

## บทที่ 4

### แม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้น

(Introduction to electromagnetics)

#### 4.1 บทนำ

แม่เหล็กและไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ต่อกันใกล้ชิดมากและเกี่ยวข้องกับการดำเนินชีวิตของมนุษย์รวมทั้งการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีโดยเฉพาะการสื่อสาร มีความเชื่อว่าเข็มทิศถูกประดิษฐ์ขึ้นและใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศจีนครั้งแรกตั้งแต่ช่วงต้นศตวรรษที่ 13 ก่อนคริสต์ศักราช และมีการพัฒนาโดยมีจุดเริ่มต้นมาจากชาวอินเดีย ในปี ค.ศ. 1269 ปีแยร์ เดอ มารีคูร์ ชาวฝรั่งเศสได้ทำการทดลองและพบว่าเมื่อนำเข็มทิศมาวางใกล้กับแม่เหล็กทรงกลม เข็มจะเกิดการเรียงตัวเป็นแนวรอบๆ แม่เหล็กทรงกลมนั้น และผ่านจุดสองจุดที่อยู่ตรงข้ามกัน เรียกว่า ขั้วแม่เหล็ก การทดลองที่ได้ทำต่อเนื่องมาพบว่า ไม่ว่าแม่เหล็กจะมีรูปร่างอย่างไรจะประกอบด้วยขั้วสองขั้วเสมอ ต่อมาในปี ค.ศ. 1600 วิลเลียม กิลเบิร์ต ได้ทำการทดลองต่อมาและเขาได้เสนอว่าโลกเป็นแม่เหล็กถาวรขนาดใหญ่ ต่อมาในปี ค.ศ. 1750 มีการทดลองโดยใช้เครื่องชั่งการบิด (Torsion balance) แสดงแรงดึงดูดหรือแรงผลักระหว่างขั้วแม่เหล็ก ซึ่งแปรผกผันกับกำลังสองของระยะห่างระหว่างขั้ว โดยขั้วแม่เหล็กจะเป็นขั้วคู่เสมอ ไม่เหมือนกับแรงระหว่างประจุไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้าและแม่เหล็กถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1819 ขณะการบรรยายของฮันส์ คริสเตียน เออร์สเตด ได้สาธิตให้เห็นว่า การที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในเส้นลวดทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของเข็มทิศ ต่อมา ในปี ค.ศ. 1820 ฟาราเดย์ และ โจเซฟ เฮนรี ได้แสดงให้เห็นว่า มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อใช้แท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าใกล้หรือตัดผ่านขดลวดตัวนำ หรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าในวงจร นั่นคือ การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า และในปีต่อมา ทฤษฎีของแมกซ์เวลล์ ได้ถูกเสนอในทางกลับกัน กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้ ในบทนี้จะศึกษาเกี่ยวกับการทำนายทางคณิตศาสตร์โดยสมการของแมกซ์เวลล์ และการทดลองของเฮิร์ตซ์ ที่สามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves) ซึ่งอย่างที่เราทราบกันดีว่าแสง

มีสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในบทนี้จะทำความเข้าใจแนวทางแม่เหล็ก แรงแเคลื่อนไฟฟ้า เหนี่ยวนำ กฎของแอมแปร์ กฎของฟาราเดย์ที่เกี่ยวข้องกับการเหนี่ยวนำ กฎของเลนซ์ ปรัชญาการฮอลล์ และที่สำคัญการอธิบายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้สมการของแมกซ์เวลล์ รวมทั้งประโยชน์ที่เราใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในชีวิตประจำวัน ทั้งคลื่นไมโครเวฟ คลื่นอินฟราเรด คลื่นวิทยุ เป็นต้น และในปัจจุบันองค์การเพื่อการวิจัยนิวเคลียร์แห่งยุโรปหรือเซิร์น (CERN) ก็มีการทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมต่อกับแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวดในเครื่องเร่งอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งแม่เหล็กดังกล่าวใช้สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุในเครื่องเร่งนี้

## 4.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic field)

แนวคิดของขั้วแม่เหล็กและปฏิกริยาระหว่างแม่เหล็กมีความคล้ายคลึงกับแนวคิดของประจุไฟฟ้า เริ่มตั้งแต่ขั้วแม่เหล็กและประจุไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทเหมือนกัน คือ ขั้วเหนือและขั้วใต้ และประจুবวกกับประจุลบ ในส่วนของแรงที่เกิดขึ้นก็มีลักษณะเหมือนกัน โดยขั้วหรือประจุชนิดเดียวกันจะออกแรงผลักกัน แต่หากเป็นขั้วหรือประจุต่างชนิดกันจะออกแรงดึงดูดกัน สนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ บริเวณที่แสดงอำนาจของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (Electric and Magnetic Field: EMFs) โดยมีทิศทางที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันและตั้งฉากกับทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไป นอกจากนั้นแล้วแม่เหล็กยังออกแรงดึงดูดกับก้อนเหล็กที่ไม่เป็นแม่เหล็กได้ อย่งไรก็ตาม ขั้วแม่เหล็กกับประจุไม่ใช่สิ่งเดียวกัน ดังนั้นขั้วแม่เหล็กจึงไม่จำเป็นต้องสอดคล้องกับประจุทั้งหมด การศึกษาสถานะแม่เหล็กในช่วงเริ่มต้นเป็นการพิจารณาจากแม่เหล็กในธรรมชาติซึ่งเรียกว่าแม่เหล็กถาวร (permanent magnetic)

### 4.2.1 การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

ปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กนั้น พอจะเห็นได้จากที่แท่งแม่เหล็กดูดเหล็กได้ สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อนำแท่งแม่เหล็กมาจ่อใกล้ ๆ กับเหล็กชนิดอื่น ๆ เช่น ตะปูเหล็ก ซึ่งปกติอิเล็กตรอนในตะปูจะหมุนรอบตัวเองในทิศทางต่าง ๆ กัน แต่เมื่อถูกเหนี่ยวนำโดยแท่งแม่เหล็ก อิเล็กตรอนในตะปูจะจัดเรียงตัวเองใหม่และหมุนไปในทิศทางเดียวกัน โดยด้านที่อยู่ใกล้ขั้วแม่เหล็กจะมีอิเล็กตรอนหมุนรอบตัวเองในทิศตรงข้ามกับอิเล็กตรอนในขั้วแม่เหล็ก ฉะนั้นตะปูจึงกลายเป็นแท่งแม่เหล็กอีกแท่งหนึ่งซึ่งทำให้เกิดการดึงดูดกัน

### 4.2.2 แรงเนื่องจากแม่เหล็กบนประจุเคลื่อนที่

รอบแท่งแม่เหล็กหรือวัตถุที่มีอำนาจแม่เหล็กจะเป็นบริเวณของสนามแม่เหล็ก นักวิทยาศาสตร์พบว่าจะมีสนามแม่เหล็กรอบตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้า กล่าวคือเมื่อประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณของสนามแม่เหล็กจะมีแรงกระทำต่อประจุไฟฟ้าที่กำลังเคลื่อนที่นั้น แรง

ที่กระทำต่อประจุไฟฟ้าเนื่องจากสนามแม่เหล็ก (magnetic field) เขียนแทนด้วยปริมาณเวกเตอร์  $\vec{B}$  จะขึ้นอยู่กับความเร็วของประจุไฟฟ้า เขียนสมการได้เป็น

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (4-1)$$

เมื่อ  $\vec{F}$  เรียกว่า แรงแม่เหล็ก (magnetic force) ที่กระทำต่อประจุ  $q$  มีหน่วยเป็นนิวตัน  
 $\vec{v}$  คือ เวกเตอร์ความเร็วของประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที  
 $\vec{B}$  คือ เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เทสลา

#### 4.2.3 แรงบนตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้า

เมื่อตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าอยู่ในสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงแม่เหล็กกระทำกับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่ในตัวนั้น และเนื่องจากอิเล็กตรอนอยู่ในสนามแม่เหล็ก แรงทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับอิเล็กตรอน ก็คือแรงที่เกิดกับตัวนำนั่นเอง พิจารณาตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้า  $I$  วางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  จะเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$F = IB\ell \quad (4-2)$$

เมื่อ  $I$  คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น แอมแปร์  
 $\ell$  คือ ขนาดความยาวของตัวนำ มีหน่วยเป็น เมตร  
 แต่ถ้าตัวนำวางไม่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก แรงบนตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าซึ่งวางอยู่ในสนามแม่เหล็กเขียนได้ว่า

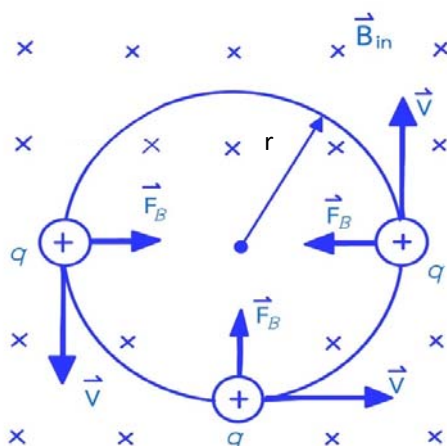
$$\vec{F} = I\vec{\ell} \times \vec{B} \quad (4-3)$$

$\vec{\ell}$  คือ เวกเตอร์ความยาวของตัวนำ มีหน่วยเป็น เมตร

#### 4.2.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ

ในการบ่งบอกทิศทางของสนามแม่เหล็ก คือ ถ้า  $\vec{B}$  อยู่ในระนาบของหน้ากระดาษจะแสดงดังเวกเตอร์ลูกศรด้านขวามือตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก สำหรับกรณีที่มีสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับหน้ากระดาษมีทิศทางพุ่งเข้ากระดาษแทนด้วยสัญลักษณ์  $\vec{B}_{in}$  ดังภาพที่ 4.1 เครื่องหมายเหล่านี้

อาจใช้บ่งบอกถึงปริมาณอื่นที่มีทิศทางตั้งฉากกับกระดาศเช่นเดียวกัน เช่น ทิศทางของแรงแม่เหล็กและทิศทางของกระแส ซึ่งแรงแม่เหล็กที่กระทำบนอนุภาคมีประจุที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กจะตั้งฉากกับความเร็วของอนุภาค เป็นผลให้งานอันเนื่องมาจากแรงแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ พิจารณากรณีของอนุภาคประจุบวกเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ ด้วยความเร็วเริ่มต้นตั้งฉากกับสนาม สมมติว่าทิศทางของสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งเข้ากระดาศ ซึ่งแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคจะมีทิศตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็กและทิศของความเร็วสม่ำเสมอ เมื่ออนุภาคมีประจุเคลื่อนที่ภายใต้สนามแม่เหล็กนี้ ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากแรงแม่เหล็ก แต่ความเร็วและแรงแม่เหล็กนั้นยังคงมีทิศตั้งฉากอยู่เสมอ การเคลื่อนที่ของอนุภาคจึงมีลักษณะเป็นวงกลมบนระนาบที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก



ภาพที่ 4.1 ความเร็วของอนุภาคมีประจุทิศตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ

อนุภาคเคลื่อนที่เป็นวงกลมเนื่องจากแรงแม่เหล็ก  $\vec{F}_B$  ซึ่งมีทิศตั้งฉากกันกับทั้ง  $\vec{v}$  และ  $\vec{B}$  โดยมีขนาดคงที่เป็น  $qvB$  ภาพที่ 4.1 อนุภาคประจุบวกมีการหมุนทวนเข็มนาฬิกาซึ่งอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่มีทิศพุ่งเข้ากระดาศ ถ้า  $q$  เป็นประจุลบจะเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามคือ หมุนตามเข็มนาฬิกา หากแทนแรงลัพธ์ตามกฎข้อที่สองของนิวตันจะได้

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_B = m\vec{a} \quad (4-4)$$

เนื่องจากอนุภาคเคลื่อนที่แบบวงกลม เราสามารถใช้สมการการเคลื่อนที่แบบวงกลมของอนุภาค และแทนความเร่งด้วยความเร่งสู่ศูนย์กลาง

$$F_B = qvB = \frac{mv^2}{r} \quad (4-5)$$

จากสมการข้างต้น จะได้ว่ารัศมีของการเคลื่อนที่แบบวงกลม คือ

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (4-6)$$

จะเห็นว่า รัศมีของการเคลื่อนที่แบบวงกลมแปรผันตรงกับโมเมนตัมเชิงเส้น  $mv$  ของอนุภาค และแปรผกผันกับขนาดของประจุของอนุภาคและขนาดของสนามแม่เหล็ก โดยอัตราเร็วเชิงมุม คือ

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m} \quad (4-7)$$

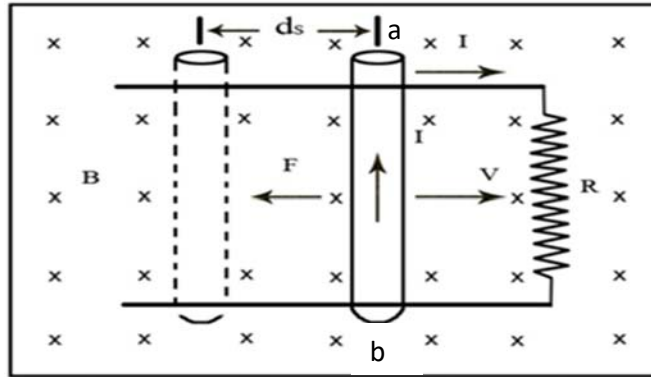
คาบการเคลื่อนที่เท่ากับเส้นรอบวงหารด้วยอัตราเร็วของอนุภาค

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB} \quad (4-8)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราเร็วเชิงมุมและคาบของการเคลื่อนที่แบบวงกลมไม่ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของอนุภาคหรือรัศมีของการเคลื่อนที่ อัตราเร็วเชิงมุมจึงมักใช้อ้างถึงความถี่ไซโคลตรอน (Cyclotron frequency) ซึ่งถูกนำไปใช้ในเครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอนได้

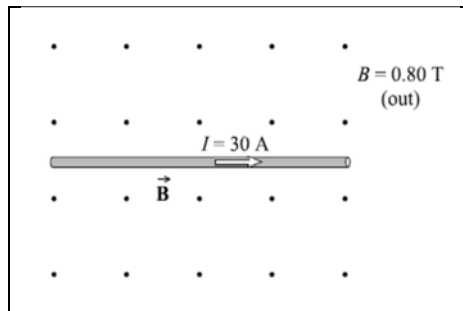
#### 4.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced electromotive force)

เมื่อเคลื่อนตัวนำในผ่านเข้าไปในสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนอิสระบนตัวนำจะถูกกระทำด้วยแรงแม่เหล็ก ทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ ถ้าสมมติให้ตัวนำไฟฟ้าตัวหนึ่ง ยาว  $l$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v$  ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก  $B$  อิเล็กตรอนอิสระทุกตัวของในตัวนำนั้น จะมีความเร็ว  $v$  ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก  $B$  ด้วย ดังนั้น อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะถูกกระทำด้วยแรง  $qvB$  ให้เคลื่อนที่ไปในตัวนำตามทิศของแรงที่เกิดกับอิเล็กตรอน จะนำอิเล็กตรอนไปทางปลาย  $b$  ของตัวนำ ทางปลาย  $a$  จะเหลือประจุบวกดังนั้นตัวนำ  $ab$  จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ตัวอย่างที่ 4.1 จากภาพที่ 4.3 สนามแม่เหล็กพุ่งออกนอกระนาบและมีขนาด  $0.80 \text{ T}$  มีเส้นลวดยาว  $0.050 \text{ m}$  วางตัวตั้งฉากกับทิศแม่เหล็กและมีกระแสในเส้นลวด  $30 \text{ A}$  จงหาขนาดและทิศทางของแรงที่เส้นลวดยาว  $5 \text{ เซนติเมตร}$



ภาพที่ 4.3 สนามแม่เหล็ก

วิธีทำ จากสมการ (4.2)  $F = I\ell B = (30\text{A})(0.050\text{m})(0.80\text{T}) = 1.2 \text{ N}$

จากกฎมือขวา จะได้แรงจะมีทิศลงมาด้านล่างของกระดาษ

คำตอบ ขนาดของแรงมีค่า  $1.2 \text{ นิวตัน}$  ทิศลงมาด้านล่างกระดาษ

#### 4.4 กฎของแอมแปร์ (Ampere's law)

เป็นกฎที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำภายในวงปิด ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กคูณระยะทางในทิศเดียวกับสนามตามทางปิดใดๆจะมีค่าเท่ากับ  $\mu_0$  คูณกับกระแสทั้งหมดภายในวงปิดนั้น หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า

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

หรือ  $\oint B \cos\theta dl = \mu_0 I$  (4-9)

เมื่อ  $\theta$  คือ มุมระหว่าง  $B$  กับระยะทางสั้นๆ ( $dl$ )  
 $\mu_0$  คือ ค่าสภาพให้ซึมได้ของสุญญากาศ (Permittivity)

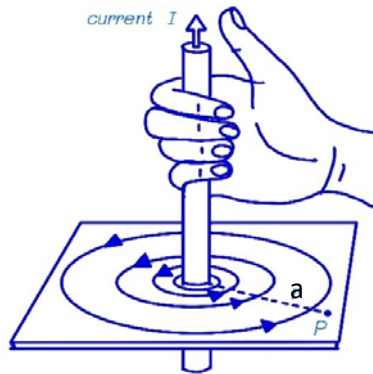
สามารถเรียกปริมาณ  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l}$  ได้ว่า การหมุนเวียนของสนามแม่เหล็ก (magnetic circulation) ตามทางปิดใดๆ กฎของแอมแปร์จึงกล่าวเป็นใจความได้ว่า การหมุนเวียนของสนามแม่เหล็กตามทางปิดใด ๆ รัศมี  $a$  ที่ล้อมกระแสไฟฟ้า จะมีค่าเท่ากับ  $\mu_0 I$

ถ้าลองพิจารณาในกรณีของตัวนำยาวมากที่มีกระแสไฟฟ้า  $I$  จากลักษณะความสมมาตร การหมุนเวียนของสนามแม่เหล็กจะมีเส้นทางเป็นวงกลม ซึ่งมีตัวนำเป็นจุดศูนย์กลาง จะได้ว่า

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B(2\pi a) = \mu_0 I$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (4-10)$$

ตัวอย่างที่ 4.3 จากภาพที่ 4.4 จงคำนวณหาขนาดของสนามแม่เหล็กในอากาศ ณ จุดห่าง 5 เซนติเมตร ตามแนวรัศมีของเส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้า 15 แอมแปร์



ภาพที่ 4.4 แรงแม่เหล็ก

วิธีทำ จากสมการ (4-5)

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \\ &= \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m/A})(15\text{A})}{2\pi(0.05\text{m})} \end{aligned}$$

$$= 6 \times 10^{-5} \text{ T}$$

คำตอบ สนามแม่เหล็กมีขนาดเท่ากับ  $6 \times 10^{-5}$  เทสลา

#### 4.5 กฎของบีโ-ซาวาร์ต (Biot-Savart Law)

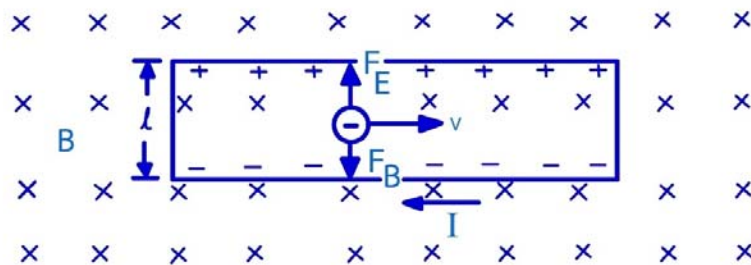
จากปรากฏการณ์ที่ว่า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำหรือประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในบริเวณนั้น ซึ่งต่อมาได้มีการทดลองของบีโกับซาวาร์ตได้ข้อมูลที่สนับสนุนว่า กระแสไฟฟ้าคงตัว  $I$  ที่ไหลผ่านเส้นลวดความยาว  $d\vec{l}$  ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่จุดใดจุดหนึ่ง จะสามารถคำนวณหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้จากสมการ

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I \oint \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2} \quad (4-11)$$

เมื่อ  $r$  คือ ระยะทางจาก  $d\vec{l}$  ถึงจุดที่จะหาความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นสมการ (4-11) สามารถอธิบายถึงสนามแม่เหล็ก ณ จุดใดๆ ที่อยู่ห่างออกไปจากบริเวณที่มีการไหลของกระแสไฟฟ้าหรือประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่อย่างไม่จำกัด ทั้งนี้การไหลของกระแสไฟฟ้านั้นจะต้องคงตัว

#### 4.6 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)

E.H. Hall ได้ค้นพบว่า แถบโลหะแบนๆ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าไปตามความยาวที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กจะเกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างด้านข้างของแถบโลหะนั้น และได้เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์ เพื่อเป็นเกียรติแก่เขา จากปรากฏการณ์นี้สามารถนำไปใช้หาว่าภายในตัวนำนั้นมีพาหะที่เป็นประจุลบที่เป็นตัวเคลื่อนที่ นอกจากนี้ยังสามารถวัดจำนวนประจุไฟฟ้าอิสระต่อหน่วยปริมาตรได้อีกด้วย ปรากฏการณ์ฮอลล์อาจแสดงได้โดยเมื่อนำแถบโลหะแบนๆ กว้าง  $l$  วางในสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก  $B$  และมีทิศตั้งฉากกับพื้นที่ด้านกว้างของแผ่นโลหะ



ภาพที่ 4.5 ปรากฏการณ์ฮอลล์

จากภาพที่ 4.5 แรงอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการ (4-1) เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าไปตามความยาวของแถบโลหะจากขวาไปซ้าย ในกรณีที่อิเล็กตรอนเป็นพาหะนำไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะวิ่งจากซ้ายไปขวา ในสนามแม่เหล็กอิเล็กตรอนจะถูกแรงกระทำในทิศลง เนื่องจากมีแรงของสนามแม่เหล็กมากกว่า แรงแม่เหล็กนี้จึงมีขนาด

$$F_B = evB$$

โดย  $-e$  และ  $v$  เป็นประจุและอัตราเร็วของอิเล็กตรอนตามลำดับ ในตอนแรกอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ลง ทำให้ด้านล่างและด้านบนของแถบโลหะมีประจุลบและบวกสะสมอยู่ ซึ่งจะทำให้เกิดความต่างศักย์ตามขวางในแถบโลหะขึ้น ซึ่งเรียกว่า ความต่างศักย์ตามขวางของฮอลล์ (transverse Hall potential difference,  $V_H$ ) และจะมีสนามไฟฟ้า  $E$  ในทิศลงเกิดขึ้น สนามนี้จะทำให้เกิดแรงกระทำ  $eE$  ในทิศขึ้นต่ออิเล็กตรอนหักล้างแรงจากสนามแม่เหล็กนั่นคือ

$$eE = evB$$

หรือ 
$$E = vB$$

สุดท้ายทำให้อิเล็กตรอนวิ่งไปทางขวา สวนกับทิศของกระแสและทำให้ได้ความต่างศักย์ฮอลล์ คือ

$$V_H = El$$

หรือ 
$$V_H = vBl$$

ถ้า  $n$  เป็นความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนจากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ว่า

$$V = \frac{1}{neA}$$

$$= \frac{1}{neld}$$

เมื่อนำกลับเข้าไปแทนจะได้ว่า

$$V_H = \frac{IB}{ned}$$

โดยปกติ นิยมเขียนสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall Coefficient,  $R_H$ )

$$\text{ดังนั้น} \quad V_H = R_H \frac{IB}{d} \quad (4-12)$$

จากประจุของอิเล็กตรอน  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  คูლობ์ และค่า  $V_H, B, I, d$  อาจวัดได้จากการทดลอง จึงอาจคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะ  $n$  ได้ โดย  $R_H$  คือ สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall coefficient) เท่ากับ  $1/nq$  ความสัมพันธ์นี้แสดงให้เห็นว่าตัวนำที่ผ่านการสอบเทียบอย่างถูกต้องแล้วสามารถใช้วัดขนาดของสนามแม่เหล็กที่ไม่ทราบค่าได้

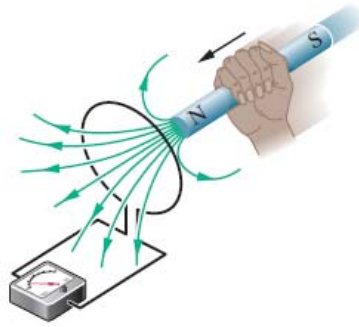
#### 4.7 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำ (Faraday's law induction)

ถ้านำขดลวดตัวนำไฟฟ้ามาวางในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก ให้ฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux,  $\phi$ ) ซึ่งหมายถึงจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วย ที่ผ่านขดลวดนั้นเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะพบว่า เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในขดลวด กระแสที่เกิดขึ้นเรียกว่า กระแสเหนี่ยวนำ (induced current) ซึ่งเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced electromotive force) จากการวัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พบว่า ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก ( $d\phi/dt$ ) ตัวอย่างเช่น ถ้าวางแท่งแม่เหล็กใกล้ขดลวดตัวนำ แล้วเคลื่อนแท่งแม่เหล็กหรือขดลวดในลักษณะที่ทำให้ ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดเปลี่ยนแปลงแล้ว จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในขดลวด ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับว่าแท่งแม่เหล็กหรือขดลวดเคลื่อนที่เร็วหรือช้า ถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าสูง แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นก็จะมีค่ามากด้วย ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นอยู่กับว่าฟลักซ์แม่เหล็กกำลังเพิ่มหรือลดดังภาพที่ 4.5 ซึ่งจะได้โดยอาศัยกฎมือซ้าย แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดในลักษณะที่ต้านกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\mathcal{E} = - \frac{d\phi}{dt} \quad (4-13)$$

เมื่อ  $\mathcal{E}$  คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โวลต์

$\frac{d\phi}{dt}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อวินาที



ภาพที่ 4.5 การทดลองกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์

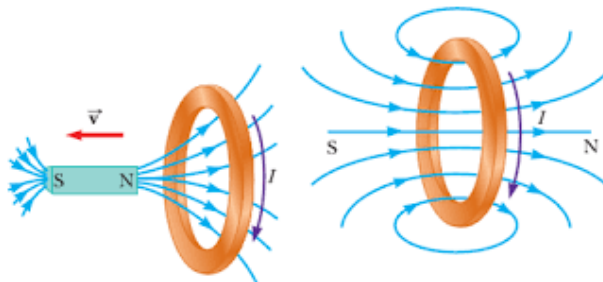
ที่มา : Resnick, R., Walker, J. and Halliday, D., 2014.

#### 4.8 กฎของเลนซ์ (Lenz's law)

เป็นกฎที่ใช้หาทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดวงปิดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันระหว่างขดลวดกับแม่เหล็ก ซึ่งกล่าวว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้นในขดลวดตัวนำที่จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีทิศต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจากภายนอกขดลวด ซึ่งสามารถพิจารณาได้ 2 กรณีดังนี้

1. ถ้าตัวนำเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็ก แล้วสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำในตัวนำนั้นจะเสริมกับสนามแม่เหล็กเดิมที่ถูกตัดแล้ว

2. ถ้าสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ใกล้ขดลวด สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำในขดลวดจะต้านการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่นั้น ทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กใกล้ขดลวดแสดงได้ดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 กระแสเหนี่ยวนำและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำ

ที่มา : Serway, R. A., and Jewett, J. W., 2014

#### 4.9 แสงกับการเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Light as electromagnetic wave)

สมัยโบราณเชื่อกันว่าการที่มนุษย์มองเห็นสิ่งต่างๆ ได้ เนื่องจากนัยน์ตาปล่อยอะไรบางอย่างออกไปสู่สิ่งนั้นๆ แต่ต่อมาความเชื่อเปลี่ยนเป็นว่า การมองเห็นสิ่งต่าง ๆ เป็นเพราะสิ่งนั้นเปล่งแสงหรือสะท้อนแสงเข้าสู่ นัยน์ตา เซอร์ไอแซค นิวตัน (Sir Isac Newton) ได้ตั้งทฤษฎีขึ้นมาอธิบายเกี่ยวกับแสงและการมองเห็นว่า แสงเป็นอนุภาค ที่ส่งออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง โดยแสงเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงออกไปจากแหล่งกำเนิดแสงนั้น แสงจะทะลุผ่านวัตถุโปร่งใสและสะท้อนกลับจากผิววัตถุทึบแสง เมื่ออนุภาคเหล่านี้กระทบหรือสะท้อนเข้าสู่ นัยน์ตาจะทำให้เกิดการมองเห็นขึ้น ต่อมาฮอยเกนส์ (Christiaan Huygens) ได้เสนอแนวคิดที่ว่าแสงเป็นคลื่นและตั้งทฤษฎีคลื่นแสงขึ้น ทฤษฎีนี้อธิบายกฎการสะท้อนและกฎการหักเหของแสงได้ แต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับในขณะนั้น เนื่องจากยังไม่พบสมบัติการเลี้ยวเบนของแสงเพราะถ้าแสงเป็นคลื่นจริงแสงต้องเลี้ยวเบนผ่านสิ่งกีดขวางได้

ภายหลัง ยัง (Thomas Young) และเฟรสเนล (Augustin Jean Fresnel) ได้ทดลองพบการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสง ซึ่งอธิบายได้ด้วยทฤษฎีคลื่นแสง ทฤษฎีคลื่นแสงจึงเป็นที่ยอมรับกันจนถึงปัจจุบันการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสงช่วยให้วัดอัตราเร็วของแสงได้ โดยไมเคิลสัน (Albert Michaelson) และมอร์เลย์ (Edward Morley) ใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ไมเคิลสัน อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Michaelson interferometer) ทดลองวัดอัตราเร็วของแสง ซึ่งได้ผลใกล้เคียงกับค่าที่ยอมรับในปัจจุบัน คือ  $3 \times 10^8$  m/s ในสุญญากาศหรือในอากาศ (โดยประมาณ) และจากการทดลองของยังเกี่ยวกับการแทรกสอดของแสง สามารถวัดความยาวคลื่นของแสงได้ ทำให้แนวคิดที่ว่าแสงเป็นอนุภาคตามข้อเสนอนิวตันหมดความหมายไป ต่อมาแมกซ์เวลล์ได้เสนอทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นมา ผลจากการคำนวณพบว่าอัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเท่ากับอัตราเร็วของแสง จึงเป็นการสนับสนุนว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง แต่ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ใช้อธิบายปรากฏการณ์บางอย่างของแสง เช่น ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกไม่ได้ โดยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์ที่โลหะบางชนิดปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาทันทีที่แสงซึ่งมีความถี่สูงพอฉายลงบนแผ่นโลหะ จนถึงปี พ.ศ.2448 ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ได้ตั้งทฤษฎีขึ้นมาอธิบายว่าแสงเป็นก้อนพลังงานที่เรียกว่า โฟตอน (Photon) และพลังงานของโฟตอนจะขึ้นกับความถี่ถ้าความถี่ของโฟตอนสูงพอทันทีที่แสงตกกระทบผิว

โลหะ โฟตอนของแสงจะถ่ายทอดพลังงานให้อิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมของโลหะนั้นได้

การพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นหรือเป็นโฟตอนขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์ของแสงที่ต้องการอธิบาย เช่น การอธิบายการสะท้อนและการหักเหของแสงต้องพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นและใช้ทฤษฎีคลื่นของแสงอธิบาย แต่การอธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกต้องพิจารณาให้แสงเป็นโฟตอนจึงจะอธิบายได้ถูกต้องสมบูรณ์ แนวคิดที่ว่าแสงเป็นทั้งคลื่นและโฟตอนจึงอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ของแสงได้อย่างกว้างขวางและครอบคลุม ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันว่า แสงมีสมบัติคู่ (Dual properties) คือ แสงเป็นได้ทั้งคลื่นและโฟตอนในเวลาเดียวกัน แต่ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะปรากฏการณ์ที่อธิบายได้โดยแนวคิดที่ว่าแสงเป็นคลื่นเท่านั้น

#### 4.10 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave)

ในปี ค.ศ.1867 แมกซ์เวลล์ได้นำเสนอทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นการรวมสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าไว้ในสมการเดียวกัน ในสมการนี้ได้ทำนายถึงการมีอยู่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทฤษฎีซึ่งในขณะนั้นยังไม่มีผู้ใดค้นพบหรือรู้จักคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาก่อนเลย ต่อมาจึงมีการพบว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง เช่นเดียวกับคลื่นวิทยุ รังสีใต้แดง รังสีเหนือม่วง หรือไมโครเวฟ เป็นต้น การค้นพบทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์เป็นการค้นพบที่สำคัญครั้งหนึ่งของนักฟิสิกส์ที่ทำให้มีการพัฒนาความรู้ความเข้าใจคุณสมบัติต่างๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ จนนำไปสู่การศึกษา ค้นคว้าและพัฒนา ประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ ให้เป็นประโยชน์ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านกิจการโทรคมนาคมและการสื่อสารในรูปแบบต่างๆ ที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายทั่วโลก เช่นทุกวันนี้

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวางประกอบด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่มีการแกว่งในทิศทางตั้งฉากกันและทิศตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น มีความเร็วในการเคลื่อนที่ในสุญญากาศเป็น  $c = 2.9979 \times 10^8$  เมตร/วินาที ถ้าพิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นคลื่นระนาบที่มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสั้นในทิศที่ตั้งฉากกันทิศใดทิศหนึ่ง ดังภาพที่ 4.6 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ตามแนวแกน x สนามไฟฟ้าสั้นในแนวแกน y สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสั้นใน

แนวแกน  $z$  เมื่อพิจารณาในระบบพิกัดฉาก พบว่าค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวแกน  $x, y$  และ  $z$  ที่เคลื่อนที่ในสุญญากาศเป็นดังนี้

$$E_x = 0$$

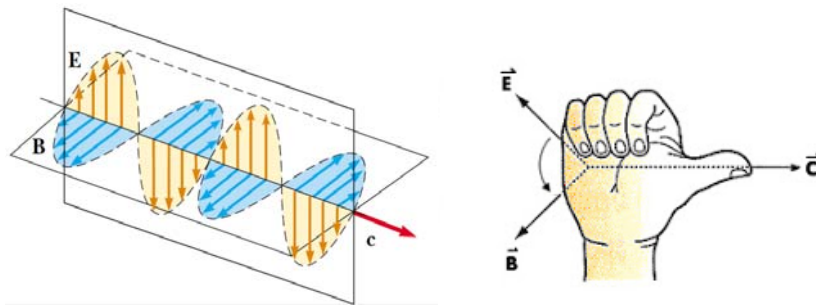
$$E_y = E$$

$$E_z = 0$$

$$B_x = 0$$

$$B_y = 0$$

$$B_z = B$$



ภาพที่ 4.7 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ในแนวแกน  $x$  และการใช้กฎมือขวา

ที่มา : Serway, R. A., and Jewett, J. W., 2014

พิจารณาทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้จากเวกเตอร์สนามไฟฟ้า  $E$  และเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก  $B$  โดยอาศัยกฎมือขวา คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันกับทิศของเวกเตอร์  $\vec{E} \times \vec{B}$  สังเกตในภาพที่ 4.7 จะพบว่าทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเช่นที่ว่านี้ (นิ้วชี้ตามทิศทางของ  $E$  หลังจากนั้นนิ้วงอไปหา  $B$  นิ้วโป้งแทนทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น) ซึ่งจากสมการคลื่นระนาบแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในสุญญากาศของแมกซ์เวลล์ สมการที่หนึ่งจากกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

หรือ

$$\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial z} = -\frac{\partial \vec{B}_x}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} - \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial x} = -\frac{\partial \vec{B}_y}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \vec{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial y} = -\frac{\partial \vec{B}_z}{\partial t}$$

แต่  $\vec{E}_y = \vec{E}$

$$\vec{E}_x = \vec{E}_z = 0$$

และ  $\vec{B}_z = \vec{B}$

$$\vec{B}_x = \vec{B}_y = 0$$

จะได้  $\frac{\partial \vec{E}}{\partial x} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  (4-14)

หาอนุพันธ์ของสมการ(4-9)เทียบกับ x จะได้

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = -\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x \partial t}$$
 (4-15)

จากสมการคลื่นระนาบแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในสุญญากาศของแมกซ์เวลล์ สมการที่สองจะได้

$$\nabla \times \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$
 (4-16)

ดังนั้น  $\frac{\partial \vec{B}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{B}_y}{\partial z} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial t}$

$$\frac{\partial \vec{B}_x}{\partial z} - \frac{\partial \vec{B}_z}{\partial x} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \vec{B}_y}{\partial x} - \frac{\partial \vec{B}_x}{\partial y} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial t}$$

แต่  $\vec{B}_z = \vec{B}$

$$\vec{B}_x = \vec{B}_y = 0$$

และ  $\vec{E}_y = \vec{E}$

$$\vec{E}_x = \vec{E}_z = 0$$

ดังนั้น 
$$-\frac{\partial \bar{B}}{\partial x} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (4-17)$$

หาอนุพันธ์ของสมการ (4-17) เทียบกับ  $t$  จะได้

$$-\frac{\partial^2 \bar{B}}{\partial t \partial x} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad (4-18)$$

จากสมการ (4-15) และ (4-18) จะได้

$$\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad (4-19)$$

เทียบสมการจะได้ความเร็วในสุญญากาศ ดังนี้

$$\frac{1}{c^2} = \epsilon_0 \mu_0$$

หรือ 
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

นั่นคือ 
$$\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad (4-20)$$

และหาอนุพันธ์ของสมการ(4-14) เทียบกับ  $t$  จะได้

$$\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial x \partial t} = -\frac{\partial^2 \bar{B}}{\partial t^2} \quad (4-21)$$

ทำนองเดียวกันกับสมการ (4-17) เทียบกับ  $x$  จะได้สมการคลื่นในเทอมของสนามแม่เหล็ก

$$\frac{\partial^2 \bar{B}}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial x \partial t} \quad (4-22)$$

จากสมการ (4-21) และ (4-22) เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial^2 \bar{B}}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \bar{B}}{\partial t^2} \quad (4-23)$$

หรือ 
$$\frac{\partial^2 \bar{B}}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \bar{B}}{\partial t^2} \quad (4-24)$$

จะเห็นว่า สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่ไปตามแกน +x เหมือนกันด้วยความเร็ว  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$  เท่ากันในสุญญากาศ โดยทิศทางการแกว่งของสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็กและปริมาณการกระจัดของสนามทั้งสองเป็นไปตามสมการฟังก์ชันคลื่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

$$\vec{E} = E_0 \sin(k\vec{x} - ct) \quad (4-20)$$

หรือ  $\vec{E} = E_0 \sin(k\vec{x} - \omega t) \quad (4-21)$

และ  $\vec{B} = B_0 \sin(k\vec{x} - ct) \quad (4-22)$

หรือ  $\vec{B} = B_0 \sin(k\vec{x} - \omega t) \quad (4-23)$

โดย	$E_0$	แทน	แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า
	$B_0$	แทน	แอมพลิจูดของสนามแม่เหล็ก
	$k$	แทน	เวกเตอร์คลื่นเท่ากับ $\frac{2\pi}{\lambda}$
	$\omega$	แทน	ความถี่เชิงมุมเท่ากับ $2\pi f$ หรือ $\frac{2\pi}{T}$
	$c$	แทน	ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ เท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ หรือ $2.9979 \times 10^8$ เมตร/วินาที
$\epsilon_0$	แทน	สภาพยอมของสุญญากาศ (Permittivity) เท่ากับ $8.85 \times 10^{-12}$ ฟารัด/เมตร	
$\mu_0$	แทน	สภาพให้ซึมได้ของสุญญากาศ (Permeability) เท่ากับ $1.26 \times 10^{-6}$ เฮนรี/เมตร	

ทิศทางการแกว่งของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กรวมทั้งทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องอยู่ในแนวแกน x แกน y และแกน z เท่านั้น จะแกว่งหรือเคลื่อนไหวในแนวแกนใดก็ได้แต่ทิศของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแกว่งในทิศที่ตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ได้เกิดจากการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เพราะสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไม่ได้เคลื่อนที่แต่เป็นความเร็วของการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ตามจุดต่างๆ ที่อยู่บนแกนของทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น

$$\begin{aligned}
 \text{จาก} \quad & \frac{\partial \vec{E}}{\partial x} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\
 \text{หรือ} \quad & \frac{\partial}{\partial x} [E_0 \sin k(x - ct)] = \frac{\partial}{\partial t} [B_0 \sin k(x - ct)] \\
 & E_0 k \cos k(x - ct) = c B_0 k \cos k(x - ct) \\
 \text{จะได้} \quad & E_0 = c B_0 \quad (4-24) \\
 \text{และ} \quad & \frac{E}{B} = \frac{E_0 \sin k(x - ct)}{B_0 \sin k(x - ct)} = \frac{E_0}{B_0} \\
 & = \frac{B_0 c}{B_0} = c \\
 \text{ดังนั้น} \quad & \vec{E} = c \vec{B} \quad (4-25)
 \end{aligned}$$

สมการ (4-25) แสดงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เวลาใดๆ

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็ว ( $c$ ) ความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) และความถี่ ( $f$ ) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ยังคงเป็นสมการเดียวกันที่เคยใช้ในการอธิบายคลื่นที่ผ่านมาทั้งหมดนั่นคือ

$$c = f\lambda \quad (4-26)$$

ตัวอย่างที่ 4.4 ถ้าสนามไฟฟ้าในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าตามสมการ

$$E_y = 100 \sin(10^7 x - \omega t) \text{ V/m}$$

(ก) จงหาความยาวคลื่นและความถี่เชิงมุมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้

(ข) จงเขียนสมการของสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้

วิธีทำ (ก) ความยาวคลื่นและความถี่เชิงมุมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเป็น

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{10^7} = 6.28 \times 10^{-7} \text{ m} \\
 &= 628 \text{ nm}
 \end{aligned}$$

โดยที่  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi c}{\lambda} = kc$

$$\omega = (10^7)(3 \times 10^8) \text{ Hz} = 3 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

คำตอบ ความยาวคลื่นเท่ากับ 628 นาโนเมตร และความถี่เชิงมุมเท่ากับ  $3 \times 10^{15}$  เฮิรตซ์

(ข) ขนาดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ สัมพันธ์กับแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ จึงมีค่าเป็น

$$B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{100}{3 \times 10^8} \text{ T} = 3.33 \times 10^{-7} \text{ T}$$

จึงเขียนสมการของสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ได้เป็น

$$\vec{B} = 3.33 \times 10^{-7} \sin(10^7 x - \omega t) \text{ T}$$

หรือ 
$$\vec{B} = 3.33 \times 10^{-7} \sin[10^7(x - ct)] \text{ T}$$

คำตอบ เขียนสมการสนามแม่เหล็กได้เป็น  $B = 3.33 \times 10^{-7} \sin[10^7(x - ct)]$  เทสลา

ตัวอย่างที่ 4.5 คลื่นวิทยุหนึ่งมีความยาวคลื่น 300 เมตร เคลื่อนที่ในสุญญากาศ จงหา

(ก) ความถี่ในหน่วย kHz

(ข) คาบของคลื่น

(ค) สนามแม่เหล็กมีค่าเท่าไร เมื่อขนาดของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 150 N/C

วิธีทำ (ก) 
$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{300 \text{ m}}$$

$$= 10^6 \text{ Hz} = 10^3 \text{ kHz}$$

(ข) 
$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{10^6} = 10^{-6} \text{ s}$$

(ค) 
$$B = \frac{E}{c} = \frac{150}{3 \times 10^8} = 5.0 \times 10^{-7} \text{ T}$$

ถ้าสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 150 N/C สนามแม่เหล็กที่เวลานี้ มีค่าเป็น  $5.0 \times 10^{-7}$  เทสลา

#### 4.11 สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell equations)

จากการศึกษาปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าและแม่เหล็กเริ่มตั้งแต่คูลอมบ์ได้ทดลองศึกษาแรงระหว่างประจุและได้ตั้งเป็นกฎที่เรียกว่า กฎของคูลอมบ์ ต่อมาก็ได้ขยายไปอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าและกฎที่สำคัญสำหรับใช้อธิบายลักษณะของฟลักซ์สนามไฟฟ้าคือกฎของเกาส์ กฎดังกล่าวนี้ได้ขยายมาใช้สำหรับแม่เหล็กด้วย เรียกว่า กฎของเกาส์สำหรับแม่เหล็กเมื่อมีการค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากับแม่เหล็กแอมแปร์ได้ตั้งกฎสำหรับอธิบายการเกิดสนามแม่เหล็กที่

เกิดจากกระแสเรียกว่ากฎของแอมแปร์ซึ่งพบว่า การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือกระแสหรือสนามไฟฟ้าได้แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell) นักคณิตศาสตร์และนักฟิสิกส์ชาวสก็อตแลนด์ได้รวบรวมกฎต่างๆ ทางไฟฟ้าแม่เหล็กเหล่านี้เข้าด้วยกัน โดยขยายความในกฎของแอมแปร์ออกไปให้ครอบคลุมถึงลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าแม้ว่าในบริเวณนั้นจะไม่มีสารแม่เหล็กหรือกระแสจริงอยู่ก็ตามกฎต่างๆ ที่แมกซ์เวลล์รวบรวมขึ้นเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ 4 สมการ

1. กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า

$$\oint_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (4-27)$$

จากกฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า อธิบายได้ว่าฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิที่ตัดผ่านผิวปิดรูปทรงใด ๆ มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณประจุสุทธิภายในผิวปิดนั้น ซึ่งถ้าปริมาณประจุสุทธิภายในผิวปิดใดไม่เป็นศูนย์ย่อมมีฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิตัดผ่านผิวปิดนั้น โดยประจุภายในผิวปิดอาจมีเพียงประจุบวกหรือประจุลบหรือมีทั้งประจุบวกและประจุลบกระจายอยู่ ประจุบวกและประจุลบซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของสนามไฟฟ้าจึงปรากฏแยกกันได้ เช่น ประจุบวกของโปรตอนและประจุลบของอิเล็กตรอน

2. กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก

$$\oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (4-28)$$

จากกฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก จะได้ว่าฟลักซ์แม่เหล็กสุทธิที่ตัดผ่านผิวปิดรูปทรงใดๆ จะมีค่าเป็นศูนย์เสมอ ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กจะต้องมีทั้งขั้วเหนือกับขั้วใต้คู่กันเสมอ ไม่ว่าจะแบ่งแท่งแม่เหล็กหนึ่งออกเป็นแท่งเล็กๆ ก็แท่งก็ตาม หรือแบ่งจนเหลือเพียงอะตอมเดียว ผลการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสและการสปีนของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดเป็นวงกระแส (Current loop) คล้ายกระแสไฟฟ้าที่ไหลวนในวงลวดกลมที่ทำให้ด้านหนึ่งของวงลวด มีสภาพขั้วเป็นขั้วเหนืออีกด้านหนึ่งของวงลวดมีสภาพเป็นขั้วใต้ (พิจารณาได้จากกฎมือขวา) อะตอมจึงมีสภาพเหมือนแท่งแม่เหล็กและขั้วแม่เหล็กไม่อาจปรากฏแยกกันได้ (ต่างจากประจุไฟฟ้า) กล่าวคือถ้าขั้วเหนือปรากฏขึ้นในบริเวณหนึ่ง บริเวณใกล้ๆ กันนั้นต้องมีขั้วใต้ปรากฏอยู่ด้วย

## 3. กฎของฟาราเดย์-เฮนรี

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi_M}{dt} \quad (4-29)$$

สำหรับความหมายของกฎของฟาราเดย์-เฮนรี สนามไฟฟ้ารอบวงปิดใดๆ มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาของฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านวงปิดนั้น ซึ่งสนามแม่เหล็กที่กำลังเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้น ไม่ว่าบริเวณนั้นจะเป็นสุญญากาศ บริเวณในตัวนำหรือบริเวณฉนวน

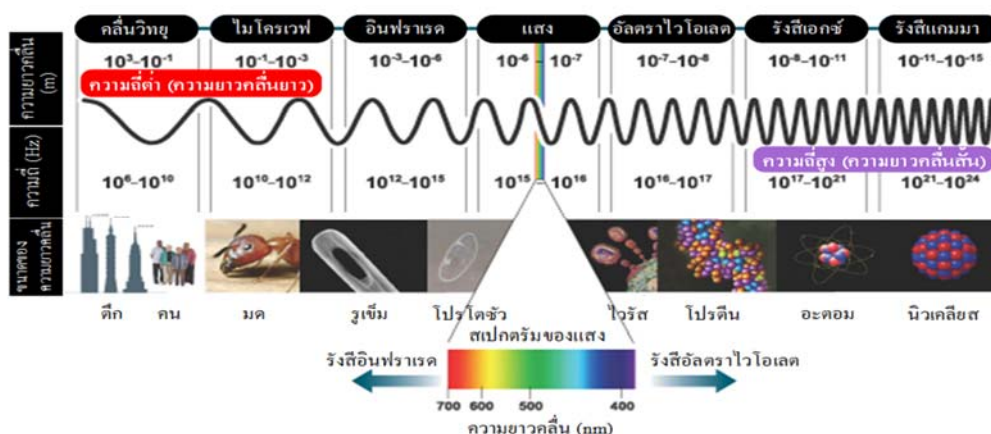
## 4. กฎของแอมแปร์ที่ปรับปรุงโดยแมกซ์เวลล์

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \left( I + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right) \quad (4-30)$$

สำหรับกฎของแอมแปร์ที่ปรับโดยแมกซ์เวลล์ สามารถกล่าวได้ว่า สนามแม่เหล็กรอบวงปิดใดๆ มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าสุทธิที่ไหลผ่านวงปิดนั้น โดยกระแสไฟฟ้าสุทธิหมายถึงทั้งกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำและกระแสกระจัดขยายความได้ว่า นอกจากประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่หรือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในบริเวณรอบๆ ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่หรือบริเวณรอบๆตัวนำแล้ว สนามไฟฟ้าที่กำลังเปลี่ยนแปลงตามเวลาในบริเวณใดจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กในบริเวณนั้น ไม่ว่าบริเวณนั้นจะเป็นสุญญากาศ บริเวณในตัวนำหรือบริเวณฉนวน

## 4.12 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave spectrum)

ประจุไฟฟ้าจะสั่นด้วยความถี่มากหรือน้อยเพียงใด จะมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นเสมอเนื่องจากประจุมีความเร่ง เพราะฉะนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่อมมีค่าความถี่หรือความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน เนื่องจากอัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศมีค่าเท่ากันหมด เท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s ช่วงของความถี่หรือความยาวคลื่นทั้งหลายนี้เรียกว่า สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังภาพที่ 4.8 แสดงช่วงของความถี่และความยาวคลื่นต่างๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพที่ 4.8 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 2 มีนาคม 2563

จาก <http://www.astro.virginia.edu>

สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็นจะเริ่มจากสีม่วงไปสีแดง ส่วนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นอื่นๆ มีชื่อเรียกต่างกันไป ซึ่งประกอบไปด้วยคลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ อินฟราเรด อุลตราไวโอเล็ต (รังสีUV) รังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา

#### 4.12.1 คลื่นวิทยุ

มีความถี่อยู่ในช่วง  $10^6 - 10^9$  เฮิรตซ์ คลื่นวิทยุมี 2 ระบบได้แก่

1. คลื่นวิทยุระบบเอเอ็ม (Amplitude modulation: AM) ความถี่ตั้งแต่ 530-1600 กิโลเฮิรตซ์ที่สถานีวิทยุส่งออกอากาศในระบบเอเอ็มเป็นการสื่อสารโดยการผสม (Modulate) คลื่นเสียงเข้ากับคลื่นวิทยุซึ่งเรียกว่าคลื่นพาหะและสัญญาณเสียงจะบังคับให้แอมพลิจูดของคลื่นพาหะเปลี่ยนแปลงไป เมื่อคลื่นวิทยุที่ผสมสัญญาณเสียงกระจายออกจากสายอากาศไปยังเครื่องรับวิทยุ เครื่องรับวิทยุจะทำหน้าที่แยกสัญญาณเสียง ซึ่งอยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้าออกจากสัญญาณคลื่นวิทยุแล้วขยายให้มีแอมพลิจูดสูงขึ้นเพื่อส่งให้ลำโพงแปลงสัญญาณออกมาเป็นเสียงที่หูรับฟัง

2. คลื่นวิทยุระบบเอฟเอ็ม (Frequency modulation: FM) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผสมสัญญาณเสียงเข้ากับคลื่นพาหะ โดยให้ความถี่ของคลื่นพาหะเปลี่ยนแปลงสัญญาณเสียงการส่งคลื่นในระบบเอฟเอ็มใช้ช่วงความถี่จาก 88-108 เมกะเฮิรตซ์ ระบบการส่งคลื่นแบบเอเอ็มและเอฟเอ็มต่างกันที่วิธีการผสมคลื่น ดังนั้นเครื่องรับวิทยุระบบเอเอ็มกับเอฟเอ็มจึงไม่สามารถรับคลื่นวิทยุของอีกระบบหนึ่งได้ ในการส่งกระจายเสียงด้วยคลื่นวิทยุระบบเอเอ็มคลื่นสามารถเดินทางถึงเครื่องรับ

วิทยุได้สองทางคือ เคลื่อนที่ไปตรง ๆ ในแนวระดับสายตา ซึ่งเรียกว่า คลื่นดินส่วนคลื่นที่สะท้อนกลับลงมาจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ เรียกว่า คลื่นฟ้า ส่วนคลื่นวิทยุระบบเอฟเอ็มซึ่งมีความถี่สูงจะมีการสะท้อนที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์น้อย ดังนั้นถ้าต้องการส่งกระจายเสียงด้วยระบบเอฟเอ็มให้ครอบคลุมพื้นที่ไกล ๆ จึงต้องมีสถานีถ่ายทอดเป็นระยะ ๆ และผู้รับต้องตั้งสายอากาศให้สูง ในขณะที่คลื่นวิทยุเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางที่มีขนาดใกล้เคียงความยาวคลื่นจะมีการเลี้ยวเบนเกิดขึ้นทำให้คลื่นวิทยุอ้อมผ่านไปได้ แต่ถ้าสิ่งกีดขวางมีขนาดใหญ่มาก เช่น ภูเขาคลื่นวิทยุที่มีความยาวคลื่นสั้นจะไม่สะท้อนอ้อมผ่านภูเขาไปได้ทำให้ด้านตรงข้ามของภูเขาเป็นจุดปลอดคลื่น โลหะมีสมบัติสามารถสะท้อนและดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ดังนั้นคลื่นวิทยุจะทะลุผ่านเข้าไปถึงภายในโลหะได้ยาก อาจจะสังเกตได้ง่ายเมื่อฟังวิทยุในรถยนต์เมื่อรถยนต์ผ่านใต้สะพานที่มีโครงสร้างเป็นเหล็กเสียงวิทยุจะเบาลงหรือเงียบหายไป ในการส่งกระจายเสียงสถานีส่งคลื่นวิทยุหนึ่งๆจะใช้คลื่นวิทยุที่มีความถี่คลื่นโดยเฉพาะ เพราะถ้าใช้คลื่นที่มีความถี่เดียวกันจะเข้าไปในเครื่องรับพร้อมกันเสียงจะรบกวนกัน แต่ถ้าสถานีส่งวิทยุอยู่ห่างกันมาก ๆ จนคลื่นวิทยุของสถานีทั้งสองไม่สามารถรบกวนกันได้สถานีทั้งสองอาจใช้ความถี่เดียวกันได้

คลื่นโทรทัศน์มีความถี่ประมาณ  $10^8$  เฮิร์ตซ์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงขนาดนี้จะไม่สะท้อนที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ แต่จะทะลุผ่านชั้นบรรยากาศไปนอกโลก ดังนั้นการส่งคลื่นโทรทัศน์ไปไกล ๆ จะต้องใช้สถานีถ่ายทอดคลื่นเป็นระยะๆเพื่อรับคลื่นโทรทัศน์จากสถานีส่งซึ่งมาในแนวเส้นตรง แล้วขยายให้สัญญาณแรงขึ้นก่อนที่จะส่งไปยังสถานีที่อยู่ถัดไป เพราะสัญญาณเดินทางเป็นเส้นตรงดังนั้นสัญญาณจะไปได้ไกลสุดเพียงประมาณ 80 กิโลเมตร บนผิวโลกเท่านั้น ทั้งนี้เพราะผิวโลกโค้งหรืออาจใช้คลื่นไมโครเวฟนำสัญญาณจากสถานีส่งไปยังดาวเทียม ซึ่งโคจรอยู่ในวงโคจรที่ตำแหน่งหยุดนิ่งเมื่อเทียบกับตำแหน่งหนึ่งๆบนผิวโลก นั่นคือ ดาวเทียมมีความเร็วเชิงมุมเดียวกับความเร็วในการหมุนรอบตัวเองของโลกจากนั้นดาวเทียมก็จะส่งคลื่นต่อไปยังสถานีรับที่อยู่ไกลๆได้

#### 4.12.2 คลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟมีความถี่ตั้งแต่  $1 \times 10^9$  เฮิร์ตซ์ ถึง  $3 \times 10^{11}$  เฮิร์ตซ์ ปัจจุบันใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2400 เมกะเฮิร์ตซ์ ในการทำอาหาร เปิดปิดประตูโรงรถ ถ่ายภาพพื้นผิวดาวเคราะห์ ศึกษากำเนิดของจักรวาล เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสะท้อนจากผิวโลหะได้ดี ดังนั้นจึงมีการ

นำคุณสมบัตินี้ไปใช้ประโยชน์ในการตรวจหาตำแหน่งของอากาศยานตรวจจับอัตราเร็วของรถยนต์ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวเรียกว่าเรดาร์

#### 4.12.3 ริงส์อินฟราเรด

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในช่วง  $10^{11} - 10^{14}$  เฮิร์ตซ์ สามารถแบ่งเป็น 3 ช่วง

1. อินฟราเรดใกล้ (0.7–1.5 ไมโครเมตร)
2. อินฟราเรดปานกลาง (1.5–4.0 ไมโครเมตร)
3. อินฟราเรดไกล (4.0–1000 ไมโครเมตร)

วัตถุที่มีความร้อนจะแผ่รังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 100 ไมโครเมตร ปรสาทสัมผัสทางผิวหนังของมนุษย์รับรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นบางช่วงได้ และฟิล์มถ่ายรูปบางชนิดสามารถตรวจจับรังสีอินฟราเรดได้ ตามปกติแล้วสิ่งมีชีวิตทุกชนิดจะแผ่รังสีอินฟราเรดตลอดเวลาและรังสีอินฟราเรดสามารถทะลุผ่านเมฆหมอกที่หนาทึบเกินกว่าที่แสงธรรมดาคะผ่านได้ นักเทคโนโลยีจึงอาศัยสมบัตินี้ในการถ่ายภาพพื้นโลกจากดาวเทียมเพื่อศึกษาการแปรสภาพของป่าไม้หรือการอพยพเคลื่อนย้ายของฝูงสัตว์ เป็นต้น ริงส์อินฟราเรดมีการใช้ในระบบควบคุมที่เรียกว่า รีโมทคอนโทรล หรือการควบคุมระยะไกล ซึ่งเป็นระบบควบคุมการทำงานของเครื่องรับโทรทัศน์จากระยะไกล เช่น ทำการปิดเปิดเครื่องการเปลี่ยนช่อง เป็นต้น ในกรณีนี้รังสีอินฟราเรดจะเป็นตัวนำคำสั่งจากอุปกรณ์ควบคุมไปยังเครื่องรับนอกจากนี้ในทางการทหารก็มีการนำรังสีอินฟราเรดมาใช้ควบคุมอาวุธนำวิถีให้เคลื่อนไปยังเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ เทคโนโลยีปัจจุบันใช้การส่งสัญญาณด้วยเส้นใยนำแสงและคลื่นที่เป็นพาหะนำสัญญาณคือ รังสีอินฟราเรด เพราะการใช้แสงธรรมดานำสัญญาณอาจถูกรบกวนโดยแสงจากภายนอกได้ง่าย

#### 4.12.4 แสงที่ตามองเห็น

แสงมีความถี่โดยประมาณตั้งแต่  $4 \times 10^{14}$  เฮิร์ตซ์ ถึง  $8 \times 10^{14}$  เฮิร์ตซ์ ปรสาทตาของมนุษย์ไวต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงนี้มาก วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงมาก ๆ เช่น ไส้หลอดไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 2500 องศาเซลเซียส หรือผิวดวงอาทิตย์ที่มีอุณหภูมิประมาณ 6000 องศาเซลเซียส จะเปล่งแสงได้ สำหรับแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 700 นาโนเมตร ปรสาทตาจะรับรู้เป็นแสงสีแดง ส่วนแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าปรสาทตาจะรับรู้เป็นแสงสีส้ม เหลือง เขียว น้ำเงิน ตามลำดับ จนถึงแสงสีม่วง ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 400 นาโนเมตร แสงสีต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้เมื่อรวมกันด้วยปริมาณที่เหมาะสมจะเป็นแสงสีขาว

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับคลื่นวิทยุ ดังนั้นอาจใช้แสงเป็นคลื่นพาหะ นำข่าวสารในการสื่อสารได้ เช่นเดียวกับการใช้คลื่นวิทยุและคลื่นโทรทัศน์เป็นพาหะนำเสียงและภาพดังกล่าวแล้วเหตุที่ไม่สามารถใช้แสงที่เกิดจากวัตถุที่มีความร้อนเป็นคลื่นพาหะเพราะว่าแสงเหล่านี้มีหลายความถี่และเฟสที่ไม่แน่นอน ปัจจุบันเรามีเครื่องกำเนิดเลเซอร์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ที่ให้แสงได้ และมีผู้ทดลองผสมสัญญาณเสียงและภาพกับเลเซอร์ได้สำเร็จ นอกจากใช้ในการสื่อสารแล้ว เลเซอร์ยังใช้ในวงการต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง เช่น วงการแพทย์ใช้ในการผ่าตัดนัยน์ตา เป็นต้น เลเซอร์เป็นเขียนภาษาอังกฤษว่า LASER ซึ่งย่อมาจาก Light amplification by stimulated emission of radiation ที่แปลเป็นภาษาไทยได้ว่า “การขยายสัญญาณแสงโดยการปล่อยรังสีแบบเร่งเร้า” เพราะแสงเลเซอร์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการปล่อยรังสีแบบเร่งเร้าและสัญญาณแสงถูกขยาย

#### 4.12.5 รังสีอัลตราไวโอเล็ต

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วง  $10^{15}$  ถึง  $10^{18}$  เฮิรตซ์ รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีในธรรมชาติส่วนใหญ่มาจากดวงอาทิตย์และรังสีนี้ทำให้บรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์มีประจุอิสระและไอออน เพราะรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีพลังงานสูงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากโมเลกุลของอากาศ ซึ่งพบว่าในไอโอโนสเฟียร์มีโมเลกุลหลายชนิด เช่น โอโซน ซึ่งสามารถกั้นรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดี ตามปกติรังสีอัลตราไวโอเล็ตไม่สามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวางที่หนาได้ รังสีนี้สามารถฆ่าเชื้อโรคบางชนิดได้ ดังนั้นในวงการแพทย์จึงใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตในปริมาณพอเหมาะเพื่อรักษาโรคผิวหนังบางชนิด

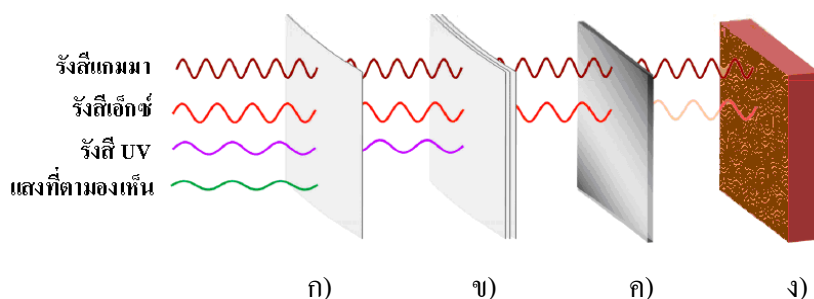
#### 4.12.6 รังสีเอกซ์

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วง  $10^{17}$  -  $10^{21}$  เฮิรตซ์ รังสีเอกซ์สามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวางหนาๆ ได้ ดังนั้นวงการอุตสาหกรรมจึงใช้รังสีเอกซ์ตรวจหารอยร้าวภายในชิ้นส่วนโลหะขนาดใหญ่ เจ้าหน้าที่ด้านตรวจก็ใช้รังสีเอกซ์ตรวจหาอาวุธปืนหรือวัตถุระเบิดในกระเป๋าเดินทางโดยไม่ต้องเปิดกระเป๋า โดยอาศัยหลักการว่ารังสีเอกซ์จะถูกขวางกั้นโดยอะตอมของธาตุนั้นได้ดีกว่าธาตุนั้นๆ ทางวงการแพทย์ใช้วิธีฉายรังสีเอกซ์ผ่านร่างกายคนไปตกบนฟิล์มเพื่อตรวจดูลักษณะผิดปกติของอวัยวะภายในและกระดูก เมื่อฉายรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 10 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกันกับขนาดของอะตอมและระยะห่างระหว่างอะตอมของ

ผลึกผ่านผลึกของโลหะที่จัดเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบจะเกิดปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เช่นเดียวกับเมื่อแสงผ่านเกรตติงทำให้สามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างอะตอมและลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมจึงทำให้ทราบ โครงสร้างของผลึกแต่ละชนิดได้

#### 4.12.7 รังสีแกมมา

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงกว่ารังสีเอกซ์ แต่เดิมรังสีแกมมาเป็นชื่อเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงที่เกิดจากการสลายของนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี แต่ในปัจจุบันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใดๆ ที่มีความถี่สูงกว่ารังสีเอกซ์โดยทั่วไปจะเรียกรังสีแกมมาทั้งนั้น ปฏิกิริยานิวเคลียร์บางปฏิกิริยาจะปลดปล่อยรังสีแกมมาการระเบิดของลูกระเบิดนิวเคลียร์จะให้รังสีแกมมาปริมาณมาก การมีความถี่สูงทำให้รังสีนี้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด นอกจากนี้ยังมีรังสีแกมมาที่ไม่ได้เกิดจากการสลายของธาตุกัมมันตรังสี เช่น รังสีแกมมาที่มาจากอวกาศและรังสีคอสมิกนอกโลก อนุภาคประจุไฟฟ้าที่ถูกร่งในเครื่องเร่งอนุภาคก็สามารถให้กำเนิดรังสีแกมมาได้เช่นกัน



ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ก) กระดาษหนึ่งแผ่น ข) กระดาษหลายแผ่น ค) แผ่นอะลูมิเนียม ง) กำแพงคอนกรีตหนา  
ที่มา: สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 5 มีนาคม 2563 จาก <https://nnnattanicha.wordpress.com>

#### 4.13 พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Energy of electromagnetic wave)

คลื่นมีพลังงานอยู่ด้วยเสมอสามารถคำนวณหาความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความเข้มของคลื่นเป็นกำลังของคลื่นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ได้จากขนาดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กนั้น ๆ โดยอาศัยความสัมพันธ์

$$I = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0} \quad (4-31)$$

โดย  $\mu_0$  แทน ค่าความซาบซึ่มได้ของสนามแม่เหล็กในสุญญากาศ เป็นค่าคงตัวที่มีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$

$E_0$  แทน แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า

$B_0$  แทนแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็ก

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสนามไฟฟ้าและขนาดของสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนสมการที่ (4 – 31) ได้เป็น

$$I = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0} = \frac{c}{2\mu_0} B_0^2 = \frac{1}{2\mu_0 c} E_0^2 \quad (4-32)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแปรผันตามแอมพลิจูดกำลังสองของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเช่นเดียวกับความเข้มของคลื่นกลที่ได้ศึกษาผ่านมา

ในที่นี้จะพิจารณาพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของความเข้ม โดยอาศัยค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่รวมกันเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีวิธีการคำนวณพลังงานของแสงในลักษณะที่แตกต่างกันออกไปเนื่องจากคลื่นมีคุณสมบัติความเป็นอนุภาคอยู่ในตัวด้วยเช่นเดียวกัน

ตัวอย่างที่ 4.6 ถ้ากำลังของแสงจากโคมไฟอ่านหนังสือที่ตกกระทบหนังสือที่มีพื้นที่หน้าตัด  $0.05 \text{ m}^2$  มีค่าเท่ากับ  $2 \text{ W}$  จงคำนวณหาแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของแสงนี้  
วิธีทำ ความเข้ม คือ กำลังต่อพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นความเข้มของคลื่นแสงที่ตกกระทบหนังสือมีค่า

$$\begin{aligned} I &= \frac{P}{A} \\ &= \frac{2}{0.05} \\ &= 40 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

เพื่อคำนวณหาแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า

$$I = \frac{1}{2\mu_0 c} E_0^2$$

$$\begin{aligned}
 E_{\max} &= \sqrt{2\mu_0 c I} \\
 &= \sqrt{2(4\pi \times 10^{-7})(3 \times 10^8)(40)} \\
 &= 173.7 \text{ V/m}
 \end{aligned}$$

เพื่อคำนวณหาแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็ก

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{c}{2\mu_0} B_0^2 \\
 B_0 &= \sqrt{\frac{2\mu_0 I}{c}} \\
 &= \sqrt{\frac{2(4\pi \times 10^{-7})(40)}{(3 \times 10^8)}} \\
 &= 5.79 \times 10^{-7} \text{ V/m}
 \end{aligned}$$

คำตอบ ขนาดของสนามแม่เหล็กมากที่สุดมีค่าเท่ากับ  $5.79 \times 10^{-7}$  เทสลา

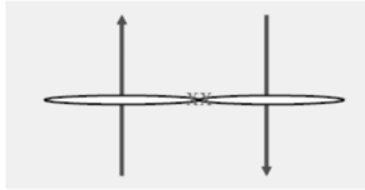
#### 4.14 บทสรุป

ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นผิวคำนวณจากการอินทิเกรตตลอดพื้นผิวนั้น โดยกฎของบิโอต์-ซาวาร์ตบอกไว้ว่า สนามแม่เหล็กที่จุดใด ๆ คำนวณจากการแทนค่าความยาวของส่วนเล็ก ๆ คูณกับกระแสไฟฟ้าที่คงที่ผ่านความยาวส่วนนั้น โดยแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวระหว่างเส้นลวดขนานกันสองเส้นที่วางแยกห่างกัน จะมีแรงดึงดูดกันถ้ากระแสไหลอยู่ในทิศทางเดียวกัน และผลักกันถ้ากระแสมีทิศทางตรงข้ามกัน กฎของแอมแปร์ กล่าวถึงการอินทิเกรตตามเส้นของสนามแม่เหล็กที่คูณแบบสเกลาร์กับส่วนความยาวสั้นๆ รอบเส้นทางปิดใดๆ ซึ่งจะเท่ากับกระแสคงที่ทั้งหมดที่ผ่านพื้นผิวใดที่ถูกล้อมรอบด้วยเส้นทางปิดนั้น สำหรับกฎของเกาส์ของแม่เหล็กกล่าวว่า ฟลักซ์แม่เหล็กสุทธิที่ผ่านพื้นผิวปิดใดๆ จะมีค่าเป็นศูนย์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกันและเหนี่ยวนำกันเองต่อไปเรื่อยๆ ตามสมการแมกซ์เวลล์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะขนส่งพลังงานไปในทิศตั้งฉากกับระนาบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ไม่ต้องอาศัยตัวกลาง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีหลายชนิดขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดและความยาวคลื่น แต่ละชนิดมีสมบัติเฉพาะแตกต่างกันและนำมาใช้ประโยชน์อย่าง

กว้างขวาง โดยเฉพาะในทางสื่อสารโทรคมนาคม ทางการแพทย์และอุตสาหกรรม แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำให้ประสาทตาของคนปกติเกิดความรู้สึกมองเห็น สมบัติที่สำคัญของแสง คือ การสะท้อน การหักเห การแทรกสอด การเลี้ยวเบน และการโพลาไรส์ สมบัติของแสงเหล่านี้นำมาใช้ประโยชน์ใช้ในทัศนอุปกรณ์ต่างๆ

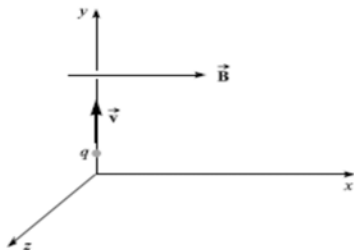
## แบบฝึกหัด

1. จากภาพที่ 4.10 ลวดยาวสองเส้นวางขนานกันห่างกัน 10 เซนติเมตรและมีกระแสไหลภายใน 6.0 A และ 4.0 A จงหาแรงบนเส้นลวด D ซึ่งมีความยาว 1 เมตร ถ้ากระแส (ก) มีทิศไปทางเดียวกัน (ข) มีทิศตรงข้ามกัน [คำตอบ (ก) 48  $\mu$ N (ข) 48  $\mu$ N แต่ทิศทางตรงข้าม]



ภาพที่ 4.10 สำหรับคำถามข้อ 1

2. เส้นลวดสองเส้นห่างกัน 20 เซนติเมตรมีกระแสไหลเท่ากันทิศตรงกันข้ามขนาด 10 A จงหาขนาดของสนามแม่เหล็กกึ่งกลางระหว่างเส้นลวดทั้งสอง [คำตอบ  $4 \times 10^{-5}$  T]
3. สนามไฟฟ้าขนาด 3.0 G ในทิศทาง x ดังภาพที่ 4.11 ถ้าโปรตอน(+e) ถูกยิงเข้าไปในสนามไฟฟ้าในทิศ +y ด้วยความเร็ว  $5 \times 10^6$  m/s (ก) จงหาขนาดและทิศของแรงที่กระทำกับโปรตอน (ข) ถ้าสลับโปรตอนเป็น อิเล็กตรอนขนาดและทิศจะเป็นอย่างไร  
[คำตอบ (ก) แรงมีขนาด  $2.4 \times 10^{-16}$  N ทิศ -Z , (ข) แรงมีขนาด  $2.4 \times 10^{-16}$  N ทิศ +Z]



ภาพที่ 4.11 สำหรับคำถามข้อ 3

4. จงคำนวณหาความเข้มของสนามแม่เหล็กในอากาศ ระยะห่างจากลวดเส้นตรงยาวซึ่งมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน 15 A [คำตอบ  $6 \times 10^{-5}$  T]
5. เส้นลวดยาวสองเส้นขนานกันมีระยะห่าง 4 เซนติเมตรและมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน 2A และ 6 A ในทิศทางเดียวกัน จงคำนวณแรงระหว่างลวดต่อเมตรของระยะความยาวลวด [คำตอบ  $6 \times 10^{-5}$  N/m แรงดูด]
6. จงหาแรงที่เกิดจากการยิงอิเล็กตรอนเข้าไปในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กความเข้ม 10 เวเบอร์ต่อตารางเมตร ด้วยความเร็ว  $3 \times 10^7$  เมตรต่อวินาที [คำตอบ  $4.8 \times 10^{-11}$  นิวตัน]

## เอกสารอ้างอิง

- ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์. (2535). ฟิสิกส์ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เจริญโชค ศรขวัญ และคณะ. (2546). ฟิสิกส์ทั่วไป 2 General Physics II 2<sup>nd</sup> ed. กรุงเทพมหานคร : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- พงษ์ศักดิ์ ชินนาบุญ. (2552). ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 2 เล่ม 1. กรุงเทพมหานคร: วิทย์พัฒนา.
- ประธาน บุรณศิริ และคณะ. (2559). ฟิสิกส์ 2. กรุงเทพมหานคร: เอสแควร์ อี จำกัด.
- ยัง และ เฟรดแมน. (2548). ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 2. (แปลจาก University Physics with Modern Physics โดย ปิยพงษ์ สิทธิคง). กรุงเทพมหานคร: เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อิน โดไชน่า.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. **สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า**. สืบค้น 2 มีนาคม 2563 จาก <http://www.astro.virginia.edu>
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. **อำนาจทะลุทะลวงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า**. สืบค้น 5 มีนาคม 2563 จาก <https://nntanicha.wordpress.com>
- Bellance, J, and Brandt, R. (2010). 21<sup>st</sup> Century Skills Rethinking How Students Learn. Solution Tree Press.
- Halpern, A. (2011). Schaum's outlines 3,000 Solved Problems in Physics. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Serway, R. A., and Jewett, J. W. (2014). Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 9<sup>th</sup> ed. Belmont: Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Serway, R.A., Vuille, C., and Hughes, J. (2015). College Physics 10<sup>th</sup> ed. Stamford: Cengage Learning.
- Tientongdee, S. (2018). **Development of problem-solving skill by using active learning for student teachers in Introductory Physics**. J. Phys.: Conf. Ser. 1144 012002
- Thornton, T.S., and Rex, A. (2013). Modern Physics for Scientists and Engineers 4<sup>th</sup> ed. Boston: Brooks/Cole- Cengage Learning.
- Young, H.D., and Freedman, R.A. (2016). Sear's & Zemansky's University Physics with Modern Physics 14<sup>th</sup> ed. Essex: Pearson Education Limited.