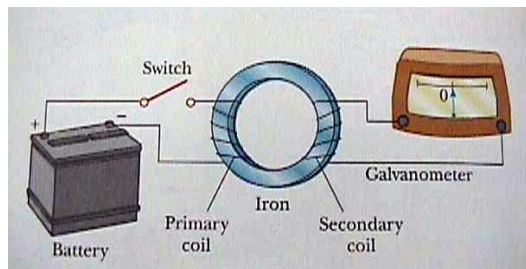


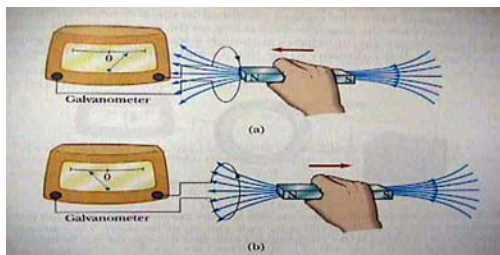
ในเรื่องกฎของแอมแปร์ ได้พิจารณาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำ ในบทนี้จะศึกษากรณีกลับกัน กล่าวคือ เป็นกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ผู้ค้นพบความสัมพันธ์นี้คือ ไมเคิล ฟาราเดย์ ชาวอังกฤษ และ โจเซฟ เฮนรี ชาวอเมริกัน

10.1 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's Law of induction)



ภาพที่ 10-1 ชุดการทดลองของฟาราเดย์

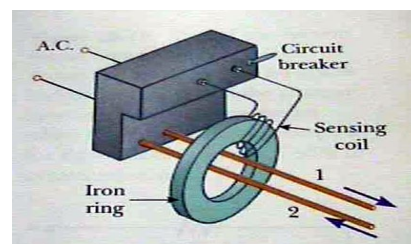
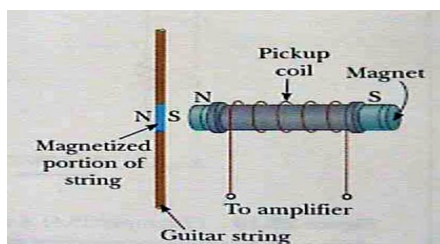
อุปกรณ์การทดลองของฟาราเดย์ ประกอบด้วยแบตเตอรี่ สวิตช์ วงเหล็ก และกัลวานอมิเตอร์ ดังภาพที่ 10-1 จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการสับสวิตช์ เข็มของกัลวานอมิเตอร์จะกระดิกไปทางหนึ่งและกลับไปที่ศูนย์ และเมื่อยกสวิตช์เข็มก็จะกระดิกไปอีกทางและกลับไปที่ศูนย์ ฟาราเดย์ สรุปว่า “กระแสไฟฟ้าสามารถสร้างขึ้นได้ โดยการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก”



ภาพที่ 10-2 การทดสอบกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์โดยเคลื่อนแม่เหล็กผ่านขดลวด

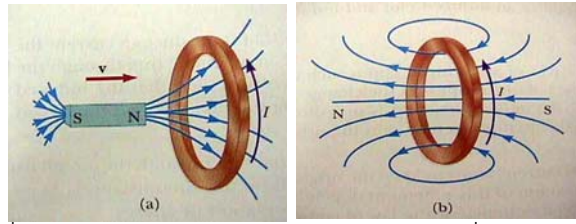
พิจารณาการจัดการทดลองอีกแบบหนึ่ง พบว่าเมื่อใดที่มีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันระหว่างแม่เหล็กกับขดลวดแล้ว จะมีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในวงจร ปรากฏการณ์นี้มีประโยชน์มาก เพราะสามารถกำเนิดกระแสไฟฟ้าได้โดยใช้กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ ตัวอย่างการประยุกต์อื่น ๆ เช่น มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า สวิตช์แม่เหล็ก เครื่องตรวจโลหะ เครื่องขยายของแบบหยอดเหรียญ หม้อสุกี้

คำถาม 1: กีตาร์ไฟฟ้าและ สวิตซ์ตัดไฟกรณีกระแสไหลเกิน ดังภาพ มีหลักการการทำงานที่ใช้การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า อย่างไร



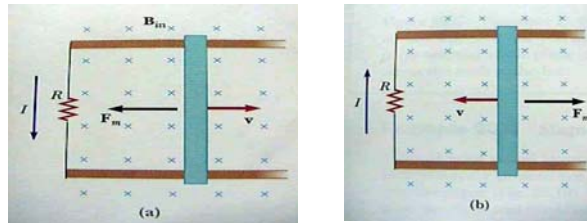
ภาพที่ 10-3 อุปกรณ์ที่ใช้กฎการเหนี่ยวนำ เช่น กีตาร์ไฟฟ้า และระบบป้องกันไฟเกิน

## 10.2 กฎของเลนซ์ (Lenz's Law)



ภาพที่ 10-4 กฎของเลนซ์แสดงถึงการต่อต้านการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก

กฎของเลนซ์กล่าวว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นในลักษณะที่ต้านการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กนั้น ๆ กล่าวคือ เกิดขึ้นเพื่อรักษาสภาพของฟลักซ์แม่เหล็กเดิมไว้ ซึ่งเป็นผลมาจากกฎทรงพลังงานจากภาพ วงแหวนจะต่อต้านการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากการเลื่อนแท่งแม่เหล็ก



ภาพที่ 10-5 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเคลื่อนเส้นลวดไปบนราง

อีกตัวอย่างหนึ่งที่พบว่าเมื่อลวดเคลื่อนที่ไปทางขวาฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านไปในลูปจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสไหลในทิศทางเพื่อลดจำนวนฟลักซ์แม่เหล็ก และในทางกลับกันเมื่อลวดเคลื่อนที่มาทางซ้าย กระแสจะไหลกลับทิศ

## 10.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced Emf)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กเทียบกับเวลา

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\phi_B}{dt} \quad (10-1)$$

โดยที่เครื่องหมายที่ปรากฏในสมการ เป็นผลมาจากกฎของเลนซ์

ในกรณีที่วงลวดมีจำนวน  $N$  รอบ (เป็นขดลวด) แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามสมการ

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\phi_B}{dt} \quad (10-2)$$

จากเรื่องฟลักซ์แม่เหล็ก ทราบว่าในกรณีวงลวดเป็นระนาบ  $\phi_B = BA \cos\theta$  สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าจึงเขียนได้เป็น

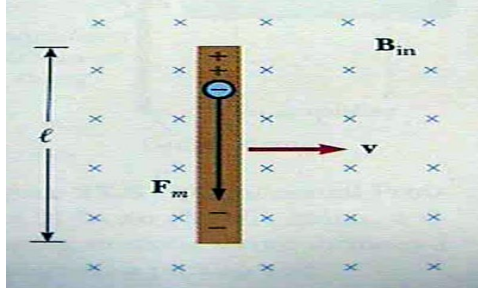
$$\mathcal{E} = -N \frac{d(BA \cos\theta)}{dt} \quad (10-3)$$

นั่นคือ ในการกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก หรือ การเปลี่ยนแปลงพื้นที่วงลวด หรือการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างสนามแม่เหล็กกับวงลวด

**คำถาม 2:** วงแหวนตัวนำมีพื้นที่  $A$  วางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับระนาบวงแหวน สนามแม่เหล็กมีขนาดแปรตามเวลาตามสมการ  $B(t) = B_0 e^{-at}$  จงคำนวณหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา

### 10.4 แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของลวดตัวนำ (Motional Emf)

นอกจากการที่วงลวดตัดผ่านสนามแม่เหล็กแล้วทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า การเคลื่อนลวดตัวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กก็สามารถก่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้เช่นกัน พิจารณาลวดตัวนำที่มีความยาว  $l$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กที่พุ่งเข้าหาหน้ากระดาษ ดังภาพ



ภาพที่ 10-6 การลากลวดตัวนำตัดสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อลวดเคลื่อนที่ อิเล็กตรอนในลวดตัวนำจะเคลื่อนที่ตึงฉากกับสนามแม่เหล็กไปด้วย และจะถูกแรงกระทำ  $F = qvB\sin\theta$  แรงนี้จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ลงมายังด้านล่างของลวดและสะสมอยู่ในบริเวณนั้น ก่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของลวดที่สามารถคำนวณขนาดได้จากกฎของฟาราเดย์ กล่าวคือถ้าลวดเคลื่อนที่ไปได้ระยะ  $x$  ฟลักซ์แม่เหล็กผ่านพื้นที่ปิดสมมติยาว  $x$  กว้าง  $l$  สามารถคำนวณได้จาก

$$\phi_B = BA = Blx \quad (10-4)$$

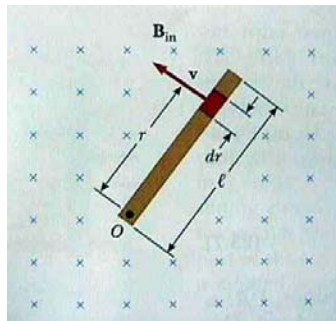
แทนค่าฟลักซ์แม่เหล็ก เพื่อหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} = -\frac{d(Blx)}{dt} = -Bl \frac{dx}{dt} = -Blv \quad (10-5)$$

ถ้าต่อความต้านทานเข้าก็บวงจร กระแสสามารถคำนวณได้จากกฎของโอห์ม โดยที่

$$I = \frac{|\varepsilon|}{R} = \frac{Blv}{R} \quad (10-6)$$

**ตัวอย่างที่ 1 :** ลวดตัวนำเคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบจุด  $O$  ตัดสนามแม่เหล็กดังภาพ จงคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการหมุน



ภาพที่ 10-7 ภาพประกอบตัวอย่างที่ 1

**วิธีทำ :** แบ่งลวดตัวนำเป็นส่วนย่อยขนาด  $dr$  ซึ่งเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าส่วนย่อย  $d\varepsilon$

$$d\varepsilon = Bvdr$$

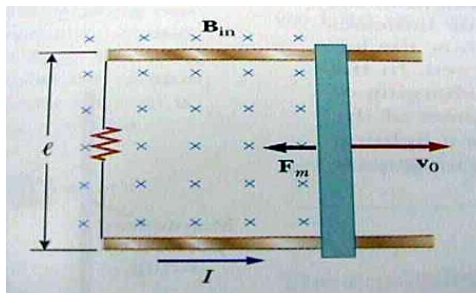
รวมแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งแท่งจากลวดที่ยาว  $l$  และ แทนค่า  $v = \omega r$

อินทิเกรตหาผลลัพท์ได้

$$\varepsilon = \int Bvdr$$

$$\varepsilon = \int_0^l B\omega r dr = B\omega \left[ \frac{r^2}{2} \right]_0^l = \frac{1}{2} B\omega l^2$$

**ตัวอย่างที่ 2 :** มีรางลวดตัวนำสองรางซึ่งไม่มีแรงเสียดทาน มีลวดตัวนำอีก 1 เส้นวางอยู่ในรางลวด ลวดตัวนำนี้ถูกทำให้เคลื่อนที่โดยมีความเร็วเริ่มต้น  $v_0$  ไปทางขวา รางลวดทั้งสองต่อเข้ากับตัวต้านทานเพื่อให้ครบวงจรดังภาพ จงคำนวณความเร็วของลวดซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา



ภาพที่ 10-8 ภาพประกอบตัวอย่างที่ 2

**วิธีทำ :** จาก  $v \times B$  สามารถหาทิศของกระแสเหนี่ยวนำได้ เมื่อมีกระแสไหลก็มีแรงทำกับเส้นลวด  $\parallel \times B$

$$F = -IlB = m \frac{dv}{dt} \quad \text{และ} \quad I = \frac{Blv}{R}$$

แทนค่า  $I$  ในสมการแรง จะได้ความสัมพันธ์

$$-\frac{B^2 l^2 v}{R} = m \frac{dv}{dt}$$

$$\frac{dv}{v} = -\frac{B^2 l^2}{mR} dt$$

$$\int_{v_i}^v \frac{dv}{v} = \int_0^t -\frac{B^2 l^2}{mR} dt$$

$$\ln\left(\frac{v}{v_i}\right) = -\frac{B^2 l^2}{mR} t$$

$$v = v_i e^{-\frac{B^2 l^2}{mR} t}$$

### 10.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและไดนาโม สามารถเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำเคลื่อนที่สัมผัสกับแท่งแม่เหล็กทำให้เกิดไฟฟ้า ตัวอย่างการใช้งาน เช่น กรณีไฟฟ้าพลังน้ำ จะมีน้ำตกลงมาหมุนใบพัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

สมมติ ขดลวดมี  $N$  รอบ และแต่ละรอบมีพื้นที่  $A$  ให้ขดลวดหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุม  $\omega$  รอบแกนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก โดยที่  $\theta$  คือมุมระหว่างสนามแม่เหล็กและเวกเตอร์พื้นที่ของขดลวด ฟลักซ์แม่เหล็กคือ

$$\phi_B = BA \cos \theta = BA \cos \omega t \quad (10-7)$$

แทนค่าฟลักซ์แม่เหล็ก เพื่อหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\phi_B}{dt} = -NAB \frac{d}{dt}(\cos \omega t) = NAB\omega \sin \omega t \quad (10-8)$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดมีค่า

$$\mathcal{E}_{\max} = NAB\omega \quad (10-9)$$



**มอเตอร์**สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล มอเตอร์ประกอบด้วยขดลวดที่มีกระแสไหลผ่าน เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กจะเกิดทอร์ก ทำให้ขดลวดและแกนหมุนได้

### 10.6 กฎของฟาราเดย์ในรูปทั่วไป

กฎของฟาราเดย์กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามารถนำไปขยายความได้ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กจะก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าเสมอ โดยสนามไฟฟ้าจะเกิดได้ทั้งในที่ว่างและในลวดตัวนำ เขียนเป็นรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\mathcal{E} = \oint E \cdot ds = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (10-10)$$

หนังสืออิเล็กทรอนิกส์	
ฟิสิกส์ 1(ภาคกลศาสตร์(	ฟิสิกส์ 1 (ความร้อน)
ฟิสิกส์ 2	กลศาสตร์เวกเตอร์
โลหะวิทยาฟิสิกส์	เอกสารคำสอนฟิสิกส์ 1
ฟิสิกส์ 2 (บรรยาย(	แก้ปัญหาฟิสิกส์ด้วยภาษา C
ฟิสิกส์พิศวง	สอนฟิสิกส์ผ่านทางอินเทอร์เน็ต
ทดสอบออนไลน์	วิดีโอการเรียนการสอน
หน้าแรกในอดีต	แผ่นใสการเรียนการสอน
เอกสารการสอน PDF	กิจกรรมการทดลองทางวิทยาศาสตร์
แบบฝึกหัดออนไลน์	สุดยอดสิ่งประดิษฐ์
การทดลองเสมือน	
บทความพิเศษ	ตารางธาตุไทย1) 2 (Eng)
พจนานุกรมฟิสิกส์	ลับสมองกับปัญหาฟิสิกส์
ธรรมชาติมหัศจรรย์	สูตรพื้นฐานฟิสิกส์
การทดลองมหัศจรรย์	ดาราศาสตร์ราชมงคล
แบบฝึกหัดกลาง	
แบบฝึกหัดโลหะวิทยา	แบบทดสอบ
ความรู้รอบตัวทั่วไป	อะไรเอ่ย ?
ทดสอบ)เกมเศรษฐี(	คติปริศนา
ข้อสอบเอนทรานซ์	เฉลยกลศาสตร์เวกเตอร์
คำศัพท์ประจำสัปดาห์	
ความรู้รอบตัว	
การประดิษฐ์ของโลก	ผู้ได้รับโนเบลสาขาฟิสิกส์
นักวิทยาศาสตร์เทศ	นักวิทยาศาสตร์ไทย
ดาราศาสตร์พิศวง	การทำงานของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์
การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ	

 <b>การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต</b> 	
1. การวัด	2. เวกเตอร์
3. การเคลื่อนที่แบบหนึ่งมิติ	4. การเคลื่อนที่บนระนาบ
5. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน	6. การประยุกต์กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
7. งานและพลังงาน	8. การดลและโมเมนตัม
9. การหมุน	10. สมดุลของวัตถุแข็งเกร็ง
11. การเคลื่อนที่แบบคาบ	12. ความยืดหยุ่น
13. กลศาสตร์ของไหล	14. ปริมาณความร้อน และ กลไกการถ่ายโอนความร้อน
15. กฎข้อที่หนึ่งและสองของเทอร์โมไดนามิก	16. คุณสมบัติเชิงโมเลกุลของสสาร
17. คลื่น	18. การสั่น และคลื่นเสียง
 <b>การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต</b> 	
1. ไฟฟ้าสถิต	2. สนามไฟฟ้า
3. ความกว้างของสายฟ้า	4. ตัวเก็บประจุและการต่อตัวต้านทาน
5. ศักย์ไฟฟ้า	6. กระแสไฟฟ้า
7. สนามแม่เหล็ก	8. การเหนี่ยวนำ
9. ไฟฟ้ากระแสสลับ	10. ทรานซิสเตอร์
11. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเสาอากาศ	12. แสงและการมองเห็น
13. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ	14. กลศาสตร์ควอนตัม
15. โครงสร้างของอะตอม	16. นิวเคลียร์
 <b>การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป ผ่านทางอินเทอร์เน็ต</b> 	
1. จลศาสตร์ (kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

