



มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม



ฟิสิกส์ 2 (Physics 2)

บทที่ 5

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและสารแม่เหล็ก

ผู้สอน

อาจารย์ ดร.วุฒิชัย ไชยภักษา

สาขาฟิสิกส์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



Nakhon Pathom Rajabhat University



หัวข้อเนื้อหาประจำบท

- 5.1 สนามแม่เหล็ก
- 5.2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคมีประจุไฟฟ้าในสนามแม่เหล็ก
- 5.3 แรงบนตัวนำไฟฟ้า
- 5.4 กฎแอมแปร์
- 5.5 สารแม่เหล็ก





สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหมายถึง ช่วงความถี่ทั้งหมดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นไปได้ในทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ จากสมการหาความเร็วของคลื่นที่ว่า

$$c = f\lambda \quad (5.28)$$

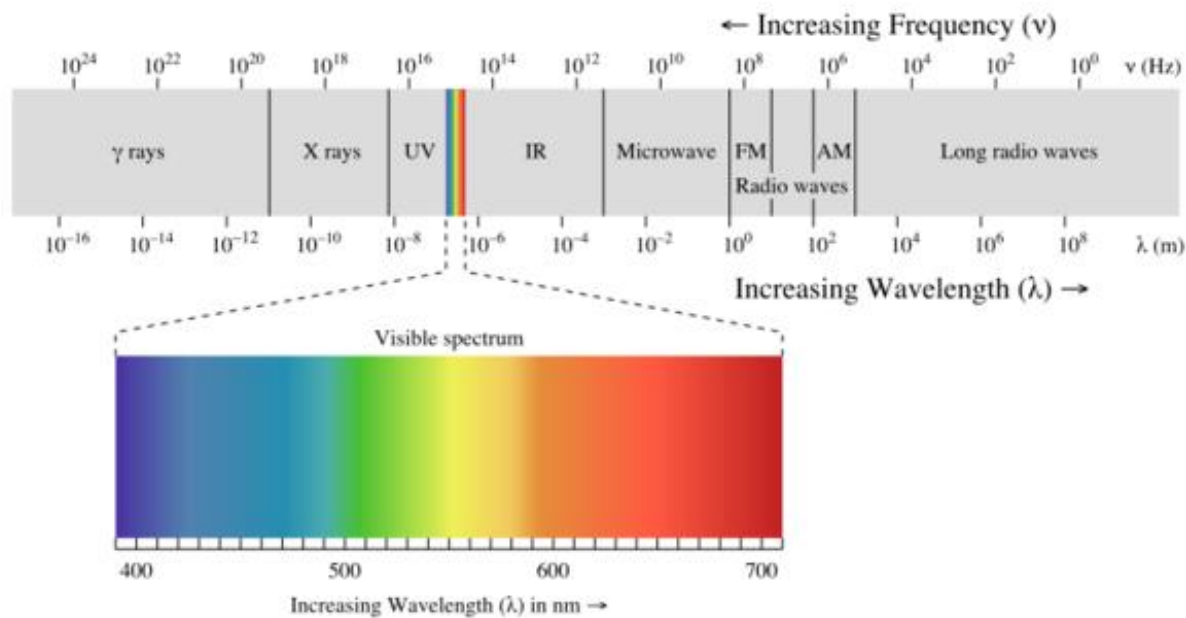
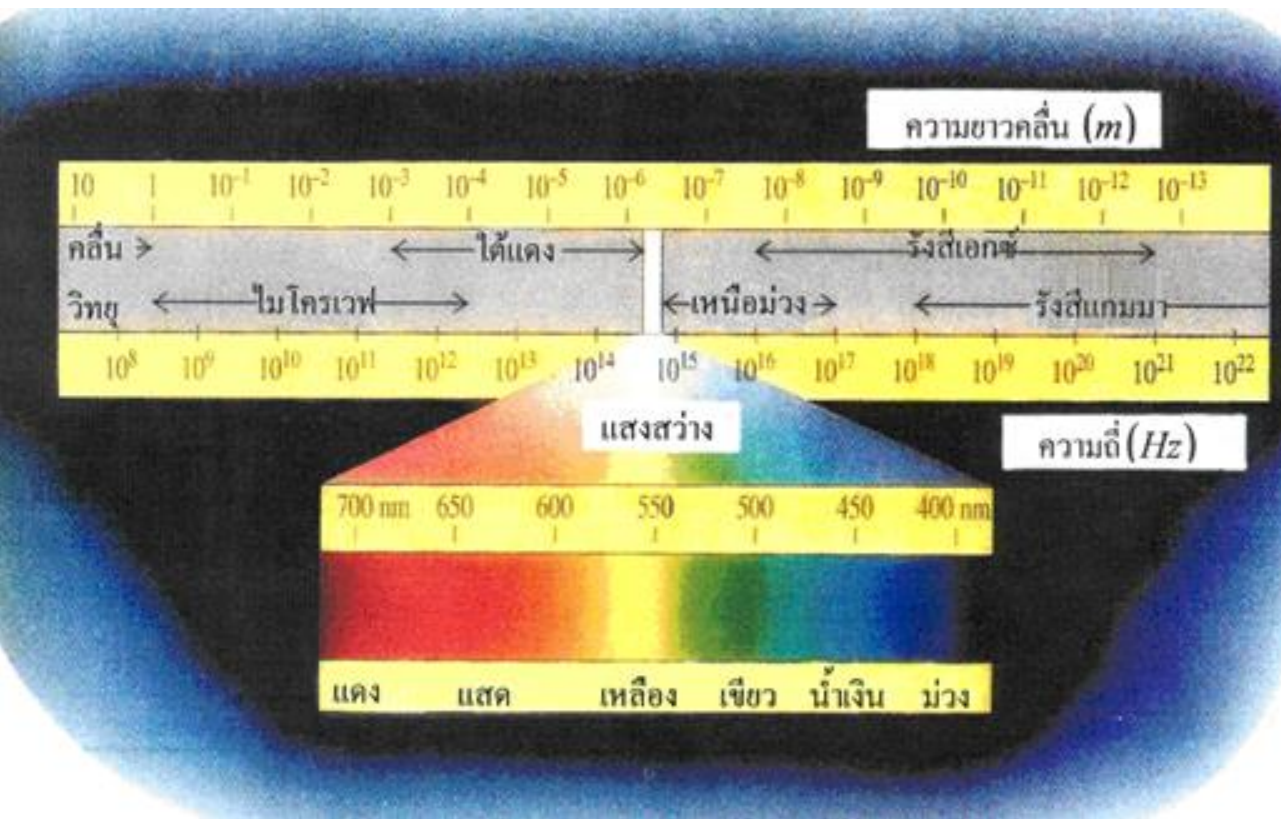
เมื่อ c เป็นความเร็วของคลื่นในตัวกลางใด ๆ

f เป็นความถี่

λ เป็นความยาวคลื่น

การหาความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระทำได้เช่นเดียวกับคลื่นชนิดอื่น ๆ คือในตัวกลางใด ๆ ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นปริมาณผกผันกับความยาวคลื่น โดยที่ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเท่ากับความเร็วของแสงดังได้กล่าวมาแล้วและมีค่าคงตัวสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเริ่มจากคลื่นที่มีความถี่ต่ำ (ความยาวคลื่นมาก) ไปจนถึง ความถี่สูง (ความยาวคลื่นสั้น) โดยแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ตามความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังภาพที่ 5.4 ซึ่งแบ่งออกเป็น 7 ประเภทดังนี้

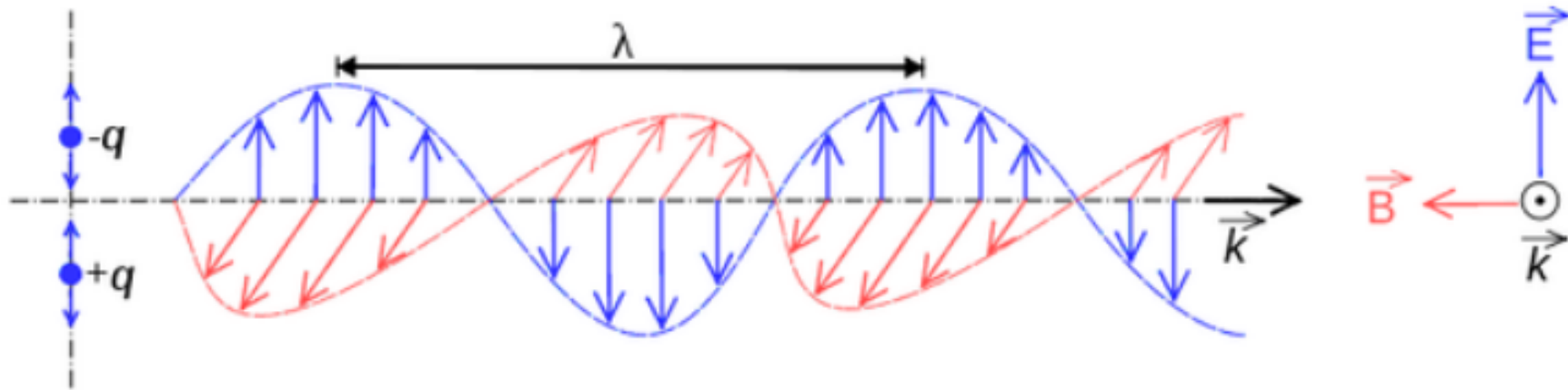




สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



การแกว่งกวัดของสนามไฟฟ้า



ภาพด้านบนแสดงการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สังเกตว่าการแกว่งกวัดขวางสนามไฟฟ้า(สีน้ำเงิน)บนระนาบแนวตั้งและการแกว่งกวัดขวางแม่เหล็กไฟฟ้า(สีแดง)บนระนาบแนวนอน

การกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

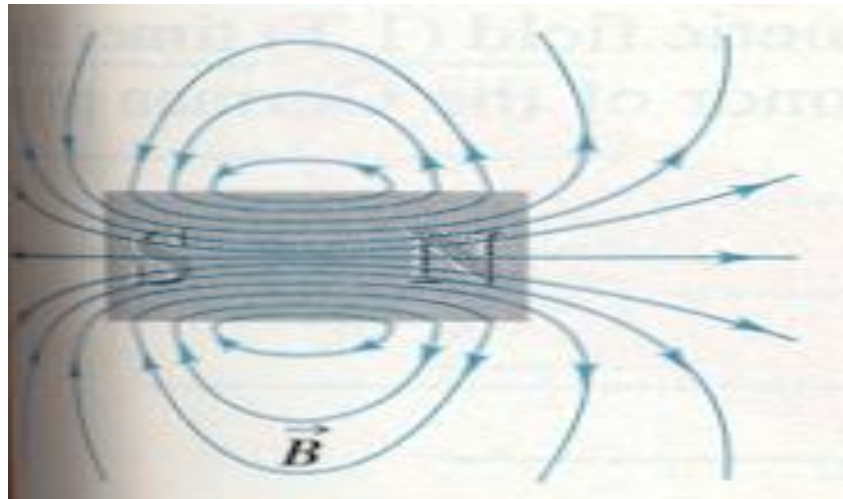
การกระจายของแม่เหล็กไฟฟ้ามีสองจุดสำคัญ:

1. การแกว่งกวัดของสนามไฟฟ้าสร้างการแกว่งกวัดของสนามแม่เหล็ก
2. การแกว่งกวัดของสนามแม่เหล็กสร้างการแกว่งกวัดของสนามไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางจากแหล่งของมันที่ความเร็วของแสง (3×10^8 m/s) แหล่งนั้นทำให้เกิดการแกว่งของไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน พลังงานของคลื่นถูกจัดเก็บในไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กและถ่ายโอนในขณะที่มันเดินทาง(แกว่งกวัด)

สนามแม่เหล็ก

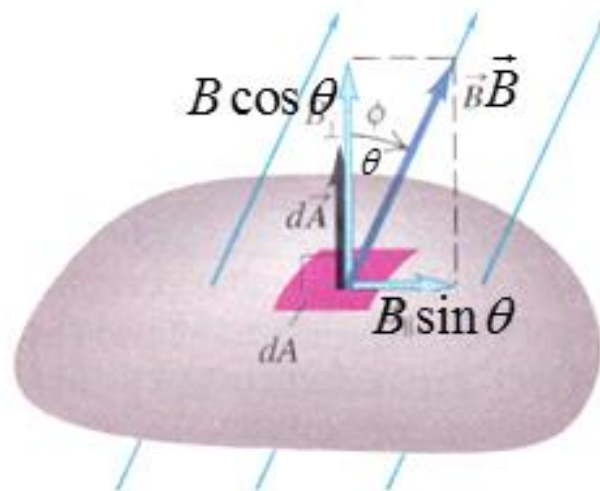
สนามแม่เหล็ก (magnetic field) นิยมแทนด้วยสัญลักษณ์ $\vec{B}$ สนามแม่เหล็กหมายถึง บริเวณที่แท่งแม่เหล็กสามารถส่งแรงไปถึงสนามแม่เหล็กเป็นปริมาณเวกเตอร์ระบบ SI สนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตร ($\text{weber.m}^{-2}, \text{Wb.m}^{-2}$) หรือเทสลา (tesla, T) หรือเกาส์ (gauss, G) โดยที่ $1\text{T} = 10^4\text{G}$



สนามแม่เหล็กและเส้นแรงแม่เหล็ก
ทีมา (Young and Freedman, 1996)



ฟลักซ์แม่เหล็ก หรือ ความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux or magnetic flux density, ϕ) หมายถึง ผลคูณสเกลาร์ ระหว่าง เส้นแรงแม่เหล็ก หรือ สนามแม่เหล็ก และ พื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กนั้นพุ่งผ่านในแนวฉาก



ภาพที่ 5.2 ฟลักซ์แม่เหล็ก

ที่มา (Young and Freedman, 1996)



จากภาพที่ 5.2 ฟลักซ์แม่เหล็ก สามารถเขียนแสดงเป็นสมการได้ว่า

$$\begin{aligned}d\phi &= B\cos\theta dA \\ &= \vec{B} \times d\vec{A}\end{aligned}\tag{5.1}$$

จากสมการ (5.1) สำหรับฟลักซ์แม่เหล็ก ที่พุ่งผ่านพื้นที่ผิวทั้งหมด จะเขียนในเทอมปริพันธ์ได้เป็น

$$\phi = \int \vec{B} \times d\vec{A}\tag{5.2}$$

ระบบ SI ฟลักซ์แม่เหล็กมีหน่วยเป็นนิวตัน.เมตรต่อแอมแปร์ (N.m.A^{-1}) หรือเรียกว่า เวเบอร์ (weber, Wb) เพื่อเป็นเกียรติแก่ วิลเฮล์ม เวเบอร์ (Wilhelm Weber, 1804-1890)

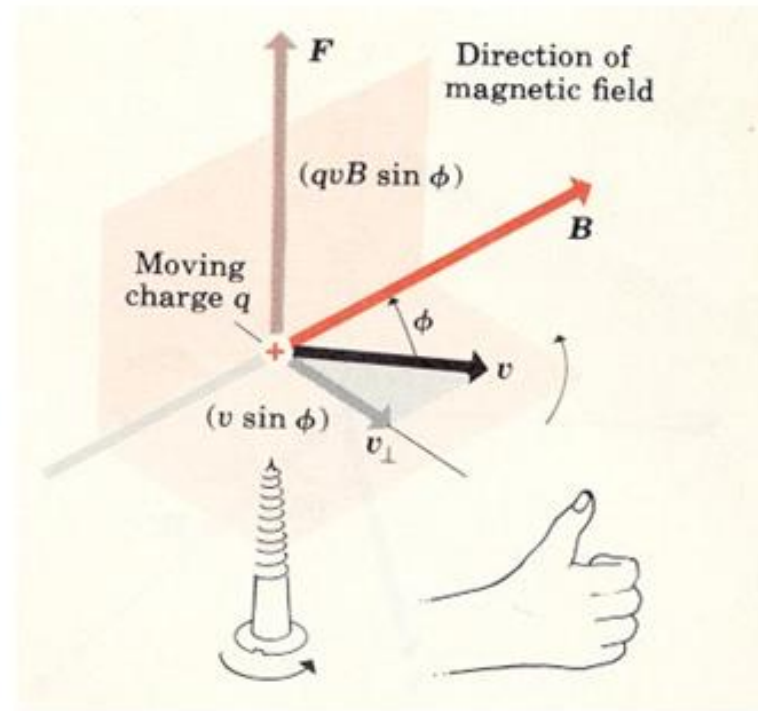
จากสมการ (5.1) กรณีเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งผ่านแนวฉากกับพื้นที่ dA เขียนสมการแสดงสนามแม่เหล็ก ซึ่งบางครั้งนิยมเรียกว่า ความหนาแน่นฟลักซ์ (flux density) นั่นคือ

$$B = \frac{d\phi}{dA}$$



การเคลื่อนที่ของอนุภาคมีประจุไฟฟ้าในสนามแม่เหล็ก

จากการทดลองพบว่าอนุภาคมีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก จะมีแรงกระทำต่อประจุไฟฟ้า แรงกระทำนี้อาจนำไปใช้สำหรับนิยามขนาดและหน่วยของสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ได้ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 5.3 แรงแม่เหล็ก $\vec{F}$ กระทำต่ออนุภาคมีประจุไฟฟ้า q อนุภาคมีความเร็ว $\vec{v}$ ที่มา (Sears, Zemansky, & Young, 1982)



จากภาพที่ 5.3 แรงแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคมีประจุไฟฟ้า เนื่องจากสนามแม่เหล็กขึ้นกับความเร็ว $\vec{v}$ และสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ เขียนเป็นสมการในเทอมของผลคูณเวกเตอร์ได้ว่า

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (5.4)$$

จากสมการ (5.4) ขนาดของแรงแม่เหล็ก คือ

$$F = qvB\sin\theta \quad (5.5)$$

เมื่อ θ เป็นมุมระหว่างความเร็ว $\vec{v}$ และสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$





ถ้าอนุภาคมีประจุไฟฟ้า q มวล m เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $\vec{v}$ ในแนวทิศทางแนวฉากกับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ จะเกิดแรงกระทำต่อประจุไฟฟ้าตลอดเวลา ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี R ความเร่งสู่ศูนย์กลางคือ v^2/R

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน จะเขียนได้ว่า

$$F = qvB = m \frac{v^2}{R}$$

ดังนั้นรัศมี

$$R = \frac{mv}{Bq} \quad (5.6)$$





ตัวอย่างที่ 5.1 อนุภาคแอลฟา ($m=6.68\times 10^{-27}$ kg, $q=+2e$) จากหยุดนิ่งถูกเร่งด้วยความต่างศักย์ ไฟฟ้า 1 kV เข้าไปในสนามแม่เหล็กทิศทางแนวฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ ถ้า $B = 0.2$ T จงหารัศมีของการเคลื่อนที่

วิธีทำ

พลังงานจลน์ปลายเท่ากับพลังงานศักย์ไฟฟ้าระหว่างการเร่งอนุภาคแอลฟา ดังนั้น

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV$$

หรือ

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$$

จากสมการ

$$R = \frac{mv}{Bq}$$

แทนค่า

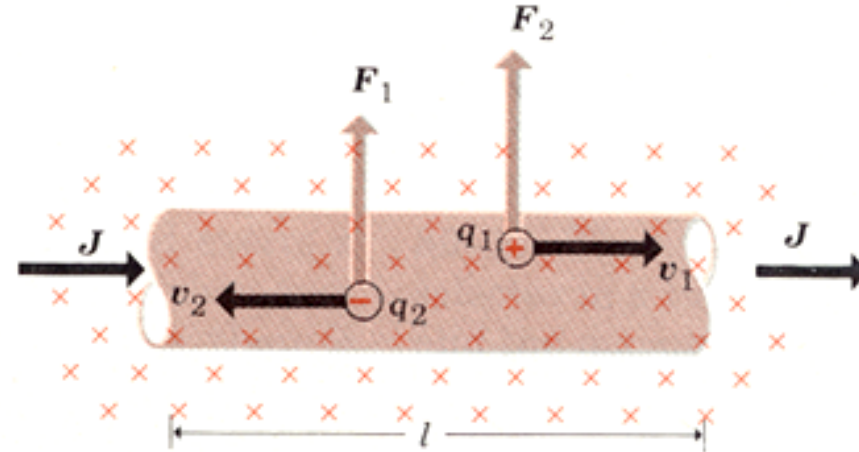
แทนค่า

$$\begin{aligned} R &= \frac{m}{Bq} \sqrt{\frac{2qV}{m}} \\ &= \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{q}} \\ &= \frac{1}{0.2\text{T}} \sqrt{\frac{2(1,000\text{V})(6.68\times 10^{-27}\text{kg})}{2(1.6\times 10^{-19}\text{C})}} = 0.032\text{ m} \end{aligned}$$



แรงบนตัวนำไฟฟ้า

เมื่อตัวนำมีกระแสไฟฟ้าวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ขนาดของแรงกระทำต่อประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ภายในตัวนำทั้งหมดก็คือแรงที่เกิดบนตัวนำ ตัวอย่างของแรงแม่เหล็กกระทำต่อตัวนำมีกระแสไฟฟ้า ได้แก่ มอเตอร์และขดลวดเคลื่อนที่ในอุปกรณ์ซึ่งเรียกว่ากัลวานอมิเตอร์ ฯลฯ



แรงบนตัวนำมีกระแสไฟฟ้าโดยประจุไฟฟ้าบวกและลบมีแรงกระทำในทิศทางเดียวกัน





$$F = IlB \quad (5.11)$$

ถ้าเส้นลวดตัวนำวางไม่อยู่ในแนวฉากกับสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ แต่ทำมุม θ สมการ (5.11) จะเขียนได้เป็น

$$F = IlB\sin\theta \quad (5.12)$$

สมการ (5.12) แรงบนเส้นลวดตัวนำมีกระแสไฟฟ้าวางในสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนในเทอมของผลคูณเวกเตอร์ได้ว่า

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B} \quad (5.13)$$

สำหรับแรงที่เกิดบนเส้นลวดตัวนำเล็กๆ $d\vec{l}$ เทอมของแรง $d\vec{F}$ จะเขียนได้เป็น

$$d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B} \quad (5.14)$$



ตัวอย่างที่ 5.2 เส้นลวดตรงยาว 1 m กระแสไฟฟ้า 50 A วางในสนามแม่เหล็ก 1.2 T ทำมุม 45°

จงหาขนาดและทิศทางของแรงกระทำ

วิธีทำ

จากสมการ

$$F = IlB\sin\theta$$
$$= (50\text{A})(1\text{m})(1.2\text{T})\sin 45^\circ = 42.4 \text{ N}$$

ทิศทางของแรงแนวฉากกับระนาบของกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามกฎมือขวา นั่นคือ ถ้าทั้งสองอยู่ในแนวราบหรือแนวระดับแล้ว แรงจะมีทิศทางชี้ขึ้นในแนวตั้ง



กฎของแอมแปร์

กฎแอมแปร์ (Ampere's law) คล้ายคลึงกับกฎของเกาส์ กฎแอมแปร์เป็นกฎแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นและกระแสไฟฟ้าสุทธิไหลผ่านตัวนำ กฎแอมแปร์เขียนในเทอมของปริพันธ์เชิงเส้นของ $\vec{B}$ รอบทางปิดใดๆ มีขนาดเท่ากับ μ_0 คูณกระแสไฟฟ้าสุทธิ I ภายในวงนั้น นั่นคือ

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \quad (5.15)$$

เมื่อ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m.A}^{-1}$ เรียกว่าค่าคงตัวสภาพให้ซึมผ่านได้ (permeability constant)

$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$ หมายถึงกระแสไฟฟ้าทั้งหมด ได้จากการรวมกันแบบพีชคณิต

ปริพันธ์เชิงเส้นไม่ขึ้นกับรูปร่างของวิถีหรือเส้นทาง (path) หรือตำแหน่ง สมการ (5.15) เรียกว่ากฎแอมแปร์ สำหรับเทอมทางซ้ายมือของสมการ (5.15) บางครั้งเรียกว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magnetomotive force) หรือการหมุนเวียนสนามแม่เหล็ก (magnetic circulation) ตามวิถีปิด กฎแอมแปร์กล่าวเป็นข้อความได้ว่า





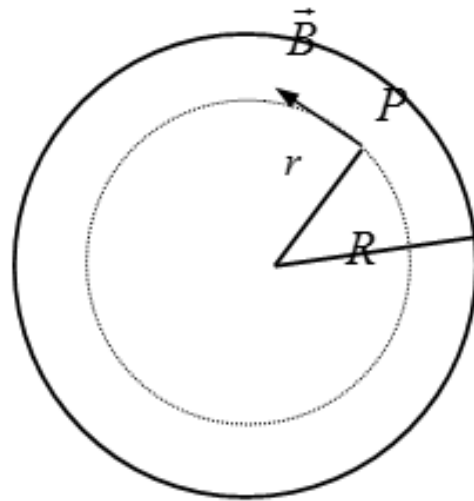
“แรงเคลื่อนแม่เหล็กหรือการหมุนเวียนสนามแม่เหล็กตามวิถีปิดใดๆ มีขนาดเท่ากับ μ_0 คูณกระแสไฟฟ้าสุทธิ I ผ่านพื้นที่ในวิถีปิด”

กฎแอมแปร์มีประโยชน์มากเมื่อต้องการหาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกลุ่มของกระแสไฟฟ้า ผ่านตัวนำ
สมมาตรเชิงเรขาคณิต

ขอย้ำในที่นี้ว่า กรณี $\oint \vec{B} \times d\vec{l} = 0$ ไม่จำเป็นว่าสนามแม่เหล็ก $\vec{B} = 0$ แต่อาจจะเนื่องมาจากไม่มี
กระแสไฟฟ้าเกี่ยวโยงภายในวิถี



จากภาพตัวอย่าง 5.6 พื้นที่หน้าตัดของแท่งโลหะรัศมี $R = 30 \text{ mm}$ กระแสไฟฟ้า $I = 5 \text{ kA}$ มีทิศทางพุ่งออกจากกระดาษ จงหาสนามแม่เหล็ก B ที่จุด $P(r = 20 \text{ mm})$ และที่ผิวของแท่งโลหะ



ภาพตัวอย่าง 5.6

วิธีทำ

สมมติว่ากระแสไฟฟ้ากระจายอย่างสม่ำเสมอผ่านพื้นที่หน้าตัด
ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านพื้นที่ πr^2 คือ

$$\frac{\pi r^2}{\pi R^2} I = \frac{r^2}{R^2} I$$



$$\frac{\pi r^2}{\pi R^2} I = \frac{r^2}{R^2} I$$

จากกฎแอมแปร์

$$\oint \vec{B} \times d\vec{l} = \mu_0 I$$

$$B(2\pi r) = \mu_0 \frac{r^2}{R^2} I$$

นั่นคือสนามแม่เหล็ก

$$B = \frac{\mu_0 I r}{2\pi R^2}$$

ที่จุด P(r = 20 mm)

$$B = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m.A}^{-1})(5,000 \text{ A})(20 \times 10^{-3} \text{ m})}{2\pi(30 \times 10^{-3} \text{ m})^2}$$

$$= 0.0222 \text{ T}$$

ที่ผิวของแท่งโลหะ (r = R)

$$B = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m.A}^{-1})(5,000 \text{ A})(30 \times 10^{-3} \text{ m})}{2\pi(30 \times 10^{-3} \text{ m})^2}$$

$$= 0.0333 \text{ T}$$

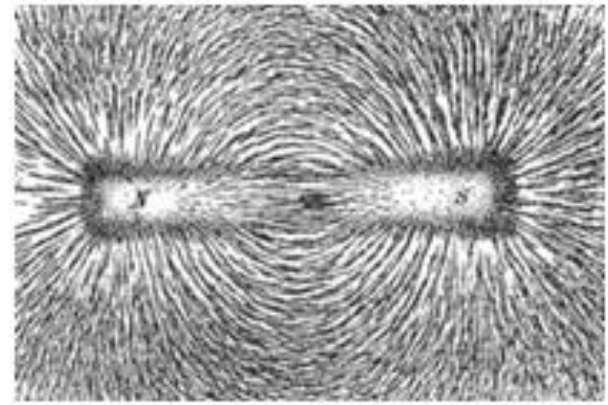


สารแม่เหล็ก

โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ไฟฟ้าเกือบทั้งหมด เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กที่ได้จากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าในตัวนำ มีเหล็กหรือเหล็กกล้าผสมเป็นโครงสร้างสำคัญ แต่สำหรับอุปกรณ์ประเภทกัลวานอมิเตอร์หรือลำโพง อุปกรณ์เหล่านี้เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยแม่เหล็กถาวร (permanent magnet) เช่นเดียวกับแถบบันทึกเสียงในเครื่องเล่นเทปก็จัดเป็นแม่เหล็กถาวรเช่นเดียวกัน



รูปแสดงการทดลองโรยผงเหล็กเพื่อดูสนามแม่เหล็ก



รูปแสดงผงเหล็กที่มีแนวการเรียงตัวแทนสนามแม่เหล็ก



กัลวานอมิเตอร์ ถ้าสารที่ใช้ทำวงแหวนโรว์แลนด์เป็นสุญญากาศ สนามแม่เหล็ก (ความซึมฟลักซ์) จะเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$B_0 = \frac{\mu_0 Ni}{2\pi r}$$

หรือฟลักซ์แม่เหล็ก

$$\phi = B_0 A = \frac{\mu_0 Ni}{2\pi r} A$$

ให้ B แทนสนามแม่เหล็กในสารที่ใช้ทำวงแหวนโรว์แลนด์ อัตราส่วน B ต่อ B_0 เรียกว่าค่าสภาพให้ซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของสารนั้น นิยมเขียนแทนด้วย K_m หรือ

$$K_m = \frac{B}{B_0} \quad (5.25)$$

ในสุญญากาศ $K_m = 1$

ตัวอย่างของค่าสภาพให้ซึมผ่านได้สัมพัทธ์ K_m วัดที่ความหนาแน่นฟลักซ์ 0.002 Wb.m^{-2}

แสดงดังตารางที่ 5.1



ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างค่าสภาพให้ซึมผ่านได้สัมพัทธ์

สารแม่เหล็ก <u>โคอะแมกเนติก</u>	K_m
ทองแดง	0.99999
เงิน	0.99997
น้ำ	0.99999
สารแม่เหล็ก <u>พาราแมกเนติก</u>	
อากาศ	1.0000004
ออกซิเจนเหลว	1.0040
ทองคำขาว (Platinum)	1.0003
สารแม่เหล็ก <u>เฟอร์โรแมกเนติก</u>	
Magnetic iron	200
นิกเกิล	100
Cu-Zn ferrite	1,500

ที่มา (Weber, Manning, White and Weygand, 1974)





การศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก (magnetic materials) ถือเป็นหัวข้อสำคัญของการศึกษาธรรมชาติของสสาร สารแม่เหล็กสามารถจัดแบ่งประเภทโดยอาศัยค่าสภาพให้ซึมผ่านได้สัมพัทธ์ (relative permeability) ออกได้เป็น 3 ประเภทคือ สารแม่เหล็กไดอะแมกเนติก (diamagnetic materials) สารแม่เหล็กพาราแมกเนติก (paramagnetic materials) และสารแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic materials)



สารแม่เหล็กไดอะแมกเนติก

สารแม่เหล็กไดอะแมกเนติกหมายถึงสารแม่เหล็กที่มีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้สัมพัทธ์ K_m น้อยกว่า 1 เล็กน้อย ตัวอย่างของสารแม่เหล็กไดอะแมกเนติก เช่น บิสมัท ทอง เงิน เพชรและตะกั่ว เป็นต้น

สารแม่เหล็กพาราแมกเนติก

สารแม่เหล็กพาราแมกเนติกหมายถึง สารแม่เหล็กที่มีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้สัมพัทธ์ K_m มากกว่า 1 เล็กน้อย ตัวอย่างสารแม่เหล็กพาราแมกเนติก ได้แก่ อะลูมิเนียม ลิเทียม แคลเซียม โครเมียม แมกนีเซียมและแพลทินัมหรือทองคำขาว

สารแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก

สารแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกหมายถึง สารแม่เหล็กที่มีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้สัมพัทธ์ K_m มากกว่า 1 มาก สามารถพบได้โดยทั่วไปในชีวิตประจำวัน เช่น เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล เป็นต้น





มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม