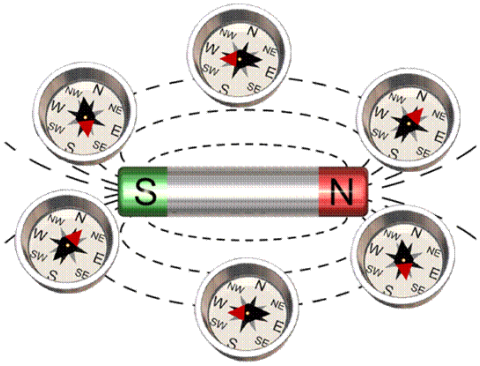


บทที่ 1

ทฤษฎีแม่เหล็กและวงจรแม่เหล็ก

วัตถุประสงค์

1. อธิบายความหมายของสนามแม่เหล็กและฟลั๊กซ์แม่เหล็กได้
2. บอกคุณสมบัติของเส้นแรงแม่เหล็กได้
3. อธิบายแรงดันแม่เหล็ก ความเข้ม และความหนาแน่นของฟลั๊กซ์แม่เหล็กและความต้านทานแม่เหล็กได้
4. คำนวณวงจรแม่เหล็กได้

1-1 แม่เหล็ก (Magnet)

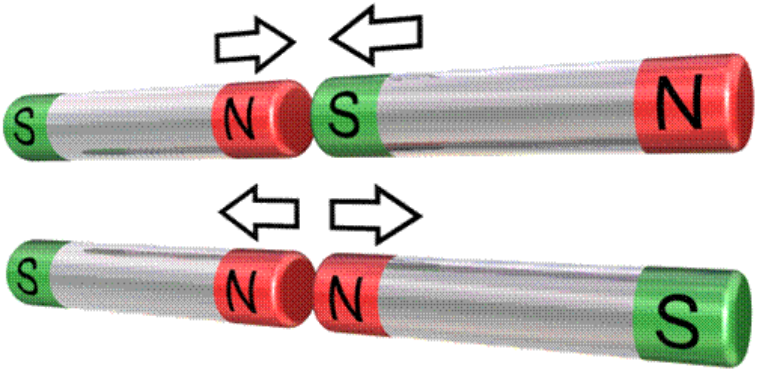
1-1-1 อำนาจแม่เหล็ก

วัสดุที่เป็นแม่เหล็ก คือวัสดุที่มีอำนาจแม่เหล็ก (Magnetism) อำนาจแม่เหล็กคือ ความสามารถของวัสดุแม่เหล็กที่ดึงดูดเหล็กได้ เช่น แท่งแม่เหล็กที่ดูดผงตะไบเหล็กได้ หรือแม่เหล็ก สามารถดูดลวดเสียบกระดาษได้ เป็นต้น

รูปที่ 1-1 วัสดุที่มีอำนาจแม่เหล็ก

1-1-2 ขั้วแม่เหล็ก (Magnetic Pole)

แท่งแม่เหล็ก (Magnetic Bar) หรือวัสดุแม่เหล็กใด ๆ จะมีขั้วแม่เหล็กเพียง 2 ขั้ว คือ ขั้วเหนือ (North pole : N) และขั้วใต้ (South pole : S) โดยมีคุณสมบัติของขั้วแม่เหล็กที่สำคัญ คือ “ขั้วแม่เหล็กเหมือนกันจะมีแรงดูดกัน และขั้วแม่เหล็กต่างกันจะมีแรงผลักกัน”

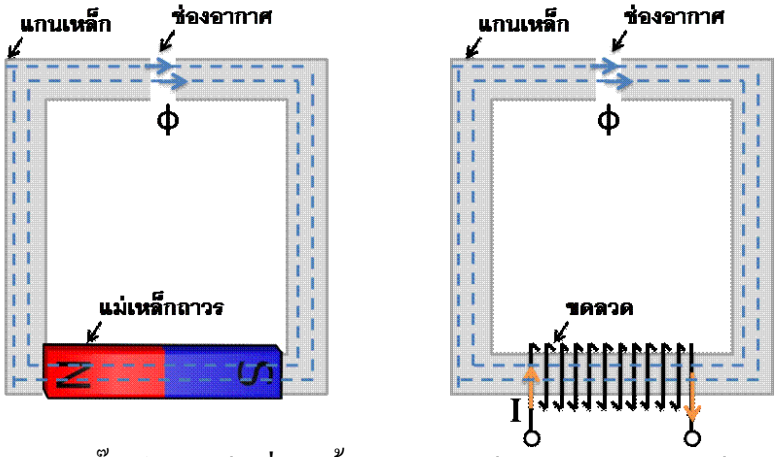


รูปที่ 1-2 แสดงการผลักและดูดของขั้วแม่เหล็กเหนือและใต้

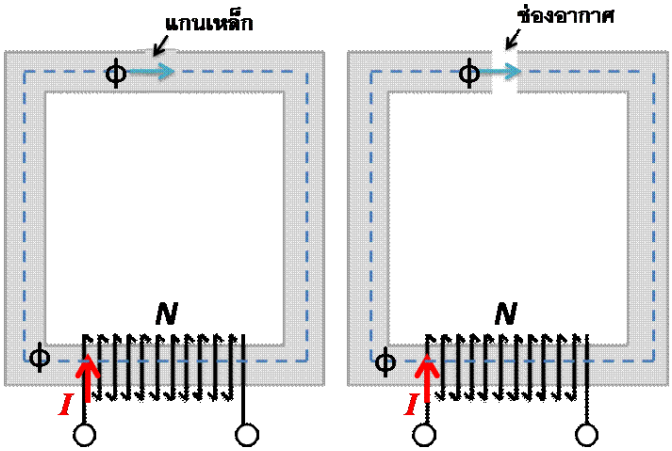
1-2 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)

วงจรแม่เหล็ก หมายถึง เส้นทางที่ฟลั๊กซ์แม่เหล็กเดินทาง จากแหล่งกำเนิดผ่านวัสดุต่าง ๆ จนครบวงรอบ

ฟลั๊กซ์แม่เหล็กนี้ อาจกำเนิดมาจากแม่เหล็กถาวร หรือแม่เหล็กไฟฟ้าก็ได้ ดังรูปแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 1-5 เป็นวงจรแม่เหล็กที่เดินทางผ่านแกนเหล็ก (Core) และช่องอากาศ (Air gap)



รูปที่ 1-5 ฟลั๊กซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นทางแม่เหล็กถาวรและแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เดินทางผ่านวงจรแม่เหล็กที่มีทั้งแกนเหล็กและช่องอากาศ



วงจรแม่เหล็กประกอบไปด้วย

1. **ขดลวดพันรอบแกนเหล็ก**

   จำนวน N รอบ

2. **แรงดันแม่เหล็ก**

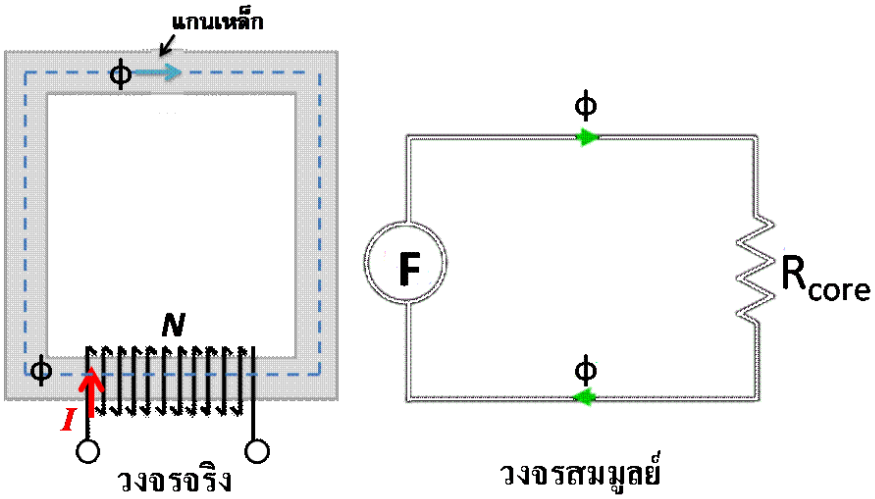
   (Magnetic Force : F)

3. **ฟลั๊กซ์แม่เหล็ก** (ø)

รูปที่ 1-6 ส่วนประกอบของมอเตอร์แม่เหล็ก
ที่มีช่องอากาศและไม่มีช่องอากาศ

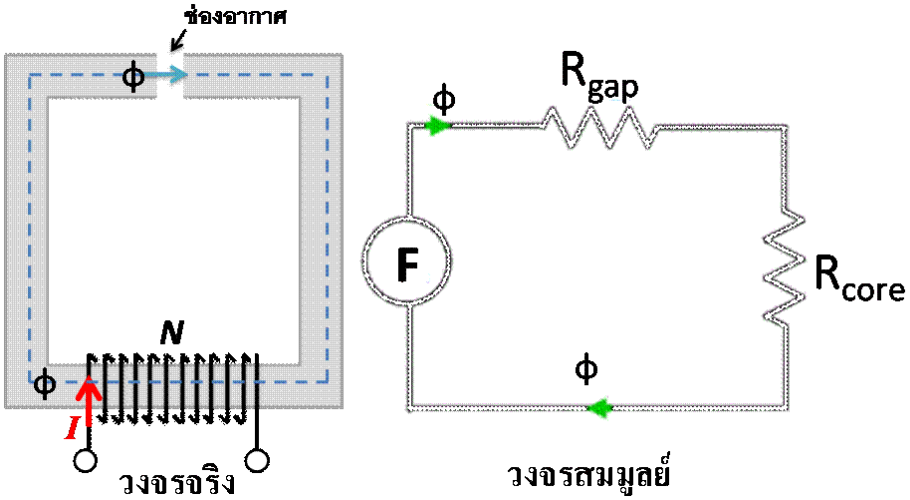
เมื่อมีกระแสไฟฟ้า (I) ไหลผ่านขดลวด (N) จะทำให้เกิดแรงดันแม่เหล็ก (F) แรงดันแม่เหล็กนี้ จะสร้างฟลั๊กซ์แม่เหล็ก (ø) ขึ้นในแกนเหล็กและไหลผ่านจนครบวงรอบ วงจรแม่เหล็กอาจเป็นได้ดังรูปที่ 1-6

วงจรแม่เหล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรไฟฟ้าจะได้ดังรูปที่ 1-7 จะพบว่า วงจรสมมูลย์วงจรแม่เหล็กเขียนเป็นวงจรไฟฟ้าได้ โดยมี R_{core} คือ ความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็กมี (ø) เปรียบได้กับกระแสไฟฟ้าของวงจรไฟฟ้า และ F เปรียบได้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า (E) ของวงจรไฟฟ้านั่นเอง



รูปที่ 1-7 วงจรแม่เหล็กเปรียบเทียบระหว่างวงจรจริง กับวงจรสมมูลย์

สำหรับวงจรสมมูลย์ของวงจรแม่เหล็ก เมื่อมีช่องอากาศ จะมีค่าความต้านทานของช่องอากาศเพิ่มขึ้นในวงจร (R_{gap}) อีกตัวหนึ่ง อนุกรมกับความต้านจากแกนเหล็ก (R_{core}) และมี (ø) เดินทางในวงจร โดยมีแหล่งจ่ายแรงดันแม่เหล็กคือ F

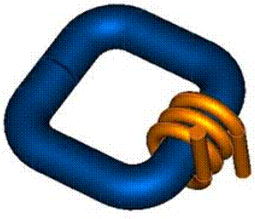


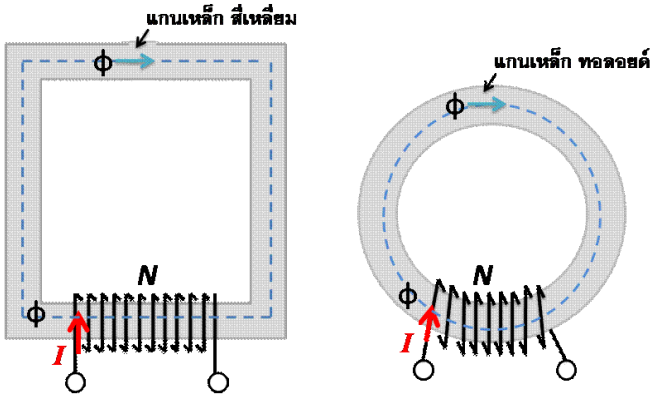
รูปที่ 1-8 วงจรสมมูลย์ของวงจรรแม่เหล็กที่มีช่องอากาศ

1-2-1 แรงดันแม่เหล็ก (Magneto motive force : m.m.f.)

แรงดันแม่เหล็ก คือ แรงที่ใช้การขับเคลื่อนฟลั๊กซ์แม่เหล็ก (ø) ให้เดินทางในวงจรแม่เหล็กได้ในลักษณะของวงรอบปิด เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวด จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดนั้น (N) ขดลวดจะสร้างอำนาจแม่เหล็กและสร้างแรงดันแม่เหล็ก (mmf) หรือใช้ขับเคลื่อน ฟลั๊กซ์แม่เหล็ก (ø) ให้เดินทางจนครบรอบวงจรปิด ในแกนเหล็กนั้นได้ วงจรแม่เหล็กอาจมี 1 วงรอบปิด หรือมากกว่าก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1-9

ขดลวดพันบนแกนทอรอยด์


ขดลวดพันบนแกนสี่เหลี่ยม



รูปที่ 1-9 วงจรแม่เหล็กของแกนเหล็กสี่เหลี่ยม และแกนเหล็กวงกลม (แกนทอรอยด์ , Toroid)

สมการของแรงดันแม่เหล็ก (mmf) คือ

$$F = NI \text{ หรือ}$$
$$mmf = NI \quad \text{(At)}$$

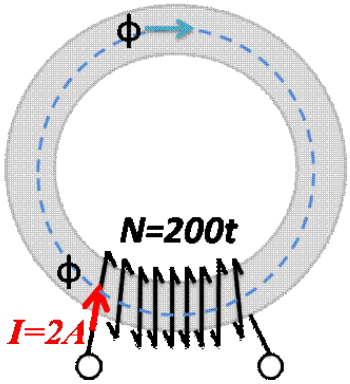
หน่วย At คือ แอมแปร์เทิร์น (Ampere turn : At)

และ F = แรงดันแม่เหล็ก (At)

N = จำนวนรอบของขดลวด (turn : t)

I = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด (Ampere : A)

ตัวอย่างที่ 1-1 จากวงจรแม่เหล็กต่อไปนี้ จงหาค่าของแรงดันแม่เหล็ก (F)



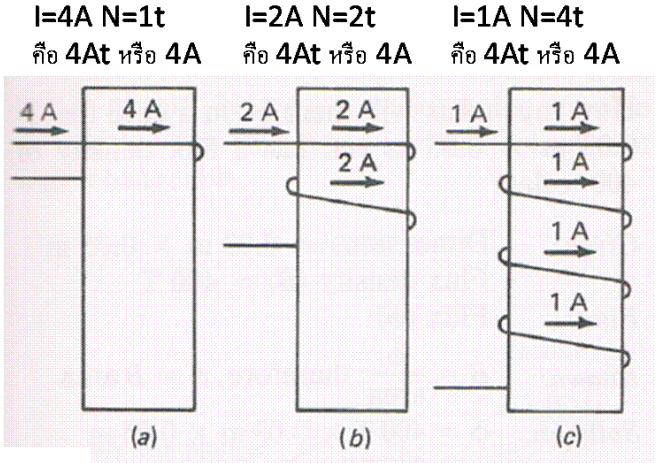
รูปที่ 1-10

จากรูปที่ 1-10 I = 2A ; N = 200 t

จากสูตร F = N I

ดังนั้น F = 200t x 2A

รูปที่ 1-11 แสดงให้เห็นว่าความหมายของแอมแปร์เทิร์น เมื่อค่าผลลัพธ์ F = 4At เท่า ๆ กัน อาจเกิดจาก (a) กระแส 4A ขดลวด 1 รอบ หรือ (b) กระแส 2A ขดลวดพัน 2 รอบ หรือ (c) กระแส 1A ขดลวดพัน 4 รอบ ก็ให้ค่า At ที่เท่ากัน



รูปที่ 1-11 ความหมายของ At

1-2-2 ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field Strength : H)

ความเข้มของสนามแม่เหล็ก หมายถึง อัตราส่วนระหว่างแรงดันแม่เหล็ก (F : mmf) ต่อความยาวของวงจรแม่เหล็ก (L) ดังสมการ

$$H = \frac{F}{L} \quad (At / m)$$

เมื่อ H คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (At / m)

F คือ แรงดันแม่เหล็ก (At)

L คือ ความยาวของวงจรแม่เหล็ก (m)

จากสมการจะพบว่า ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) แปรผันตรงกับแรงดันแม่เหล็ก (F) และแปรผกผันกับความยาวของวงจรแม่เหล็ก (L)

ตัวอย่างที่ 1-2 จากวงจรแม่เหล็กในรูที่ 1-12 และ (b) อยากทราบว่ารูปใดให้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) มากที่สุด

วิธีทำ รูปที่ 8 (a)

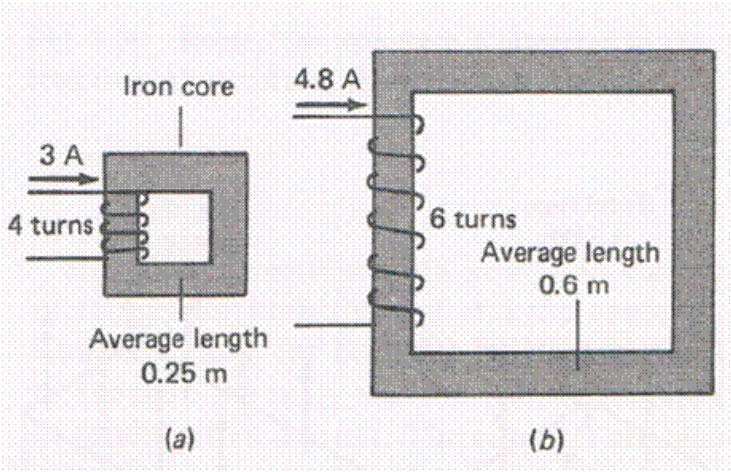
$$H_a = \frac{F}{L} = \frac{4t \times 3A}{0.25m}$$

$$H_a = \frac{12At}{0.25m} = 48At/m$$

รูปที่ 8 (b)

$$H_b = \frac{F}{L} = \frac{6t \times 4.8A}{0.6m}$$

$$H_b = \frac{28.8At}{0.6m} = 48At/m$$



ตอบ วงจรแม่เหล็กทั้งสอง มีค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากัน

1-2-3 ความหนาแน่นของฟลั๊กซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux density: B)

ความหนาแน่นของฟลั๊กซ์แม่เหล็ก (B) หมายถึง ปริมาตรของฟลั๊กซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux : ø) ในหนึ่งหน่วยพื้นที่ (A) และความหนาแน่นของฟลั๊กซ์แม่เหล็ก (B) นี้ จะแปรผันโดยตรงกับค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Magnetic Permeability : μ) และค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ดังสมการ

$$\mathbf{H = \mu H} \qquad (Wb/m^2 ; Tesla)$$

เมื่อ B คือ ความหนาแน่นของฟลั๊กซ์แม่เหล็ก (Wb / m^2)
μ คือ ความซึมซาบแม่เหล็ก (μb / Am)
H คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (At / m)

1-2-4 ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ)

หมายถึง ความสามารถของวัสดุ ในการยอมให้ เส้นแรงแม่เหล็ก (ø) ไหลผ่านได้ ค่าของ μ หาได้จาก

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

เมื่อ μ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสมบูรณ์ (Absolute Permeability)
มีหน่วยเป็น Wb/A-m , Henry/m

μ_0 คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของสุญญากาศ (Permeability of free Space)
มีหน่วยเป็น W_b/A-m , Henry/m มีค่าคงที่เท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A-m

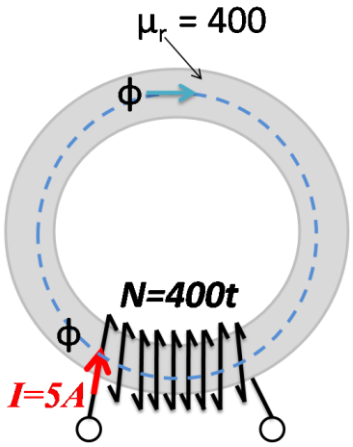
μ_r คือ ค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ (Relative Permeability) ของวัสดุใด ๆ ค่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้น ๆ

เช่น μ_r ของอากาศ (Air) $\approx$ 1.0

μ_r ของเหล็ก (Iron 99.8%) $\approx$ 5,000

μ_r ของเหล็กผสมซิลิกอน (Silicon Steel) $\approx$ 40,000

ตัวอย่างที่ 1-3 จากวงจรแม่เหล็กในรูป 1-13 จงหาค่าของความหนาแน่นของฟลั๊กซ์แม่เหล็ก



วิธีทำ $B = \mu H$

และ $\mu = \mu_0 \mu_r$

$\therefore \mu = 4\pi \times 10^7 \times 400$ Wb/Am

$H = NI$

$= 400t \times 5A = 2000AT$

ดังนั้น $B = 94\pi \times 10^7 \times 400) \times 20$

ตอบ $\therefore B = 1.00$ Wb/m^2

1-2-5 ฟลั๊กซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux : ø)

ฟลั๊กซ์แม่เหล็ก หรือเส้นแรงแม่เหล็ก (Line of force) ใช้สัญลักษณ์ ø มีหน่วยเป็นเวเบอร์ (Weber : Wb) ฟลั๊กซ์แม่เหล็กจำนวน 1Wb หมายความว่า ฟลั๊กซ์แม่เหล็ก (ø) ที่คล้องขดลวดจำนวน 1 รอบ แล้วทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยมนำ 1V เมื่อฟลั๊กซ์แม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงในอัตราที่สม่ำเสมอในเวลา 1 วินาที

สมการหาค่า ø คือ $\Phi = B A$

เมื่อ Ø คือ ฟลั๊กซ์แม่เหล็ก (หน่วย / Wb)

B คือ ความหนาแน่นของฟลั๊กซ์แม่เหล็ก (หน่วย : Wb/m^2)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

หรือพื้นที่ที่ฟลั๊กซ์แม่เหล็กเดินทางผ่าน (หน่วย : m^2)

ตัวอย่างที่ 1-4 จงหาค่าของฟลั๊กซ์แม่เหล็กเมื่อ $B = 0.8\ Wb/m^2$ และ $A = 100\ cm^2$

วิธีทำ จากสูตร $\emptyset = BA$

$$\emptyset = 0.8\ Wb/m^2 \times 100 \times 10^{-4} m^2$$

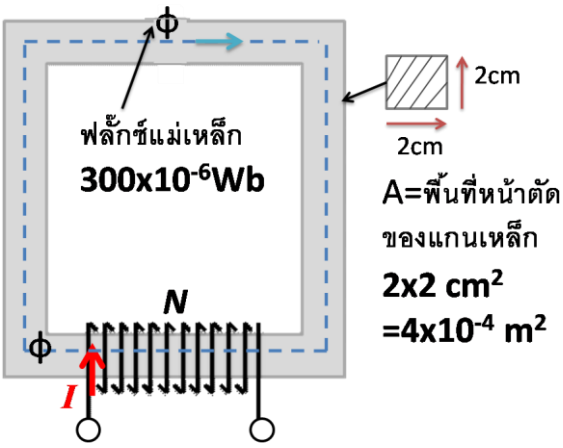
$$\emptyset = 0.8 \times 100 \times 10^{-4}$$

$$\emptyset = 8 \times 10^{-3}\ Wb$$

ตอบ $\emptyset = 8m\ Wb$

จากสมการ $\emptyset = BA$ ทำให้หาค่าของ B ได้ว่า $B = \frac{\emptyset}{A}$ นั่น คือ ความหนาแน่นของฟลั๊กซ์แม่เหล็ก (B) หาได้จาก จำนวนของฟลั๊กซ์แม่เหล็กต่อหน่วยพื้นที่นั่นเอง

ตัวอย่างที่ 1-5 จงหาค่าความหนาแน่นของฟลั๊กซ์แม่เหล็ก จากวงจรแม่เหล็กในรูปที่ 1-14



<u>วิธีทำ</u> กำหนดให้ $\emptyset = 3.60 \times 10^{-6}\ Wb$

$$A = 4 \times 10^{-4}\ m^2$$

จากสูตร $B = \frac{\emptyset}{A}$

$$B = \frac{360 \times 10^{-6}}{4 \times 10^{-4}}$$

$$B = 0.9\ Wb/m^2$$

หรือ $B = 0.9$ Tesla (T)

1-2-6 ความต้านทานแม่เหล็ก (Magnetic Reluctance: R)

ความต้านทานแม่เหล็ก หมายถึง ความสามารถของแกนเหล็กในการต้านการไหล (จำกัดปริมาณ) ของฟลั๊กซ์แม่เหล็กในวงจรแม่เหล็ก

ความต้านทานแม่เหล็ก R จะแปรผันตามความยาวของวงจรแม่เหล็ก (L) และแปรผกผันกับค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ) และพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (A) ดังสมการ

$$R = \frac{L}{\mu}$$

หน่วย At / Wb

หรือ $R = \frac{F}{\emptyset}$ หน่วย At / Wb

เมื่อ R คือ ค่าความต้านทานแม่เหล็ก (At / Wb)

L คือ ความยาวของวงจรแม่เหล็ก (m)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของทางเดินฟลั๊กซ์แม่เหล็ก หรือพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (m^2)

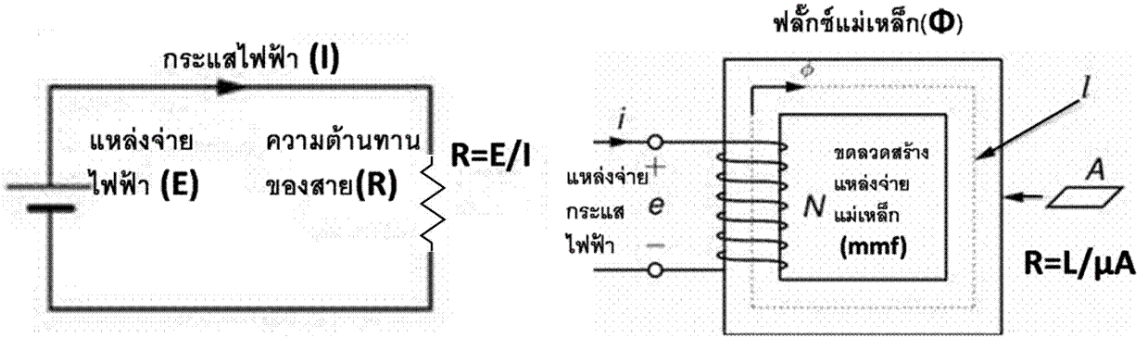
μ คือ ความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุ (Wb/At.m)

เพื่อให้ผู้เรียนมีความเข้าใจได้ดีขึ้น ขอให้พิจารณาการเปรียบเทียบระหว่างวงจรไฟฟ้ากับวงจรแม่เหล็ก จะได้ดังรูปที่ 11 และเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่าง ๆ ของวงจรไฟฟ้ากับวงจรแม่เหล็กได้ดังตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรไฟฟ้ากับวงจรแม่เหล็ก

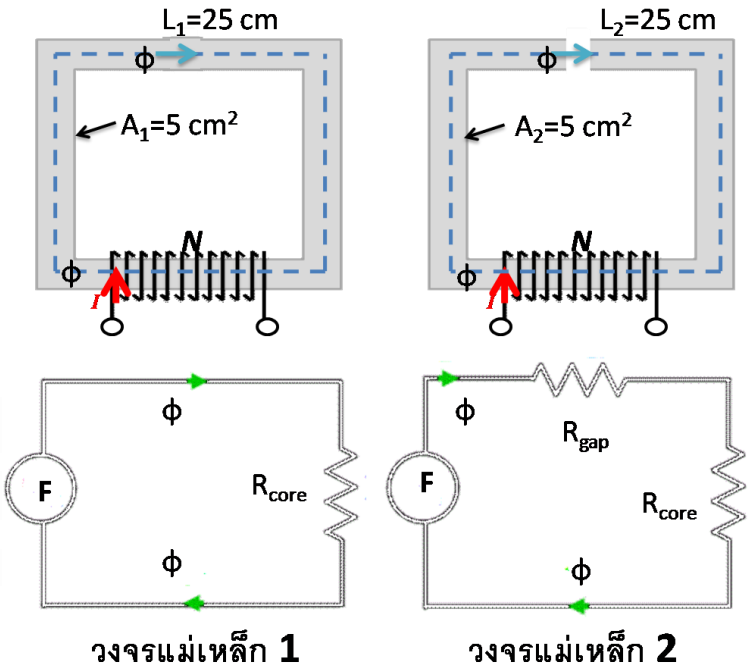
วงจรไฟฟ้า	วงจรแม่เหล็ก
1. แหล่งจ่ายไฟฟ้า (E)	แหล่งจ่ายแม่เหล็ก (F:mmf)
2. ตัวนำ	วัสดุแม่เหล็ก
3. ความต้านทาน (R)	ความซึมซาบ (μ)
4. กระแสไฟฟ้า (I)	ฟลั๊กซ์แม่เหล็ก ($\emptyset$)

แหล่งจ่ายในวงจรแม่เหล็ก (หรือแรงดันแม่เหล็ก) เรียกว่า Magneto motive force (F) ทำหน้าที่จ่ายฟลั๊กซ์แม่เหล็กออกมาในวงจรแม่เหล็ก ในทางปฏิบัติ ฟลั๊กซ์แม่เหล็ก ($\emptyset$) เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าไปในขดลวด ฟลั๊กซ์นี้จะเดินทางจากแหล่งจ่าย (F) ผ่านแกนเหล็กคล้ายกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าและค่าความต้านทานแม่เหล็ก จะหาได้จากสมการ $R = \frac{L}{\mu A}$ ดังรูปที่ 1-15



รูปที่ 1-15 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างคุณลักษณะของวงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก

ตัวอย่างที่ 1-6 วงจรแม่เหล็ก 2 วงจรดังรูปที่ 1-16 มีค่า L และค่า A เท่ากัน ใช้วัสดุแม่เหล็กชนิดเดียวกัน วงจรแม่เหล็กใดจะมีค่าความต้านทานแม่เหล็ก (R) มากว่า จงให้เหตุผลประกอบ



ตอบ

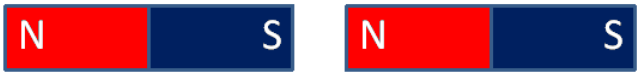
วงจรแม่เหล็กที่ 2 มีค่าความต้านทานมากกว่า เพราะมีค่าความต้านทานแม่เหล็กสองค่า ***คือ*** $R_{core} + R_{gap}$

แต่วงจรที่ 1 มีค่าความต้านทานแม่เหล็กเพียงค่าเดียว ***คือ*** R_{core}

แบบฝึกหัด เรื่อง แม่เหล็ก และวงจรแม่เหล็ก

<u>จงเลือกคำตอบที่ถูกต้องที่สุดเพียงคำตอบเดียว</u>

1. จากรูปต่อไปนี้ ข้อใดถูกต้อง



ก. แม่เหล็กทั้ง 2 แท่ง จะผลักกัน

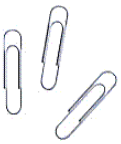
ข. แม่เหล็กทั้ง 2 แท่งจะดูดกัน

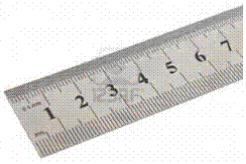
ค. แม่เหล็กด้านซ้ายมือจะขยับ

ง. แม่เหล็กทั้ง 2 จะอยู่กับที่

2. รูปใดคือวัสดุที่มีอำนาจแม่เหล็ก

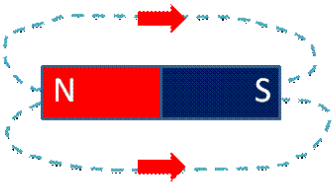
ก.

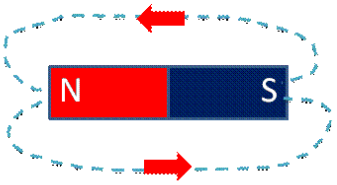
ข. 

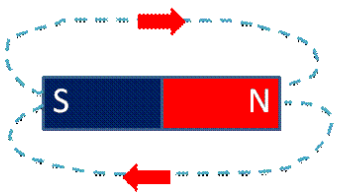
ข. 

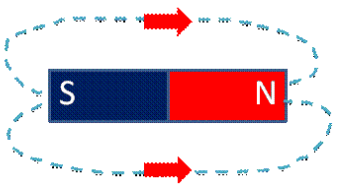
ง.

3. ทิศทางของสนามแม่เหล็กในข้อใดถูกต้อง

ก 

ข 

ค 

ง 

4. ข้อใดไม่ใช่คุณสมบัติของเส้นแรงแม่เหล็ก

ก. เส้นแรงแม่เหล็กหนาแน่นมาก บริเวณขั้วแม่เหล็ก

ข. เส้นแรงแม่เหล็กไหลจากขั้วเหนือ ไปขั้วใต้ ภายนอกแท่งแม่เหล็ก

ค. เส้นแรงแม่เหล็กจะไม่ตัดกัน

ง. เส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วต่างกันจะเบนออกจากัน

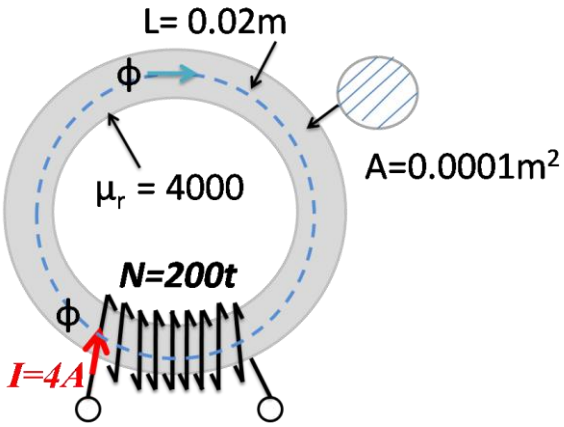
5. ในวงจรแม่เหล็ก “F” มีความหมายตรงกับข้อใด

ก. แรงฟลั๊กซ์แม่เหล็ก ข. ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

ค. แรงดันแม่เหล็ก ง. ความต้านทานแม่เหล็ก

6. ในวงจรแม่เหล็ก “R” คือข้อใด (ใช้คำตอบในข้อ 5.)

จากรูปต่อไปนี้ใช้ตอบคำถามข้อ 7 – 10



7. ค่าแรงดันแม่เหล็กมีค่าเท่าไร

ก. 80 × At ข. 800 At

ค. 800 At/m^2 ง. 50 At/m^2

8. ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) เท่ากับข้อใด

ก. 40,000 At/m ข. 40,000 At/m^2

ค. 4,000 At/m ง. 80,000 At/m

9. จงหาค่าของความหนาแน่นของฟลั๊กซ์แม่เหล็ก (B)

ก. 50 Wb/m^2 ข. 100 Wb/m^2

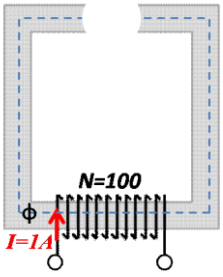
ค. 150 Wb/m^2 ง. 200 Wb/m^2

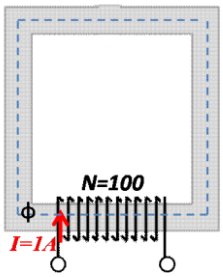
10. ค่าของฟลั๊กซ์แม่เหล็ก (ø) เท่ากับข้อใด

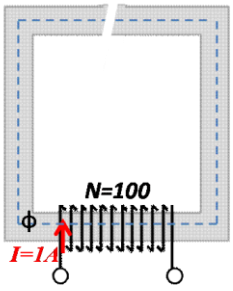
ก. 0.002 Wb ข. 200 mWb

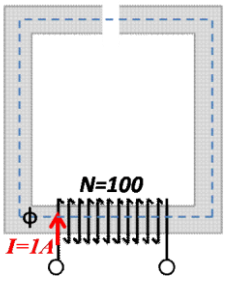
ค. 20 mWb ง. 2 mWb

11. วงจรแม่เหล็กในข้อใดมีค่าความต้านทานแม่เหล็กสูงที่สุด เมื่อแกนเหล็กมีความยาว วงจรแม่เหล็กเท่ากัน พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กเท่ากัน และแกนเหล็กทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน

ก. 

ข. 

ค. 

ง. 

12. ข้อใดคือสมการหาค่าความต้านทานแม่เหล็ก

ก. $R = \frac{L}{\mu A}$ ข. $R = \frac{L}{BA}$

ค. $R = \frac{BA}{\mu H}$ ง. $R = \frac{mmf}{\mu A}$