

บทที่ 1

แม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก

(ELECTROMAGNETS AND MAGNETIC CIRCUITS)

จุดประสงค์การสอน

1. พื้นฐานวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า

11 พิจารณาเลือกลักษณะวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า

111 อธิบายหน่วยต่างๆ ที่ใช้ในวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า

112 คำนวณหาค่าวงจรแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างง่าย

12 รู้คุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ

121 บอกลักษณะของ B-H Curve และการสูญเสียเนื่องจาก Hysteresis Loop

122 บอกชนิดการจัดระดับแกนเหล็ก

บทที่ 1

แม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก

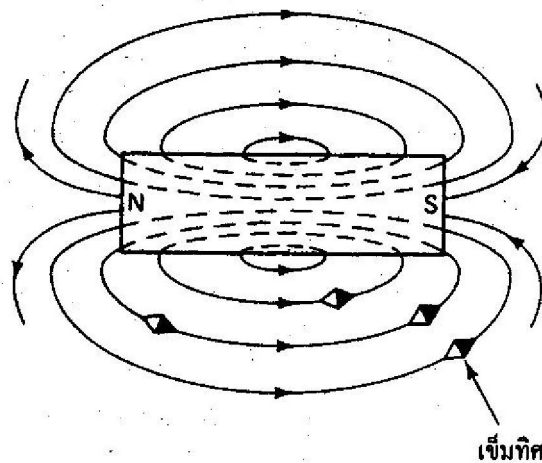
(ELECTROMAGNETS AND MAGNETIC CIRCUITS)

1.1 บทนำ

ในเครื่องกลไฟฟ้า (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้า) และหม้อแปลงไฟฟ้ามีทั้งวงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก โดยอาศัยขดลวดซึ่งพันรอบแกนเหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านวงจรแม่เหล็ก ปฏิสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเส้นแรงแม่เหล็กก่อให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของพลังงาน เช่น ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ในมอเตอร์ไฟฟ้าทำหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล สำหรับหม้อแปลงก็จะทำหน้าที่ส่งผ่านหรือถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากขดลวดปฐมภูมิไปยังขดลวดทุติยภูมินั่นเอง

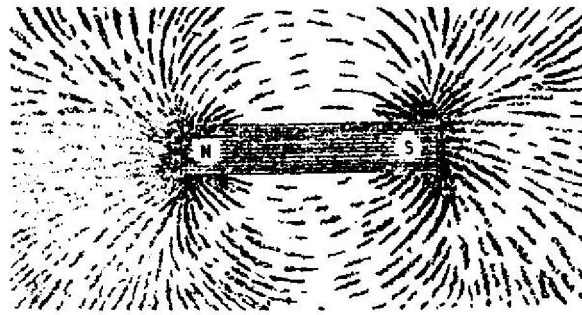
1.2 สนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็ก (magnetic field) รอบๆ แท่งแม่เหล็ก จะประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux) หลายๆ เส้น ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กแต่ละเส้นจะไหลออกจากขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กและไหลเข้าทางขั้วใต้แล้วไหลกลับไปยังขั้วเหนือครบวงจร (closed loop) ของมัน แม่เหล็กที่มีแรงดึงดูดหรือแรงผลักมาก ก็หมายความว่ามันมีปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กมากนั่นเอง



รูปสนามแม่เหล็กรอบๆ แท่งแม่เหล็ก

จากรูปเราสามารถทดสอบได้โดยการนำเข็มทิศไปวางในตำแหน่งต่างๆ รอบแท่งแม่เหล็กดังรูป



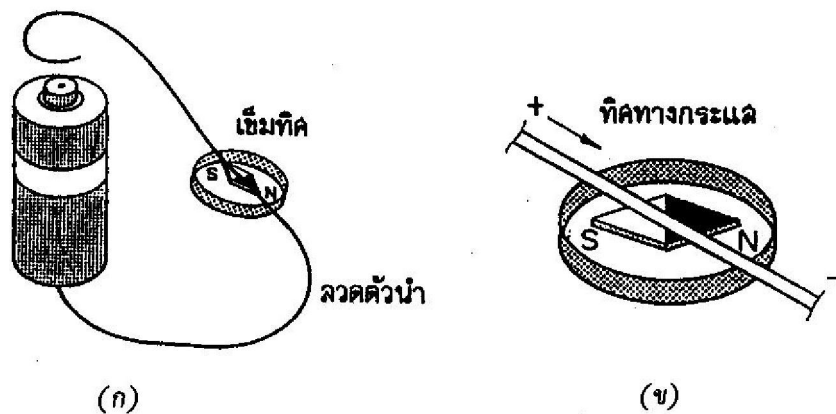
รูปลักษณะของผงตะไบเหล็กเรียงตัวกันเป็นเส้นแรงแม่เหล็กรอบแท่งแม่เหล็ก

จากรูปเป็นการทดสอบโดยการใช้ผงตะไบเหล็กโรยรอบๆ แม่เหล็ก จะสังเกตเห็นการเรียงตัวของผงตะไบเหล็กตามแนวทางของเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างขั้วแม่เหล็กทั้งสอง และจะสังเกตเห็นว่าบริเวณใกล้ๆ ขั้วแม่เหล็ก จะมีเส้นแรงแม่เหล็กหนาแน่นกว่าบริเวณที่ห่างขั้วแม่เหล็กออกไป เนื่องจากความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลงเมื่อห่างจากขั้วแม่เหล็กมากๆ

1.3 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้า

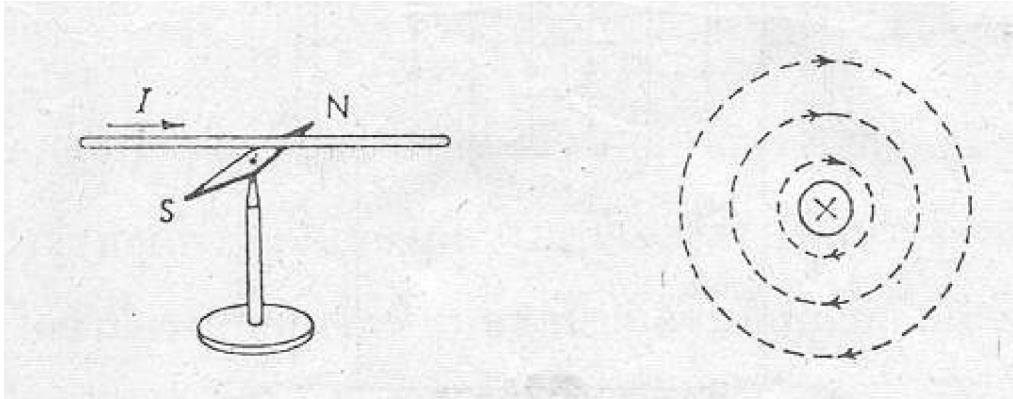
(Magnetic field due to an electric current)

เมื่อมีกระแสไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ จะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบตัวนำนั้นปรากฏการณ์นี้ค้นพบโดยนักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์กชื่อ แฮนส์ คริสเตียน เอร์สเตด (Hans Cristian Oersted) ณ กรุงโคเปนเฮเกนเมื่อปี ค.ศ. 1820 เขาพบว่า เมื่อเอาเส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านไปวางเหนือเข็มทิศเข็มทิศจะบ่ายเบนไปในตำแหน่งตั้งฉากกับเส้นลวดตัวนำ โดยทิศทางการเข็มหรือทวนเข็มนาฬิกา ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสที่ไหลในเส้นลวดตัวนำ นั่นหมายความว่า มีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น



รูป (ก) แสดงการทดลองของเอร์สเตด เมื่อยังไม่มีกระแสไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ เข็มทิศจะชี้ไปในแนวทิศเหนือ-ใต้

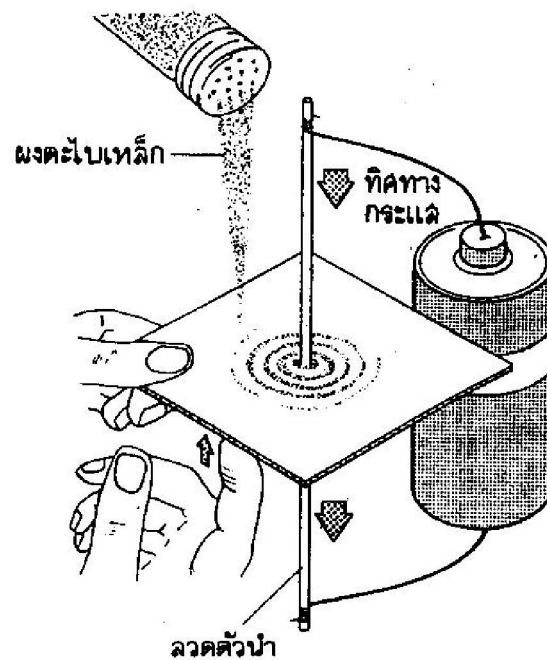
รูป (จ) เมื่อมีกระแสไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ เข็มทิศจะเบนไปอยู่ในตำแหน่งตั้งฉากกับสายไฟ



รูป 1-1 แสดงการทดลองของเออร์สเตด

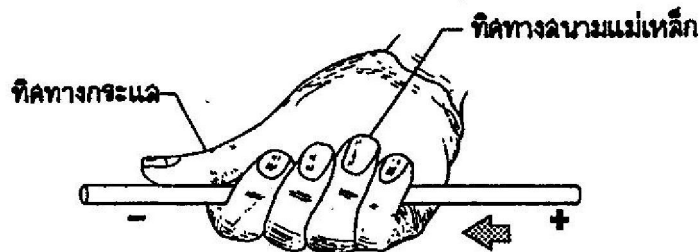
รูป 1-2 เส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบตัวนำที่มีกระแสไหลเข้า (เครื่องหมายกากบาทคือหางลูกศร)

จากปรากฏการณ์ดังกล่าว อาจทำการทดลองได้อีกวิธีหนึ่งคือ ใช้ผงตะไบเหล็กเทลงบนแผ่นกระดาษแข็ง แล้วจ่ายกระแสให้ไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ ใช้มือเคาะแผ่นกระดาษแข็งเบาๆ จะพบว่าผงตะไบเหล็กจะจัดเรียงตัวเองเป็นวงๆ ดังรูป



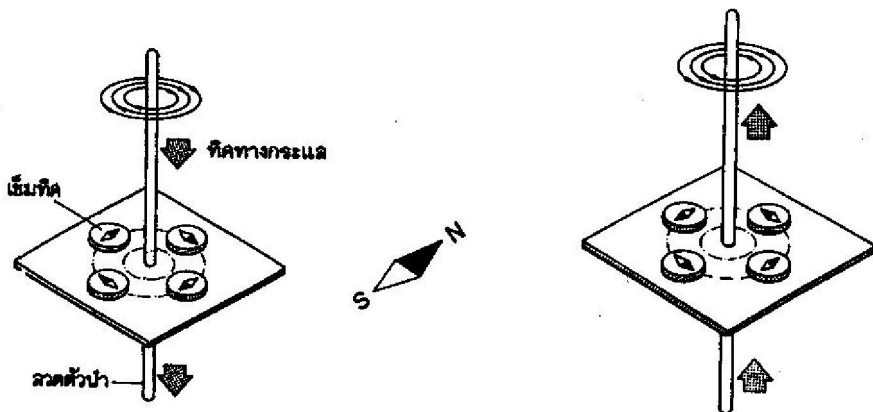
รูปการทดลองให้เห็นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ เส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน โดยใช้ผงตะไบเหล็ก

ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่รอบเส้นลวดตัวนำ และทิศทางกระแสในเส้นลวดตัวนำ สามารถหาได้โดยใช้ “ กฎมือขวาของตัวนำ ” (Right-hand rule of conductor) คือ ถ้าใช้มือขวากำรอบตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน โดยให้หัวแม่มือชี้ทิศทางของกระแส ปลายนิ้วมืองอที่กำรอบตัวนำ จะชี้ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำ ดังรูป

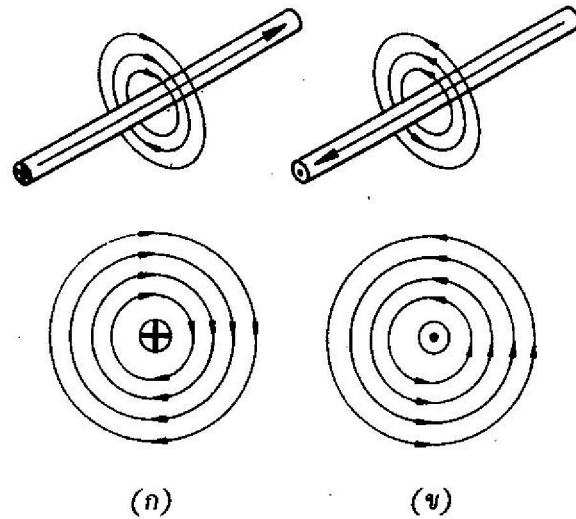


ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดรอบๆ ตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านสามารถแสดงให้เห็นได้ ดังรูป โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดที่ร้อยทะลุผ่านตั้งฉากกับกระดาษแข็ง หรือแผ่นพลาสติกใส ขนาดและทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำทราบได้จากการนำเข็มทิศไปวางไว้ตามตำแหน่งต่างๆ รอบๆ เส้นลวดตัวนำ แล้วสังเกตการเบี่ยงเบนของเข็มทิศ

ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นให้สังเกตจากขั้วเหนือของเข็มทิศที่เบี่ยงเบนไป การเบี่ยงเบนของเข็มทิศแสดงว่ามีเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นเป็นรูปวงกลมรอบๆ เส้นลวดตัวนำ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลลงด้านล่าง เส้นแรงแม่เหล็กที่รอบตัวนำจะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา หากกลับขั้วของแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

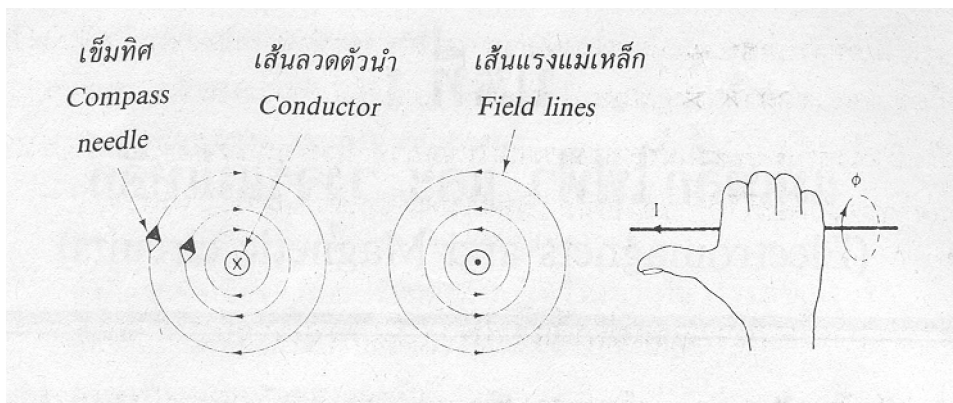


โดยทั่วไป หัวลูกศรที่ใช้ในวงจรไฟฟ้า จะใช้แสดงทิศทางกระแสไฟฟ้าไปตามความยาวสายไฟฟ้า แต่เมื่อต้องการแสดงภาพพื้นที่หน้าตัดสายไฟฟ้า แสดงทิศทางกระแสไหลเข้า (ไหลออกจากตัวเรา) จะใช้เครื่องหมายกากบาท (Cross) \otimes แทนหางลูกศร ดังรูป (ก) หากต้องการแสดงภาพพื้นที่หน้าตัดของสายไฟฟ้าแสดงทิศทางกระแสไหลออก (ไหลเข้าหาตัวเรา) จะใช้เครื่องหมายจุด (Dot) \odot แทนหัวลูกศร ดังรูป (ข)



รูป (ก) แสดงพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไหลเข้า เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำจะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา

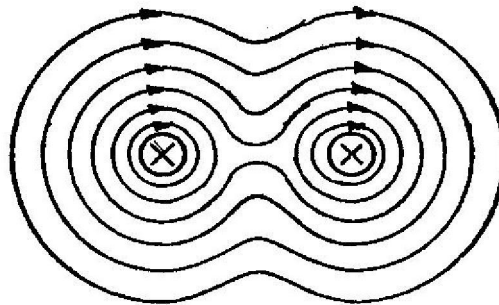
รูป (ข) แสดงพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไหลออก เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำจะมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



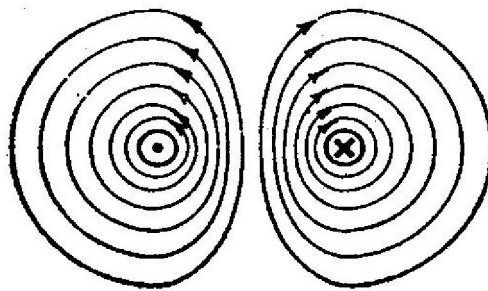
รูป 1-3 ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน ก. กระแสไหลเข้าไปในหน้ากระดาษ ข. กระแสไหลออกจากหน้ากระดาษ ค. แสดงการใช้กฎมือขวาของตัวนำ

เมื่อนำเส้นลวดตัวนำสองเส้นที่มีกระแสไหลในทิศทางเดียวกันมาวางใกล้ๆ กัน ดังรูป สนามแม่เหล็กรอบตัวนำทั้งสองมีทิศทางเดียวกัน ผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำทั้งสองจะพยายามดึงลวดตัวนำทั้งสองเส้นให้เคลื่อนที่เข้าหากัน แต่ถ้าหากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเส้นลวดตัวนำทั้งสองเส้นมีทิศทางตรงกันข้ามกัน ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำทั้งสองจะหนาแน่นมากตรงช่องระหว่างลวดตัวนำทั้งสองเส้น จึงเกิดแรงผลักทำให้ลวดทั้งสองเส้นแยกตัวออกจากกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า

เมื่อตัวนำสองตัววางขนานกันหากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปในทิศทางเดียวกัน จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน หากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปในทิศทางตรงข้ามกันจะเกิดแรงผลักซึ่งกันและกัน



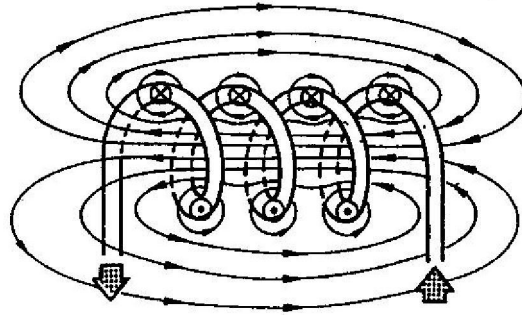
(ก)



(ข)

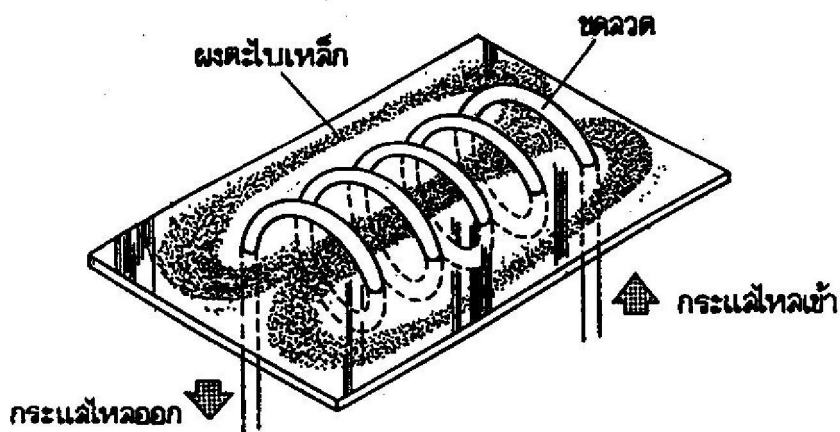
1.4 สนามแม่เหล็กกรอบขดลวด (Magnetic field around a coil)

สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ เส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะเกิดขึ้นทุกๆ จุดตลอดความยาวของเส้นลวดตัวนำตลอดความยาวของเส้นลวดตัวนำ ซึ่งสนามแม่เหล็กนั้นประกอบด้วยวงของเส้นแรงแม่เหล็กซ้อนกันหลายๆ วง และมีจุดศูนย์กลางร่วมกันคือเส้นลวดตัวนำ หากนำเส้นลวดตัวนำมาพันเป็นขดลวดโซลินอยด์ (Solenoid) แกนอากาศ ดังรูป แล้วนำปลายทั้งสองของขดลวดต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตามทิศทางที่แสดงไว้ สนามแม่เหล็กของขดลวดแต่ละรอบจะคล้องกับสนามแม่เหล็กของรอบที่อยู่ติดกัน ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดถูกรอบจะทำให้ขดลวดโซลินอยด์ดังกล่าวกลายเป็นแม่เหล็กสองขั้ว โดยปลายด้านซ้ายของขดลวดจะเป็นขั้วเหนือ และปลายด้านขวาจะเป็นขั้วใต้



⊗ กระแสไหลเข้า ⊙ กระแสไหลออก

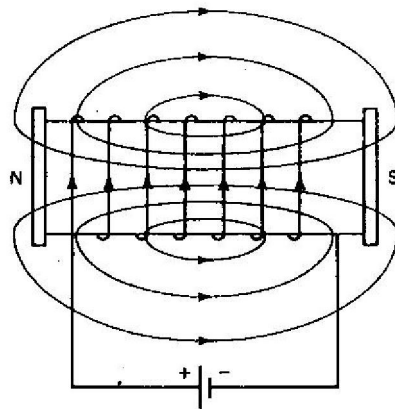
รูปสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์



รูปแสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ โดยใช้ผงตะไบเหล็ก

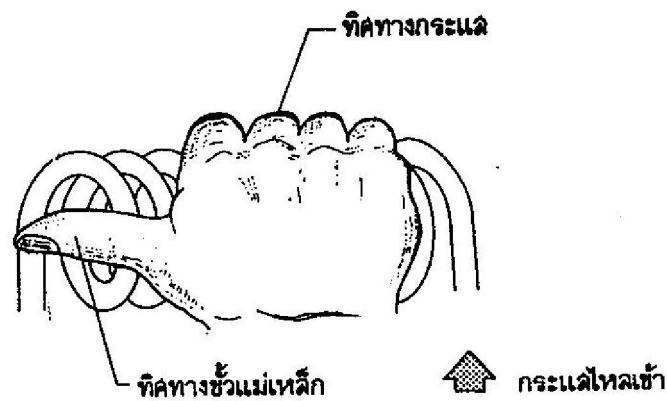
รูปด้านบนแสดงการโรยผงตะไบเหล็กลงบนแผ่นกระดาษที่มีขดลวดพันทะลุแผ่นกระดาษ เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวด ผงตะไบเหล็กจะจัดเรียงตัวเองเป็นวงรอบขดลวดสองวง มีลักษณะคล้ายกับสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร

ถ้าเราพันขดลวดรอบแกนเหล็กดังรูปที่ 1-4 และต่อปลายขดลวดเข้ากับขั้วแบตเตอรี่ แกนเหล็กจะกลายเป็นแม่เหล็กและมีคุณสมบัติคล้ายกับแม่เหล็กถาวร ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเขียนแทนด้วยหัวลูกศร โดยปลายของแกนเหล็กด้านซ้ายจะเป็นขั้วเหนือ และปลายด้านขวาจะเป็นขั้วใต้ ถ้ากลับทิศทางกระแสในขดลวดหรือกลับขั้วแบตเตอรี่ จะทำให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปหรือขั้วแม่เหล็กด้านซ้ายจะเปลี่ยนเป็นขั้วใต้ และด้านขวาจะเปลี่ยนเป็นขั้วเหนือนั่นเอง

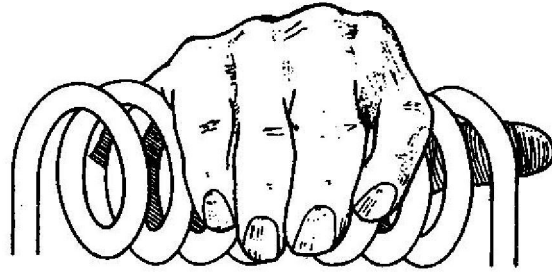


รูป 1-4 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวด

เมื่อทราบทิศทางกระแสไหลในขดลวด เราสามารถหาขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้โดยใช้ “กฎมือขวาของขดลวด” (Righthand rule for coil) ซึ่งกล่าวว่า ให้กำขดลวดด้วยมือขวาโดยให้นิ้วทั้งสี่กำขดลวดชี้ทิศทางกระแสในขดลวด นิ้วหัวแม่มือซึ่งยื่นออกไปขนานกับแกนของขดลวดจะชี้ไปทางขั้วเหนือ (ทิศทางสนามแม่เหล็กภายในขดลวด)



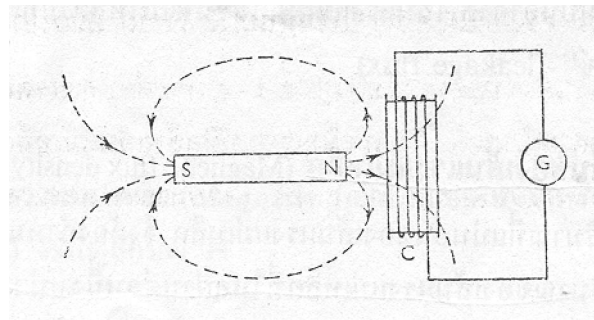
รูป การใช้กฎมือขวาของขดลวดหาทิศทางของขั้วแม่เหล็ก จะได้ขั้วเหนือเกิดขึ้นที่ปลายด้านซ้ายของขดลวด



เมื่อทิศทางกระแสที่ไหลในขดลวดเปลี่ยนแปลงไป จะได้ชั่วเหนื่อเกิดขึ้นที่ปลายด้านขวาของขดลวด

1.5 การเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic induction)

ในปี ค.ศ. 1831 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ คือ ไมเคิลฟาราเดย์ (Michael Faraday) ได้ค้นพบหลักสำคัญเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำไฟฟ้าคือ ถ้ามีขดลวด C ปลายของขดลวดต่อกับกัลวานอมิเตอร์ G (แอมป์มิเตอร์ที่มีความไวสูง) ดังรูปที่ 1-5 แล้วนำแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่เข้าไปในขดลวด เข็มของ กัลวานอมิเตอร์จะบ่ายเบนไปในทิศทางหนึ่ง แสดงว่ามีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด C หลังจากการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กถาวรหยุดลง เข็มของกัลวานอมิเตอร์จะกลับมายังที่ศูนย์ตามเดิม ผลการทดลองพิสูจน์ได้ว่ามีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ เมื่อเทียบกับ ขดลวด C



รูปที่ 1-5 วงจรการทดลองหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ถ้าเราจับขั้วแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ออกห่างจากขดลวด C เข็มของกัลวานอมิเตอร์จะบ่ายเบนไปในทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรก แสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด C มีทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรกเช่นกัน ถ้าเราจับแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างๆ กัน จะพบว่ายิ่งมีความเร็วมาก เข็มของกัลวานอมิเตอร์ก็ยิ่งบ่ายเบนมากดังนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดก็ต้องมากขึ้นด้วย

ผลที่ได้รับจากการทดลองเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า สรุปได้ดังนี้

- ก. เมื่อลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดเส้นแรงแม่เหล็ก หรือเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดลวดตัวนำ จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในลวดตัวนำ
- ข. ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็กและขึ้นอยู่กับทิศทางของลวดตัวนำที่เคลื่อนที่สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก
- ค. ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราความเร็วที่ลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดหรือถูกตัดโดยเส้นแรงแม่เหล็ก

1.6 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density) ใช้สัญลักษณ์ B

เพื่อให้ทราบปริมาณที่แน่นอนของเส้นแรงแม่เหล็ก จึงต้องกำหนดพื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่าน ปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลผ่านต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เรียกว่า “ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก” (magnetic flux density) ดังนั้นหน่วยความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก คือ เวเบอร์/ตารางเมตร (Wb/m^2) หรือ เทสลา (Tesla)

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad \dots 1.1$$

เมื่อ B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก เป็น เวเบอร์ / ตารางเมตร

Φ = เส้นแรงแม่เหล็ก เป็น เวเบอร์

A = พื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็ก เป็น ตารางเมตร

1.7 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force) ใช้สัญลักษณ์ F

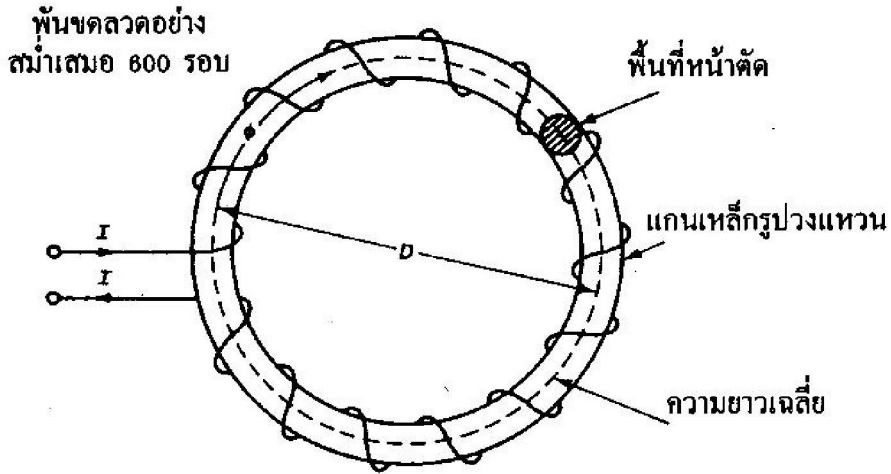
ความสามารถในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดที่พันอยู่รอบแกนเหล็กรูปวงแหวนของรูปที่ 1-6 เรียกว่า “แรงเคลื่อนแม่เหล็ก” (magnetomotive force) หรือ m.m.f. ซึ่งเป็นสัดส่วน โดยตรงกับจำนวนรอบ (N) ของขดลวด และกระแส (I) ที่ไหลผ่านขดลวด หน่วยของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก คือ แอมแปร์ (A)

$$F = NI \quad \dots 1.2$$

เมื่อ F = แรงเคลื่อนแม่เหล็ก เป็น แอมแปร์-เทินส์ หรือ แอมแปร์

N = จำนวนรอบของขดลวด เป็น รอบ (turns)

I = กระแสที่ไหลผ่านขดลวด เป็น แอมแปร์



รูปที่ 1-6 วงจรแม่เหล็กทอรอยด์ (Toroid)

1.8 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity) หรือ แรงแม่เหล็ก (Magnetic force) ใช้สัญลักษณ์ H

คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวของวงจรแม่เหล็ก วงจรแม่เหล็กที่มีเส้นแรงแม่เหล็กสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 1-6 จะมีค่าของแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวคงที่ตลอดแนวของเส้นแรงแม่เหล็กนั้น นั่นหมายความว่าความเข้มสนามแม่เหล็กคือ แอมแปร์/เมตร (A/m) หรือ แอมแปร์-เทินส์ / เมตร (At/m)

$$H = \frac{F}{l} = \frac{NI}{l} \quad \dots 1.3$$

เมื่อ H = ความเข้มสนามแม่เหล็ก เป็น แอมแปร์-เทินส์/เมตร
 l = ความยาวของวงจรแม่เหล็ก เป็น เมตร

1.9 ความซึมซาบได้ (Permeability) ใช้สัญลักษณ์ μ

ความซึมซาบได้ คือ คุณสมบัติของตัวกลางที่ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านได้ยากหรือง่าย ความซึมซาบของสุญญากาศ (μ_0) มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรี/เมตร โดยทั่วไปเราจะกล่าวถึงเฉพาะความซึมซาบสัมพัทธ์ (μ_r) หมายถึงตัวกลาง เช่น เหล็กยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านได้เป็นกี่เท่าของอากาศ เมื่อใช้แรงแม่เหล็ก (H) เท่ากัน

1.9.1 ความซึมซาบได้ของสุญญากาศ หรือ ค่าคงที่ของแม่เหล็ก (Permeability of free space or magnetic constant) ใช้สัญลักษณ์ μ_0

อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ต่อความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) เรียกว่า “ความซึมซาบได้ของสุญญากาศ” (Permeability of free space) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “ค่าคงที่ของแม่เหล็ก” (Magnetic constant) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ μ_0 มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรี/เมตร (H/m)

ดังนั้นในตัวกลางที่เป็นสุญญากาศ อากาศ หรือในวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก (Non-magnetic material) ค่าคงที่ของแม่เหล็กคือ

$$\mu_0 = \frac{B}{H} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ เฮนรี/เมตร} \quad \dots 1.4$$

และความเข้มสนามแม่เหล็กสำหรับวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก คือ

$$H = \frac{B}{\mu_0} \text{ หรือ } = \frac{B}{4\pi \times 10^{-7}} \text{ แอมแปร์-เทินส์ / เมตร} \quad \dots 1.5$$

ตัวอย่างที่ 1.1 ขดลวดขดหนึ่งมี 200 รอบ พันอย่างสม่ำเสมอรอบวงแหวนไม้ที่มีความยาวของเส้นรอบวงโดยเฉลี่ย 60 ซม. มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอด 5 ซม.² ถ้ามีกระแสไหลผ่านขดลวด 4 แอมแปร์จงหา

- ก. ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H)
- ข. ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (B) และ
- ค. จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด(Φ)

วิธีทำ ก. ความยาวของเส้นรอบวงโดยเฉลี่ย $= 60 \text{ ซม.} = \frac{60}{100} = 0.6 \text{ เมตร}$

$$\begin{aligned} \therefore \text{ความเข้มสนามแม่เหล็ก } H &= \frac{NI}{l} \\ &= \frac{200 \times 4}{0.6} \\ &= 1,333 \text{ แอมแปร์-เทินส์ / เมตร} \quad \text{ตอบ} \end{aligned}$$

ข. จากสมการที่ 1.4

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก } B &= \mu_0 H \\ &= 4\pi \times 10^{-7} \times 1,333 \\ &= 1.67 \times 10^{-3} \text{ เทสลา} \quad \text{ตอบ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ก. พื้นที่หน้าตัดของวงแหวนไม้} &= 5 \text{ ซม.}^2 \\
 &= 5 \times 10^{-4} \text{ ตารางเมตร} \\
 \therefore \text{เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด } \oint &= BA \\
 &= 1.67 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^{-4} \\
 &= 8.35 \times 10^{-7} \text{ เวเบอร์} \quad \text{ตอบ}
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 1.2 จงคำนวณหาแรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อใช้ผลิตเส้นแรงแม่เหล็ก 0.015 เวเบอร์ ส่งข้ามช่องว่างอากาศยาว 2.5 มม. มีพื้นที่ยังผล (effective area) 200 ซม.²

$$\begin{aligned}
 \text{วิธีทำ} \quad \text{พื้นที่ของช่องว่างอากาศ} &= 200 \times 10^{-4} \\
 &= 0.02 \text{ ตารางเมตร} \\
 \text{ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B} &= \frac{\Phi}{A} \\
 &= \frac{0.015 \text{ เวเบอร์}}{0.02 \text{ ตารางเมตร}} \\
 &= 0.75 \text{ เทสลา}
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ 1.5 ความเข้มสนามแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ

$$\begin{aligned}
 H &= \frac{B}{\mu_0} \\
 &= \frac{0.75}{4\pi \times 10^{-7}} \\
 &= 597,000 \text{ แอมแปร์/เมตร}
 \end{aligned}$$

$$\text{ความยาวของช่องว่างอากาศ } \ell = 2.5 \text{ มม.} = 2.5 \times 10^{-3} \text{ เมตร}$$

\therefore แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ใช้ส่งข้ามช่องว่างอากาศ (จากสมการที่ 1.3)

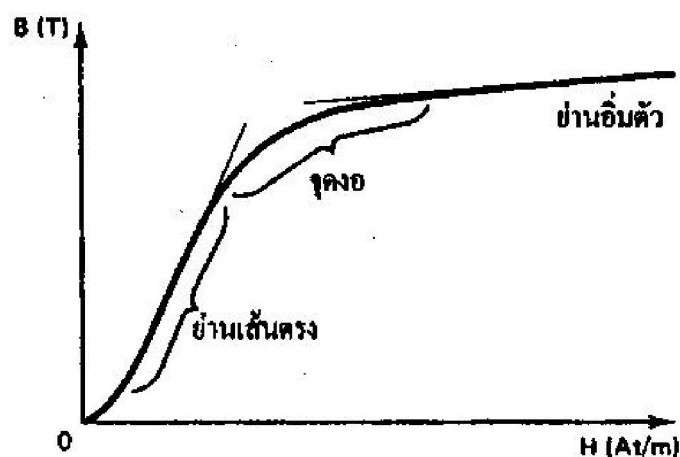
$$\begin{aligned}
 F \text{ หรือ } NI &= H \ell \\
 &= 597,000 \times 2.5 \times 10^{-3} \\
 &= 1,492 \text{ แอมแปร์} \quad \text{ตอบ}
 \end{aligned}$$

1.9.1.1 ความซึมซาบได้สัมพัทธ์ (Relative permeability) ใช้สัญลักษณ์ μ_r

ถ้าหากแกนวงแหวนทอรอยด์ทำมาจากวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กในแกนวงแหวนที่ผลิตโดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะมีค่าน้อย แต่ถ้าแกนวงแหวนทอรอยด์ทำจากวัสดุสารแม่เหล็ก (ferromagnetic materials) เช่น เหล็ก นิกเกิล และโลหะอื่นๆ ที่ยินยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ดีกว่าอากาศหรือสุญญากาศเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตโดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่กำหนดให้ จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้วัสดุสารแม่เหล็กทำอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อเพิ่มปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็ก

อัตราส่วนของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ที่ผลิตได้ในวัสดุสารแม่เหล็กต่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ที่ผลิตได้ในสุญญากาศ (หรือในแกนที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก) โดยใช้ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ค่าเดียวกัน มีชื่อเรียกว่า “ความซึมซาบได้สัมพัทธ์” (Relative permeability) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ μ_r ในอากาศ $\mu_r = 1$ แต่ในโลหะผสม เช่น นิกเกิล-เหล็ก (Nickel-iron alloys) มีค่า μ_r สูงถึง 100,000

เส้น โคง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแม่เหล็ก แสดงดังรูป 1-7



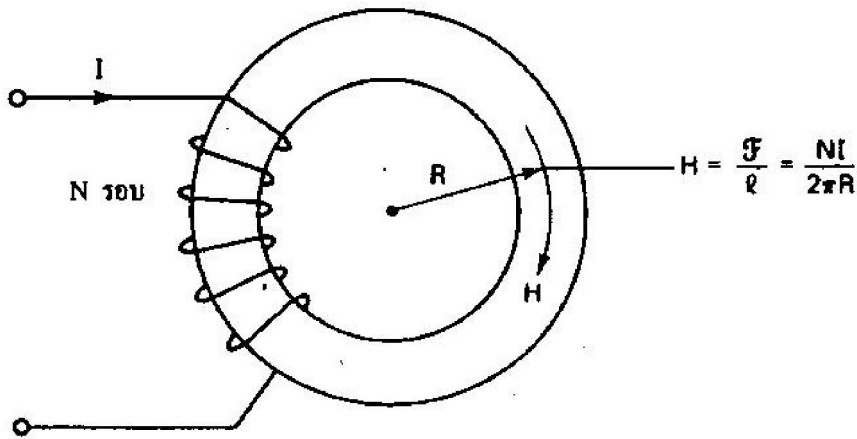
รูปเส้น โคง B-H หรือเส้น โคงแรงแม่เหล็ก (Magnetization curve) ของสารแม่เหล็กธรรมดา

คุณสมบัติของสารแม่เหล็กสามารถหาได้จากเส้น โคงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) และความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ที่เรียกว่าเส้น โคง B-H (B-H curve) หรือเส้น โคงแรงแม่เหล็ก (Magnetization curve) ได้แสดงว่าในรูปที่ 1-7

หากพิจารณาเส้น โคง B-H จะพบว่าออกจากจุดเริ่มต้นจะเป็นเส้นตรง หมายความว่า เมื่อเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) จะทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) เพิ่มขึ้นตามเป็นสัดส่วนโดยตรง และเมื่อขึ้นถึงจุดอของเส้น โคง ถ้าต้องการจะให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) เพิ่มขึ้นต่อไปอีก จะต้องเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) เป็นปริมาณที่มากกว่าในย่านเส้นตรง และในที่สุดก็จะถึงจุดอิ่มตัว

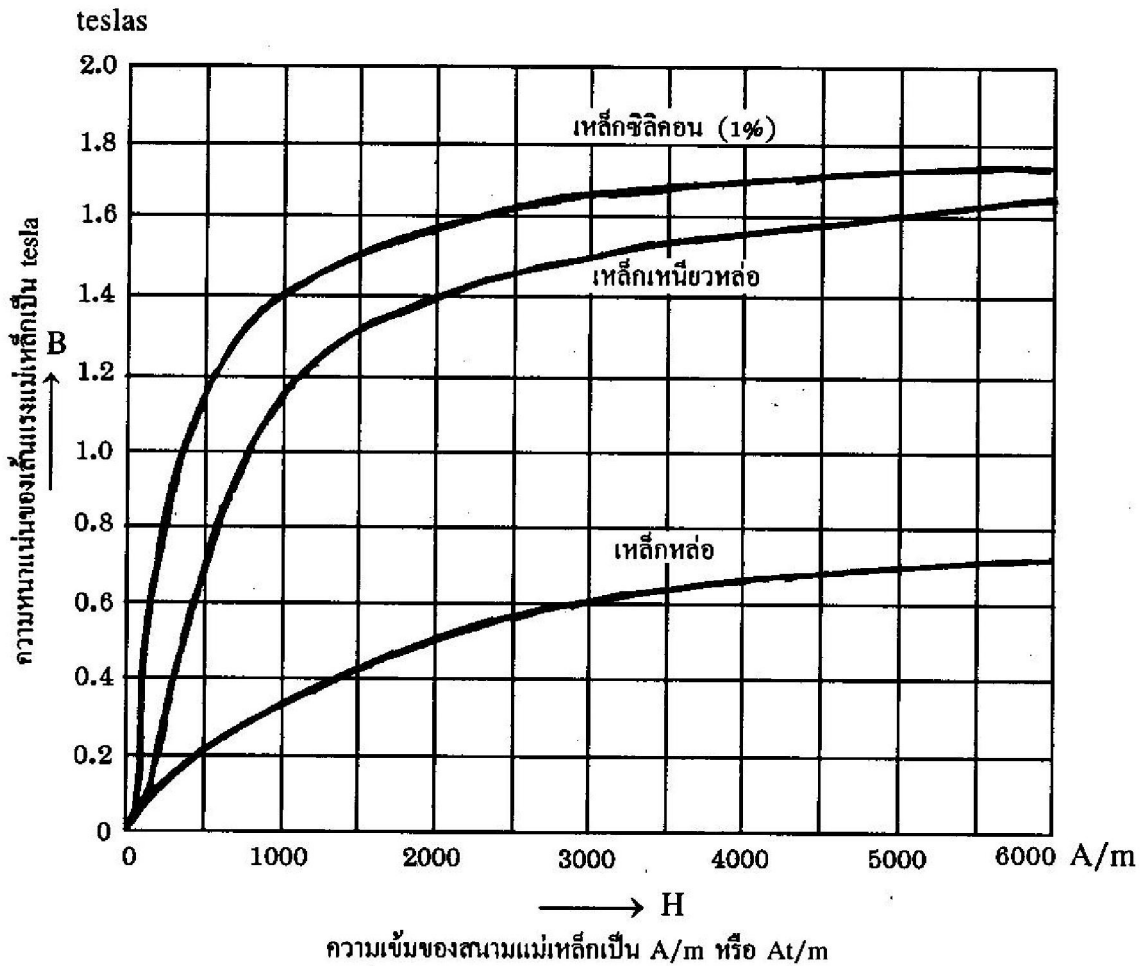
(saturation point) ซึ่งเกือบจะอยู่ในระดับแนวอนของเส้นโค้ง นั้นหมายความว่าแม่จะเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ต่อไปอีก ก็จะทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ลักษณะของเส้นโค้ง B-H ขึ้นอยู่กับสารหรือวัสดุซึ่งนำมาทำเป็นวงจรแม่เหล็กเท่านั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดหรือรูปร่างของวงจรแม่เหล็ก เส้นโค้ง B-H นำมาใช้หาปริมาณทางแม่เหล็กด้วยวิธีการ เช่น ถ้าทราบจำนวนแอมแปร์-เทินส์ (NI) ของขดลวดและความยาวของวงจรแม่เหล็ก (l) ลักษณะเป็นวงแหวนทอรอยด์ในรูปจะทราบค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ($H = NI / l$) และโดยใช้เส้นโค้ง B-H ก็จะหาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ได้ หากทราบพื้นที่หน้าตัด (A) ของวงจรแม่เหล็กหรือวงแหวนทอรอยด์ก็สามารถคำนวณหาปริมาณเส้นแรงแม่เหล็ก (Φ) จากสมการที่ 1.1 ได้และในทำนองเดียวกันถ้าทราบค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ก็สามารถหาความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ได้จากเส้นโค้ง B-H เช่นเดียวกัน

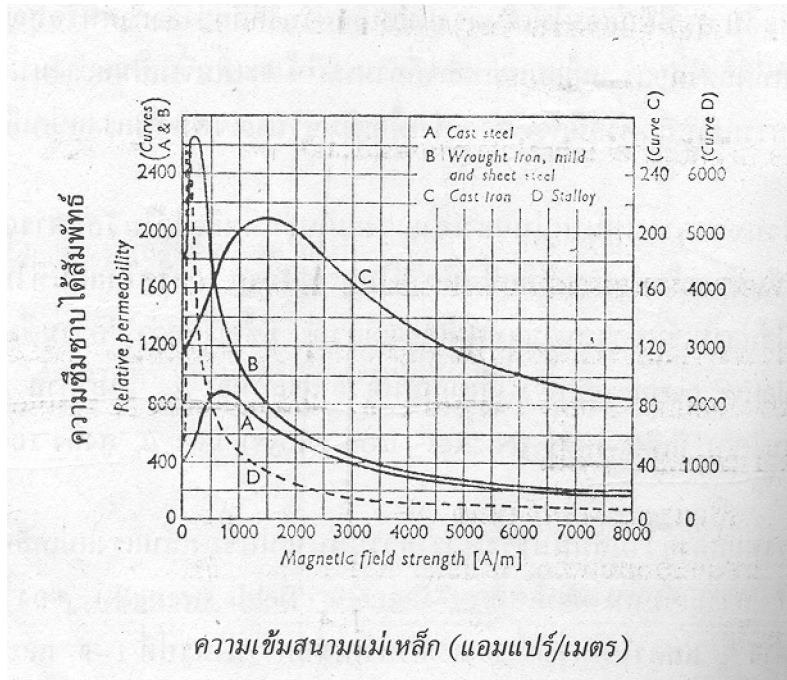


รูป วงจรแม่เหล็กลักษณะเป็นวงแหวนทอรอยด์เพื่อใช้หาเส้นโค้ง B-H หรือเส้นโค้งแรงแม่เหล็ก

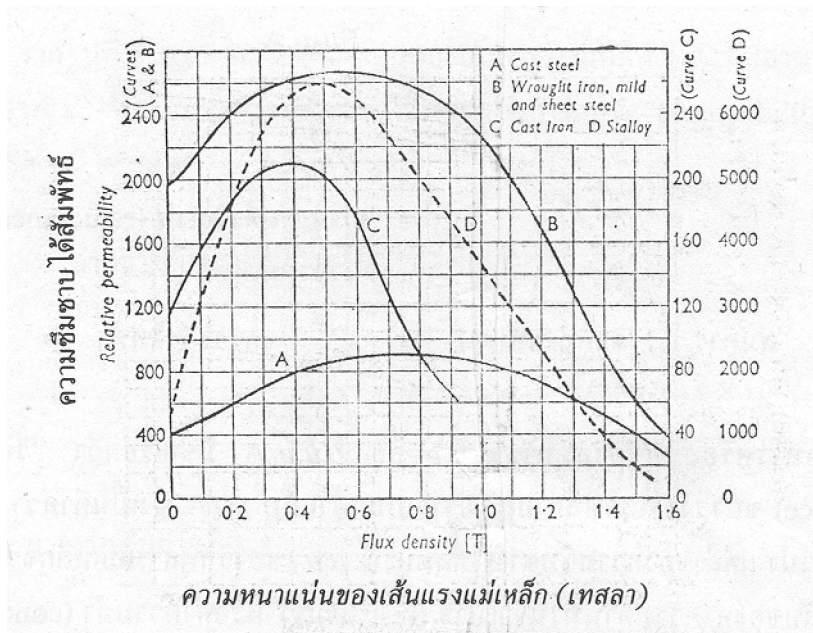
เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux density) กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field strength) ของวัสดุสารแม่เหล็กชนิดต่างๆ อาทิ เหล็กหล่อ (Cast iron) เหล็กแผ่น (Sheet steel) และเหล็กเหนียวหล่อ (Cast steel) แสดงไว้ในรูปที่ 1-8 สำหรับเส้นกราฟในรูปที่ 1-9 และ 1-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบได้สัมพัทธ์ (μ_r) กับ ความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กตามลำดับ



รูปที่ 1-8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุสารแม่เหล็กต่างชนิดกัน



รูปที่ 1-9 ความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบได้สัมพัทธ์ (μ_r) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุสารแม่เหล็กต่างชนิดกัน



รูปที่ 1-10 ความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบได้สัมพัทธ์ (μ_r) กับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ของวัสดุสารแม่เหล็กต่างชนิดกัน

จากสมการที่ 1.4 , $\mu_0 = \frac{B}{H}$ หรือ $B = \mu_0 H$ สำหรับวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กและใน

สุญญากาศ

ในตัวกลางหรือวัสดุประเภทสารแม่เหล็ก ที่มีความซึมซาบได้สัมพัทธ์เป็น μ_r จะได้

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

หรือ $B = \mu_r \mu_0 H$

∴ ความซึมซาบได้สมบูรณ์ (absolute permeability) $\mu = \mu_r \mu_0$...1.6

μ_0 เป็นค่าคงที่ของสมการ มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรี/เมตร

μ_r จะเปลี่ยนแปลงตามชนิดของสารแม่เหล็ก และ μ_r ในอากาศจะมีค่าเท่ากับ = 1

1.10 ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance) ใช้สัญลักษณ์ R

ถ้าพิจารณาวงแหวนแม่เหล็กที่มีพื้นที่หน้าตัด A ตารางเมตร และมีความยาวของเส้นรอบวงโดยเฉลี่ย l เมตร (ดังรูปที่ 1-6) พันด้วยขดลวด N รอบมีกระแสไหลผ่านขดลวด I แอมแปร์ ดังนั้น

เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด $= \oint = BA$... (1)

และ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก , m.m.f. หรือ F $= Hl$... (2)

(1) ÷ (2) จะได้ $\frac{\oint}{F} = \frac{BA}{Hl}$
 $= \mu_r \mu_0 \times \frac{A}{l}$

∴ $\oint = \frac{F \mu_0 \mu_r A}{l}$

$$\oint = \frac{F}{l / \mu_0 \mu_r A} \quad \dots 1.7$$

= ค่าความต้านทาน (reluctance) ของวงจรแม่เหล็ก

สมการ 1.7 จะคล้ายกับ $I = \frac{E}{\rho l / A}$ ของวงจรไฟฟ้า

ตัวหารหรือส่วนของสมการที่ 1.7 คือ $l / \mu_r \mu_0 A$ มีชื่อเรียกว่า “รีลักแตนซ์” (reluctance) ของวงจรแม่เหล็กและมีรูปแบบคล้ายกับ $\rho l / A$ ซึ่งเป็นค่าความต้านทานของลวดตัวนำ แต่ค่าของความซึมซาบ $\mu_r \mu_0$ ของวัสดุสารแม่เหล็กจะสอดคล้องกับส่วนกลับของค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity) หรือค่าความนำ (conductivity) ของวัสดุไฟฟ้า

เนื่องจากแรงเคลื่อนแม่เหล็ก คือ ผลคูณของกระแสและจำนวนรอบ (NI)

$$\therefore \text{เส้นแรงแม่เหล็ก, } \oint = \frac{NI}{\text{ความต้านทานแม่เหล็ก}} \quad \dots 1.8$$

$$\text{เมื่อความต้านทานแม่เหล็ก} = R = \frac{l}{\mu_r \mu_0 A}$$

$$\text{และ } R = l / \mu_0 A \text{ สำหรับวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก}$$

สัญลักษณ์ของความต้านทานแม่เหล็ก (reluctance) คือ R มีหน่วยเป็น แอมแปร์-เทินส์/เวเบอร์ (Ampere-turns/weber)

ตัวอย่างที่ 1.3 วงแหวนเหล็กอ่อน (mild-steel) มีพื้นที่หน้าตัด 5 ตารางเซนติเมตร มีความยาวของเส้นรอบวงโดยเฉลี่ย 40 เซนติเมตร มีขดลวดพันรอบวงแหวนอย่างสม่ำเสมอ 200 รอบ จงคำนวณหา

ก. ความต้านทานแม่เหล็กของวงแหวน

ข. กระแสไฟฟ้าที่ใช้ผลิตเส้นแรงแม่เหล็ก 0.8 มิลลิเวเบอร์ขึ้นในแกนในวงแหวน

วิธีทำ ก. ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในวงแหวน

$$B = \frac{\oint}{A} = \frac{0.8 \times 10^{-2} \text{ เวกอร์}}{5 \times 10^{-4} \text{ เมตร}^2} = 1.6 \text{ เทสลา}$$

จากรูปที่ 1-10 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก 1.6 เทสลาของเหล็กอ่อน (เส้นกราฟ B) ตรงกับค่าความซึมซาบได้สัมพัทธ์ (relative permeability) ประมาณ 380 หรือ $\mu_r = 380$

\therefore ค่าความต้านทานแม่เหล็กของวงแหวน

$$\begin{aligned} R &= \frac{l}{\mu_r \mu_0 A} \\ &= \frac{40 \times 10^{-2}}{380 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 5 \times 10^{-4}} \\ &= 1.67 \times 10^6 \text{ แอมแปร์/เวเบอร์} \quad \text{ตอบ} \end{aligned}$$

ข. จากสมการที่ 1.8

$$\oint = \frac{NI}{\text{ความต้านทานแม่เหล็ก}}$$

$$0.8 \times 10^{-3} = \frac{NI}{1.67 \times 10^6}$$

$$\begin{aligned} \therefore NI &= 0.8 \times 10^{-3} \times 1.67 \times 10^6 \\ &= 1,336 \text{ แอมแปร์-เทินส์ (แอมแปร์)} \end{aligned}$$

ดังนั้น กระแสที่ใช้ผลิตเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetising current)

$$I = \frac{1336}{200} = 6.68 \text{ แอมแปร์} \quad \text{ตอบ}$$

1.11 การเปรียบเทียบวงจรไฟฟ้ากับวงจรแม่เหล็ก (Comparison of the electric and magnetic circuit)

สมการที่ 1.7 และ 1.8 บางครั้งอาจเรียกว่ากฎของโอห์มของวงจรแม่เหล็ก เพราะสามารถเปรียบเทียบกับวงจรไฟฟ้าได้ ซึ่งจะช่วยให้สามารถนำวิธีการแก้ปัญหของวงจรไฟฟ้าไปใช้แก้ปัญหของวงจรแม่เหล็กได้ ตารางที่ 1.1 เป็นการเปรียบเทียบปริมาณของวงจรไฟฟ้ากับปริมาณของวงจรแม่เหล็ก

ตารางที่ 1.1

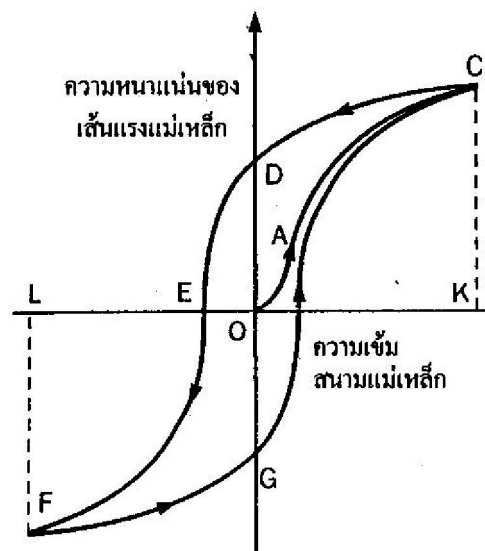
ปริมาณของวงจรไฟฟ้า	หน่วย	ปริมาณของวงจรแม่เหล็ก	หน่วย
แรงเคลื่อนไฟฟ้า (E)	โวลต์ (V)	แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (F)	แอมแปร์ (A)
กระแสไฟฟ้า (I)	แอมแปร์ (A)	เส้นแรงแม่เหล็ก (Φ)	เวเบอร์ (Wb)
ความต้านทานไฟฟ้า (R) ($= \rho \frac{l}{A}$)	โอห์ม (Ω)	ความต้านทานแม่เหล็ก (R)	แอมแปร์/เวเบอร์
-	-	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H)	แอมแปร์/เมตร
ความหนาแน่นของกระแส (Current density)	แอมแปร์/เมตร ²	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B)	เทสลา (T)

ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างวงจรไฟฟ้ากับวงจรแม่เหล็ก คือ วงจรไฟฟ้าต้องใช้พลังงานเพื่อรักษาการไหลของกระแสไฟฟ้าไว้ในวงจร ส่วนเส้นแรงแม่เหล็กนั้นเมื่อถูกจัดสร้างขึ้นครั้งหนึ่งแล้ว ก็ไม่ต้องการพลังงานให้แก่มันอีกต่อไป ตัวอย่างเช่น เส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตขึ้นจนถึงค่าสูงสุดของมันในครั้งหนึ่ง โดยกระแสที่ไหลผ่านขดลวด พลังงานที่ถูกใช้ไปในขดลวดจะเปลี่ยนเป็นความร้อนเนื่องจากความต้านทานของขดลวด

1.12 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

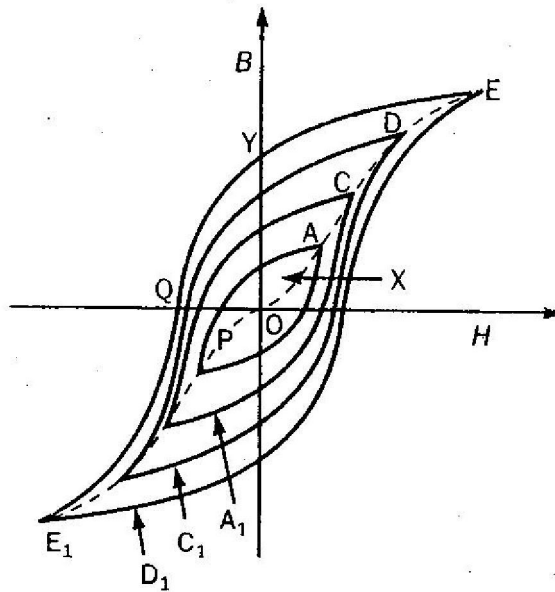
ถ้าทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กของวงแหวนทอรอยด์ในรูปที่ 1-6 เปลี่ยนแปลง โดยวัดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ที่เพิ่มขึ้นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองแทนด้วยเส้นโค้ง OAC ในรูปที่ 1-11 ถ้าลดความเข้มสนามแม่เหล็กลงเป็นศูนย์จะยังมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเหลืออยู่คือ OD มีชื่อเรียกว่า “อำนาจแม่เหล็กตกค้าง” (Residual magnetism) หรือ “ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กหลงเหลือ” (Remanent flux density)

ถ้าต้องการให้อำนาจแม่เหล็กตกค้างเป็นศูนย์ จะต้องเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงข้าม ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลง จนกระทั่งถึงค่า OE เส้นแรงแม่เหล็กจะลดลงเป็นศูนย์ ค่าของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก OE ที่ทำให้อำนาจแม่เหล็กตกค้างเป็นศูนย์มีชื่อเรียกว่า “โคเออร์ซิฟ ฟอर्स” (Coercive force) การเพิ่มขึ้นต่อไปของความเข้มสนามแม่เหล็กจะเป็นเหตุให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม ดังแทนด้วยเส้นโค้ง EF จะสังเกตเห็นว่า ความเข้มของสนามแม่เหล็กมากที่สุดในทิศทางบวก คือ OK จะมีค่าเท่ากับ OL ในทิศทางลบและความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมากที่สุดในทิศทางบวกคือ KC จะมีค่าเท่ากับ LF ในทิศทางลบ



รูปที่ 1-11 วงของฮิสเทอรีซิส

ถ้าความเข้มสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงค่าจาก OL ไปเป็น OK ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงตามเส้นโค้ง FGC คล้ายกับเส้นโค้ง CDEF และรูปปิดของ CDEFGC มีชื่อเรียกว่า “วงของฮิสเทอรีซิส”



รูปที่ 1-12 วงของฮิสเทอรีซิส และเส้นเคอร์ฟการเกิดสนามแม่เหล็ก

การหาวงแหวนของฮิสเทอรีซิสของวงแหวนเหล็กอันหนึ่ง จะสังเกตเห็นว่าค่าสูงสุดของความเข้มสนามแม่เหล็กแต่ละค่าจะอยู่บนเส้นโค้งการเกิดสนามแม่เหล็กเส้นเดียวกัน ดังรูปที่ 1-12 จุดยอดของฮิสเทอรีซิสแต่ละวงคือ ACD และ E จะวางอยู่บนเส้นโค้ง B-H (B-H curve) ที่หาได้โดยการเพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก จะพบว่าอำนาจแม่เหล็กตกค้างขึ้นอยู่กับค่าสูงสุดของความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังนั้นในวง A อำนาจแม่เหล็กตกค้างคือ OX ส่วนวง E ค่าสูงสุดของความเข้มสนามแม่เหล็กเข้าใกล้จุดอิ่มตัว (saturation) อำนาจแม่เหล็กตกค้างคือ OY

อำนาจแม่เหล็กตกค้างที่ได้รับเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุดถึงจุดอิ่มตัวของวัสดุมีชื่อเรียกว่า “รีมานนซ์” (remanence) ของวัสดุนั้น ดังนั้นสำหรับวัสดุที่มีวงของฮิสเทอรีซิสดังในรูปที่ 1-12 มีรีมานนซ์ประมาณ OY

ค่าของโคเออร์ซิฟ พอร์ซ ในรูปที่ 1-12 เปลี่ยนแปลงจาก OP ของวง AA1 จนถึง OQ ของวง EE1 และค่าโคเออร์ซิฟ พอร์ซ เมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุดถึงจุดอิ่มตัวมีชื่อเรียกว่า “เออร์ซิวิตี” (Coercivity) ของวัสดุนั้นดังนั้นในรูปที่ 1-12 โคเออร์ซิวิตีมีค่าประมาณ OQ

1.13 การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิสและกระแสไหลวน (Hysteresis and eddy current losses)

ก. การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส

การใช้ไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำวงจรขดลวดที่พันรอบแกนเหล็ก ให้เกิดอำนาจแม่เหล็กในแต่ละรอบ (cycle) การสูญเสียในแกนเหล็กอันเกิดจากฮิสเทอรีซิสจะเท่ากับพื้นที่ภายในวงฮิสเทอรีซิสนั้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และชนิดของสารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกน ดังนั้นค่าโดยประมาณของการสูญเสียจากฮิสเทอรีซิสของสารแม่เหล็กที่ความถี่ f หาได้จาก

$$Ph = Kh f B_{max}^n \quad \text{วัตต์} \quad \dots 1.9$$

- เมื่อ
- Ph = การสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส มีหน่วยเป็น วัตต์
 - Kh = ค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็กที่ทำการทดลอง
 - f = ความถี่ของแหล่งจ่าย มีหน่วยเป็น เฮิรท์
 - n = สไตน์เมทซ์โพเนนท (Steinmetz exponent) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5-2.0 แต่โดยทั่วไปใช้ $n = 1.6$
 - B_{max} = ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดเป็นเทสลา

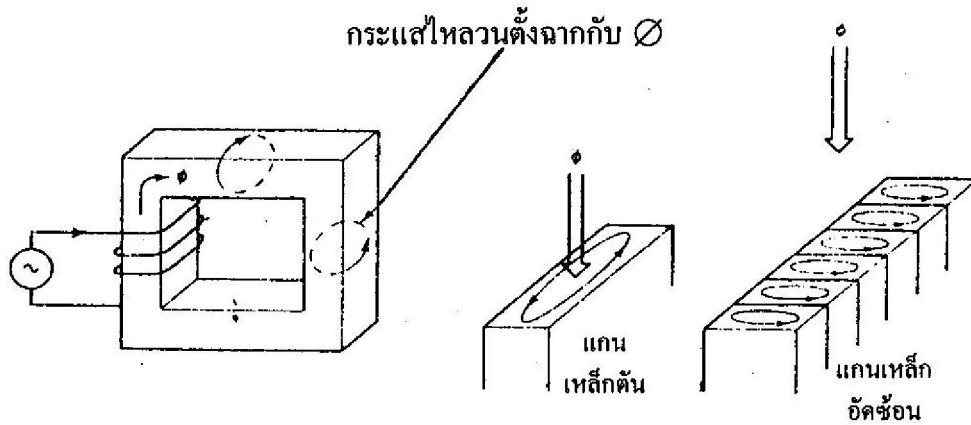
ข. การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

คือ การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนอยู่ในสารแม่เหล็ก เนื่องจากสารแม่เหล็กมีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้า ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในสารแม่เหล็กจะทำให้เกิดกระแสไหลวน (eddy current) ขึ้น กระแสนี้จะไหลผ่านความต้านทานไฟฟ้าของสารแม่เหล็ก ก่อให้เกิดความร้อนมีค่า I^2R จากการทดลอง การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงแบบรูปคลื่นไซน์

$$Pe = Ke f^2 B_m^2 \quad \text{วัตต์} \quad \dots 1.10$$

- เมื่อ
- Ke = ค่าคงที่ของวงจรแม่เหล็ก

ขนาดของกระแสไหลวนขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก (ความถี่) และความต้านทานไฟฟ้าของแกนเหล็ก การลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนทำได้โดยใช้แกนเหล็กเป็นแบบแผ่นอัดซ้อนกัน (Laminated core) ดังรูปที่ 1-13 โดยแต่ละแผ่นจะใช้สารเคลือบผิวที่มีค่าความต้านทานสูง เช่น ฉาบด้วยน้ำมันวานิช

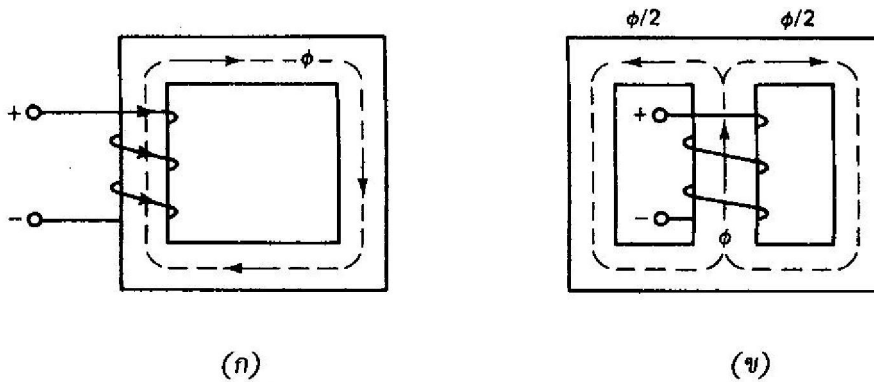


รูปที่ 1-13 การใช้แกนเหล็กแบบเหล็กแผ่นอัดซ้อน เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิสและกระแสไหลวนรวมกันเรียกว่า “การสูญเสียในแกนเหล็ก” (Core loss) การสูญเสียในแกนเหล็กของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำงานโดยมีแรงดันป้อนและความถี่หรือความเร็วคงที่ เช่น หม้อแปลง มอเตอร์ เครื่องกำเนิด จะมีค่าโดยประมาณคงที่และไม่เปลี่ยนแปลงตามโหลด

1.14 วงจรแม่เหล็ก

วงจรแม่เหล็ก คือ เส้นทางหรือแนวทางที่เส้นแรงแม่เหล็กส่วนใหญ่ไหลผ่าน ได้แก่ ส่วนที่เป็นสารแม่เหล็ก และส่วนที่เป็นช่องว่างอากาศ (air gap) โดยทั่วไปวงจรแม่เหล็กแบ่งออกเป็นสองแบบคือ วงจรแม่เหล็กอนุกรม และวงจรแม่เหล็กขนาน ดังแสดงไว้ในรูป 1-14

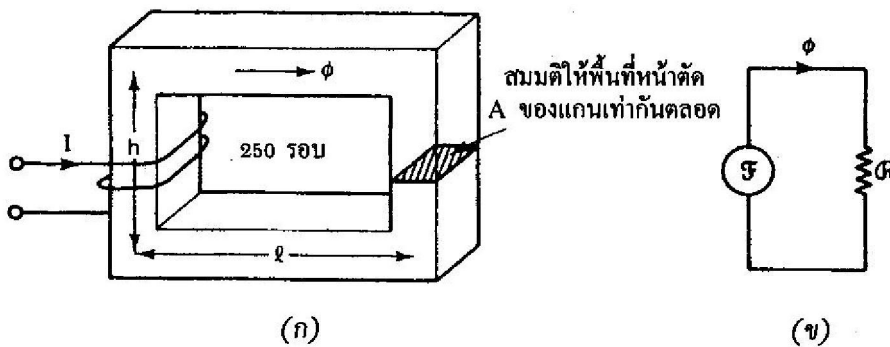


รูปที่ 1-14 ตัวอย่างของวงจรแม่เหล็ก (ก) แบบอนุกรม (ข) แบบขนาน

1.14.1 วงจรแม่เหล็กอนุกรม

วงจรแม่เหล็กอนุกรม หมายถึง วงจรแม่เหล็กที่มีทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กครบวงจรเพียงเส้นทางเดียว ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1-14 (ก)

ตัวอย่างที่ 1.4 วงจรแม่เหล็กดังรูปที่ 1-15 เป็นแกนเหล็กแม่เหล็กที่ทำด้วยเหล็กเหนียวหล่อ (cast steel) มีขดลวดพันอยู่ 250 รอบ ถ้าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเป็น 0.48 mWb จงหากระแสที่ไหลในขดลวด กำหนดให้พื้นที่หน้าตัดของแกนเป็น 4 cm² ความยาวของ l เป็น 10 cm. และความยาวของ h เป็น 8 cm.



รูปที่ 1-15 ก) วงจรแม่เหล็กของตัวอย่างที่ 1.4 ข) วงจรไฟฟ้าสมมูล

วิธีทำ หาคความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

$$\begin{aligned}
 B &= \frac{\Phi}{A} \\
 &= \frac{0.48 \text{ mWb}}{4 \text{ cm}^2} \\
 B &= \frac{0.48 \times 10^{-3} \text{ Wb}}{4 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \\
 &= 1.2 \text{ Wb/m}^2 \text{ หรือ T}
 \end{aligned}$$

ค่า $B = 1.2$ จะได้ $H = 1240 \text{ At/m}$ (หาได้จากเส้นโค้ง B-H สำหรับเหล็กเหนียวหล่อ ในรูปที่ 1-8)
 ความยาวเฉลี่ยของวงจรแม่เหล็กหรือเส้นทางที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านคือ

$$\begin{aligned}
 \ell + h + \ell + h &= 10 \text{ cm.} + 8 \text{ cm.} + 10 \text{ cm.} + 8 \text{ cm.} \\
 &= 36 \text{ cm.} \\
 &= 36 \times 10^{-2} \text{ m.} \\
 &= 0.36 \text{ m.}
 \end{aligned}$$

จากสมการ $F = H\ell$

$$\begin{aligned}
 &= 1240 \text{ At/m} \times 0.36 \text{ m} \\
 &= 446.4 \text{ At}
 \end{aligned}$$

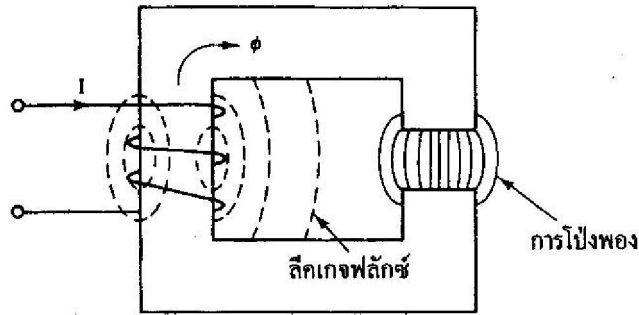
จากสมการ $F = NI$

หรือ $I = \frac{F}{N}$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{446.4 \text{ At}}{250} \\
 &= 1.79 \text{ A.} \quad \text{ตอบ}
 \end{aligned}$$

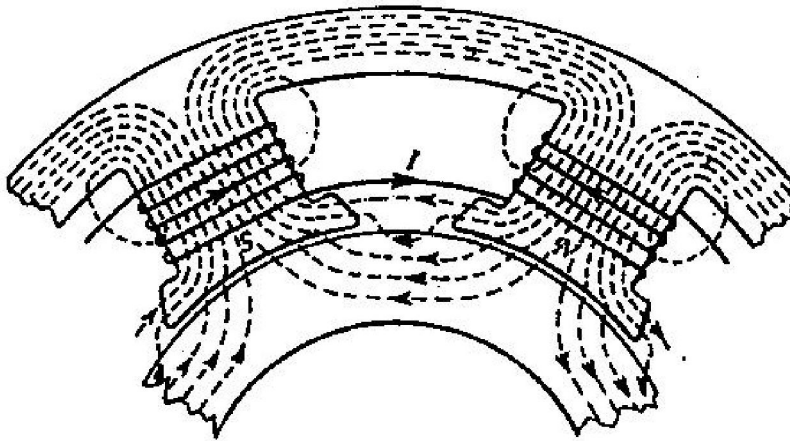
1.14.2 ลีคเกจฟลักซ์และการโป่งพอง

ในวงจรแม่เหล็กที่มีช่องว่างอากาศ (air gap) เป็นส่วนประกอบของวงจร ดังรูป 1-16 เส้นแรงแม่เหล็กมักจะรั่วไหลออกจากแนวหรือทางเดินของวงจรแม่เหล็กและแพร่กระจายออกไปในอากาศ เรียกว่า ลีคเกจฟลักซ์ หรือ ฟลักซ์รั่ว เนื่องจากมันไม่ได้เดินผ่านช่องว่างอากาศของวงจรแม่เหล็ก แต่เส้นแรงแม่เหล็กตรงช่องว่างอากาศจะมีการโป่งพองออก (fringing) ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็กตรงช่องว่างอากาศใหญ่ขึ้น เป็นผลทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศลดลง



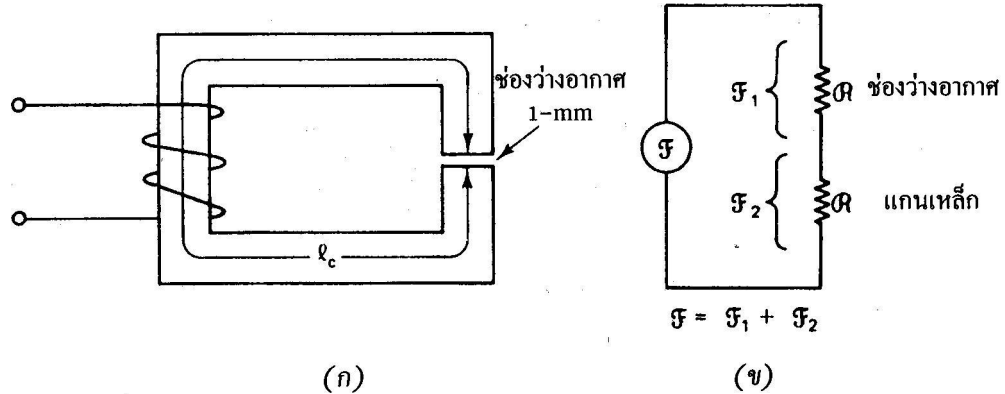
รูปที่ 1-16 ฟลักซ์รั่วหรือลึกลงฟลักซ์ และการโป่งพองออกของเส้นแรงแม่เหล็กในบริเวณช่องว่างอากาศ

ในรูปที่ 1-17 แสดงขั้วแม่เหล็กทั้งสองขั้วของเครื่องกลไฟฟ้า 6 ขั้ว ไม่ได้แสดงร่อง (slot) ของอาร์เมเจอร์ เส้นแรงแม่เหล็กบางเส้นไม่ได้เดินทางผ่านแกนเหล็กอาร์เมเจอร์ ดังนั้นจึงไม่ได้ช่วยในการผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้า มันคือลึกลงฟลักซ์ เส้นแรงแม่เหล็กบางเส้นเดินทางระหว่างปลายขั้วแม่เหล็กและแกนเหล็กอาร์เมเจอร์ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กเหล่านี้จึงมีชื่อเรียกว่า “เส้นแรงแม่เหล็กโป่งพอง” (fringing flux) และเนื่องจากมันถูกตัดโดยลวดตัวนำในอาร์เมเจอร์ จึงถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้ประโยชน์ (useful flux)



รูปที่ 1-17 แสดงลึกลงฟลักซ์ และการโป่งพอง (fringing) ของเส้นแรงแม่เหล็ก

ตัวอย่างที่ 1.5 เพื่อแสดงผลของช่องว่างอากาศที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็ก สมมติให้แกนเหล็กของตัวอย่างที่ 1.4 ได้ถูกตัดออกเป็นช่องว่างอากาศมีความยาวเท่ากับ 1 mm. ดังรูปที่ 1-18 จงหาค่าของกระแสที่ไหลในขดลวดเพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กยังคงมีค่าเท่าเดิม



วิธีทำ ทั้งค่า B และค่า H จะเท่ากับในตัวอย่างที่ 1.4 คือ

$$B = \frac{\Phi}{A} = 1.2 \text{ T}$$

และ $H = 1240 \text{ At/m}$

ดังนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กตกคร่อมในแกนเหล็กคือ

$$F_2 = 446.4 \text{ At}$$

$$B_g = \frac{\Phi}{A} = 1.2 \text{ T ในช่องว่างอากาศ}$$

แต่ $B_g = \mu_0 H_g$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น } H_g &= \frac{B_g}{\mu_0} \\
 &= \frac{1.2 \text{ T}}{4\pi \times 10^{-7}} \\
 &= 954.9 \times 10^3 \text{ At/m} \\
 \text{และ } F_1 &= H_g l_g \\
 &= 954.9 \times 10^3 \text{ At/m} \times 1 \times 10^{-3} \text{ m.} \\
 &= 954.9 \text{ At}
 \end{aligned}$$

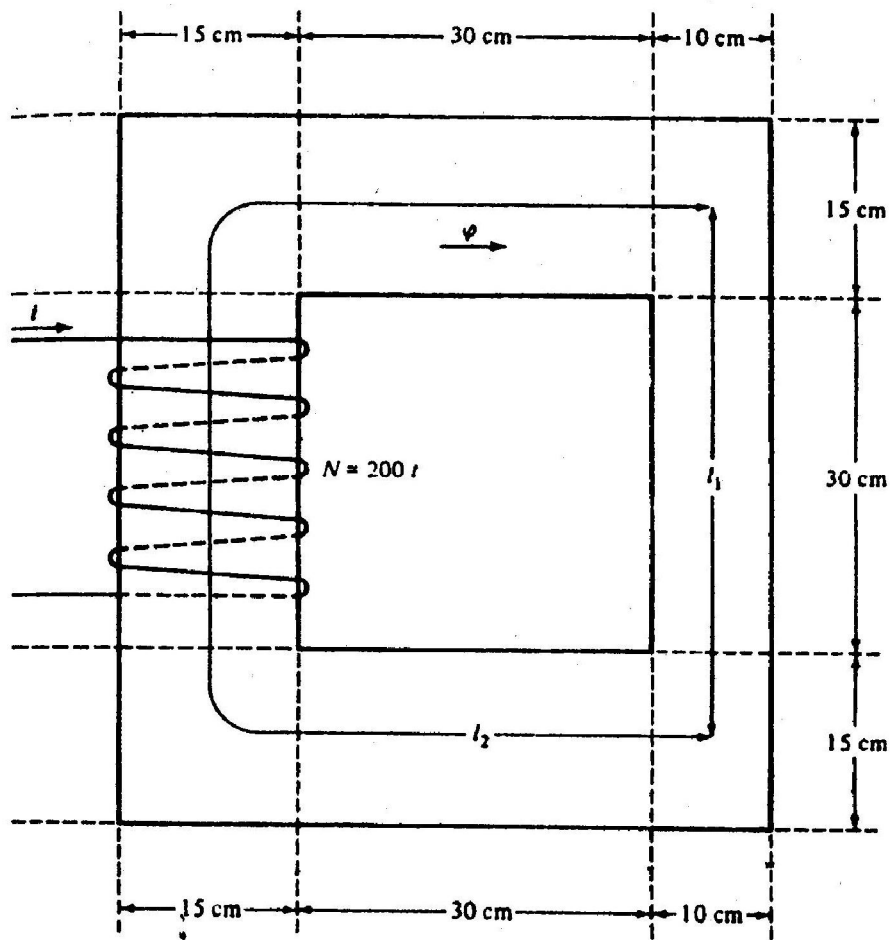
แรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งหมดที่ต้องการ คือ

$$F = F_1 + F_2$$

$$\begin{aligned}
 &= 954.9 + 446.4 \\
 &= 1401.3 \text{ At} \\
 \text{ดังนั้น} \quad I &= \frac{F}{N} \\
 &= \frac{1401.3 \text{ At}}{250 \text{ A}} \\
 &= 5.60 \text{ A.} \quad \text{ตอบ}
 \end{aligned}$$

จากผลการคำนวณในตัวอย่างจะพบว่า เมื่อมีช่องว่างอากาศเกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็ก แม้มีเพียงความยาวเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับความยาวของแกนเหล็กก็ทำให้ต้องใช้กระแสเพิ่มขึ้นถึงสามเท่า เพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กให้มีค่าเท่าเดิม

ตัวอย่างที่ 1.6 แกนเหล็กดังรูปที่ 1-18 มีขนาดเท่ากัน 3 ด้าน ส่วนด้านที่ 4 แคบกว่าทุกด้าน มีความหนาเท่ากันคือ 10 ซม. มีขดลวด 200 รอบพันอยู่รอบแกนเหล็กด้านซ้ายมือ สมมติให้ความซึมซาบสัมพัทธ์ (relative permeability) ของแกนเหล็ก μ_r เป็น 2,500 ถ้ามีกระแสไหลผ่านขดลวด 1 แอมแปร์ จงหาเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตได้



รูปที่ 1-18 แกนเหล็กของตัวอย่างที่ 1.6

วิธีทำ แกนเหล็กในรูปที่ 1-18 สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ

- ก. ส่วนที่มีพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก คือ แกนเหล็กทางด้านขวามีความยาวโดยเฉลี่ยเป็น $l_1 = 45$ ซม. และมีพื้นที่หน้าตัดของแกนเป็น $A_1 = 10 \times 10$ ซม. = 100 ตร.ซม. ดังนั้น ค่าความต้านทานแม่เหล็กของส่วนแรก คือ

$$R_1 = \frac{l_1}{\mu_r \mu_0 A_1}$$

$$= \frac{0.45 \text{ ม.}}{(2500)(4\pi \times 10^{-7})(0.01 \text{ ม.}^2)}$$

$$= 14,300 \text{ แอมแปร์/เวเบอร์}$$

- ข. ส่วนที่มีพื้นที่หน้าตัดของแกนใหญ่ซึ่งมีอยู่ 3 ด้าน มีความยาวโดยเฉลี่ยเป็น $l_2 = 130$ ซม. และพื้นที่หน้าตัดของแกนเป็น $A_2 = 10 \times 15$ ซม. = 150 ตร.ซม. ดังนั้น ค่าความต้านทานแม่เหล็กของส่วนที่สอง คือ

$$R_2 = \frac{l_2}{\mu_r \mu_0 A_2}$$

$$= \frac{1.3 \text{ ม.}}{(2500)(4\pi \times 10^{-7})(0.015 \text{ ม.}^2)}$$

$$= 27,600 \text{ แอมแปร์/เวเบอร์}$$

ดังนั้นค่าความต้านทานแม่เหล็กรวมทั้งหมดในแกนเหล็ก คือ

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

$$= 14,300 + 27,600 \text{ แอมแปร์/เวเบอร์}$$

$$= 41,900 \text{ แอมแปร์/เวเบอร์}$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กของวงจร คือ

$$F = NI$$

$$= 20 \times 1 = 20 \text{ แอมแปร์-เทินส์}$$

ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดในแกนเหล็ก คือ

$$\oint = \frac{F}{R_{eq}}$$

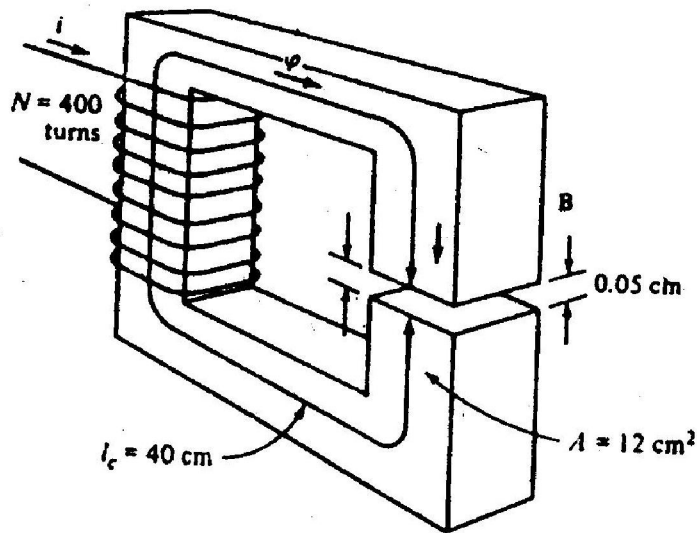
$$= \frac{20 \text{ แอมแปร์}}{41,900 \text{ แอมแปร์/เวเบอร์}}$$

$$= 4.77 \text{ มิลลิเวเบอร์}$$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 1.7 แกนเหล็กดังรูปที่ 1-19 มีความยาวโดยเฉลี่ย 40 ซม. มีช่องว่างอากาศยาว 0.05 ซม. พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก 12 ตร.ซม. ถ้าความซึมซาบได้สัมพัทธ์ของแกนเหล็กเป็น 4,000 และขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กมี 400 รอบ สมมติว่า การโป่งพองของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิม 5 เปอร์เซ็นต์ จงหา

- ก. ความต้านทานแม่เหล็กรวมที่เส้นแรงแม่เหล็กเดินผ่าน (แกนเหล็กบวกช่องว่างอากาศ)
- ข. กระแสที่ใช้ผลิตความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก 0.5 เวเบอร์/ตร.ม. ขึ้นในช่องว่างอากาศ



รูปที่ 1-19 แกนเหล็กของตัวอย่างที่ 1.17

วิธีทำ ก. ความต้านทานแม่เหล็กในแกนเหล็ก

$$\begin{aligned}
 R_C &= \frac{l_c}{\mu_r \mu_0 A_C} \\
 &= \frac{0.4 \text{ ม.}}{(4000)(4\pi \times 10^{-7})(0.0012 \text{ ม.}^2)} \\
 &= 66,300 \text{ แอมแปร์/เวเบอร์}
 \end{aligned}$$

พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิม 5 เปอร์เซ็นต์

$$\begin{aligned}
 A_a &= 12 + \left(\frac{5}{100} \times 12\right) = 12 + 0.6 \text{ ซม.}^2 \\
 &= 12.6 \text{ ซม.}^2 = 12.6 \times 10^{-4} \text{ ม.}^2 \\
 &= 0.00126 \text{ ม.}^2
 \end{aligned}$$

∴ ความต้านทานแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ

$$\begin{aligned}
 R_a &= \frac{l_a}{\mu_r \mu_0 A_a} \\
 &= \frac{0.0005 \text{ ม.}}{(1)(4\pi \times 10^{-7})(0.00126 \text{ ม.}^2)} \\
 &= 316,000 \text{ แอมแปร์/เวเบอร์}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ความต้านทานแม่เหล็กทั้งหมดที่เส้นแรงแม่เหล็กเดินผ่าน

$$\begin{aligned}
 R_{eq} &= R_c + R_a \\
 &= 66,300 + 316,000 \\
 &= 382,300 \text{ แอมแปร์/เวเบอร์}
 \end{aligned}$$

ข. จากสมการที่ 1.8

$$\begin{aligned}
 F &= \oint R \\
 \text{แต่ } \oint &= BA \quad \text{และ} \quad F = NI \\
 \text{ดังนั้น} \quad NI &= BAR \\
 I &= \frac{BAR}{N} \\
 &= \frac{0.5 \times 0.00126 \times 382,000}{400} \\
 &= 0.602 \text{ แอมแปร์} \qquad \qquad \qquad \text{ตอบ}
 \end{aligned}$$

1.14.2 วงจรแม่เหล็กขนาน

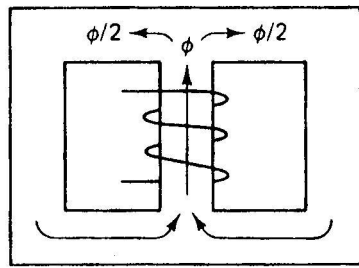
วงจรแม่เหล็กขนาน หมายถึง วงจรแม่เหล็กที่มีทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่ครบวงจรมากกว่าหนึ่งเส้นทาง ดังรูปที่ 1-20 (ก) ส่วนรูปที่ 1-20 (ข) เป็นวงจรไฟฟ้าสมมูลของรูปที่ 1-20 (ก)

ในรูปที่ 1-20 จะสังเกตเห็นว่า ขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กขากลางจะเป็นตัวสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กให้เกิดขึ้นและเส้นแรงแม่เหล็กในขากลางจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่ไปทางซ้ายของแกนและอีกส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่ไปทางขวาของแกนสมมติให้แกนมีลักษณะสมมาตร ดังนั้นจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกระจายออกไปอย่างสม่ำเสมอเท่าๆ กันระหว่างขาด้านข้างทั้งสองข้าง และจะได้

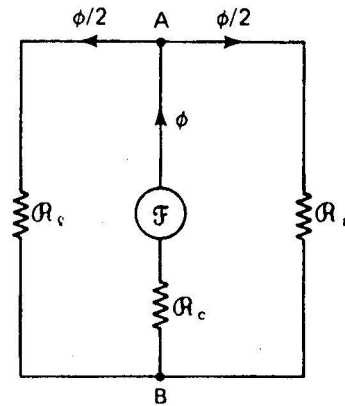
$$\boxed{\oint_c = \oint_l + \oint_r}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 \oint_c &= \text{เส้นแรงแม่เหล็กในขากลาง} \\
 \oint_l &= \text{เส้นแรงแม่เหล็กในขาด้านนอกด้านซ้าย} \\
 \oint_r &= \text{เส้นแรงแม่เหล็กในขาด้านนอกด้านขวา}
 \end{aligned}$$



(ก)

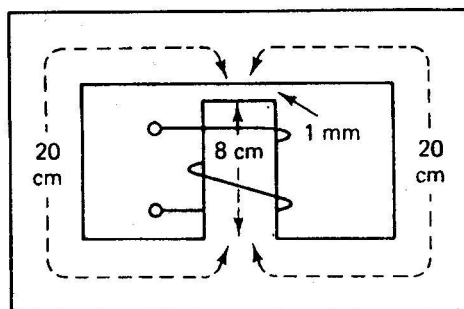


(ข)

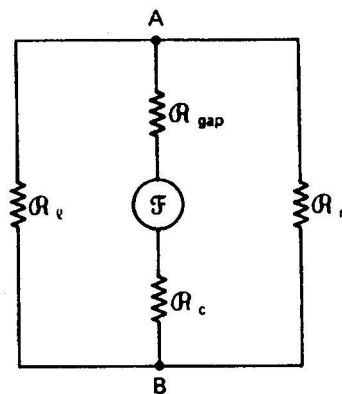
รูปที่ 1-20 (ก) วงจรแม่เหล็กขนาน

(ข) วงจรไฟฟ้าสมมูล

ตัวอย่างที่ 1.8 วงจรแม่เหล็กทำด้วยเหล็กแผ่น (sheet steel) มีลักษณะดังรูปที่ 1-21 (ก) ขากลางมีพื้นที่หน้าตัด 10 cm^2 และขาข้างซ้ายแต่ละข้างมีพื้นที่หน้าตัดเป็น 6 cm^2 จงคำนวณหาค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (MMF) ที่ต้องใช้ในการทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก 1.2 mWb ขึ้นในขากลาง สมมติว่าไม่คำนึงถึงลึกลูกเกอพลักซ์



(ก)



(ข)

รูปที่ 1-21

วิธีทำ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในขากลาง

$$\begin{aligned}
 B_c &= \frac{\Phi_c}{A_c} \\
 &= \frac{1.2 \text{ mWb}}{10 \text{ cm}^2} \\
 &= \frac{1.2 \times 10^{-3} \text{ Wb}}{10 \times 10^{-4} \text{ m}^2}
 \end{aligned}$$

$$= 1.2 \text{ T}$$

จากรูปที่ 1-8 ค่า $B_c = 1.2$ เทสลา จะได้ค่า $H_c = 825 \text{ At/m}$ (หาได้จากเส้นโค้ง B-H สำหรับเหล็กแผ่น ในรูปที่ 1-8)

แรงเคลื่อนแม่เหล็กของขากลาง

$$\begin{aligned} F_c &= H_c \times l_c \\ &= 825 \text{ At/m} \times 8 \text{ cm} \\ &= 825 \text{ At/m} \times 8 \times 10^{-2} \text{ m} \\ &= 66 \text{ At} \end{aligned}$$

เป็น MMF ที่ต้องการเอาชนะความต้านทานแม่เหล็กของขากลาง และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ = 1.2 T ดังนั้นค่า H_g ในช่องว่างอากาศคือ

$$\begin{aligned} H_g &= \frac{B}{\mu_0} \\ &= \frac{1.2 \text{ T}}{4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}} \\ &= 0.95 \times 10^6 \text{ At/m} \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned} F_g &= H_g l_g \\ &= 0.95 \times 10^6 \text{ At/m} \times 1 \text{ mm.} \\ &= 0.95 \times 10^6 \text{ At/m} \times 1 \times 10^{-3} \text{ m.} \\ &= 9.55 \text{ At} \end{aligned}$$

เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กครึ่งหนึ่งเดินทางด้านนอกข้างซ้าย อีกครึ่งหนึ่งเดินทางด้านนอกข้างขวา และเนื่องจากทางด้านนอกทั้งสองข้างเหมือนกันทุกประการ ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} Bl &= B_r = \frac{\varnothing/2}{A_r} \\ &= \frac{0.6 \text{ mWb}}{6 \text{ cm}^2} \\ &= \frac{0.6 \times 10^{-3} \text{ Wb}}{6 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \\ &= 1 \text{ T} \end{aligned}$$

จากเส้นโค้ง B-H ของเหล็กแผ่นในรูปที่ 1-8 จะได้ค่า $H = 500 \text{ At/m} = H_\ell = H_r$ และแรงเคลื่อนแม่เหล็กของทางด้านนอกทั้งสองข้างคือ

$$F_{AB} = H_\ell l_\ell = H_r l_r$$

$$\begin{aligned}
 &= 500 \text{ At/m} \times 20 \times 10^{-2} \text{ m} \\
 &= 100 \text{ At} \\
 \text{ดึงขึ้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กรวม} \\
 F &= F_{AB} + F_g + F_C \\
 &= 100 + 955 + 66 \\
 &= 1121 \text{ At} \qquad \text{ตอบ}
 \end{aligned}$$

แบบฝึกหัดบทที่ 1

1. แชนส์ คริสเตียน เออสเตด นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์ก ค้นพบปรากฏการณ์เกี่ยวกับเรื่องใด
2. กฎมือขวาของตัวนำ กล่าวไว้ว่าอย่างไร จงอธิบาย
3. กฎมือขวาของขดลวดอธิบายไว้ว่าอย่างไร จงอธิบาย
4. จงอธิบายผลที่เกิดขึ้นจากขดลวดตัวนำสองเส้นที่วางขนานกัน ถ้ากระแสที่ไหลในลวดตัวนำทั้งสองมีทิศทางเดียวกัน
5. จงอธิบายผลที่เกิดขึ้นจากขดลวดตัวนำสองเส้นที่วางขนานกัน ถ้ากระแสที่ไหลในลวดตัวนำทั้งสองมีทิศทางตรงข้ามกัน
6. หน่วยความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก คืออะไร
7. แรงเคลื่อนแม่เหล็ก เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าอย่างไร และหน่วยของมันคืออะไร
8. จงอธิบายความหมายของ “ความซึมซาบได้”
9. ความซึมซาบได้ของสุญญากาศ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าอย่างไร และหน่วยของมันคืออะไร
10. จงอธิบายความหมายของ “ความซึมซาบได้สัมพัทธ์”
11. จงอธิบายความหมายของ “การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิส”
12. จงอธิบายความหมายของ “การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน”
13. วิธีการลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนทำได้อย่างไร จงอธิบาย
14. การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิส และกระแสไหลวนรวมกันเรียกว่าอะไร
15. วงจรแม่เหล็กวงจรหนึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอด คือ 5 ตร.ซม. มีความยาวของวงจร 25 ซม. มีขดลวด 120 รอบ พันรอบวงจรแม่เหล็กอย่างสม่ำเสมอ เมื่อจ่ายกระแสเข้าไปในขดลวด 1.5 แอมป์ มีเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้น 0.3 มิลลิเวเบอร์ เมื่อจ่ายกระแส 5 แอมป์ มีเส้นแรงเกิดขึ้น 0.6 มิลลิเวเบอร์ จงคำนวณหาค่าต่างๆ ข้างล่างของกระแสแต่ละค่า
 - ก. ความเข้มสนามแม่เหล็ก
 - ข. ความซึมซาบได้สัมพัทธ์ของแกนเหล็ก
(720 แอมป์/เมตร , 663 , 2,400 แอมแปร์/เมตร ,398)
16. วงแหวนเหล็กอ่อน (mild steel) มีความยาวของเส้นรอบวงโดยเฉลี่ย 500 มม. มีพื้นที่หน้าตัดเท่าตลอด 300 มม.² จงหาแรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อใช้ผลิตเส้นแรงแม่เหล็ก 500 ไมโครเวเบอร์ (μWb) ถ้าวงแหวนดังกล่าวถูกตัดมีช่องว่างอากาศยาว 1 มม. จงหาเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตได้จากแรงเคลื่อนแม่เหล็กค่าเดิม สมมติให้ความซึมซาบได้สัมพัทธ์ของเหล็กอ่อนมีค่าคงที่เท่ากับ 1,200
(533 แอมแปร์ , 147 μWb)