บุคลากรทั้งภาครัฐและเอกชน ตลอดจนนักเรียน นักศึกษา เยาวชน ซึ่งจะเป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรม เศรษฐกิจ และสังคมไทยให้เติบโตได้อย่างยั่งยืนต่อไป

สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. ไคร่ขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างยิ่งต่อผู้เขียนและผู้แปลทุกท่านที่มีส่วนสำคัญในความสำเร็จของสำนักพิมพ์ตั้งแต่เริ่มต้นจนปัจจุบัน และหวังว่าหนังสือของสำนักพิมพ์ ส.ส.ท. จะมีส่วนช่วยในการพัฒนาบุคลากร อันจะนำไปสู่การสร้างสรรค์สังคมและเศรษฐกิจของประเทศให้ก้าวหน้าและยั่งยืน และหากท่านผู้อ่านมีข้อชี้แนะประการใด ขอได้โปรดแจ้งให้ทางสำนักพิมพ์ทราบด้วย จักเป็นพระคุณยิ่ง



สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

คำนำ

หนังสือหม้อแปลงไฟฟ้านี้ เป็นหนังสือที่ใช้ในการเรียนการสอนในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) ซึ่งครอบคลุมตามหลักสูตร ประกอบด้วยแม่เหล็กและการเหนี่ยวนำ หม้อแปลงเฟสเดียว วงจรสมมูล โวลต์เตจเรกูลेशन การทดสอบหม้อแปลง ประสิทธิภาพ เครื่องหมายแสดงข้อผิดพลาด การขนานหม้อแปลง หม้อแปลงสำหรับใช้งานพิเศษ หม้อแปลงสามเฟส การระบายความร้อน การบำรุงรักษาและการสร้างหม้อแปลงขนาดเล็ก ซึ่งเหมาะกับนักเรียนระดับ ปวช. เป็นอย่างยิ่ง ผู้เรียบเรียงได้ตระหนักถึงความสำคัญของการเรียนการสอนในสาขาช่างไฟฟ้า และเพื่อเป็นพื้นฐานในการประกอบอาชีพต่อไป จึงได้เรียบเรียงหนังสือหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้น หนังสือเล่มนี้นอกจากจะเหมาะกับนักเรียนในระดับ ปวช. แล้ว ยังเหมาะกับบุคคลทั่วไปที่มีความสนใจที่จะศึกษาเรื่องของหม้อแปลงไฟฟ้าอีกด้วย ผู้เรียบเรียงใคร่ขอขอบพระคุณเจ้าของเอกสารและตำราที่ผู้เรียบเรียงได้นำมาอ้างอิง ทั้งที่ได้กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ และหากหนังสือเล่มนี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้เรียบเรียงขอน้อมรับด้วยความเคารพ และพร้อมที่จะนำไปปรับปรุงแก้ไขในครั้งต่อไปให้ดียิ่งขึ้น



(นายไชยชาญ หินเกิด)

สารบัญ

บทที่ 1	แม่เหล็กและการเหนี่ยวนำ.....	1
1.1	แม่เหล็กไฟฟ้า.....	2
1.2	วงจรแม่เหล็ก.....	4
1.3	กระแสไหลวน.....	8
1.4	สนามแม่เหล็ก.....	9
1.5	เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล.....	12
1.6	กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำ.....	20
1.7	การเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้า.....	22
	แบบฝึกหัดบทที่ 1.....	27
บทที่ 2	หม้อแปลงเฟสเดียว.....	31
2.1	โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	31
2.2	การทำงานเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	35
2.3	หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ.....	36
2.4	ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในหม้อแปลง.....	38
2.5	สมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	39
2.6	หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริง.....	41
	แบบฝึกหัดบทที่ 2.....	58
บทที่ 3	วงจรสมมูลและโวลต์เตจเรกูเลชัน.....	63
3.1	ความต้านทานสมมูล.....	63
3.2	เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล.....	65
3.3	อิมพีแดนซ์สมมูล.....	67
3.4	โวลต์เตจเรกูเลชัน.....	72
	แบบฝึกหัดบทที่ 3.....	84

บทที่ 4	การทดสอบหม้อแปลงและประสิทธิภาพ.....	89
4.1	การทดสอบหม้อแปลง.....	89
4.2	การสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	96
4.3	ประสิทธิภาพของหม้อแปลง.....	98
4.4	ประสิทธิภาพตลอดทั้งวัน.....	103
	แบบฝึกหัดบทที่ 4.....	107
บทที่ 5	เครื่องหมายแสดงข้อและการขนานหม้อแปลง.....	113
5.1	เครื่องหมายแสดงข้อ.....	113
5.2	การขนานหม้อแปลง.....	118
5.3	หม้อแปลงระบบจำหน่าย.....	121
	แบบฝึกหัดบทที่ 5.....	125
บทที่ 6	หม้อแปลงสำหรับใช้งานพิเศษ.....	129
6.1	หม้อแปลงเครื่องมือวัด.....	129
6.2	หม้อแปลงแบบออโต.....	139
6.3	หม้อแปลงกระแสคงตัว.....	142
6.4	หม้อแปลงเครื่องเชื่อมไฟฟ้า.....	144
	แบบฝึกหัดบทที่ 6.....	147
บทที่ 7	หม้อแปลงสามเฟส.....	151
7.1	การต่อแบบเดลตา-เดลตา.....	153
7.2	การต่อแบบวาย-วาย.....	158
7.3	การต่อแบบเดลตา-วาย.....	165
7.4	การต่อแบบวาย-เดลตา.....	169
7.5	การต่อแบบโอเพนเดลตา.....	171
	แบบฝึกหัดบทที่ 7.....	191

บทที่ 8	การระบายความร้อนหม้อแปลงและการบำรุงรักษา.....	195
8.1	การระบายความร้อนหม้อแปลง.....	195
8.2	น้ำมันหม้อแปลง.....	197
8.3	การตรวจสอบหม้อแปลงก่อนนำไปติดตั้ง.....	203
8.4	ข้อปฏิบัติก่อนนำหม้อแปลงไปติดตั้ง.....	204
8.5	การติดตั้งและบำรุงรักษา.....	206
8.6	การตรวจสอบหม้อแปลง.....	209
8.7	การสร้างหม้อแปลงขนาดเล็ก.....	215
	แบบฝึกหัดบทที่ 8.....	225
บรรณานุกรม.....		229

แม่เหล็ก

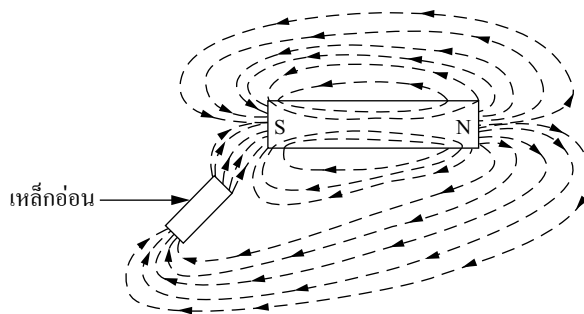
และการเหนี่ยวนำ

1

อำนาจแม่เหล็กไม่สามารถมองเห็นด้วยตา ซึ่งเปรียบเทียบกับกับ กระแสลมถึงแม้ว่าจะมีอนุภาคนมาก แต่ก็ไม่สามารถมองเห็นด้วยตา อำนาจ แม่เหล็กก็เช่นเดียวกันเรามองไม่เห็น แต่สามารถรู้ได้ด้วยความรู้สึก อำนาจ แม่เหล็กจะวิ่งออกจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง คุณสมบัติอันหนึ่งของเส้นแรง แม่เหล็กคือ เส้นแรงแม่เหล็กแต่ละเส้นนั้นจะผลักกัน จะไม่มีเส้นแรงตัดกัน หรือรวมกันเป็นเส้นเดียว และไม่มีฉนวนใดในโลกที่จะกั้นเส้นแรงแม่เหล็ก ได้ เส้นแรงแม่เหล็กจะวิ่งผ่านวัตถุได้ทุกชนิด ซึ่งแตกต่างกันก็ตรงที่วัตถุบาง ชนิดเส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ยาก และบางชนิดเส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ง่าย ซึ่ง วัตถุที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ยากแสดงว่าวัตถุนั้นเฉื่อย เส้นแรงแม่เหล็กจะ เดินในทางที่มีความต้านทานแม่เหล็กต่ำและเนื่องจากอากาศมีความต้านทาน แม่เหล็กสูงกว่าเหล็ก ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะเดินผ่านเหล็กได้ง่ายกว่า อากาศ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กในเหล็กมีมากกว่าใน อากาศ

จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่มีอยู่ในพื้นที่หนึ่งตารางเซนติเมตรเรียกว่า ความเข้มสนามแม่เหล็ก เส้นทางที่เส้นแรงแม่เหล็กใช้เป็นทางเดินหรือเป็นจุดที่เส้นแรงแม่เหล็กเข้าหรือออกก็คือขั้วแม่เหล็ก ทางเดินนี้เรียกว่า วงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuit) จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่วิ่งผ่านก้อนวัตถุใด ๆ จะมีค่าสูงสุดเพียงค่าหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุนั้น ๆ เมื่อมีเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนเท่าค่าสูงสุดวิ่งผ่านวัตถุใดเรียกว่า วัตถุนั้นถึงจุดอิ่มตัวต่อเส้นแรงแม่เหล็ก (Saturation) และอำนาจแม่เหล็กนั้นอาจทำให้เกิดขึ้นได้ในสารที่ยังมิได้เป็นแม่เหล็ก ด้วยวิธีการเหนี่ยวนำ คือ ถ้าเราวางแท่งแม่เหล็กอ่อนแท่งหนึ่งลงในสนามแม่เหล็กถาวร ในระยะเวลาที่ไม่นานนักเหล็กอ่อนนั้นจะมีอำนาจแม่เหล็กเกิดขึ้น เพราะถูกเหนี่ยวนำ สาเหตุที่เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในขณะนี้ เป็นเพราะเส้นแรงแม่เหล็กที่วิ่งอยู่ในอากาศจะพยายามเบนวิ่งเข้าหาแท่งเหล็กอ่อนดังแสดงในรูปที่ 1.1 เหล็กอ่อนนั้นมีความต้านทานแม่เหล็กน้อยกว่าอากาศ ขณะที่เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งผ่านเหล็กอ่อนโมเลกุลของเหล็กอ่อนจะเรียงตัวกันใหม่ให้ขนานกับแนวเส้นแรงแปร และกับชี้ขั้วเหนือของโมเลกุลไปทางทิศเดียวกันกับเส้นแรงแปรนั้นด้วย ในขณะนี้เองแท่งเหล็กอ่อนซึ่งถูกเหนี่ยวนำจะมีอำนาจแม่เหล็กและเกิดขั้วเหนือขั้วใต้ดังแสดงในรูปที่ 1.1

ต่อมาถ้ายกแท่งแม่เหล็กถาวรออก แท่งเหล็กอ่อนจะสูญเสียกำลังอำนาจแม่เหล็กลงไปมาก แต่ก็ไม่ถึงกับเป็นศูนย์ เพราะจะมีอำนาจแม่เหล็กตกค้างอยู่บ้าง อำนาจแม่เหล็กนี้เรียกว่า อำนาจแม่เหล็กตกค้าง (Residual flux หรือ Residual magnetism)



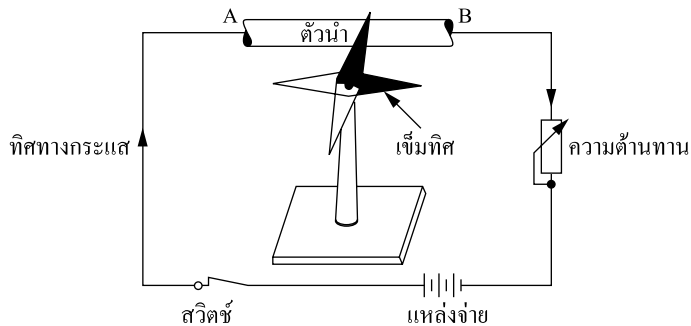
รูปที่ 1.1 แสดงการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในเหล็กอ่อน

1.1 แม่เหล็กไฟฟ้า



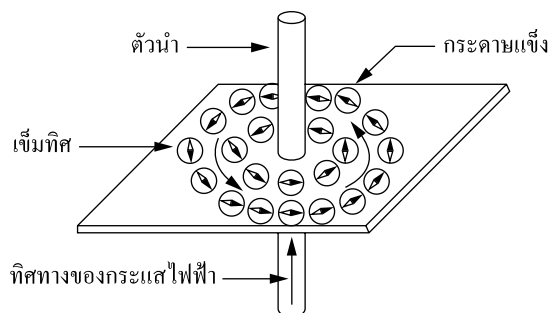
ในปี ค.ศ. 1819 แฮนส์ คริสเตียน เออร์สเตด (Hans Christian Oersted) นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์กได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้า และพบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นเสมอ

การทดลองของเออร์สเตดนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 1.2 โดยการนำเอาลวดตัวนำไฟฟ้า AB ต่อเข้ากับ เซลล์ไฟฟ้า และให้ตัวนำนั้นวางขนานกับเข็มทิศที่วางอยู่ใต้ตัวนำนั้น เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำจะ ทำให้เข็มทิศเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวขนานเดิม โดยเข็มทิศจะตั้งฉากกับตัวนำ AB แต่เมื่อให้กระแสไฟฟ้า ไหลกลับทาง เข็มทิศจะเกิดการเบี่ยงเบนกลับทางไปอีกทิศทางหนึ่ง ซึ่งทำมุมกับตำแหน่งเดิม 180 องศา และ ยังพบอีกว่าถ้าให้ลวดตัวนำทำมุม 90 องศากับเข็มทิศแล้ว เข็มทิศจะไม่เบี่ยงเบนไปในทิศทางใด ๆ เลย



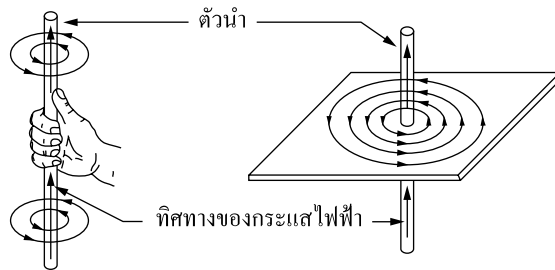
รูปที่ 1.2 การทดลองของเออร์สเตด

เออร์สเตดยังได้ค้นพบอีกว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้านั้นประกอบไปด้วยเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนหนึ่งจัดเรียงเป็นวงรอบ ๆ ตัวนำที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านนั้น โดยตัวนำจะเป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมเหล่านั้น เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำนี้ถ้ายังอยู่ห่างตัวนำมากอำนาจแม่เหล็กก็ยิ่งน้อย การเกิดสนามแม่เหล็กนี้สามารถแสดงดังรูปที่ 1.3 โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ในแนวตั้งทะลุผ่านกระดาษแข็ง แล้วนำเข็มทิศวางไว้บนกระดาษแข็งตามตำแหน่งต่าง ๆ จะสังเกตเห็นว่า ทิศทางของเข็มทิศจะหันเหเรียงตามกันไปเป็นวงกลมรอบตัวนำ โดยให้สีดำแทนด้วยขั้วเหนือและสีขาวแทนด้วยขั้วใต้ หรืออาจใช้ผงเหล็กโรยจะสังเกตเห็นว่าผงเหล็กจะจัดเรียงตัวกันเป็นวงกลม



รูปที่ 1.3 แสดงการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ

ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้ากับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำสามารถหาได้โดยการใช้กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก (Right hand rule for magnetic field) คือ ให้ใช้มือขวากำรอบตัวนำไฟฟ้า โดยให้หัวแม่มือชี้ไปตามความยาวของตัวนำแทนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า และให้นิ้วทั้งสี่ที่เหลือกำรอบตัวนำ โดยนิ้วทั้งสี่นั้นจะแทนทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำนั้นดังแสดงในรูปที่ 1.4



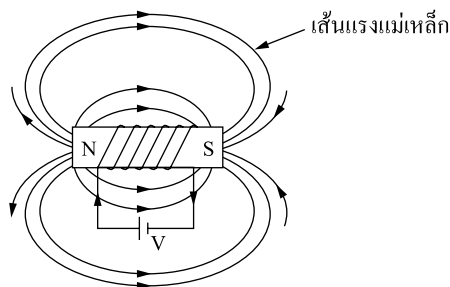
รูปที่ 1.4 แสดงกฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก

1.2 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuit)



วงจรแม่เหล็ก หมายถึง ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งกฎเกณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจรแม่เหล็กก็เหมือนกันกับวงจรไฟฟ้า แต่ก็มิได้หมายความว่า จะเหมือนกันทั้งหมด เพราะหน่วยต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้านั้นจะต่างกันแต่ความหมายต่าง ๆ นั้นมักจะคล้ายกัน เช่น แรงดันแม่เหล็กหมายถึงแหล่งที่ทำให้เกิดการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็ก ส่วนในวงจรไฟฟ้านั้นมีแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร

จากรูปที่ 1.5 เป็นการแสดงให้เห็นถึงลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ขดลวดที่พันไว้บนแกนเหล็ก โดยขดลวดนั้นมีกระแสไหลผ่าน ส่วนทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กนั้นสามารถหาได้จากการใช้กฎมือขวา



รูปที่ 1.5 แสดงลักษณะของการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ขดลวดเมื่อมีกระแสไหล

1.2.1 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Maximum flux density)

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก คือ ปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดการเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อพื้นที่นี้เรียกว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยวัดเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตร (Weber per square metre, $\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$) หรือเทสลา (Tesla) ใช้สัญลักษณ์ B ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการ คือ

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$

เมื่อ $B =$ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตร ($\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$)

$\Phi =$ เส้นแรงแม่เหล็กเป็นเวเบอร์ (Wb)

$A =$ พื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็กเป็นตารางเมตร (m^2)

(1 เทสลามีค่าเท่ากับ $1 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$)

หรือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กอาจหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ คือ

$$B = \mu H = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$

เมื่อ $\mu =$ ความซาบซึมได้ของวัสดุ (ที่เป็นสารแม่เหล็ก) มีหน่วยเป็นเฮนรีต่อเมตร หรือเวเบอร์ต่อแอมแปร์เมตร ($\frac{\text{H}}{\text{m}}$ or $\frac{\text{Wb}}{\text{A} \cdot \text{m}}$)

$H =$ ความเข้มของสนามแม่เหล็กเป็นแอมแปร์ต่อเมตร หรือแอมแปร์เทอนต่อเมตร ($\frac{\text{A}}{\text{m}}$ or $\frac{\text{A} \cdot \text{T}}{\text{m}}$)

1.2.2 ความซาบซึมได้ (Permeability)

จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ที่แท้จริงจะขึ้นอยู่กับโมเลกุลของแกนเหล็กว่าจะสามารถวางตัวในแนวเดียวกันได้ง่ายเพียงใด เรียกว่าความซาบซึมได้ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ μ (เป็นอักษรกรีกอ่านว่ามิว) ความซาบซึมได้นี้เป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นแห่งการเหนี่ยวนำต่อแรงดันแม่เหล็ก ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mu = \frac{B}{H}$$

ดังนั้น $B = \mu H = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$

$$B = \mu_0 \mu_r H = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$

$\mu_0 =$ ค่าความซาบซึมได้ของอากาศบริเวณที่ไม่มีเส้นแรงใด ๆ มาเกี่ยวข้องเลย และไม่ใช่อากาศ (เพราะว่าในสุญญากาศเส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้)

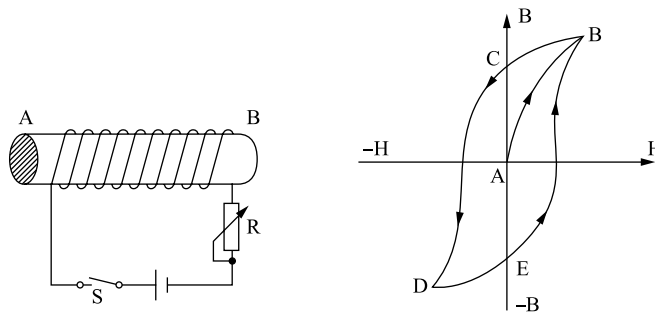
μ_r = ค่าความซาบซึมได้สัมพัทธ์ ซึ่งหมายถึงความซาบซึมได้ของสารอื่น ๆ
(Relative permeability)

$\mu_r = 1$ สำหรับในอากาศ

μ_r เป็นอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในสารอย่างหนึ่งกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในอากาศ เมื่อใช้ความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากัน

ความซาบซึมได้ คือ ความยินยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่าน ความซาบซึมของสุญญากาศเป็น 1 โดยปกติทั่วไปจะกล่าวถึงเฉพาะความซาบซึมได้สัมพัทธ์ ซึ่งหมายถึงตัวกลาง เช่น เหล็กยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้เป็นที่เท่าของอากาศ เมื่อมีความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากัน

เมื่อใช้แกนเหล็กในการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก จะเห็นว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นตามเส้นโค้งการเกิดอำนาจแม่เหล็กตามเส้น AB จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวของเส้นโค้ง แล้วถ้าทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กหมดไปโดยการลดกระแสไฟฟ้าที่ล้นน้อยจนกระทั่งกระแสเป็นศูนย์ ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลงแต่ไม่ซำรอยเส้นโค้งเดิม โดยที่กระแสเป็นศูนย์แล้ว ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะยังไม่เป็นศูนย์จะได้เส้นโค้งเป็นเส้น BC ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง ดังแสดงในรูปที่ 1.6 และถ้าต้องการทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (Residual magnetism) ในแกนเหล็กลดลงเป็นศูนย์ เราจะต้องเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าใหม่ และวัดค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะได้เส้นโค้งดังเส้น CD เมื่อถึงจุด D อันเป็นจุดอิ่มตัวในอีกทิศทางหนึ่งของค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และถ้าลดปริมาณของกระแสไฟฟ้าลงเส้นโค้งจะเป็นตามแนวของเส้น DE และถ้าเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสใหม่และค่อย ๆ เพิ่มกระแสไฟฟ้าอีก เส้นโค้งจะเป็นเส้น EB ซึ่งทำให้เส้นรอบรูปเป็น BCDEB ซึ่งเส้นโค้งดังกล่าวนี้เรียกว่า เส้นโค้งความล้าหรือเส้นโค้งฮิสเทอรีซิส (Hysteresis curve)



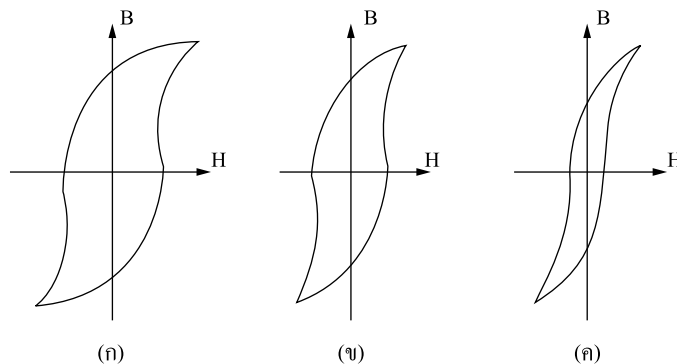
รูปที่ 1.6 แสดงเส้นโค้งฮิสเทอรีซิส

เส้นโค้งฮิสเทอรีซิสมีความสำคัญในการที่จะใช้ออกแบบหรือจัดหาสารมาทำแกนแม่เหล็ก แม่เหล็กถาวร เช่น แม่เหล็กแท่ง แม่เหล็กเกือกม้า หรือแม่เหล็กที่ใช้ทำเป็นเข็มทิศจะต้องมีเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสกว้าง ๆ เพื่อให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กคงอยู่ได้นาน สารดังกล่าวเอามาทำแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ได้ดี ถ้าจะเอาเหล็กมาทำแกนหม้อแปลง เหล็กดังกล่าวจะต้องมีเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสแคบ ๆ ด้วยเหตุผลคือการกลับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กในหม้อแปลงต่อหนึ่งไซเคิลของไฟฟ้ากระแสสลับนั้น ต้องสิ้นเปลืองพลังงาน พื้นที่เส้นโค้งฮิสเทอรีซิสจะบอกปริมาณพลังงานที่สูญเสียไปในหนึ่งไซเคิลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัตถุที่ทำแกนหม้อแปลง พลังงานดังกล่าวจะสูญเสียไปมากในเมื่อเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสกว้าง ๆ วัสดุที่ใช้ทำแม่เหล็กถาวรที่มีเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสกว้าง ได้แก่ โลหะผสมอัลนิโค (Alnico) ทำจากอะลูมิเนียม นิกเกิล และเหล็กโคบอลต์ ส่วนแกนเหล็กหม้อแปลงนั้นนิยมใช้เหล็กอ่อน (Soft iron) เนื่องจากมีพื้นที่เส้นโค้งฮิสเทอรีซิสแคบดังแสดงในรูปที่ 1.7 ค่าฮิสเทอรีซิสนี้วัดเป็นพลังงานซึ่งสูญเสียไปในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็กในแท่งเหล็กนั้น พื้นที่ของรูปฮิสเทอรีซิสจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสารแม่เหล็ก

จากรูปที่ 1.7 (ก) เป็นค่าของเหล็กชนิดแข็ง เนื่องจากเป็นเหล็กชนิดที่มีความสามารถในการเก็บอำนาจแม่เหล็กไว้ได้สูงและมีอำนาจในการกลับที่เดิมช้า มีคุณสมบัติเกือบเป็นแม่เหล็กถาวรจึงมีค่าฮิสเทอรีซิสสูง แสดงว่ามีพื้นที่มาก การที่นำมาทำเป็นโลหะผสมระหว่างอะลูมิเนียม นิกเกิลกับเหล็กกล้าเรียกว่า อัลนิโค-อัลลอยด์ (Alnico alloys) ซึ่งพบว่าสารนี้มีอำนาจเป็นแม่เหล็กถาวรได้

จากรูปที่ 1.7 (ข) เป็นเหล็กอ่อนและเหล็กหล่อ แสดงว่าวัตถุนั้นมีความซาบซึมของแม่เหล็กได้สูง มีอำนาจการกลับคืนของแม่เหล็กปานกลาง ดังนั้นเหล็ก 2 อย่างนี้สามารถทำเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าได้

จากรูปที่ 1.7 (ค) เป็นเหล็กแผ่นบางผสม แสดงถึงมีความซาบซึมของแม่เหล็กได้สูงมากและมีค่าฮิสเทอรีซิสต่ำ ดังนั้นวัตถุส่วนใหญ่ที่ใช้ทำอาร์มเจอร์และแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้วัตถุที่มีอำนาจการกลับคืนของแม่เหล็กเร็ว



รูปที่ 1.7 (ก) แสดงเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของสารที่ทำแม่เหล็ก

(ข) แสดงเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของเหล็กอ่อนและเหล็กหล่อ

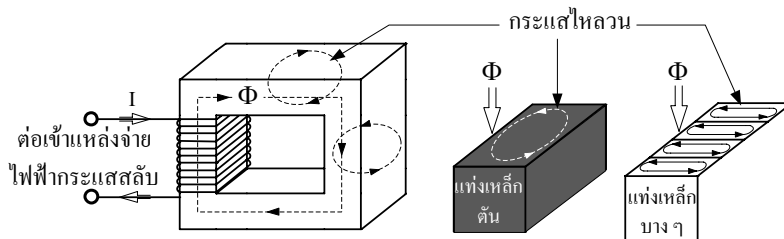
(ค) แสดงเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของสารที่ทำแกนเหล็กหม้อแปลง

1.3 กระแสไหลวน (Eddy current)



กระแสไหลวนจะทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นเนื่องจากกระแสไหลวนอยู่ภายในสารแม่เหล็ก โดยถ้าทำให้สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านตัวนำ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในตัวนำนั้น แต่ถ้าเราใส่แกนเหล็กเข้าไปในขดลวดที่มีไฟฟ้ากระแสสลับไหลอยู่ ก็จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะของรูปคลื่นไซน์ด้วย การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในแกนเหล็ก และแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กนี้จะเป็นตัวทำให้เกิดมีกระแสไหลวนเวียนขึ้นภายในแกนเหล็กนั้น ซึ่งเรียกกระแสไฟฟ้านี้ว่า กระแสไหลวน กระแสไหลวนจะเกิดขึ้นในแกนเหล็กทุก ๆ ชนิดของสารที่เป็นตัวนำไฟฟ้า กระแสนี้จะไหลผ่านความต้านทานไฟฟ้าของสารแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากกำลังสูญเสียซึ่งมีค่า I^2R และเนื่องจากความต้านทานของเหล็กมีค่าค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับสารชนิดอื่น ๆ ดังนั้นการสูญเสียกำลังเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กจึงมีค่าค่อนข้างสูง และขนาดของกระแสไหลวนจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก หรือความถี่ของการกลับไปกลับมาของเส้นแรงแม่เหล็ก และความต้านทานไฟฟ้าของแกนเหล็ก การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนนี้สามารถทำให้ลดลงได้โดยใช้แกนเหล็กที่เป็นแผ่นเหล็กบาง ๆ (Laminated sheet steel) อัดซ้อนเข้าด้วยกัน โดยในแต่ละแผ่นจะใช้สารเคลือบผิวที่มีค่าความต้านทานสูง ซึ่งจะทำให้กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กที่ใช้แกนเหล็กแผ่นบาง ๆ อัดซ้อนกันมีค่าลดลงอย่างมาก ดังนั้นจึงทำให้กำลังสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนมีค่าลดลงหรือมีค่าน้อยลงตามไปด้วย กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กที่มีเนื้อเดียวกันตลอดและในแกนเหล็กที่เป็นแผ่นบางอัดซ้อนกันแสดงได้ดังรูปที่ 1.8

ดังนั้นเราจึงไม่นำเอาแกนเหล็กที่มีเนื้อเดียวกันตลอด หรือแกนเหล็กตันมาใช้กับแรงดันแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 1.8 แสดงการเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

1.4 สนามแม่เหล็ก (Magnetic field)



สนามแม่เหล็ก หมายถึง บริเวณหรือพื้นที่ที่มีเส้นแรงแม่เหล็กส่งผ่านไปถึง บางครั้งก็เรียกว่าสนามเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic field of force) และเส้นแรงแม่เหล็กนี้ถือว่ามีทิศทางออกจากขั้วเหนือของแม่เหล็กผ่านอากาศหรือตัวกลางอื่น ๆ ไปยังขั้วใต้ของแม่เหล็ก และเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะครบวงจรของตัวมันเอง และก็จะไม่ตัดซึ่งกันและกัน สนามแม่เหล็กมีหน่วยวัดเป็นเวเบอร์ (Weber, Wb) ใช้สัญลักษณ์ Φ โดย 1 เวเบอร์ มีค่าเท่ากับ 10^{-8} เส้น

1.4.1 แรงดันแม่เหล็ก (Magnetomotive Force, m.m.f.)

แรงดันแม่เหล็ก เป็นแหล่งที่ทำหน้าที่ส่งเส้นแรงแม่เหล็กให้เคลื่อนที่ผ่านไปในวงจรแม่เหล็ก ซึ่งคล้ายกับแรงดันไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งส่งกำลังดันให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปในโหลด หรือส่วนต่าง ๆ ของวงจร โดยแรงดันแม่เหล็กนั้นเป็นงาน (Work done) ที่มีหน่วยวัดเป็นจูล (Joules) ซึ่งได้จากการนำเอาขั้วเหนือเดียวส่งผ่านเข้าไปในสนามแม่เหล็ก หน่วยของงานคิดเป็นจูล แต่หน่วยของแรงดันแม่เหล็กใช้แอมแปร์เทอน (Ampere-turn, A – T) ซึ่งได้จากการเอากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดคูณกับจำนวนรอบของขดลวดที่พันไว้เพื่อให้เกิดสนามเส้นแรงแม่เหล็ก แรงดันแม่เหล็กใช้สัญลักษณ์ F และแรงดันแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการ คือ

$$F = \text{m.m.f.} \quad A - T$$

$$= IN \quad A - T$$

เมื่อ F = แรงดันแม่เหล็กเป็นแอมแปร์เทอน (A – T) หรืออาจใช้สัญลักษณ์เป็น F_m

$$I = \text{กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดเป็นแอมแปร์ (A)}$$

$$N = \text{จำนวนรอบขดลวดเป็นรอบ (T)}$$

1.4.2 ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance or Magnetic Resistance)

ความต้านทานแม่เหล็ก คือ ความต้านทานที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็กซึ่งอาจจะเป็นอากาศ หรือวัสดุอะไรก็ได้ที่อยู่ในบริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กส่งอำนาจไปถึงซึ่งจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุนั้น ๆ ซึ่งความต้านทานนี้ จะต้านทานการส่งเส้นแรงแม่เหล็กที่ออกจากแหล่งกำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กให้มีค่าลดลง ความต้านทานแม่เหล็กจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของแกนเหล็กหรือวัตถุ คือ l ที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่านไปเพื่อให้ครบวงจรของมันเอง เป็นส่วนกลับกับพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก คือ A ความต้านทานแม่เหล็กเป็นการแสดงคุณสมบัติของวัตถุที่มีการต้านต่อการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งคล้าย ๆ กับคุณสมบัติของวัตถุที่มีการต้านการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า ความต้านทาน ความต้านทานแม่เหล็กมีหน่วยวัดเป็นแอมแปร์เทอนต่อเวเบอร์ ใช้สัญลักษณ์ R_m ความต้านทานแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการ คือ

$$\begin{aligned}
 R_m &= \frac{\text{m.m.f.}}{\Phi} = \frac{A - T}{\text{Wb}} \\
 &= \frac{IN}{\Phi} = \frac{A - T}{\text{Wb}} \\
 \text{หรือ } R_m &= \frac{1}{\mu A} = \frac{A - T}{\text{Wb}} \\
 &= \frac{1}{\mu_0 \mu_r A}
 \end{aligned}$$

เมื่อ R_m = ความต้านทานแม่เหล็กเป็นแอมแปร์เทอนต่อเวเบอร์ ($\frac{A - T}{\text{Wb}}$)

m.m.f. = แรงดันแม่เหล็กเป็นแอมแปร์เทอน ($A - T$)

Φ = เส้นแรงแม่เหล็กเป็นเวเบอร์ (Wb)

m = ความซาบซึมได้

μ_0 = ความซาบซึมได้ของอากาศบริเวณที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กใด ๆ มาเกี่ยวข้องเลย และไม่ใช้ในสุญญากาศ (เพราะว่าในสุญญากาศเส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้)

$= 4\pi \times 10^{-7}$ เป็นเวเบอร์ต่อแอมแปร์เมตร ($\frac{\text{Wb}}{\text{A-m}}$)

μ_r = ค่าความซาบซึมได้สัมพัทธ์ ซึ่งหมายถึงความซาบซึมได้ของสารอื่น ๆ (Relative permeability)

μ_r = 1 สำหรับในอากาศ

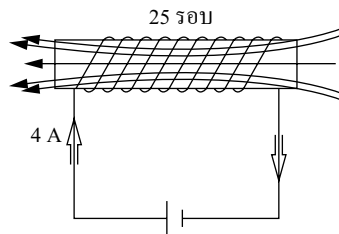
จากวงจรแม่เหล็กสามารถสรุปหน่วยของแม่เหล็กได้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ตารางสรุปหน่วยของแม่เหล็ก

ปริมาณ (Quantity)	สัญลักษณ์ (Symbol)	หน่วย
แรงดันแม่เหล็ก (Magnetomotive force)	$F = I \times N$	แอมแปร์เทอน (Ampere turn, $A - T$)
ความเข้มเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic field intensity)	$H = \frac{F}{l}$	แอมแปร์ต่อเมตรหรือ แมกเวลล์ (Ampere per metre, $\frac{A}{m}$) (Ampere turn per metre, $\frac{A - T}{m}$)
เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด (Magnetic flux)	$\Phi = B \times A$	เวเบอร์หรือโวลต์-วินาที (Weber, Wb or Volt-second, V-s)
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux density)	$B = \frac{\Phi}{A}$	เวเบอร์ต่อตารางเมตร (Weber per square metre, $\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$)
ความซาบซึมได้ (Permeability)	$\mu = \frac{B}{H}$	$\mu = \mu_0 \mu_r$ $\mu_0 = 1$ $\mu_r = 4\pi \times 10^{-7}$
ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance)	$R_m = \frac{IN}{\Phi}$	แอมแปร์เทอนต่อเวเบอร์ (Ampere-turn per Weber, $\frac{A - T}{\text{Wb}}$)

ตัวอย่างที่ 1.1

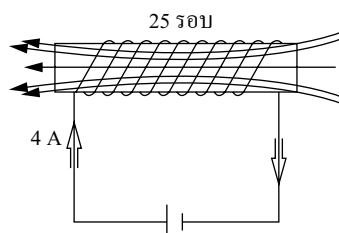
จากรูปเมื่อขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กมีจำนวนรอบ 25 รอบ โดยมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดเท่ากับ 4 A **จงคำนวณหา** แรงดันแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

วิธีทำ

กำหนดให้	N	$=$	25	รอบ
	I	$=$	4	A
จาก	F	$=$	IN	A – T
ดังนั้น	F	$=$	4×25	A – T
แรงดันแม่เหล็กที่เกิดขึ้น		$=$	100	A – T

ตอบ**ตัวอย่างที่ 1.2**

แกนเหล็กแท่งหนึ่งมีความยาว 25 เซนติเมตร มีขดลวดพันอยู่โดยรอบจำนวน 15 รอบ และมีกระแสไหลผ่านขดลวดทำให้เกิดแรงดันแม่เหล็กขึ้น 50 A–T **จงคำนวณหา** ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

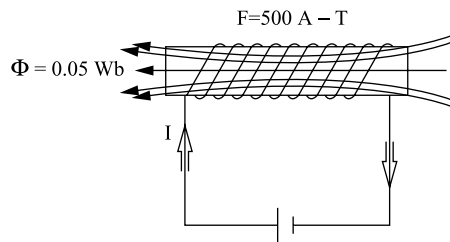
วิธีทำ

กำหนดให้	l	$=$	25	เซนติเมตร
		$=$	0.25	เมตร
	F	$=$	50	A – T
จาก	H	$=$	$\frac{F}{l}$	$\frac{\text{A – T}}{\text{m}}$
ดังนั้น	H	$=$	$\frac{50}{0.25}$	$\frac{\text{A – T}}{\text{m}}$
ความเข้มของสนามแม่เหล็ก		$=$	200	$\frac{\text{A – T}}{\text{m}}$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 1.3

แกนเหล็กแท่งหนึ่งมีความยาว 15 เซนติเมตร มีขดลวดพันอยู่โดยรอบและเกิดแรงดันแม่เหล็กขึ้น 500 A – T เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 0.05 Wb **จงคำนวณหา** ความต้านทานแม่เหล็ก

วิธีทำ


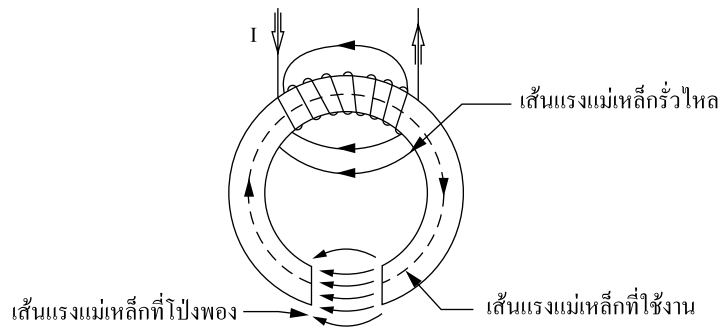
กำหนดให้	l	$=$	15	เซนติเมตร
		$=$	15×10^{-2}	เมตร
		$=$	0.15	เมตร
	F	$=$	500	A – T
	Φ	$=$	0.05	Wb
จาก	R_m	$=$	$\frac{F}{\Phi}$	$\frac{\text{A – T}}{\text{Wb}}$
แทนค่า	R_m	$=$	$\frac{500}{0.05}$	$\frac{\text{A – T}}{\text{Wb}}$
ดังนั้นความต้านทานแม่เหล็ก		$=$	10,000	$\frac{\text{A – T}}{\text{Wb}}$

ตอบ

1.5 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Magnetic leakage or leakage flux)



เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล เป็นเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนหนึ่งที่ไม่ไหลไปตามความต้องการดังแสดงในรูปที่ 1.9 เส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการและใช้ประโยชน์จริง ๆ ก็คือ เส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่ผ่านช่องว่างอากาศเท่านั้น

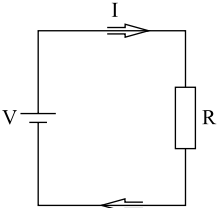
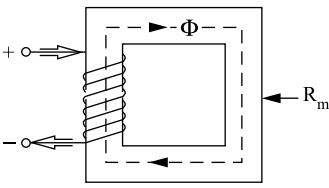


รูปที่ 1.9 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล

ส่วนเส้นแรงแม่เหล็กที่ไม่ไหลผ่านช่องว่างตามต้องการเรียกเส้นแรงแม่เหล็กส่วนนี้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล จากการทดลองพบว่าถ้าต้องการให้เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลน้อยที่สุดนั้นต้องให้ขดลวดชุดที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กอยู่ใกล้ช่องว่าง หรือจุดที่ต้องการใช้เส้นแรงแม่เหล็กนั้น ๆ ซึ่งเราจะสามารถทราบได้ว่าการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กได้ จากการเอาเข็มทิศไปวางไว้ในบริเวณที่ที่เข้าใจว่ามีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล และก็จะเป็นการยากมากที่จะไม่ให้มีการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก เครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดที่อาศัยอำนาจแม่เหล็ก เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์อย่างดี จะมีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลประมาณ 15-20 %

นอกจากจะมีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลแล้วจากรูปที่ 1.9 จะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนกระจายออกนอกช่องอากาศ เส้นแรงแม่เหล็กนี้เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดการโป่งออก (Fringing flux) เส้นแรงแม่เหล็กส่วนนี้ไม่เกิดประโยชน์เช่นเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กได้แพร่กระจายออกไปบนพื้นที่ที่เกี่ยวข้องที่โตกว่า ดังนั้นจึงมีผลทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศมีค่าลดลง และสามารถเปรียบเทียบระหว่างวงจรไฟฟ้ากับวงจรแม่เหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 1.2

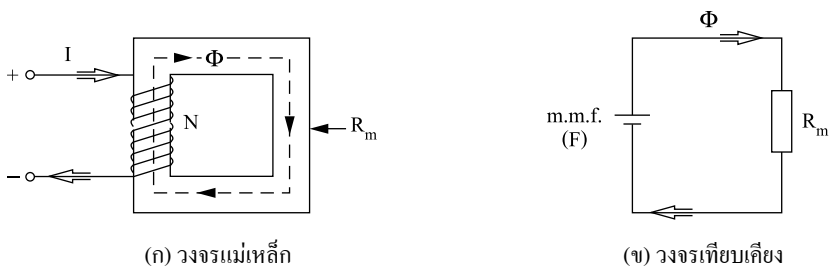
ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบระหว่างวงจรไฟฟ้ากับวงจรแม่เหล็ก

วงจรไฟฟ้า	วงจรแม่เหล็ก
 1. แรงดันไฟฟ้า (e.m.f.) มีหน่วยเป็น V 2. กระแสไฟฟ้า (I) มีหน่วยเป็น A 3. ความต้านทานไฟฟ้า (R) มีหน่วยเป็น Ω 4. ความนำไฟฟ้า ($\frac{1}{R}$) มีหน่วยเป็นซีเมน (S) 5. ความหนาแน่นของกระแส มีหน่วยเป็น $\frac{A}{m^2}$ $R = \frac{V}{I} \quad \Omega$ $R = \frac{\rho l}{A} \quad \Omega$	 1. แรงดันแม่เหล็ก (m.m.f.) มีหน่วยเป็น A – T 2. เส้นแรงแม่เหล็ก (Φ) มีหน่วยเป็น Wb 3. ความต้านทานแม่เหล็ก (R_m) มีหน่วยเป็น $\frac{A-T}{Wb}$ 4. ความนำแม่เหล็ก ($\frac{1}{R_m}$) มีหน่วยเป็น $\frac{Wb}{A-T}$ 5. ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) มีหน่วยเป็น $\frac{Wb}{m^2}$ $R_m = \frac{\text{m.m.f.}}{\Phi} = \frac{A-T}{Wb}$ $R_m = \frac{IN}{\Phi} = \frac{A-T}{Wb}$ $R_m = \frac{l}{\mu A} = \frac{A-T}{Wb}$ $R_m = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A} = \frac{A-T}{Wb}$

วงจรแม่เหล็กแบ่งออกเป็นดังนี้ คือ วงจรแม่เหล็กแบบอนุกรม และวงจรแม่เหล็กแบบขนาน

1. วงจรแม่เหล็กแบบอนุกรม

วงจรแม่เหล็กแบบอนุกรม หมายถึง วงจรแม่เหล็กที่มีทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่ครบวงจรเพียงเส้นทางเดียวเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 1.10 และรูปที่ 1.11



รูปที่ 1.10 วงจรแม่เหล็กแบบอนุกรมแบบไม่มีช่องว่าง