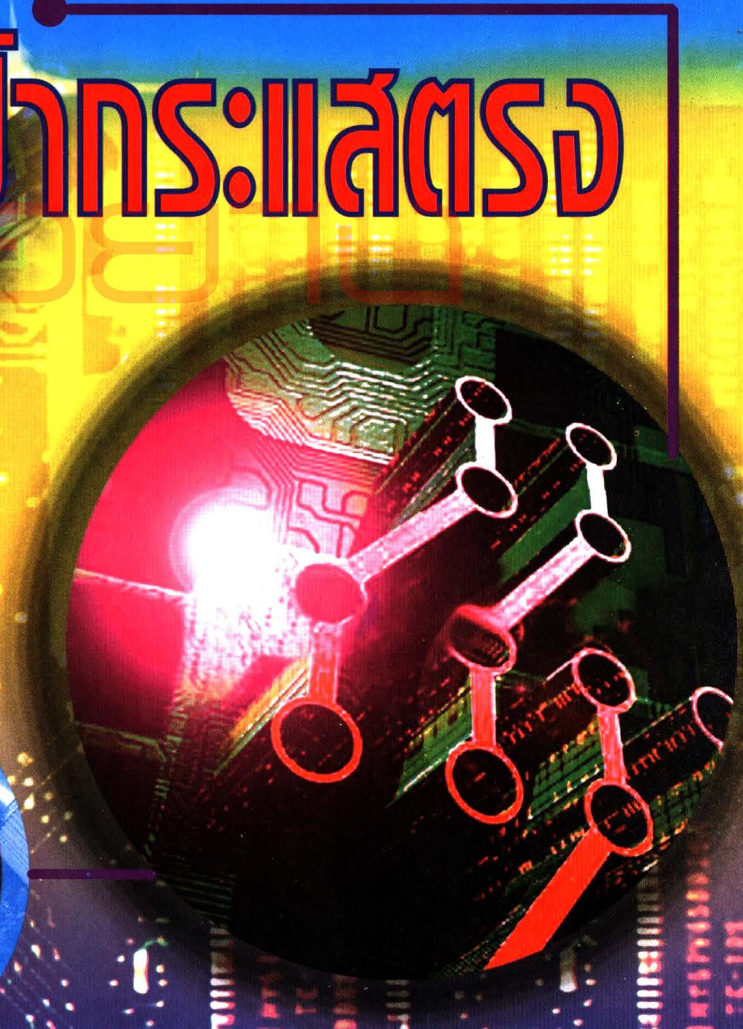


ทรงตามหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) พุทธศักราช 2545 ปรับปรุงปี พ.ศ. 2546 สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

เครื่องกล

ไฟฟ้ากระแสตรง



หลักสูตรใหม่

รหัสวิชา 2104-2106

[illegible]

โดย...พศ. นภัทร วังนเทพินทร์ และประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ

เครื่องกล

ไฟฟ้ากระแสตรง

รหัสวิชา 2104-2106

ตัวอย่าง

โดย...พศ. นภัทร วัฒนเทพินทร์ และประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ



บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด

SKYBOOK COMPANY LIMITED

515/276-8 ถ.รังสิต-ปทุมธานี ต.ปทุมธานี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12130

โทร. 0-2958-1125-7, 0-2567-5119 โทรสาร. 0-2567-5105

e-mail: sales@skybook.co.th

www.skybook.co.th

“เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง”

พิมพ์ครั้งที่ 1 มกราคม 2548

สงวนลิขสิทธิ์ตามกฎหมาย

ห้ามคัดลอกถ่ายเอกสารหรือพิมพ์

หรือวิธีหนึ่งวิธีใดของหนังสือเล่มนี้ก่อนได้รับอนุญาต

จากบริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด

ราคา 80 บาท

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

นภัทร วัจนเทพินทร์

เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง -- ปทุมธานี : สกายบุ๊กส์, 2548.

140 หน้า

1. เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง I. ชื่อเรื่อง

621 . 31042

ISBN: 974-389-541-8

S7901-30-01-05

จัดพิมพ์และจำหน่ายโดย



บริษัท สกายบุ๊กส์ จำกัด
SKYBOOK COMPANY LIMITED
515/276-8 ถนนสีลม-ปทุมธานี ต.ปทุมธานี อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12130
โทร. 0-2958-1125-7, 0-2567-5119 โทรสาร. 0-2567-5105
e-mail: sales@skybook.co.th

www.skybook.co.th

พิมพ์ที่ บริษัท สยามสปอร์ต ซินดิเคท จำกัด

459 ซอยพยับสก๊อต (ลาดพร้าว 48) แขวงสามเสนนอก เขตห้วยขวาง กรุงเทพฯ 10310

โทรศัพท์ : 0-2694-3010

คำนำ

หนังสือเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง รหัส (2104 - 2106) เล่มนี้เรียบเรียงขึ้นตามหลักสูตรของกรมอาชีวศึกษาที่ปรับปรุงใหม่ เมื่อเดือนมีนาคม 2545 สำหรับนักศึกษาในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาไฟฟ้าและแผนกช่างไฟฟ้า เนื้อหาแบ่งออกเป็น 4 บทเรียนครอบคลุมตามหลักสูตรใหม่ หลักสูตรใหม่ดังกล่าวเกี่ยวกับวงจรแม่เหล็ก การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก การคำนวณความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าฯ และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง วงจรลวดอาร์เมเจอร์ หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง หลักการกำเนิดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง การเกิดคอมมิวเตชัน การเกิดอาร์เมเจอร์-รีแอคชัน และการคำนวณประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้า รวมทั้งกระแสแรงดันและเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทอร์ก ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าฯ และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจหลักการทำงานและคุณลักษณะทางเอาต์พุตของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้า การกลับทางหมุน การลงทุนความเร็ว และการเริ่มเดินมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง รวมทั้งการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ฯลฯ

ขอบคุณสำนักพิมพ์ สกายบุ๊กส์ จำกัด ที่กรุณาจัดพิมพ์ผลงานที่ได้มาตรฐาน เพื่อเผยแพร่ให้ผู้สนใจได้ใช้ประโยชน์ ขอขอบคุณอย่างสุดจิตสุดใจสำหรับความรักของคุณวัชรภรณ์ คุณภัทราภรณ์ และคุณณภัทร ที่มอบให้ผู้เขียนตลอดชีวิต ขอขอบคุณครู-อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกคนที่เกื้อกูลผู้เขียนมาแต่เยาว์วัย



(ผศ. นภัทร วัจนเทพินทร์)



(นายประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ)

สารบัญ

บทที่ 1	วงจรแม่เหล็กและแม่เหล็กไฟฟ้า	6
1.1	แม่เหล็กไฟฟ้า	6
1.2	การคำนวณวงจรแม่เหล็กเบื้องต้น	18
	แบบฝึกหัดบทที่ 1	20
บทที่ 2	หลักการเบื้องต้นของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง	22
2.1	โครงสร้างของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง	22
2.2	การพันขดลวดอาร์เมเจอร์	28
2.3	หลักการเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	34
2.4	การเกิดอาร์เมเจอร์รีแอกชันและคอมมิวเตชัน	42
2.5	หลักการเบื้องต้นของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	47
	แบบฝึกหัดบทที่ 2	50
บทที่ 3	เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	53
3.1	ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	53
3.2	คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	64
3.3	กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพ	73
3.4	การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	84
	แบบฝึกหัดบทที่ 3	90

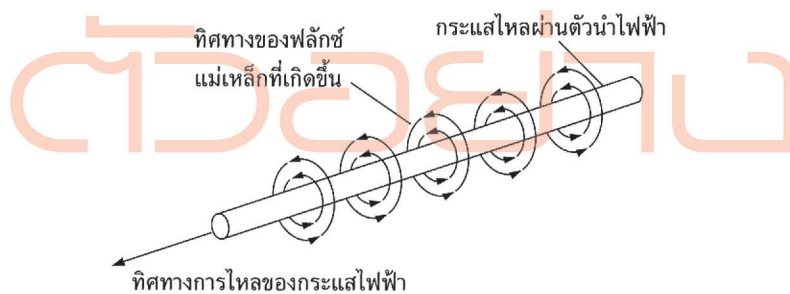
บทที่ 4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	94
4.1 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	94
4.2 คุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	99
4.3 กำลังไฟฟ้าสูญเสียและประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	114
4.4 การเริ่มเดินมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	121
4.5 การกลับทางหมุนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	126
4.6 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	128
แบบฝึกหัดบทที่ 4	136

ตัวอย่าง

1 วงจรแม่เหล็ก และแม่เหล็กไฟฟ้า

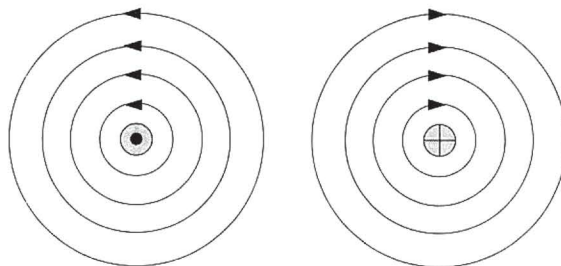
1.1 แม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำไฟฟ้าใด ๆ จะเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรอบ ๆ ลวดตัวนำนั้นเป็นรูปร่างกลมตามรัศมีของลวดตัวนำ ปริมาณของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น จะแปรผันตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด ลักษณะของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น แสดงในรูป 1.1

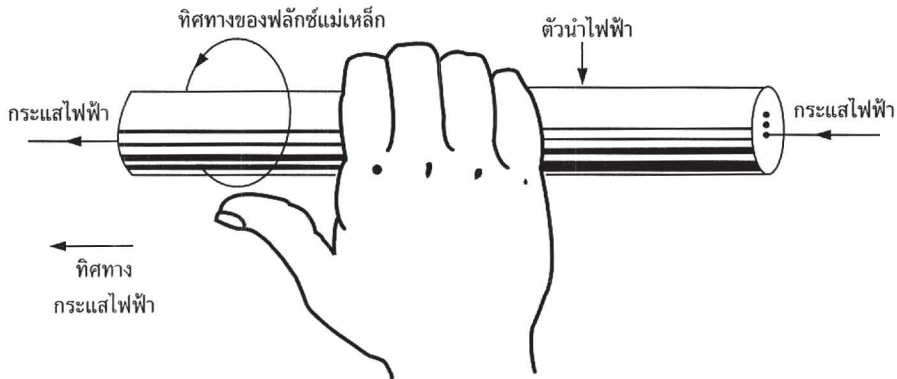


รูปที่ 1.1 แสดงฟลักซ์ที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ลวดตัวนำเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

เมื่อพิจารณาภาพพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ และแทนรูป $\odot$ ด้วยทิศทางการกระแสไหลเข้าและรูป $\ominus$ แทนด้วยทิศทางการกระแสที่ไหลออกจากลวดตัวนำ ทิศทางการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรอบ ๆ ลวดตัวนำ จะแสดงในรูป 1.2



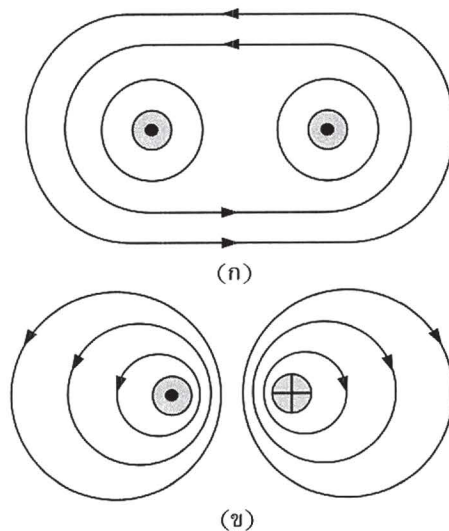
รูปที่ 1.2 แสดงทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ลวดตัวนำเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าและไหลออกจากตัวนำ



รูปที่ 1.3 แสดงลักษณะของกฎมือขวา

เมื่อใช้กฎมือขวา สามารถแทนนิ้วหัวแม่มือด้วยทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า และนิ้วที่เหลือ คือทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ลวดตัวนำ ซึ่งทำให้เราสามารถเข้าใจและจดจำลักษณะการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูป 1.3

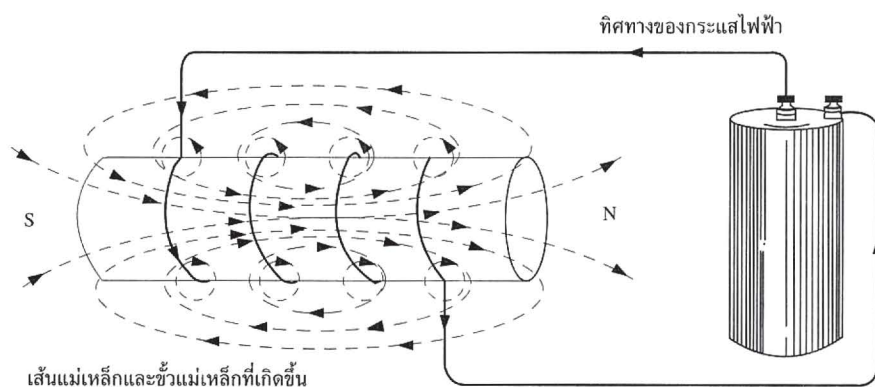
เมื่อนำตัวไฟฟ้าที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน 2 ตัวนำมาวางใกล้กัน ลักษณะของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเกิดได้ 2 ลักษณะ คือ เมื่อตัวนำทั้งสองมีกระแสไหลเข้าหรือไหลออกทั้งคู่ ลักษณะของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเสริมรวมเป็นอันเดียวกัน ดังรูป 1.4 (ก) และเมื่อตัวนำตัวหนึ่งมีกระแสไหลเข้าและอีกตัวหนึ่งมีกระแสไหลออก ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเบี่ยงเบนไป ดังรูป 1.4 (ข)



รูปที่ 1.4 แสดงฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นกับตัวนำ 2 ตัว

1.1.1 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux Density, B)

เมื่อนำลวดตัวนำมาขดหลาย ๆ วงแล้วจ่ายกระแสเข้าไป เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดกับขดลวดแต่ละวงจะเสริมกันและพุ่งไปในทิศทางที่แน่นอนแต่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะมากขึ้น ดังแสดงในรูป 1.5



รูปที่ 1.5 เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด จะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นและจะมีความหนาแน่นมากเมื่อขดลวดมีจำนวนรอบมาก และเกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นที่ปลายทั้งสองของขดลวด

จากรูป 1.5 จะเกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นที่ปลายทั้งสองของขดลวด ซึ่งจะเป็นไปตามทิศทางของกระแสที่ไหลผ่านขดลวด เมื่อใช้กฎมือขวาของขดลวด (Right-hand rule for coil) หรือกฎของแม่เหล็ก จำนวนของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำในรูปนั้น เรียกว่า ϕ (phi) จะวัดด้วยจำนวน ϕ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โดยคิดในหนึ่งตารางเมตร พื้นที่นี้คือ A นั่นคือ ϕ มีหน่วยเป็นเวเบอร์ (Weber หรือ Wb) และ A มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2) และปริมาณ B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งตารางเมตร B คือ Flux Density มีหน่วยเป็น Wb/m^2 ดังนั้น สมการของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กคือ

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (Wb/m^2) \quad \dots(1)$$

หน่วยของ B คือ Wb/m^2 หรือเรียกว่า เทสลา (tesla หรือ T) โดย 1T เท่ากับ $1 \frac{Wb}{m^2}$
 $= 1T$

1.1.2 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force, $\mathcal{F}$)

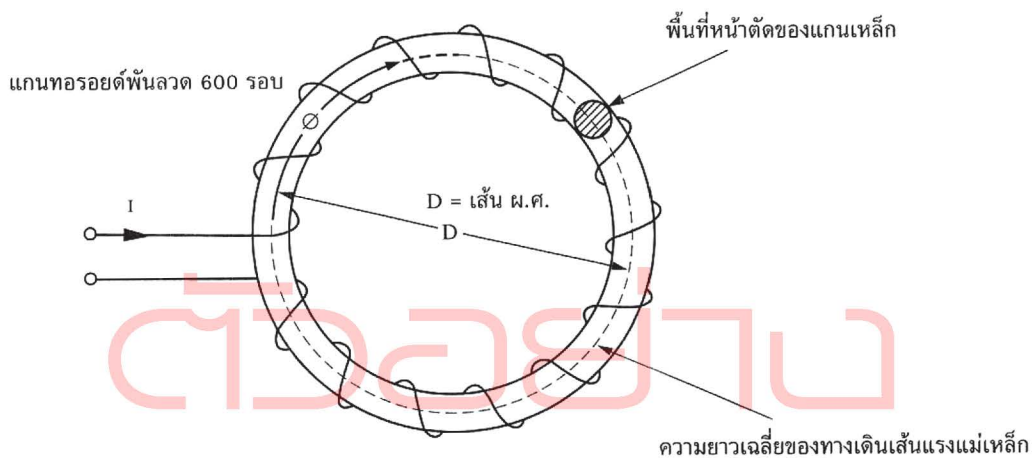
ความสามารถของขดลวดที่จะผลิตเส้นแรงแม่เหล็กออกมาได้เรียกว่า แรงเคลื่อนแม่เหล็ก หรือ MMF, $\mathcal{F}$ มีหน่วยเป็น แอมแปร์-รอบ (Ampere-Turns, หรือย่อว่า At) แรงเคลื่อนแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กนั้น เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวด และค่าของจำนวนรอบของขดลวดนั้น ดังสมการของแรงเคลื่อนแม่เหล็กคือ

$$\mathcal{F} = NI \quad (\text{At}) \quad \dots(2)$$

เมื่อ N = จำนวนรอบของขดลวด หน่วย รอบ (Turn, t)

I = กระแสที่ไหลผ่านขดลวดนั้น หน่วย แอมแปร์ (Ampere, A)

ตัวอย่าง 1.1 ขดลวดนี้อยู่บนแกนแม่เหล็กรูปวงแหวน ในรูปที่ 1.6 มีจำนวนรอบของขดลวด 600 รอบ วงแหวนเป็นแกนเหล็กมีพื้นที่หน้าตัด 1 cm^2 มีเส้นแรงแม่เหล็กรวมที่เกิดขึ้น $0.2 \text{ } \mu\text{Wb}$ เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวด 0.8 A ถ้ามีกระแสไหลผ่านขดลวด 2 A ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กรอบ ๆ แกนเหล็กมีค่าเท่าไร



รูปที่ 1.6

วิธีทำ

$$\mathcal{F}_1 = NI$$

$$= 600 \times 0.8 = 480 \text{ At}$$

$$\phi_1 = 0.2 \text{ } \mu\text{Wb}$$

$$\text{แต่เมื่อ } I = 2 \text{ A } \therefore \mathcal{F}_2 = 600 \times 2 = 1,200 \text{ At}$$

ϕ_2 จะเพิ่มขึ้นดังนี้

$$\frac{\mathcal{F}_2}{\mathcal{F}_1} \times \phi_1 = \frac{1,200}{480} \times 0.2 \text{ } \mu\text{Wb} = 0.5 \text{ } \mu\text{Wb}$$

(กำหนดให้ค่าของ $\mathcal{F}$ และ ϕ แปรผันตรงกันและเป็นลักษณะเชิงเส้น)

$$\text{ดังนั้น } B = \frac{\phi}{A} = \frac{0.5 \times 10^{-6} \text{ Wb}}{1 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$\therefore B = 0.005 \text{ T} = 5 \text{ mT}$$

1.1.3 ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity = H)

ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กที่ออกแรงกระทำกับหนึ่งหน่วยขั้วแม่เหล็กมีหน่วยเป็น Ampere Turn/meter หรือ At/m ในหน่วย MKS ส่วนในระบบ CGS มีหน่วยเป็น Oersted หรือ Gilbert ต่อเซนติเมตร สำหรับในตัวกลางที่เป็นอากาศ หรืออื่น ๆ นั้น ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Field Intensity) มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B (Flux Density) นั่นคือ $B = \mu H$ เมื่อ B มีหน่วยเป็น Wb/m^2 ในระบบ MKS แต่ในระบบ CGS มีหน่วยเป็น Maxwell/cm² (หรือ Gauss) หรือ $1 \text{ Wb/m}^2 = 10,000 \text{ Gauss}$

ดังนั้นสมการของความเข้มของสนามแม่เหล็กคือ

$$H = \frac{\mathcal{F}}{l} \quad (\text{At/m}) \quad \dots(3)$$

เมื่อ H = ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็ก หน่วยเป็น แอมแปร์-รอบ/เมตร (At/m)

$\mathcal{F}$ = แรงเคลื่อนแม่เหล็ก หน่วยเป็น แอมแปร์-รอบ (At)

l = ความยาวของทางเดินแม่เหล็ก หน่วยเป็น เมตร (m)

บางครั้งจะเรียกความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กว่า Magnetizing Force

1.1.4 ความซึมซาบของแกนเหล็ก (Magnetic Flux Permeability = μ)

สภาพการซึมซาบของแม่เหล็กก็คือตัวกลางตัวหนึ่งที่สามารถทำให้เกิดสนามหรือเส้นแรงแม่เหล็กได้มากหรือน้อยแตกต่างกันไป เช่น ถ้ามีขดลวดขดหนึ่งพันรอบแกนไม้โดยที่มีกระแสจำนวนหนึ่งไหลผ่านขดลวดนี้ ก็จะทำให้เกิดสนามหรือเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นจำนวนหนึ่ง ในทำนองเดียวกันถ้าใช้แกนเหล็กขนาดเท่ากับแกนไม้ใส่เข้าไปแทนในขดลวดนั้นแล้วให้กระแสไฟฟ้าจำนวนเดียวกันไหลผ่านขดลวดนั้น จะทำให้ได้สนามหรือเส้นแรงแม่เหล็กมากกว่าเมื่อมีแกนเป็นไม้ก็แสดงว่าแกนเหล็กมีสภาพการซึมซาบทางแม่เหล็กสูงกว่าไม้ ($\mu_r \text{ เหล็ก} > \mu_r \text{ ไม้}$) ค่า μ_r เมื่ออากาศนั้นเท่ากับ 1 ในระบบ CGS ค่า μ นี้ยังแสดงได้ในรูปอัตราส่วน B/H ด้วย โดยที่ B เป็น Flux Density และ H เป็น Flux Intensity

$$\mu = \frac{B}{H} \quad \text{หรือ} \quad B = \mu H \quad (\mu \text{ มีหน่วยเป็น เฮนรี/เมตร H/m}) \quad \dots(4)$$

สำหรับระบบ MKS ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$B = 4\pi \times 10^{-7} \mu_r H$$

- เมื่อ B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก หน่วย Wb/m²
 H คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก หน่วย At/m
 $\mu = \mu_o \mu_r$ หน่วย H/m
 $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$ หน่วย H/m
 μ_r คือ Relative Permeability (ความซึมซับสัมพัทธ์ของตัวกลาง)

1.1.5 ความต้านทานแม่เหล็ก (Magnetic Reluctance, $\mathcal{R}$)

ความต้านทานทางแม่เหล็ก (Reluctance, $\mathcal{R}$) คือความต้านทานที่เกิดขึ้นในวงจรแม่เหล็ก ซึ่งอาจจะเป็นอากาศหรือวัสดุอะไรก็ได้ที่อยู่ในบริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กส่งเส้นแรงแม่เหล็กไปถึง จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสิ่งนั้น ๆ ความต้านทานนี้จะต้านทานการส่งเส้นแรงแม่เหล็กที่ออกจากแหล่งกำเนิดเส้นแรงให้ลดลงไป นี่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาว l ที่เส้นแรงผ่านไป เพื่อให้ครบวงจรของตัวเอง และเป็นสัดส่วนผกผันกับพื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่าน รวมทั้งเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าของ μ ด้วย ฉะนั้นในอากาศจึงได้ว่า

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (\text{At/Wb}) \quad \dots(5)$$

เมื่อ l = ความยาวเฉลี่ยของทางเดินแม่เหล็ก หน่วยเป็นเมตร (m)

A = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่ใช้เป็นทางเดินแม่เหล็ก หน่วยเป็นตารางเมตร (m²)

μ = สภาพการซึมซับของวัสดุที่ใช้เป็นแกนเหล็ก หน่วยเป็นเฮนรี/เมตร (H/m)

ตัวอย่างที่ 1.2 จากตัวอย่างที่ 1.1 ถ้าแกนทอรอยด์พันขดลวด 600 รอบและมีกระแสไหลผ่าน 2 A จงคำนวณหาค่าของ

- ค.ต.ท. แม่เหล็กของแกนเหล็ก ($\mathcal{R}$)
- ความยาวเฉลี่ยของทางเดินเส้นแรงแม่เหล็ก (l)
- ความเข้มของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก (H)

วิธีทำ

$$\text{ก) } \mathcal{R} = \frac{l}{\mu_o A} \quad \text{หรือ, } \mathcal{R} = \frac{\mathcal{F}}{\phi}$$

$$\text{แทนค่า} \quad \mathcal{R} = \frac{600 \times 2}{0.5 \times 10^{-6}} = 2,400 \times 10^{-6} \text{ At/Wb}$$

$$\text{ข) } l = \mu_o A \mathcal{R} = 4\pi \times 10^{-7} \times 1 \times 10^{-4} \times 2,400 \times 10$$

$$\therefore l = 0.3 \text{ m} = 30 \text{ cm}$$

$$\text{ค) } \mathcal{F} = Hl \text{ ดังนั้น } H = \frac{\mathcal{F}}{l} = \frac{1,200}{0.3}$$

$$\therefore H = 4,800 \text{ At/m}$$

1.1.6 เส้นแรงแม่เหล็ก (ฟลักซ์แม่เหล็ก) (Magnetic Flux, ϕ)

เส้นแรงแม่เหล็ก คือ เส้นแรงที่เกิดจากแม่เหล็กส่งอำนาจแม่เหล็กออกมารอบตัวมันเอง โดยมีทิศทางของเส้นแรงภายนอกแท่งแม่เหล็กจะวิ่งจากขั้วเหนือ (N) ไปยังขั้วใต้ (S) ส่วนภายในแท่งแม่เหล็กจะวิ่งจากขั้วใต้ (S) ไปยังขั้วเหนือ (N) ดังแสดงในรูปที่ 1.5

สำหรับระบบ CGS มีหน่วยเป็น Maxwell แต่ในระบบ MKS มีหน่วยเป็น Weber เท่ากับ 10^8 Lines ดังนั้นสมการของ ϕ คือ

$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} \text{ หน่วยเวเบอร์ (Wb)} \quad \dots(6)$$

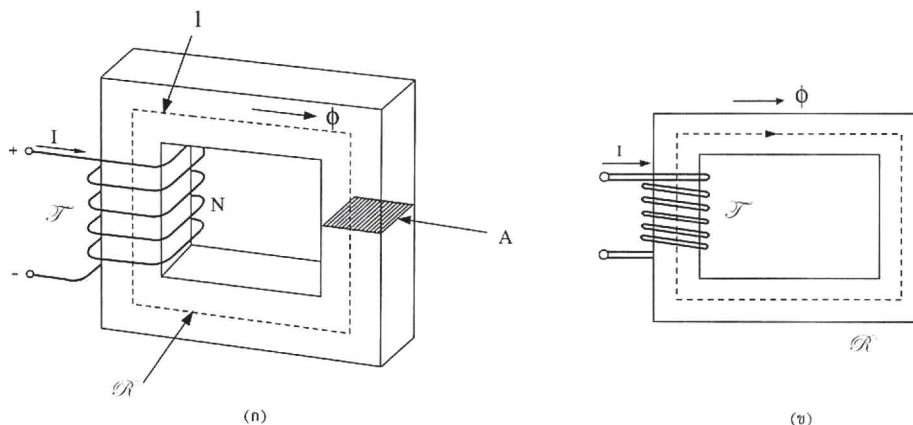
เมื่อ ϕ = เส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วย เวเบอร์ (Wb)

$\mathcal{F}$ = แรงเคลื่อนแม่เหล็ก หน่วย แอมแปร์-รอบ (At)

$\mathcal{R}$ = ค.ต.ท. แม่เหล็ก หน่วย แอมแปร์-รอบ/เวเบอร์ (At/Wb)

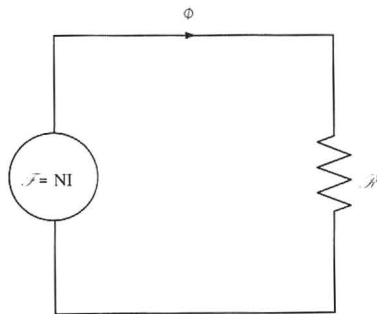
1.1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างวงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก

เมื่อพิจารณาวงจรแม่เหล็กในรูปที่ 1.7 (ก) จะพบว่า เป็นแกนเหล็กสี่เหลี่ยมมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A ความยาวทางเดินแม่เหล็กเท่ากับ l มีขดลวดพันอยู่ด้านซ้ายมือของแกนเหล็ก จำนวนรอบการพันเท่ากับ N มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเท่ากับ I และมีแรงเคลื่อนแม่เหล็กเท่ากับ $\mathcal{F}$ ความต้านทานการเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก คือ ความต้านทานแม่เหล็กเท่ากับ $\mathcal{R}$ สามารถเขียนในภาพที่ดูง่ายขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.7 (ข)

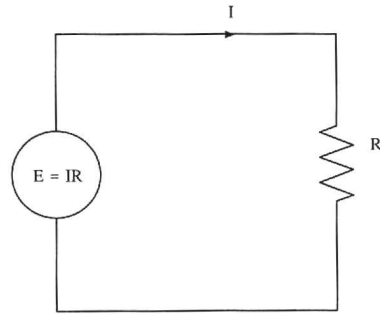


รูปที่ 1.7 แสดงภาพเปรียบเทียบของวงจรแม่เหล็ก

จากรูปที่ 1.7 สามารถเขียนวงจรแม่เหล็กให้ดูง่ายขึ้น และเขียนให้อยู่ในลักษณะเดียวกับวงจรไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 1.8 (ก) โดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กคือ $\mathcal{F} = NI$ ทำหน้าที่ผลิตเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) ผ่านความต้านทานแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็ก ($\mathcal{R}$) เมื่อเทียบกับวงจรไฟฟ้าจะเทียบได้ดังรูปที่ 1.8 (ข) โดย E คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าเปรียบได้เหมือนกับ $\mathcal{F}$ และ R คือ ค.ต.ท. ไฟฟ้าเปรียบได้กับ $\mathcal{R}$ ในวงจรแม่เหล็ก และกระแส I ในวงจรไฟฟ้าเปรียบได้กับ ϕ ในวงจรแม่เหล็ก เป็นต้น



(ก) วงจรแม่เหล็ก



(ข) วงจรไฟฟ้า

รูปที่ 1.8 ภาพเปรียบเทียบระหว่างวงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก

เมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าวงจรไฟฟ้า และวงจรแม่เหล็กมีส่วนสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน ดังแสดงการเปรียบเทียบในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก

วงจรไฟฟ้า	วงจรแม่เหล็ก
1. มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive Force)	มีแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force)
2. มีกระแสไฟฟ้าวิ่งรอบวงจร (Circuit)	มีเส้นแรงแม่เหล็กวิ่งรอบวงจร (Magnetic Flux)
3. ตัวนำคือลวดทองแดง (Copper)	ตัวนำคือเหล็ก (Steel)
4. กระแสไหลทำให้เกิดการสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก	การเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า
5. ตัวนำเป็นสื่อไฟฟ้า (Conductivity)	ความซึมซาบ (Permeability) ขึ้นอยู่กับสภาพตัวนำ
6. ตัวเก็บประจุขณะที่เปิดวงจรไฟฟ้าออกจะมีประจุไฟฟ้าคงค้างไว้	ตัวเหนี่ยวนำแม่เหล็ก ขณะที่ปลดแรงดันแม่เหล็กออกจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างไว้

สรุปสมการของวงจรแม่เหล็ก

$$\mathcal{F} = NI = \phi \mathcal{R}$$

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A}$$

$$\phi = BA = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}$$

$$B = \mu H = 4\pi \times 10^{-7} \times \mu_r \times H$$

$$H = \frac{\mathcal{F}}{l} = \frac{NI}{l}$$

เมื่อ $\mathcal{F}$ คือ แรงดันแม่เหล็ก

หน่วย At

N คือ จำนวนรอบของขดลวด

I คือ จำนวนกระแสที่ไหลผ่านขดลวด

หน่วย A

ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็ก

หน่วย Wb

$\mathcal{R}$ คือ ความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็ก

หน่วย At/Wb

H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก

หน่วย At/m

B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

หน่วย Wb/m²

μ คือ สภาพความซึมซับทางแม่เหล็กของสารนั้น ๆ

หน่วย H/m

l คือ ความยาวของวงจรแม่เหล็กที่เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งผ่าน

หน่วย m

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็กที่เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งผ่าน

หน่วย m²

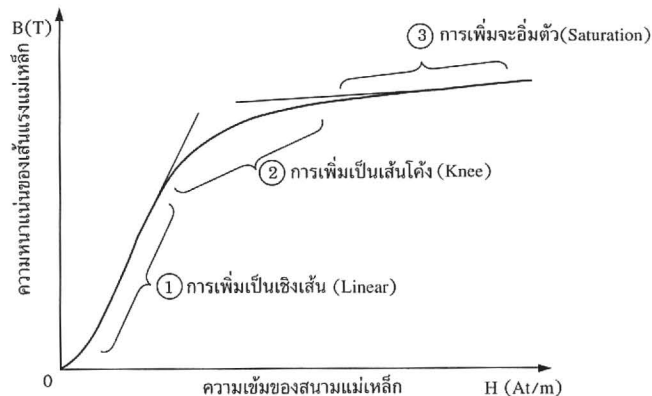
1.1.8 ฮิสเตอร์ซิส และเส้นโค้ง B - H

1. เส้นโค้ง B - H (B - H Curve)

การอิ่มตัวของวัสดุ (Saturation) ตัวนำแม่เหล็ก หมายถึง สภาพที่วัสดุตัวนำแม่เหล็กยอมรับสภาพการเปลี่ยนแปลงเป็นแม่เหล็กเต็มที่แล้ว

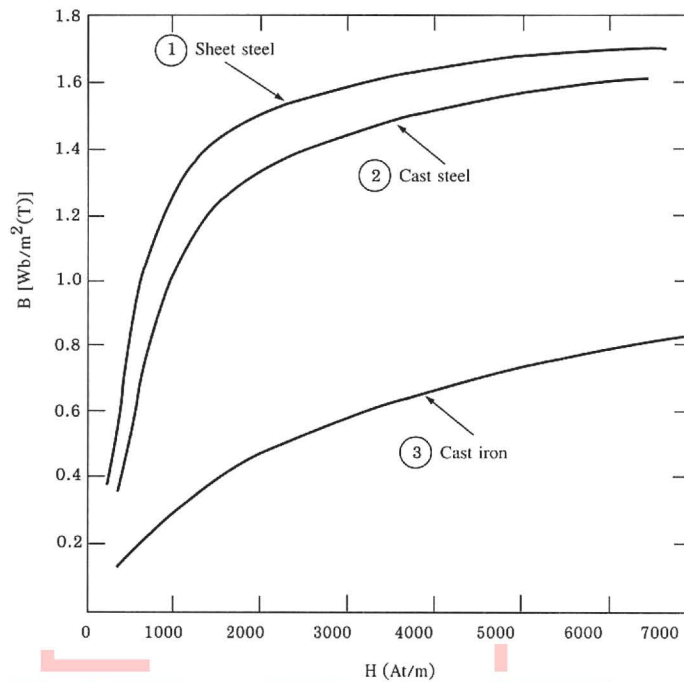
การอิ่มตัวของวัสดุตัวนำแม่เหล็กเปรียบเทียบกับได้กับการขึ้นรถเมล์ในช่วงเวลาเร่งด่วน ถ้ารถว่างผู้โดยสารก็ขึ้นได้ง่าย เมื่อผู้โดยสารเต็มคันรถแล้วจะไม่สามารถขึ้นได้อีก แต่ถ้าพยายามเบียดเสียดกันก็พอจะไปได้อีก 1-2 คน เช่นเดียวกับกรณีของวัสดุตัวนำแม่เหล็ก แม้ว่าวัสดุตัวนำแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัวแล้ว แต่ถ้าเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในวัสดุตัวนำแม่เหล็ก (B) จะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย

ถ้านำความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (B) กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ของวัสดุตัวนำแม่เหล็กชนิดใดชนิดหนึ่งมาเขียนเส้นโค้งการเป็นแม่เหล็ก (Magnetization Curve) หรือในบางครั้งเรียกว่า B-H Curve หรือเส้นโค้ง B-H ซึ่งแสดงในรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 เส้นโค้ง $B-H$ ของวัสดุแม่เหล็กชนิดหนึ่ง

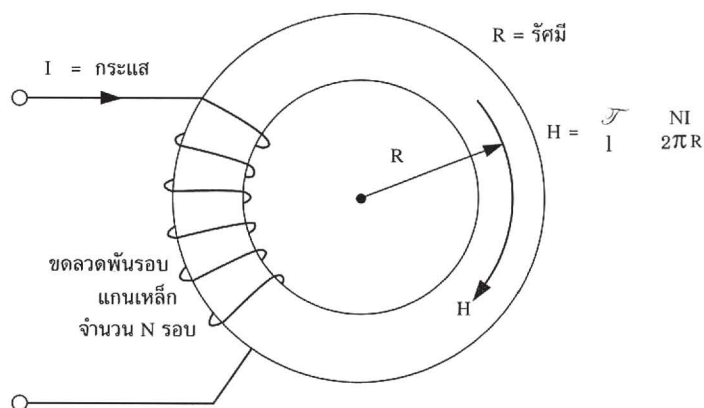
จากรูปที่ 1.9 สามารถแบ่งเส้นโค้งที่เกิดจากผลทางแม่เหล็กได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่มีการเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ให้กับวัสดุตัวนำแม่เหล็ก ทำให้ความหนาแน่นของฟลักซ์ (B) เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนในลักษณะเป็นเชิงเส้นและเมื่อ B เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงที่ 2 เส้นโค้งจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่บริเวณนี้ แกนตัวนำแม่เหล็กเริ่มเกิดการอิ่มตัว ในช่วงที่ 3 แกนตัวนำแม่เหล็กอิ่มตัวแล้วสังเกตได้ว่าการเพิ่มของ H ทำให้ B เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเท่านั้น เส้นโค้ง $B-H$ ของเหล็กต่างชนิดกันจะให้เส้นโค้งที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.10 เส้นที่ 1 คือ เส้นโค้ง $B-H$ ของเหล็กเส้น (Sheet Steel) เส้นที่ 2 คือเส้นโค้ง $B-H$ ของเหล็กชนิด Cast Steel และเส้นที่ 3 คือเส้นโค้ง $B-H$ ของเหล็กชนิด Cast Iron ซึ่งเหล็กทั้ง 3 ชนิดนี้ เป็นเหล็กที่มีใช้งานทั่วไปในอุตสาหกรรม เช่น เหล็กที่ใช้ทำแกนหม้อแปลง เหล็กหล่อที่ใช้ทำโครงของมอเตอร์ และเครื่องกำเนิด หรือเหล็กแผ่นบางอัดซ้อนกันที่ใช้ทำโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เป็นต้น



รูปที่ 1.10 รูปแสดงเส้นโค้ง B - H ของเหล็ก 3 ชนิดคือ Sheet steel, Cast steel และ Cast iron

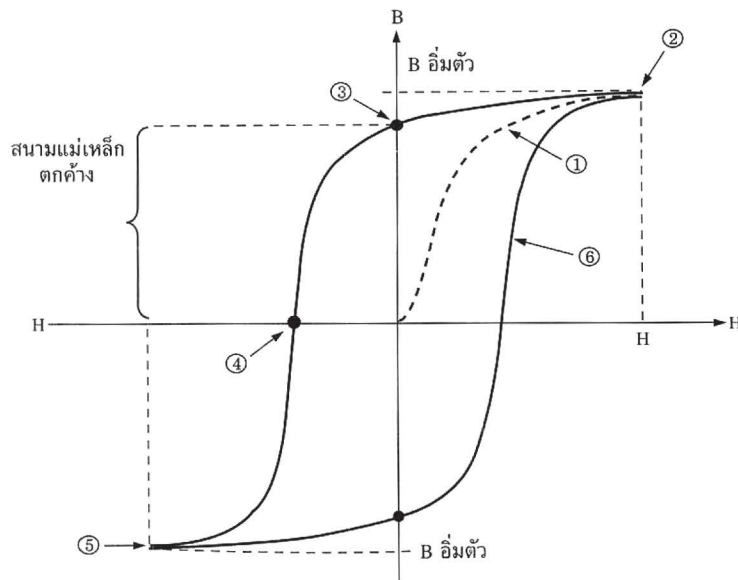
2. ฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis)

อาจเรียกว่า ฮิสเตอร์ซิส หมายถึง วงรอบของค่า B - H ซึ่งอธิบายได้จากการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กอันหนึ่ง ดังรูปที่ 1.11 (ก)



(ก) ขดลวดพันรอบแกนเหล็ก ทำให้เป็นวงจรแม่เหล็กเพื่อใช้ในการหากรอบของ B - H

รูปที่ 1.11



(ข) แสดงเส้นโค้งวงรอบ B-H หรือเส้นโค้งฮิสเตอร์ซิสของวงจรแม่เหล็กในรูป 1.11 (ก)

รูปที่ 1.11 (ต่อ)

จากรูปที่ 1.11 (ก) เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำที่พันอยู่รอบแกนตัวนำแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ($\mathcal{F}$) ถ้า $\mathcal{F}$ เพิ่มขึ้น ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ย่อมเพิ่มขึ้นด้วย จนกระทั่งแกนตัวนำแม่เหล็กอิ่มตัว (จุด 1 ถึงจุด 2 ของเส้นโค้ง) ดังรูปที่ 1.11 (ข)

ถ้ากระแสไฟฟ้าลดลงถึงศูนย์ $\mathcal{F}$ กับ H ย่อมมีค่าเป็นศูนย์ด้วยเช่นกัน แต่ B ไม่เป็นศูนย์ (จุด 2 ถึงจุด 3) แสดงว่า B ล้าหลัง H ทั้งนี้เพราะเกิดสนามแม่เหล็กตกค้าง (Residual Magnetism) ในแกนตัวนำแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กตกค้างนี้ถ้าเกิดขึ้นในแกนตัวนำแม่เหล็กที่เป็นเหล็กกล้า ซึ่งรักษาสภาพการเกิดสนามแม่เหล็กตกค้างได้เป็นเวลานาน เราเรียกว่า แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnetism)

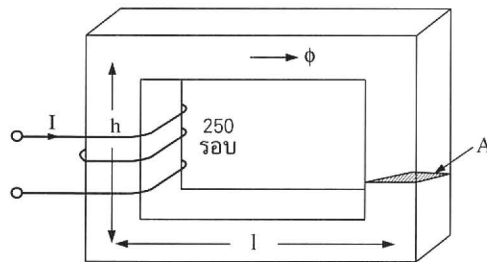
หลังจากนั้น ถ้าเราเพิ่มกระแสไฟฟ้าในทิศทางลบอย่างช้า ๆ ค่า B จะลดลงมาที่ศูนย์ แต่ H ที่ทำให้ B เป็นศูนย์นี้เป็น H ด้านลบ (จุด 4) เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าด้านลบอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่ง B ถึงจุดสูงสุดทางด้านลบ แกนตัวนำแม่เหล็กจึงเกิดการอิ่มตัวอีกครั้งหนึ่ง (จุด 5)

ถ้าลดกระแสไฟฟ้าด้านลบลงมาที่ศูนย์ (จุด 5 ถึงเส้น 0) และเพิ่มกระแสไฟฟ้าด้านบวกอีกครั้งหนึ่ง เส้นโค้งที่เกิดขึ้นจะกลับไปรวมกับเส้นโค้งเดิมทำให้เส้นโค้งที่เกิดจากผลทางแม่เหล็กครบวงจรที่จุด 6

การเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งที่เกิดจากผลทางแม่เหล็ก จากจุด 2, 3, 4, 5 และ 6 แล้วกลับมาครบรอบที่ 2 อีกครั้งหนึ่งนี้ เราเรียกว่า วงรอบฮิสเตอร์ซิส และการที่ B ล้าหลัง H หรือ B ไม่กลับไปยังจุดศูนย์พร้อมกับ H เราเรียกว่า ฮิสเตอร์ซิส

1.2 การคำนวณวงจรแม่เหล็กเบื้องต้น

ตัวอย่างที่ 1.3 จากวงจรแม่เหล็กในรูปที่ 1.12 แกนเหล็กหล่อ (Cast Steel) มีขดลวดพันอยู่จำนวน 250 รอบ ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กจำนวน 0.48 mWb ในแกนเหล็กนี้ ถ้าขนาดของแกนเหล็กคือ $l = 10 \text{ cm}$, $h = 8 \text{ cm}$, $A = 4 \text{ cm}^2$ จงคำนวณหาค่ากระแสที่จ่ายให้ขดลวดนี้



รูปที่ 1.12

วิธีทำ

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{0.48 \times 10^{-3}}{4 \times 10^{-4}} = 1.2 \text{ T}$$

จากรูปที่ 1.10 เมื่อ $B = 1.2 \text{ T}$ พิจารณากระแสของ Cast Steel จะได้ค่าของ $H \approx 1,240 \text{ At/m}$

จากรูปที่ 1.12 ทางเดินแม่เหล็กมีความยาวเฉลี่ย เท่ากับ

$$l + h + l + h = (2 \times 0.1) + (2 \times 0.08)$$

$$\therefore l = 0.36 \text{ m}$$

$$\text{แต่ } \mathcal{F} = Hl = 1,240 \times 0.36 = 446.4 \text{ At}$$

$$\text{ดังนั้น } I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{446.4}{250} = 1.79 \text{ A}$$

ตัวอย่างที่ 1.4 วงจรแม่เหล็กวงจรหนึ่งดังรูปที่ 1.13 ที่แกนเหล็กมีช่องอากาศ (Air Gap) ขนาด 1 m.m. แกนเหล็กทำด้วยเหล็กหล่อ (Cast Steel) เหมือนตัวอย่างที่ 1.3 จงคำนวณหาค่ากระแสที่จ่ายให้ขดลวด เพื่อให้ได้เส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 0.48 mWb