

เครื่องกลไฟฟ้า กระแสตรง



เหมาะสำหรับใช้ประกอบการเรียนระดับ ปวช.
ประเภทวิชาอุตสาหกรรม สาขาวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง



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

ไชยชาญ หินเกิด

เครื่องกลไฟฟ้า กระแสตรง



โดย ชาญชาญ หินเกิด



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

225 บาท

เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง

โดย ไชยชาญ หินเกิด

ราคา 225 บาท

พิมพ์ครั้งที่ 1 - 4 เมษายน 2559 - กันยายน 2562

พิมพ์ครั้งที่ 5 มิถุนายน 2565

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ

ไชยชาญ หินเกิด.

เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง. -- พิมพ์ครั้งที่ 5. -- กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2565.

268 หน้า.

1. เครื่องจักรกลไฟฟ้า -- กระแสตรง. I. ชื่อเรื่อง.

621.31042

ISBN 978-974-443-821-8

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ (ฉบับเพิ่มเติม) พ.ศ. 2558 โดย สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
ห้ามลอกเลียนไม่ว่าส่วนใดส่วนหนึ่งของหนังสือเล่มนี้ ไม่ว่าในรูปแบบใด 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 วลภา สิริชานนท์ กองบรรณาธิการ รินดา คันทรร, พรรณพิมล กิจไพฑูรย์, แสงเงิน นาคพัฒน์ ผู้จัดการแผนกศิลปกรรม ศิริรัช อิศรางกูร ณ อยุธยา ศิลปกรรม อนิล พยุงเกียรติคุณ ออกแบบปก ชารินี คุดตะสิงค์
■ 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 ท่วมเทกำลังกายและกำลังใจของกลุ่มบุคคลที่เคยไปศึกษาและทำงานโดยทุน ABK & AOTS ณ ประเทศญี่ปุ่น โดยมี ฯพณฯ สมหมาย ฮุนตระกูล เป็นประธานคณะกรรมการก่อตั้ง และสำเร็จด้วยความช่วยเหลืออย่างดีจาก อาจารย์ โกอิชิ โฮซุมิ อดีตประธานกรรมการ สมาคมความร่วมมือทางเศรษฐกิจ ไทย-ญี่ปุ่น (JTECS) ทั้งนี้โดยได้รับความช่วยเหลือทางด้านเงินทุนจากกระทรวงการค้าระหว่างประเทศและอุตสาหกรรม (METI) ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งไม่มีพันธะผูกพันใด ๆ เพื่อใช้จ่ายในการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ

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

ในระยะ 4-5 ปี หลังจากการก่อตั้งสมาคมฯ โครงการตำราได้เปลี่ยนชื่อเป็น โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม และได้ขยายกิจกรรมเป็น ส่วนตำราสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม 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. ใคร่ขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างยิ่งต่อผู้เขียนและผู้แปลทุกท่าน ที่มีส่วนสำคัญในความสำเร็จของสำนักพิมพ์ตั้งแต่เริ่มต้นจวบจนปัจจุบัน และหวังว่าหนังสือของสำนักพิมพ์ ส.ส.ท. จะมีส่วนช่วยในการพัฒนาบุคลากร อันจะนำไปสู่การสร้างสรรค์สังคมและเศรษฐกิจของประเทศให้ก้าวหน้าและยั่งยืน และหากท่านผู้อ่านมีข้อชี้แนะประการใด ขอได้โปรดแจ้งให้ทางสำนักพิมพ์ทราบด้วย จักเป็นพระคุณยิ่ง

คำนิยบ

ปัจจุบันการเรียนวิชาช่างไฟฟ้าหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ มีตำราภาษาไทยที่เรียบเรียงโดยอาจารย์ผู้สอนหลายเล่ม เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง เป็นรายวิชาหนึ่งที่อยู่ในสาขาวิชาช่างไฟฟ้า อาจารย์ไชยชาญ หินเกิด เป็นผู้ที่มีความรู้ความสามารถในการสอนวิชาช่างไฟฟ้ามาหลายปีในวิทยาลัยเทคนิค ได้รับเชิญเป็นวิทยากรหลายแห่ง และเป็นผู้มีประสบการณ์ในการสอน ได้เรียบเรียงหนังสือเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น เพื่อใช้ในการเรียนการสอนในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) เป็นหนังสือที่ดีมีประโยชน์มาก อ่านเข้าใจง่าย เนื้อหาในหนังสือครอบคลุมตามหลักสูตร ปวช. ทุกประการ เหมาะสมกับนักเรียนระดับ ปวช. เป็นอย่างยิ่ง

ขออวยพรให้ผู้เรียบเรียงประสบความสำเร็จในการจัดทำหนังสือเล่มนี้ และขอให้ประสบความสำเร็จในการจัดทำหนังสือเล่มต่อไปด้วย



(นายสนอง อิมอม)

ศึกษานิเทศ 9

ผู้อำนวยการสถาบันพัฒนาครูอาชีวศึกษา

คำนำ

การเรียบเรียงหนังสือเครื่องกลไฟฟ้ากระแสดตรงขึ้นนี้ ผู้เรียบเรียงได้ตระหนักถึงความสำคัญของการเรียนว่านักเรียนควรมีความรู้พื้นฐานอะไรบ้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับชั้น ปวช. เพื่อจะได้เป็นแนวทางที่จะนำไปสู่การศึกษาระดับสูงขึ้นไปอีก ทั้งยังจะได้เป็นความรู้พื้นฐานที่จะออกไปประกอบอาชีพได้ด้วย และด้วยประสบการณ์ในการสอนของผู้เรียบเรียง จึงได้ค้นคว้าและเรียบเรียงหนังสือเครื่องกลไฟฟ้ากระแสดตรงเพื่อใช้เป็นหนังสือประกอบการเรียนขึ้นมา ดังนั้นหนังสือเครื่องกลไฟฟ้ากระแสดตรงเล่มนี้จึงเหมาะกับผู้เรียนในสาขาวิชาช่างไฟฟ้า

ผู้เรียบเรียงใคร่ขอขอบพระคุณเจ้าของเอกสาร และตำราที่ผู้เรียบเรียงที่ได้นำมาอ้างอิง ทั้งที่ได้กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ และหากหนังสือเล่มนี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้เรียบเรียงขอน้อมรับด้วยความเคารพ และพร้อมที่จะนำไปปรับปรุงแก้ไขในครั้งต่อไปให้ดียิ่งขึ้น



(นายไชยชาญ หินเกิด)

ผู้เรียบเรียง

สารบัญ

บทที่ 1	แม่เหล็ก.....	1
1.1	ทฤษฎีแม่เหล็ก	1
1.2	แม่เหล็กไฟฟ้า	8
1.3	วงจรแม่เหล็ก.....	12
1.4	กระแสไหลวน.....	21
1.5	สนามแม่เหล็ก.....	22
1.6	เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล	32
	แบบฝึกหัด	56
บทที่ 2	การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก	61
2.1	กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำ	64
2.2	กฎมือขวาของเฟลมมิ่ง.....	67
2.3	กฎของเลนซ์.....	68
2.4	การเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้า	69
	แบบฝึกหัด	79
บทที่ 3	เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง.....	83
3.1	โครงสร้างของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง.....	83
3.2	การผันขดลวดอาร์เมเจอร์.....	90
	แบบฝึกหัด	110
บทที่ 4	เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	113
4.1	การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	118
4.2	ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	120
4.3	การเกิดแรงดันไฟฟ้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	129
4.4	สาเหตุที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงไม่เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น	131
4.5	สาเหตุของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นไม่ถึงค่าสูงสุด และสาเหตุที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่เครื่องกำเนิดมาก.....	133

4.6 อาร์เมเจอร์รีแอคชัน	133
4.7 การแก้อาร์เมเจอร์รีแอคชัน	136
4.8 การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	139
4.9 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำหรือสมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	151
4.10 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	156
4.11 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	163
4.12 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า	174
4.13 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	175
4.14 การใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	181
แบบฝึกหัด.....	183

บทที่ 5 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 189

5.1 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	189
5.2 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	199
5.3 อาร์เมเจอร์รีแอคชันในมอเตอร์	203
5.4 คุณลักษณะและการนำไปใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	205
5.5 วิธีกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	222
5.6 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	228
5.7 การเริ่มเดินมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	231
แบบฝึกหัด.....	240

บทที่ 6 การบำรุงรักษาเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง 245

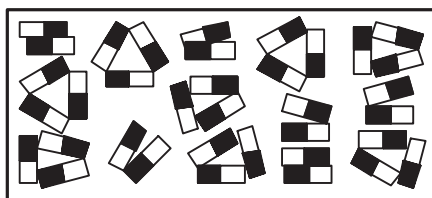
6.1 วิธีบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	245
6.2 วิธีบำรุงรักษาแปรงถ่าน.....	247
6.3 วิธีตรวจการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า	249
6.4 วิธีตรวจหาวงจรเปิดและวงจรลัดขดลวดฟิลด์คอยล์	251
6.5 การหล่อลื่น.....	251
แบบฝึกหัด.....	255

บรรณานุกรม..... 256

แม่เหล็ก

1.1 ทฤษฎีแม่เหล็ก

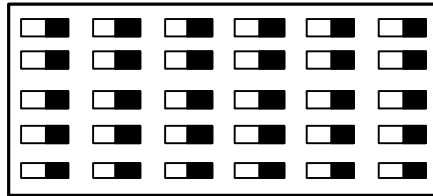
ทฤษฎีแม่เหล็กถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1852 โดยชาวเยอรมันชื่อเวเบอร์ (Weber) และต่อจากนั้นมาได้มีการพัฒนาทฤษฎีแม่เหล็กขึ้นในปี ค.ศ. 1890 โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่ออีวิงก์ (Ewing) สรุปเป็นทฤษฎีได้ดังนี้คือ โมเลกุลของสารทุกชนิดมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กภายในตัวมันเองอยู่แล้ว โมเลกุลในแต่ละโมเลกุลนั้นมีขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) ถ้าสารใดไม่มีอำนาจแม่เหล็กนั้นเป็นเพราะว่าโมเลกุลเล็ก ๆ ในสารนั้น ๆ วางตัวกันอยู่ไม่เป็นระเบียบและระเกะระกะ หรือเนื่องมาจากโมเลกุลวางตัวกันจนเป็นวงเหมือนวงแหวน ดังนั้นอำนาจแม่เหล็กจึงไม่แสดงออกมาภายนอกเลย ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การจัดกลุ่มของโมเลกุล

เมื่อนำแท่งเหล็กหรือสารเหล่านี้ไปวางไว้ในสนามแม่เหล็ก โมเลกุลต่าง ๆ ก็จะจัดตัวเองเป็นแถวขนานกันตามทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก แต่ถ้านำแท่งเหล็กนี้ออกจากสนามแม่เหล็กแล้วโมเลกุลอาจจะกลับไปอยู่สภาพเดิมหรือเรียงตัวกันเป็นระเบียบอยู่ก็ได้ซึ่งแล้วแต่ชนิดของแกนเหล็กหรือวัสดุนั้น แต่ถ้าโมเลกุลของแท่งเหล็กยังเรียงตัวกันอยู่ตลอดไป แท่งเหล็กนั้นจะแสดงอำนาจแม่เหล็กเป็นแม่เหล็กถาวร ถึงแม้ว่าแท่งเหล็กนั้นไม่ได้วางไว้ในสนามแม่เหล็กแล้วก็ตาม เมื่อแท่งเหล็กแสดงอำนาจแม่เหล็ก ปลาย

ข้างหนึ่งจะเป็นขั้วเหนือ ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งจะเป็นขั้วใต้ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 การปรับเรียงตัวกันของโมเลกุลนั้นจะทำให้โมเลกุลเกิดการเสียดสีกัน เป็นเหตุทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นเรียกว่า การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิส



รูปที่ 1.2 แสดงโมเลกุลที่เรียงตัวกัน

ทฤษฎีโมเลกุลของเวเบอร์ไม่ได้กล่าวถึงว่า

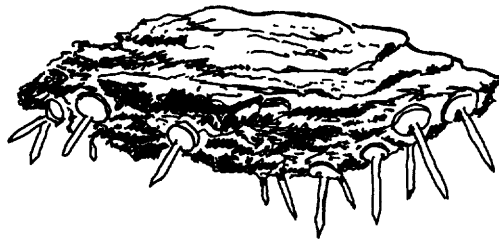
ประการแรกทำไมโมเลกุลของวัตถุใด ๆ จึงมีอำนาจเป็นแม่เหล็กในตัวเองได้

ประการที่สองคือทำไมจึงไม่สามารถทำให้ ไม้ อากาศและวัตถุอื่น ๆ อีกหลายชนิดเป็นแม่เหล็กได้

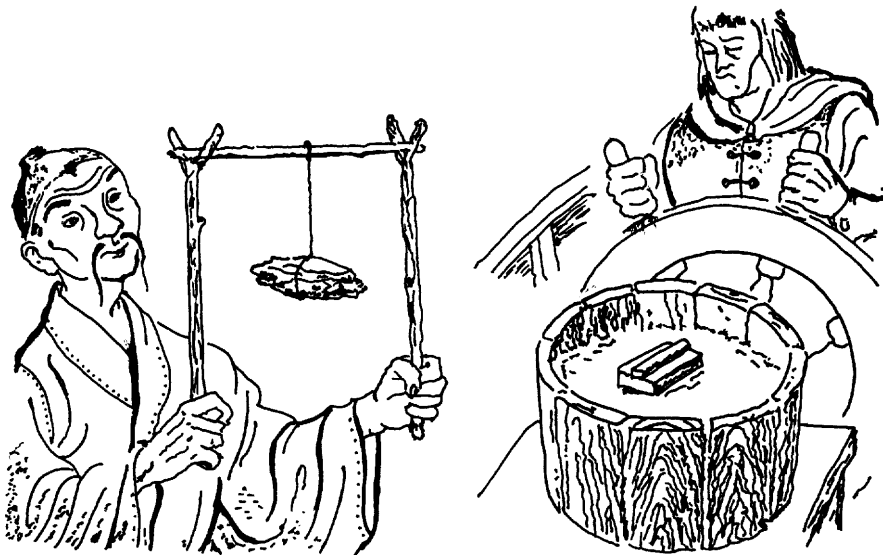
แต่นักวิทยาศาสตร์ชื่อแอมแปร์ (Ampere) ได้กล่าวถึงปัญหาว่าทำไมโมเลกุลของวัตถุใด ๆ จึงมีอำนาจเป็นแม่เหล็กในตัวเอง คือมีอิเล็กตรอนวิ่งอยู่รอบ ๆ อะตอมของโมเลกุลอยู่ตลอดเวลา และเมื่อมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนก็แสดงว่ามีกระแสไฟฟ้าไหลและเป็นผลทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กในโมเลกุลนั้นได้ ส่วนปัญหาอีกประการหนึ่งก็คือทำไมจึงไม่สามารถทำให้ ไม้ อากาศ และวัตถุอื่น ๆ อีกหลายชนิดเป็นแม่เหล็กได้นั้น สามารถอธิบายได้โดยทฤษฎีของอะตอม-โดเมนซึ่งเป็นทฤษฎีขั้นสูงของอะตอมโดยมีขอบข่ายที่กว้างมากไม่สามารถที่จะอธิบายได้ในหนังสือนี้ แต่ก็อาศัยหลักการของการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ อะตอม และขณะเดียวกันก็หมุนรอบแกนของตัวเองซึ่งเรียกว่าการเคลื่อนที่นี้ว่าอิเล็กตรอนสปิน (Electron spin) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเหมือนกับการหมุนของลูกข่างว่ามีการสมดุลหรือไม่สมดุลทางประจุบวกและประจุลบในไม้ หรืออากาศ และวัตถุอื่น ๆ ที่ไม่เป็นแม่เหล็ก เพราะว่าอิเล็กตรอนสปินที่เป็นประจุบวกและประจุลบเท่ากัน ดังนั้นจึงไม่สามารถทำเป็นแม่เหล็กได้

ในสมัยโบราณนั้นชนชาติกรีกได้รู้จักก้อนหินชนิดหนึ่ง ซึ่งพบใกล้เมืองแมกนีเซียในตะวันออกกลาง ก้อนหินชนิดนี้มีกำลังดูดชิ้นเหล็กเล็ก ๆ ให้ติดก้อนหินได้ ในปัจจุบันเราเรียกก้อนหินชนิดนี้ว่าแร่เหล็ก “แมกนีไตต์” และอำนาจที่ดูดเหล็กได้ก็คือ “อำนาจแม่เหล็ก” หินที่เกิดตามธรรมชาติที่มีอำนาจแม่เหล็ก เราเรียกว่า ว่าเป็นแม่เหล็กธรรมชาติดังแสดงในรูปที่ 1.3

ต่อมาได้มีผู้ค้นพบอีกว่าถ้าแขวนก้อนแมกนีไตต์นี้ดังรูปที่ 1.4 และสามารถหมุนได้คล่องจะปรากฏว่าด้านหนึ่งของก้อนแมกนีไตต์จะชี้ไปทางทิศเหนือเสมอ ก้อนแมกนีไตต์ที่ผูกแขวนไว้ด้วยเชือกนี้จะใช้บอกทิศ ซึ่งรู้จักกันดีว่าเป็นโลดสโตน (Lodestone) ซึ่งแปลว่าหินชี้ทิศ โดยสมัยโบราณนั้นจะนิยมใช้หินชี้ทิศนี้บอกทิศทางของการเดินทาง มักจะนำไปใช้กับนักเดินเรือ และการที่ก้อนแมกนีไตต์นี้ชี้ไปทางทิศเหนือเสมอ ก็เพราะว่าที่ขั้วโลกเหนือของโลกมีขั้วแม่เหล็กโลกคอยดึงดูดอยู่นั่นเอง



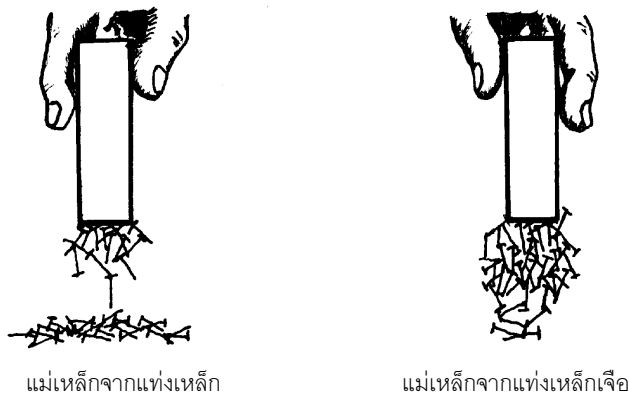
รูปที่ 1.3 แม่เหล็กธรรมชาติ



รูปที่ 1.4 แม่เหล็กโบราณ

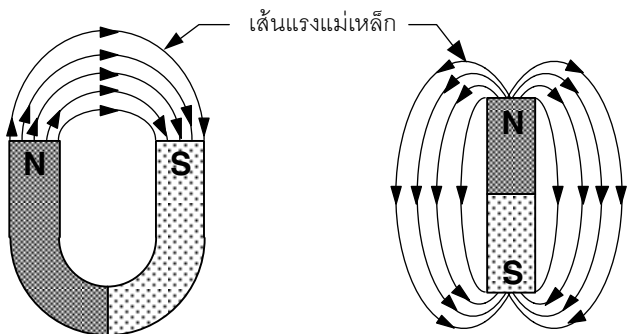
แม่เหล็กธรรมชาตินั้นสามารถนำไปผลิตแม่เหล็กประดิษฐ์ได้ด้วยวิธีการง่าย ๆ คือนำก้อนแมกนีไตต์นั้นไปถูเข้ากับแท่งเหล็ก 3-4 ครั้ง แท่งเหล็กก็จะกลายเป็นแม่เหล็กประดิษฐ์ ส่วนวิธีอื่นที่จะทำให้เป็นแม่เหล็กอีกวิธีหนึ่งก็คือการใช้ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจนเป็นแม่เหล็ก วัสดุแม่เหล็กนั้นยังมีโลหะอื่นที่ไม่ใช่เหล็ก แต่สามารถทำให้เป็นแม่เหล็กมีอำนาจแม่เหล็กมากกว่าเหล็กแท้ ๆ วัสดุแม่เหล็กที่มีอำนาจแม่เหล็ก

มาก ๆ นั้นทำมาจากเหล็กที่ผสมนิกเกิลและโคบอลต์ เรียกแม่เหล็กนี้ว่าแม่เหล็กจากแท่งแม่เหล็กเจือดังแสดงในรูปที่ 1.5 แท่งเหล็กที่สามารถทำเป็นแม่เหล็กได้ง่ายคือเหล็กอ่อน แต่ก็สูญเสียอำนาจแม่เหล็กได้เร็ว แม่เหล็กที่ทำมาจากเหล็กอ่อนนี้เรียกว่าแม่เหล็กชั่วคราว และแม่เหล็กที่ทำมาจากโลหะผสมของเหล็กจะมีอำนาจแม่เหล็กได้ยาวนานกว่าเหล็กอ่อนมากเรียกว่าแม่เหล็กถาวร โดยอำนาจแม่เหล็กจะมีความเข้มอยู่ ณ จุดสองจุดคือที่ปลายของแท่งแม่เหล็กเราเรียกว่าขั้วแม่เหล็ก โดยปลายด้านหนึ่งเป็นขั้วเหนือและปลายอีกด้านหนึ่งเป็นขั้วใต้ ขั้วเหนือคือขั้วแม่เหล็กซึ่งเมื่อแขวนแม่เหล็กให้เป็นอิสระจะชี้ไปทางเหนือส่วนขั้วใต้จะอยู่ตรงกันข้ามกับขั้วเหนือ แม่เหล็กจะมีรูปร่างลักษณะขนาดและกำลังที่แตกต่างกัน แม่เหล็กถาวรมักจะทำจากแท่งเหล็กจะเป็นแท่งตรงหรือแท่งโค้งรูปเกือกม้า



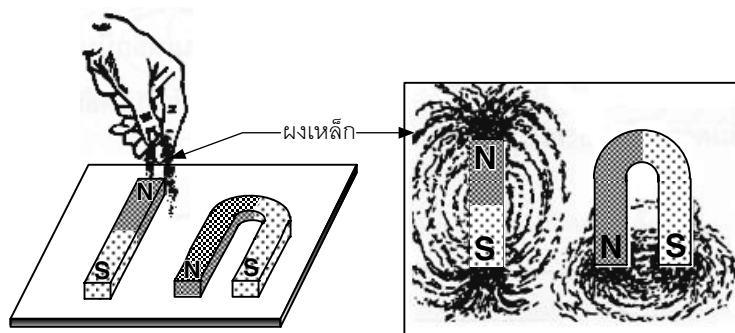
รูปที่ 1.5 แสดงอำนาจแม่เหล็กจากแท่งเหล็กและจากแท่งเหล็กเจือ

อำนาจแม่เหล็กไม่สามารถมองเห็นด้วยตาซึ่งเปรียบเทียบกับกระแสลมถึงแม้ว่าจะมีอำนาจมากแต่ก็ไม่สามารถมองเห็นด้วยตา อำนาจแม่เหล็กก็เช่นเดียวกันเรามองไม่เห็น แต่สามารถรู้ได้ด้วยความรู้สึก อำนาจแม่เหล็กจะวิ่งออกจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง เรียกว่าเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux line) ดังแสดงในรูปที่ 1.6

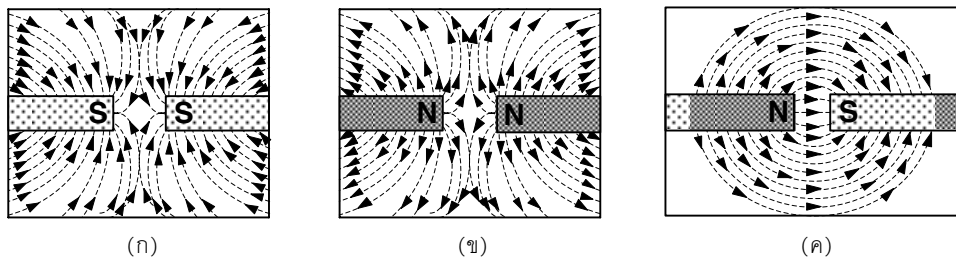


รูปที่ 1.6 แสดงเส้นแรงแม่เหล็ก

วิธีที่จะแสดงให้เห็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กรอบแม่เหล็กนั้น สามารถทำได้โดยการวางแม่เหล็กแท่งและแม่เหล็กเกือกม้าบนแผ่นพลาสติกแล้วค่อย ๆ โรยผงเหล็ก (ผงตะไบเหล็ก) ลงรอบ ๆ แม่เหล็กบนแผ่นพลาสติกนั้น และทำการเคาะเบา ๆ จะเห็นว่าผงเหล็กเหล่านั้นเรียงกันเป็นเส้นอยู่รอบ ๆ ขั้วแม่เหล็กแสดงให้เห็นถึงแนวของเส้นแรงแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กนั้นได้อย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 แสดงวิธีสาธิตสนามแม่เหล็กด้วยผงเหล็ก

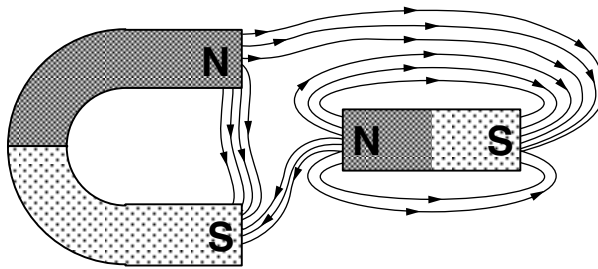


รูปที่ 1.8 แสดงการผลักและดูดของแม่เหล็ก

เมื่อนำขั้วแม่เหล็กขั้วหนึ่งของแม่เหล็ก 2 แท่งหันเข้าหากันจะเกิดการผลักกันดังรูปที่ 1.8 (ก) ซึ่งสามารถรู้สึกได้และในทำนองเดียวกันถ้านำขั้วใต้หันเข้าหากันบ้างก็จะมีแรงผลักรออกจากกันอีกด้วยดังรูปที่ 1.8 (ข) แต่ถ้าหากนำขั้วเหนือและขั้วใต้หันเข้าหากันขั้วแม่เหล็กทั้งสองจะดูดกันดังรูปที่ 1.8 (ค) ซึ่งเหมือนกับประจุไฟฟ้าสถิต คือประจุไฟฟ้าเหมือนกันจะผลักกันและประจุไฟฟ้าต่างกันจะดูดกัน อำนาจแม่เหล็กที่เกิดการดูดและผลักกันของแท่งแม่เหล็กนี้เกิดจากสนามแม่เหล็กรอบ ๆ แท่งแม่เหล็กนั้น โดยเส้นแรงแม่เหล็กจะออกจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ ส่วนภายในแท่งแม่เหล็กเองเส้นแรงแม่เหล็กจะออกจากขั้วใต้ไปสู่ขั้วเหนือ

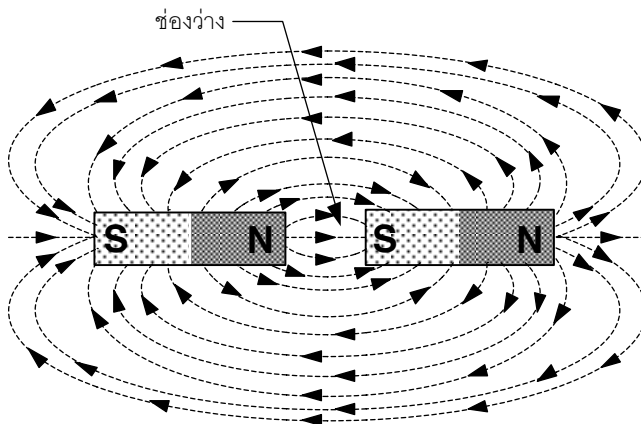
คุณสมบัติอีกอันหนึ่งของเส้นแรงแม่เหล็กคือ เส้นแรงแม่เหล็กแต่ละเส้นนั้นจะผลัดกัน จะไม่มีเส้นแรงแตรัดกัน หรือรวมกันเป็นเส้นเดียว ถ้าวางแท่งแม่เหล็กสองแท่งไว้ใกล้กันดังแสดงในรูปที่ 1.9 เส้นแรงแม่เหล็กจะปรับเปลี่ยนทางเดินใหม่ และไม่มีฉนวนใดในโลกที่จะกั้นเส้นแรงแม่เหล็กได้ เส้นแรงแม่เหล็ก

แม่เหล็กจะวิ่งผ่านวัตถุได้ทุกชนิดซึ่งจะแตกต่างกันก็ตรงที่วัตถุบางชนิดเส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ยาก และบางชนิดเส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ง่าย ซึ่งวัตถุที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ยากแสดงว่าวัตถุนั้นเฉื่อย หรือมีความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance) ต่อเส้นแรงแม่เหล็ก โดยความต้านทานแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กก็เหมือนกันกับความต้านทานในวงจรไฟฟ้านั่นเอง เส้นแรงแม่เหล็กจะเดินในทางที่มีความต้านทานแม่เหล็กต่ำและเนื่องจากอากาศมีความต้านทานแม่เหล็กสูงกว่าเหล็ก ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะเดินผ่านเหล็กได้ง่ายกว่าอากาศ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กในเหล็กมีมากกว่าในอากาศ นั่นคือถ้าต้องการเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กใดก็ตาม ให้เพิ่มเหล็กเข้าไปในวงจรนั้น

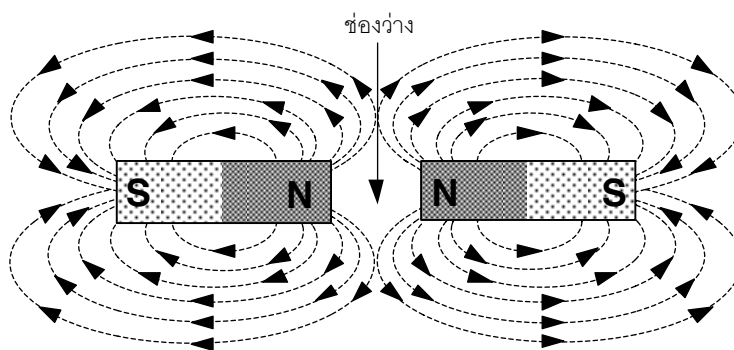


รูปที่ 1.9 แสดงการปรับลักษณะทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก

เส้นแรงแม่เหล็กนั้นจะมีลักษณะประหนึ่งยางยืดดังแสดงในรูปที่ 1.10 สังเกตที่ช่องว่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้วทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กจะโค้งออกเล็กน้อยจากขั้วเหนือสู่ขั้วใต้ สาเหตุที่เส้นแรงแม่เหล็กต้องโค้งออกเพราะว่าเส้นแรงแม่เหล็กแต่ละเส้นมีแรงผลักกัน ตัวเส้นแรงแม่เหล็กเองจะพยายามยืดรักษาความคงเส้นของตัวไว้ด้วยแรงดึง (Tension) ในตัวเอง จึงทำให้เส้นแรงแม่เหล็กโค้งออกเล็กน้อย

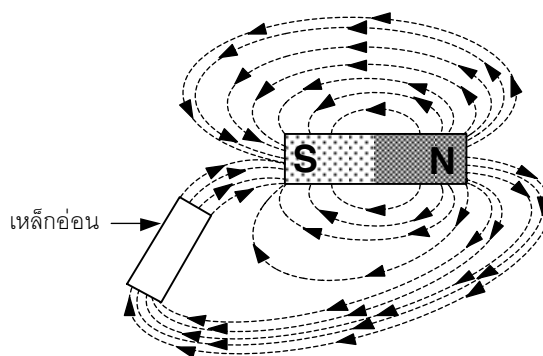


รูปที่ 1.10 แสดงลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีขั้วต่างกันติดกัน



รูปที่ 1.11 แสดงลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีขั้วเหมือนกันผลักกัน

ถ้าวางแท่งแม่เหล็ก 2 แท่งที่มีขั้วเหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 1.11 คือขั้วเหนือหันเข้าหากัน เมื่อพิจารณาคุณลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่ขั้วเหนือของแม่เหล็กทั้งสองจะมีเส้นแรงแวงออกมาซึ่งมีลักษณะเหมือนกับว่าจะสวนทางกัน แต่เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กจะไม่ตัดกัน เส้นแรงแม่เหล็กจึงพยายามเบี่ยงเบนหรือเลี้ยวออกจากกัน โดยเส้นแรงแม่เหล็กจะเลี้ยวออกไปทางด้านข้างของขั้วแม่เหล็กและจะขนานกันออกไป แรงผลักระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองจะรู้สึกได้ว่าเป็นแรงผลักระหว่างแม่เหล็ก



รูปที่ 1.12 แสดงการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในเหล็กอ่อน

จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่มีอยู่ในพื้นที่หนึ่งตารางเซนติเมตรเรียกว่าความเข้มสนามแม่เหล็ก เส้นทางที่เส้นแรงแม่เหล็กใช้เป็นทางเดินหรือเป็นจุดที่เส้นแรงแม่เหล็กเข้าหรือออกก็คือขั้วแม่เหล็ก ทางเดินนี้เรียกว่าวงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuit) จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่วิ่งผ่านก้อนวัตถุใด ๆ จะมีค่าสูงสุดเพียงค่าหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุนั้น ๆ เมื่อมีเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนเท่าค่าสูงสุดวิ่งผ่านวัตถุใดเรียกว่าวัตถุนั้นถึงจุดอิ่มตัวต่อเส้นแรงแม่เหล็ก (Saturation) และอำนาจแม่เหล็กนั้นอาจทำให้เกิดขึ้นได้ในสารที่ยังมิได้เป็นแม่เหล็กด้วยวิธีการเหนี่ยวนำ คือถ้าเราวางแท่งแม่เหล็กอ่อนแท่งหนึ่งลงในสนามแม่เหล็กถาวร ในระยะเวลาที่ไม่นานนักเหล็กอ่อนนั้นจะมีอำนาจแม่เหล็กเกิดขึ้น เพราะถูกเหนี่ยวนำ

สาเหตุที่เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในขณะนี้ เป็นเพราะเส้นแรงแม่เหล็กที่วิ่งอยู่ในอากาศจะพยายามเบนวิ่งเข้าหาแท่งเหล็กอ่อนดังแสดงในรูปที่ 1.12 เหล็กอ่อนนั้นมีความต้านทานแม่เหล็กน้อยกว่าอากาศ ขณะที่เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งผ่านเหล็กอ่อนโมเมนต์ของเหล็กอ่อนจะเรียงตัวกันใหม่ให้ขนานกับแนวเส้นแรง พร้อมกับชี้หัวเหนือของโมเมนต์ไปทางทิศเดียวกันกับเส้นแรงนั้นด้วย ในขณะนี้เองแท่งเหล็กอ่อนซึ่งถูกเหนี่ยวนำจะมีอำนาจแม่เหล็กและเกิดชั่วเหนื่อชั่วได้ดังแสดงในรูปที่ 1.12

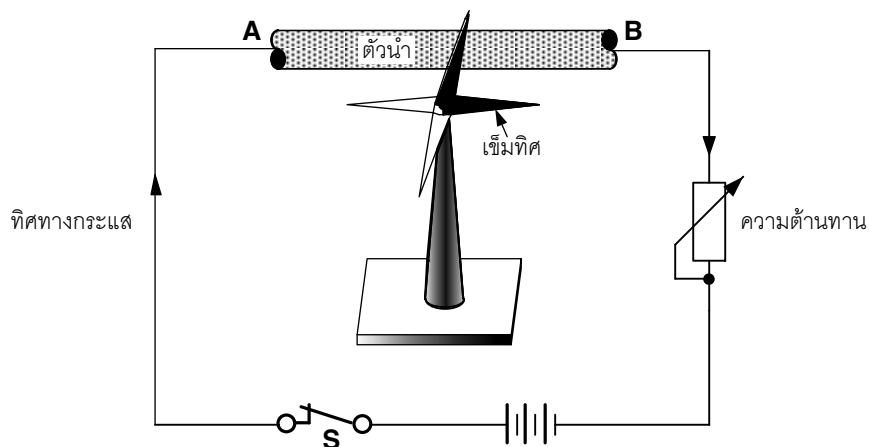
ต่อมาถ้ายกแท่งแม่เหล็กถาวรออก แท่งเหล็กอ่อนจะสูญเสียกำลังอำนาจแม่เหล็กลงไปมาก แต่ก็ไม่ถึงกับเป็นศูนย์ เพราะจะมีอำนาจแม่เหล็กตกค้างอยู่บ้าง อำนาจแม่เหล็กนี้เรียกว่าอำนาจแม่เหล็กตกค้าง (Residual flux หรือ Residual magnetism)

1.2 แม่เหล็กไฟฟ้า

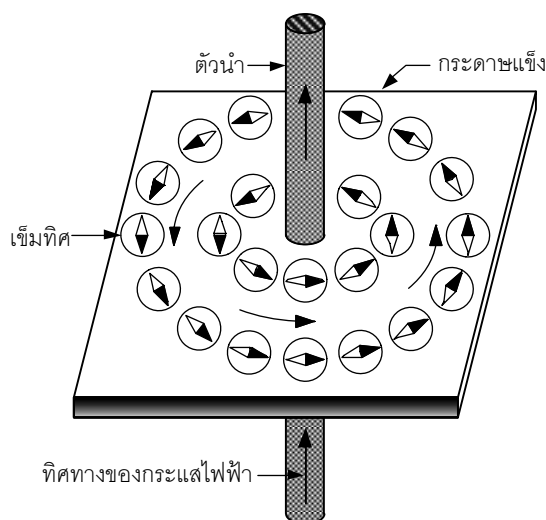
ในปี ค.ศ. 1819 แฮนส์ คริสเตียน เออร์สเตด (Hans Christian Oersted) นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์ก ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้า และพบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นเสมอ

การทดลองของเออร์สเตดนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 1.13 โดยการนำเอาลวดตัวนำไฟฟ้า AB ต่อเข้ากับเซลล์ไฟฟ้า และให้ตัวนำนั้นวางขนานกับเข็มทิศที่วางอยู่ใต้ตัวนำนั้น เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำจะทำให้เข็มทิศเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวขนานเดิม โดยเข็มทิศจะตั้งฉากกับตัวนำ AB แต่เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับทาง เข็มทิศจะเกิดการเบี่ยงเบนกลับทางไปอีกทิศทางหนึ่ง ซึ่งทำมุมกับตำแหน่งเดิม 180 องศา และยังพบอีกว่าถ้าให้ลวดตัวนำทำมุม 90 องศากับเข็มทิศแล้ว เข็มทิศจะไม่เบี่ยงเบนไปในทิศทางใด ๆ เลย

เออร์สเตดยังได้ค้นพบอีกว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้านั้น ประกอบไปด้วยเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนหนึ่งจัดเรียงเป็นวงรอบ ๆ ตัวนำที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านนั้น โดยตัวนำจะเป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมเหล่านี้นั้น เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำนี้ถ้ายังอยู่ห่างตัวนำมาก อำนาจแม่เหล็กก็ยิ่งน้อย การเกิดสนามแม่เหล็กนี้สามารถแสดงดังรูปที่ 1.14 โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ในแนวตั้งทะลุผ่านกระดาษแข็ง แล้วนำเข็มทิศวางไว้บนกระดาษแข็งตามตำแหน่งต่าง ๆ จะสังเกตเห็นว่าทิศทางของเข็มทิศจะหันเหเรียงตามกันไปเป็นวงกลมรอบตัวนำ โดยให้สีดำแทนด้วยหัวเหนือ และสีขาวแทนด้วยหัวใต้หรืออาจใช้ผงเหล็กโรย โดยจะสังเกตเห็นว่าผงเหล็กจะจัดเรียงตัวกันเป็นวงกลม

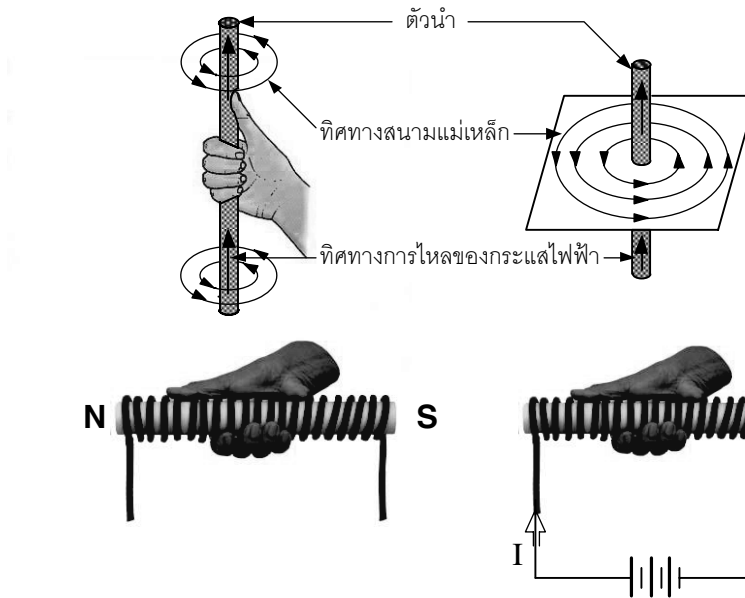


รูปที่ 1.13 การทดลองของเออร์สเตด



รูปที่ 1.14 แสดงการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ

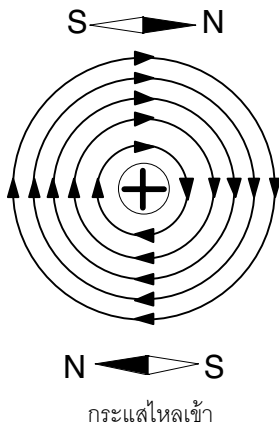
ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กรอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้ากับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำสามารถหาได้โดยการใช้กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก (Right hand rule for magnetic field) คือให้ใช้มือขวากำรอบตัวนำไฟฟ้า โดยให้หัวแม่มือชี้ไปตามความยาวของตัวนำ แทนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า และให้นิ้วทั้งสี่ที่เหลือกำรอบตัวนำ โดยนิ้วทั้งสี่นั้นจะแทนทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำนั้นดังแสดงในรูปที่ 1.15



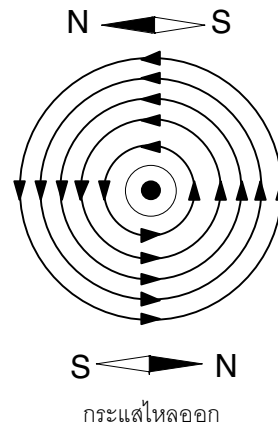
รูปที่ 1.15 แสดงกฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก

ลูกศรที่ใช้ในวงจรไฟฟ้าจะใช้แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าไปตามความยาวของตัวนำไฟฟ้า โดยจะกำหนดให้ด้านที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้าซึ่งเห็นกันลูกศรนั้นแทนด้วยเครื่องหมายกากบาท (+) ส่วนด้านที่กระแสไฟฟ้าไหลออก ซึ่งเห็นเป็นหัวลูกศรแทนด้วยเครื่องหมายจุด (•) และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำดังแสดงในรูปที่ 1.16 และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดแสดงได้ดังรูปที่ 1.17

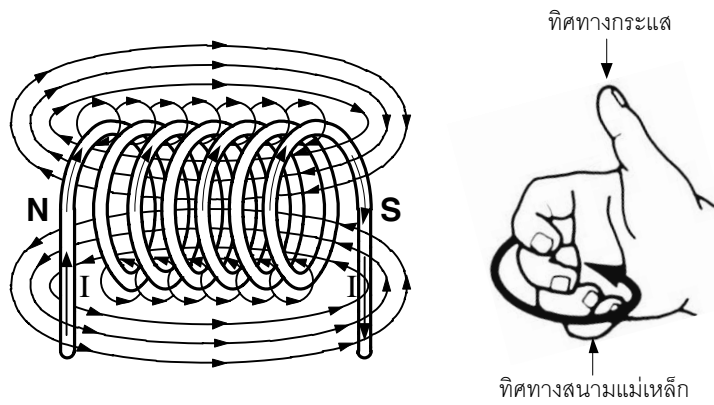
เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา



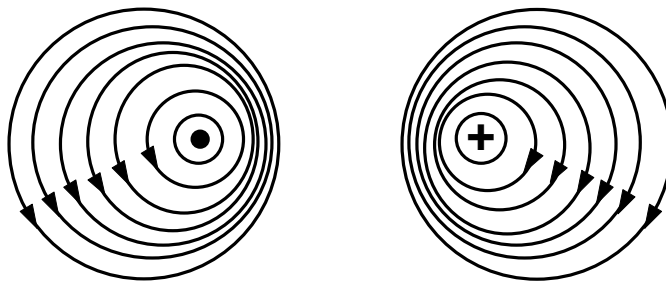
เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



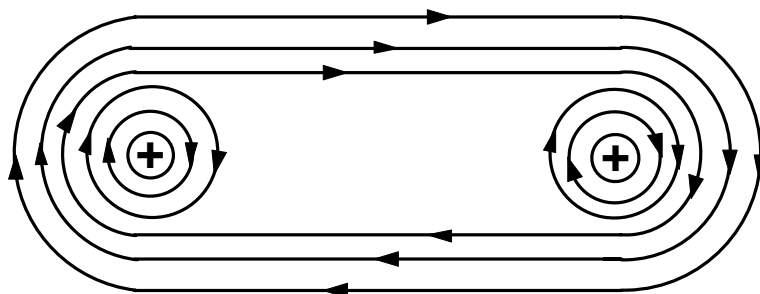
รูปที่ 1.16 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าและทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ



รูปที่ 1.17 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวด



(ก) แสดงทิศทางการไหลของกระแสในทิศทางตรงกันข้ามกันในตัวนำที่วางขนานกัน



(ข) แสดงทิศทางการไหลของกระแสในทิศทางเดียวกันในตัวนำที่วางขนานกัน

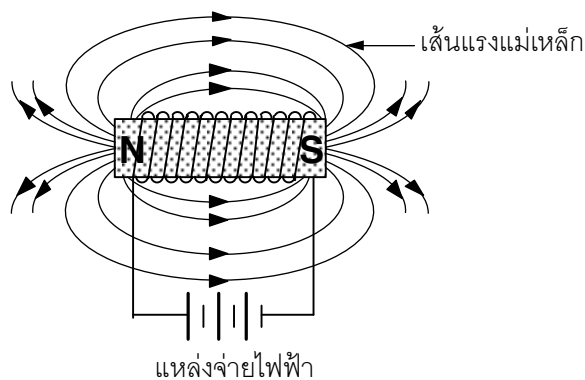
รูปที่ 1.18 แสดงการเกิดสนามแม่เหล็กที่ตัวนำสองตัววางขนานกัน

เมื่อนำตัวนำสองตัวมาวางขนานกัน และมีกระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางตรงกันข้ามกันดังแสดงในรูปที่ 1.18 (ก) สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำทั้งสองสามารถหาได้จากกฎมือขวา โดยกระแสไฟฟ้าไหลออกแสดงด้วยจุด คือตัวนำด้านซ้ายมือ และตัวนำด้านขวาให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าแสดงด้วยเครื่องหมายกากบาท ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำทางด้านซ้ายมือ จะมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ส่วนตัวนำทางด้านขวามือที่กระแสไหลเข้า เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังนั้นจะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำทั้งสองนั้นมีทิศทางไปในทางเดียวกัน ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเหมือนกัน จึงเกิดแรงผลักระหว่างตัวนำทั้งสองที่วางขนานกันนั้น

แต่ถ้าตัวนำทั้งสองที่วางขนานกันนั้นมีกระแสไหลไปในทิศทางเดียวกัน โดยสมมติให้กระแสไหลเข้าดังแสดงในรูปที่ 1.18 (ข) ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำทางด้านซ้ายจะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกาและเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำทางด้านขวาก็จะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกาเช่นเดียวกัน จึงทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่ต่างกัน เป็นเหตุให้เกิดแรงดูดกันขึ้น ตัวนำทั้งสองถูกดึงเข้ามาใกล้กัน

1.3 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuit)

วงจรแม่เหล็กหมายถึง ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งกฎเกณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจรแม่เหล็กก็เหมือนกันกับวงจรไฟฟ้า แต่ก็มีได้หมายความว่าเหมือนกันทั้งหมด เพราะหน่วยต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้านั้นจะต่างกัน แต่ความหมายต่าง ๆ นั้นมักจะคล้ายกัน เช่นแรงดันแม่เหล็กหมายถึงแหล่งที่ทำให้เกิดการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็ก ส่วนในวงจรไฟฟ้านั้นมีแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร



รูปที่ 1.19 แสดงลักษณะของการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ขดลวดเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหล

จากรูปที่ 1.19 เป็นการแสดงให้เห็นถึงลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ขดลวดที่พันไว้บนแกนเหล็ก โดยขดลวดนั้นมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ส่วนทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กนั้นสามารถหาได้จากการใช้กฎมือขวา

1.3.1 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux density)

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

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

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

Φ = เส้นแรงแม่เหล็กเป็นเวเบอร์ (Wb)

A = พื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็กเป็นตารางเมตร (m^2)

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

หรือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กอาจหาได้จากสมการดังต่อไปนี้คือ

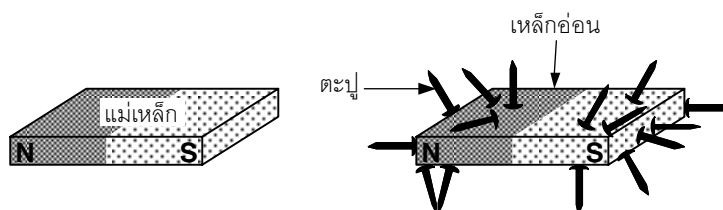
$$B = \mu H \quad \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$

เมื่อ μ = ความซาบซึมได้ของวัสดุ (ที่เป็นสารแม่เหล็ก) มีหน่วยเป็นเฮนรีต่อเมตรหรือเวเบอร์ต่อแอมแปร์เมตร ($\frac{\text{H}}{\text{m}}$ or $\frac{\text{Wb}}{\text{A-m}}$)

H = ความเข้มของสนามแม่เหล็กเป็นแอมแปร์ต่อเมตร หรือแอมแปร์รอบต่อเมตร ($\frac{\text{A}}{\text{m}}$ or $\frac{\text{A-T}}{\text{m}}$)

1.3.2 การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetic induction)

แม่เหล็กไม่จำเป็นเสมอไปที่จะต้องเอามาจากสารที่เป็นแม่เหล็กอยู่แล้ว ซึ่งอาจจะแยกออกมา หรือผ่าออกมาก็ตามที แต่เราสามารถทำแม่เหล็กได้โดยที่ไม่ต้องดูหรือสัมผัสกับแม่เหล็กเลยก็ได้ ตัวอย่างเช่น การนำเอาเหล็กอ่อนไปวางไว้ใกล้ ๆ แท่งแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 1.20 โดยเหล็กอ่อนนั้นจะกลายเป็นแม่เหล็กทันที ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการเอาตะปูไปไว้ใกล้ ๆ เหล็กอ่อนนั้นจะสามารถดูดตะปูได้ วิธีการกระทำนี้เรียกว่าวิธีการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก แม่เหล็กที่ได้จากการเหนี่ยวนำนี้จะมีอย่างน้อย 2 ขั้ว โดยขั้วที่อยู่ใกล้แท่งแม่เหล็กถาวรจะมีขั้วตรงกันข้ามกับขั้วของแท่งแม่เหล็กถาวรที่อยู่ใกล้กัน



รูปที่ 1.20 แสดงการทำแม่เหล็กโดยการเหนี่ยวนำ

1.3.3 ความซาบซึมได้ (Permeability)

จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ที่แท้จริงมันจะขึ้นอยู่กับโมเลกุลของแกนเหล็กว่าจะสามารถวางตัวในแนวเดียวกันได้ง่ายเพียงใด เรียกว่าความซาบซึมได้ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ μ (เป็นอักษรกรีกอ่านว่ามิว) ความซาบซึมได้นี้เป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นแห่งการเหนี่ยวนำต่อแรงดันแม่เหล็ก ดังนั้นจะได้ว่า

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

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

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

μ_0 = ค่าความซาบซึมได้ของอากาศบริเวณที่ไม่มีเส้นแรงใด ๆ มาเกี่ยวข้องเลยและไม่ใช้ในสุญญากาศ (เพราะว่าในสุญญากาศเส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้)

μ_r = ค่าความซาบซึมได้สัมพัทธ์ ซึ่งหมายถึงความซาบซึมได้ของสารอื่น ๆ (Relative permeability)

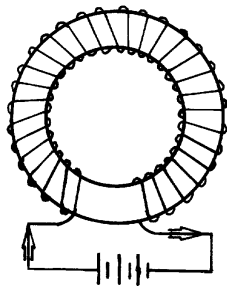
$\mu_r = 1$ สำหรับในอากาศ

μ_r เป็นอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในสารอย่างหนึ่งกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในอากาศ เมื่อใช้ความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากัน

ความซาบซึมได้คือ ความยินยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่าน ความซาบซึมของสุญญากาศเป็น 1 โดยปกติทั่วไปจะกล่าวถึงเฉพาะความซาบซึมได้สัมพัทธ์ ซึ่งหมายถึงตัวกลาง เช่นเหล็กยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้เป็นกี่เท่าของอากาศ เมื่อมีความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากัน

เส้นโค้งแสดงความเป็แม่เหล็ก

เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับความซาบซึมได้ดียิ่งขึ้น จึงขอยกตัวอย่างของสนามแม่เหล็กที่เกิดกับขดลวดโซลินอยด์ที่ขดเป็นวงกลมเรียกว่าทอรอยด์ (Toroid)



รูปที่ 1.21 แสดงลักษณะของทอรอยด์

การที่ขดโซลินอยด์ให้เป็นวงกลมนั้นมีความยาวเฉลี่ย 1 หน่วยความยาว สนามแม่เหล็กภายในไม่เปลี่ยนค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก แต่ถ้านำเอาแกนเหล็กมาใส่ภายในขดโซลินอยด์จะทำให้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนไปและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะมีค่าเพิ่มเป็นหลายร้อยเท่าของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเดิม ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะแปรตาม μ_r ซึ่งหมายความว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าของ μ_r หรือ $\frac{\mu}{\mu_0}$ ของสารนั้น ๆ

เส้นโค้งแสดงความเป็นแม่เหล็กเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) จากรูปที่ 1.21 ขดลวดทอรรอยด์นั้น ถ้าเพิ่มกระแสไฟฟ้า ไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นตามด้วย ถ้าเราเริ่มต้นจากกระแสเป็นศูนย์และมีเครื่องมือวัดค่าเส้นแรงแม่เหล็กในแกนทอรรอยด์เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H จากรูปที่ 1.21 ถ้าเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแกนเหล็กเช่นทอรรอยด์นั้นจะได้เส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 1.22 และรูปที่ 1.23 แต่ค่าความซาบซึมได้จะไม่คงที่ เมื่อค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นค่า μ จะเพิ่มจนถึงค่าสูงสุด เมื่อค่า μ ถึงค่าสูงสุดแล้วการเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็กก็จะไม่ทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นมากนักจนกระทั่งเกิดการอิ่มตัว จะทำให้ค่า μ ลดลงเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอีกดังแสดงในรูปที่ 1.24 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มของสนามแม่เหล็กบางครั้งเรียกว่า B-H curve หรือเส้นโค้งการอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก หรือเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก

สารใดมีค่า μ_r มากกว่า 1 เล็กน้อยสารนั้นจัดเป็นชนิดพาราแมกเนติก (Paramagnetic) เช่นอากาศ ไม้

สารใดมีค่า μ_r น้อยกว่า 1 สารนั้นจัดเป็นชนิดไดอาแมกเนติก (Diamagnetic) เช่นพวกอะลูมิเนียม หรือสารตัวนำสมบูรณ์ ซึ่งมี $\mu_r = 0$

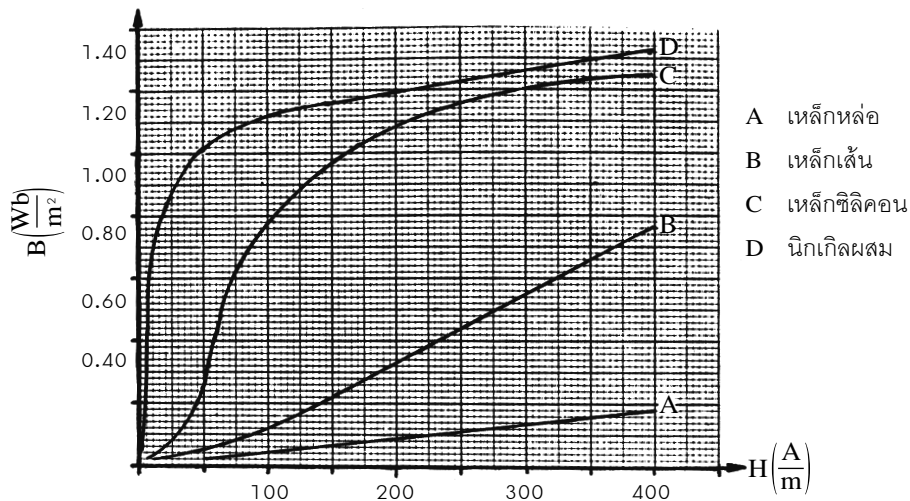
สารใดที่มีค่า μ_r สูงมาก ๆ จัดเป็นพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) โดยทั่วไปค่า μ_r จะอยู่ระหว่าง 1,000–1,000,000 โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารแม่เหล็ก และแม้แต่ในสารชนิดเดียวกันที่ค่าของความเข้มสนามแม่เหล็กต่างกัน ค่าของ μ_r จะไม่เท่ากัน

ค่าความสัมพันธ์จะไม่เป็นเส้นตรงและจะมีระดับหนึ่ง ถึงแม้ว่าเราจะเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กให้มากขึ้นไปอีกแต่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะไม่เปลี่ยนแปลง จุดที่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีกนี้เราเรียกว่าเป็นจุดอิ่มตัวของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของสารนั้นและค่าของ μ_r ที่มีขนาดสูงที่สุดของสารใด ๆ จะสามารถหาจากการลากเส้นตรงไปสัมผัสกับเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ของสารนั้น ซึ่งเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H

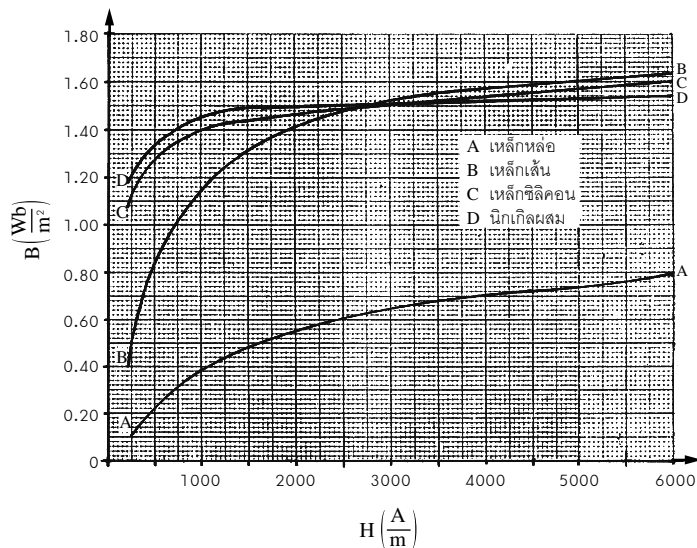
นี่เราเรียกว่าเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก หรือเส้นโค้งการอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก ณ จุดสัมผัสระหว่างเส้นตรงที่ลากจากจุดเริ่มต้นของเส้นโค้งและสัมผัสกับเส้นโค้ง ทำให้อ่านค่า B และ H ได้ และนำค่า B และ H ที่อ่านได้ในแต่ละจุดนั้นไปแทนค่าในสมการดังนี้คือ

$$\text{จาก } B = \mu_r \mu_0 H$$

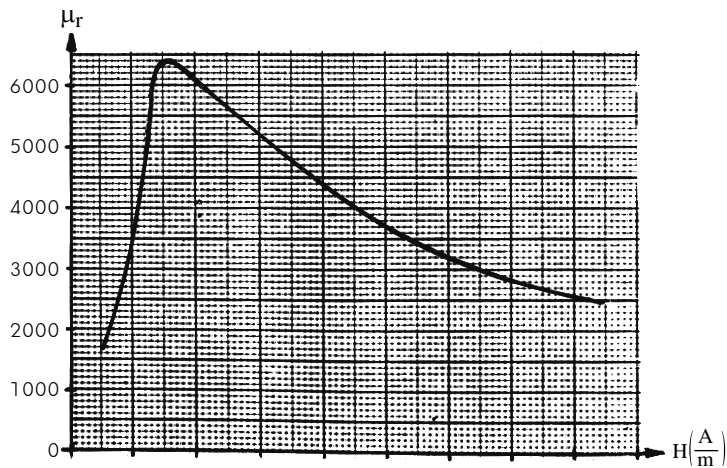
$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}$$



รูปที่ 1.22 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (B-H curve) เมื่อ $H < 400$ แอมแปร์ต่อเมตร



รูปที่ 1.23 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (B-H curve) เมื่อ $H > 400$ แอมแปร์ต่อเมตร



รูปที่ 1.24 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความซาบซึมได้กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก ($\mu - H$ curve)

ไดอาแมกเนติก หมายถึงการที่สารแม่เหล็กมีการต่อต้านกับสนามแม่เหล็กจากภายนอก สารแม่เหล็กแบบนี้เรียกว่า สารแม่เหล็กไดอาแมกเนติก (Diamagnetic substances) ผู้ที่ค้นพบคือ ไมเคิล ฟาราเดย์ เมื่อปี ค.ศ. 1846

พาราแมกเนติก หมายถึงการที่สนามแม่เหล็กจากภายนอกทำให้อะตอมเกิดแรงคู่ควบจัดเรียงตัวให้หันไปในทิศทางที่เรียงตัวกันตามสนามแม่เหล็กภายนอกนั้น คุณสมบัติที่สำคัญของความเป็นแม่เหล็กแบบนี้คือ ค่าความเป็นแม่เหล็กของสารเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งสารนั้นวางอยู่ และเป็นสัดส่วนกลับกันกับอุณหภูมิ ผู้ค้นพบคือ ปีแอร์ คิวรี (Pierre Curie) เมื่อปี ค.ศ. 1895

เฟอร์โรแมกเนติก อะตอมของสารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์จะมีการจัดโมเลกุลตัวคู่เหนี่ยวนำซึ่งกันและกันให้มีทิศทางไปทางเดียวกันภายใต้แรงกระทำซึ่งกันและกัน คุณสมบัติที่เด่นชัดของสารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์คือความเป็นแม่เหล็กของสารไม่เป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และสารอาจแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กได้ถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามแม่เหล็ก สารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์มีอยู่ 5 ธาตุ ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล กาโดลิเนียม และดิสโปรเซียม โดยสารทั้ง 5 นี้จะคงสภาพเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ตามอุณหภูมิยังไม่เกินค่าอุณหภูมิของคิวรี (Curie temperature) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้จะเปลี่ยนเป็นสารแม่เหล็กพาราแมกเนติก เหล็กมีอุณหภูมิคิวรี 1043°K คุณสมบัตินี้จะเกิดได้แม้ว่าอะตอมของธาตุทั้ง 5 นี้จะอยู่ในโครงสร้างของผลึก ซึ่งไม่ใช่มีแต่ธาตุทั้ง 5 นี้อย่างเดียว ค่าความซาบซึมได้ของสารต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แสดงค่าความซาบซึมได้ของสารต่าง ๆ

สาร	$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$
บิสมัท	0.99983
เงิน	0.99998
ทองแดง	0.99999
น้ำ	0.99999
อากาศ	1.0000004
อะลูมิเนียม	1.00002
โคบอลต์	250
นิกเกิล	600
เหล็กหล่อ	2000
เหล็กเส้น	5000
แกนเหล็กหม้อแปลง (เหล็กกล้าซิลิคอน)	7000
ซูเปอร์มัลลอย (Supermalloy)	1000000
48 เปอร์มัลลอย (48 Permalloy)	6000
78 เปอร์มัลลอย (78 Permalloy)	7000
โมเปอร์มัลลอย (Mopermalloy)	9000
ซินิแมก (Sinimax)	3500
โมนิแมก (Monimax)	3500
มิวเมทอล (Mumetal)	9000

เมื่อใช้แกนเหล็กในการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก จะเห็นว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นตามเส้นโค้งการเกิดอำนาจแม่เหล็กตามเส้น AB จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวของเส้นโค้ง แล้วถ้าทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กหมดไปโดยการลดกระแสไฟฟ้าที่ล้นน้อยจนกระทั่งกระแสเป็นศูนย์ ค่าความหนาแน่นของเส้น

แรงแม่เหล็กจะลดลงแต่ไม่ซำรอยเส้นโค้งเดิม โดยที่กระแสเป็นศูนย์แล้ว ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะยังไม่เป็นศูนย์จะได้เส้นโค้งเป็นเส้น BC ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง ดังแสดงในรูปที่ 1.25 และถ้าต้องการทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (Residual magnetism) ในแกนเหล็กลดลงเป็นศูนย์ เราจะต้องเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าใหม่ และวัดค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะได้เส้นโค้งดังเส้น CD เมื่อถึงจุด D อันเป็นจุดอิ่มตัว ในอีกทิศทางหนึ่งของค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และถ้าลดปริมาณของกระแสไฟฟ้าลง เส้นโค้งจะเป็นตามแนวของเส้น DE และถ้าเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสใหม่และค่อย ๆ เพิ่มกระแสไฟฟ้าอีกเส้นโค้งจะเป็นเส้น EB ซึ่งทำให้เส้นรอบรูปเป็น BCDEB ซึ่งเส้นโค้งดังกล่าวนี้เรียกว่า เส้นโค้งความล่าหรือเส้นโค้งฮิสเตอรีซิส (Hysteresis curve)

เส้นโค้งฮิสเตอรีซิสมีความสำคัญในการที่จะใช้ออกแบบหรือจัดหารามาทำแกนแม่เหล็ก แม่เหล็กถาวร เช่นแม่เหล็กแท่ง หรือแม่เหล็กเกือกม้า หรือแม่เหล็กที่ใช้ทำเป็นเข็มทิศจะต้องมีเส้นโค้งฮิสเตอรีซิสกว้าง ๆ เพื่อให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กคงอยู่ได้นาน สารดังกล่าวเอามาทำแม่เหล็กไฟฟ้าได้ไม่ดี ถ้าจะเอาเหล็กมาทำแกนหม้อแปลง เหล็กดังกล่าวจะต้องมีเส้นโค้งฮิสเตอรีซิสแคบ ๆ ด้วย เหตุผลคือการกลับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กในหม้อแปลงต่อหนึ่งไซเคิลของไฟฟ้ากระแสสลับนั้น ต้องสิ้นเปลืองพลังงาน พื้นที่เส้นโค้งฮิสเตอรีซิสจะบอกปริมาณพลังงานที่สูญเสียไปในหนึ่งไซเคิลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัตถุที่ทำแกนหม้อแปลง พลังงานดังกล่าวจะสูญเสียไปมากในเมื่อเส้นโค้งฮิสเตอรีซิสกว้าง ๆ วัสดุที่ใช้ทำแม่เหล็กถาวรที่มีเส้นโค้งฮิสเตอรีซิสกว้าง ได้แก่โลหะผสมอัลนิโค (Alnico) ทำจากอะลูมิเนียม นิกเกิล และเหล็กโคบอลต์ ส่วนแกนเหล็กหม้อแปลงนั้นนิยมใช้เหล็กอ่อน (Soft iron) เนื่องจากมีพื้นที่เส้นโค้งฮิสเตอรีซิสแคบ ดังแสดงในรูปที่ 1.26 ค่าฮิสเตอรีซิสนี้วัดเป็นพลังงานซึ่งสูญเสียไปในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็กในแท่งเหล็กนั้น พื้นที่ของรูปฮิสเตอรีซิสจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสารแม่เหล็ก จากรูปที่ 1.26 (ก) เป็นค่าของเหล็กชนิดแข็ง เนื่องจากเป็นเหล็กชนิดที่มีความสามารถในการเก็บอำนาจแม่เหล็กไว้ได้สูงและมีอำนาจในการกลับที่เดิมช้า มีคุณสมบัติเกือบเป็นแม่เหล็กถาวรจึงมีค่าฮิสเตอรีซิสสูง แสดงว่ามีพื้นที่มาก การที่นำมาทำเป็นโลหะผสมระหว่างอะลูมิเนียม นิกเกิลกับเหล็กกล้าเรียกว่าอัลนิโคอัลลอย (Alnico alloys) ซึ่งพบว่าสารนี้มีอำนาจเป็นแม่เหล็กถาวรได้

จากรูปที่ 1.26 (ข) เป็นเหล็กอ่อนและเหล็กหล่อ แสดงว่าวัตถุนั้นมีความซาบซึมของแม่เหล็กได้สูง มีอำนาจการกลับคืนของแม่เหล็กปานกลาง ดังนั้นเหล็ก 2 อย่างนี้สามารถทำเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าได้

จากรูปที่ 1.26 (ค) เป็นเหล็กแผ่นบางผสม แสดงถึงมีความซาบซึมของแม่เหล็กได้สูงมาก และมีค่าฮิสเตอรีซิสต่ำ ดังนั้นวัตถุส่วนใหญ่ที่ใช้ทำอาร์เมเจอร์และแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้วัตถุที่มีอำนาจการกลับคืนของแม่เหล็กเร็ว