

# ทบทวนความรู้ฟิสิกส์ สำหรับเตรียมความพร้อมในการเรียนวิชา อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง

สรุปจาก Sears & Zemansky's University Physics, Young and Freedman, 12th Edition, 2006

## ภาค แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetism) และ ทัศนศาสตร์ (Optics)

บทที่ 21 ประจุไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า (Electric Charge and Electric Field)

บทที่ 22 กฎของเกาส์ (Gauss's Law)

บทที่ 23 ศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential)

บทที่ 24 ความจุไฟฟ้าและไดอิเล็กทริก (Capacitance and Dielectrics)

บทที่ 25 กระแสไฟฟ้า ความต้านทาน และ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Current, Resistance, and Electromotive Force)

บทที่ 26 วงจรไฟฟ้ากระแสตรง (Direct-Current Circuits)

บทที่ 27 สนามแม่เหล็กและแรงแม่เหล็ก (Magnetic Field and Magnetic Forces)

บทที่ 28 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (Sources of Magnetic Field)

บทที่ 29 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction)

บทที่ 30 ความเหนี่ยวนำ (Inductance)

บทที่ 31 ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current)

บทที่ 32 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves)

บทที่ 33 ธรรมชาติและการแผ่กระจายของแสง (The Nature and Propagation of Light)

บทที่ 34 ทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต (Geometric Optics)

บทที่ 35 การแทรกสอด (Interference)

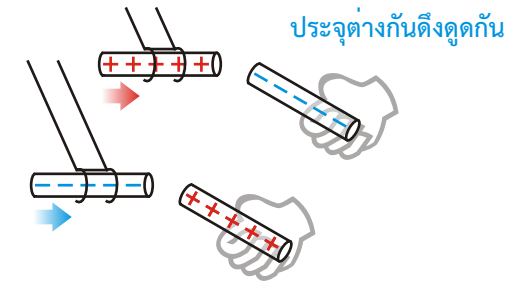
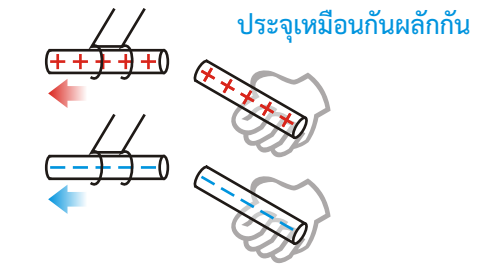
บทที่ 36 การเลี้ยวเบน (Diffraction)

## บทที่ 21 ประจุไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า (Electric Charge and Electric Field)

**ประจุไฟฟ้า ตัวนำ และ ฉนวน:** ปริมาณพื้นฐานในเรื่องไฟฟ้าสถิตคือ ประจุไฟฟ้า ประจุมีสองชนิดคือประจุบวกและประจุลบ ประจุที่มีเครื่องหมายเหมือนกันจะผลักกัน และประจุที่มีเครื่องหมายต่างกันจะดูดกัน ประจุเป็นปริมาณที่ถูกอนุรักษ์ หมายความว่า ประจรรวมในระบบปิดใด ๆ จะมีค่าคงที่เสมอ

สสารโดยทั่วไปจะประกอบด้วย โปรตอน นิวตรอน และ อิเล็กตรอน โปรตอนที่จะมีประจุบวก และนิวตรอนที่เป็นกลาง จะรวมอยู่ที่นิวเคลียสของอะตอม โดยถูกแรงนิวเคลียร์ดึงดูดไว้ ขณะที่อิเล็กตรอนจะอยู่รอบ ๆ นิวเคลียสที่ระยะห่างมาก ๆ เมื่อเทียบกับขนาดนิวเคลียส การปฏิสัมพันธ์กันทางไฟฟ้า เป็นสิ่งหลัก ๆ ที่ทำให้เกิดโครงสร้างอะตอม โมเลกุล และ ของแข็ง

ตัวนำไฟฟ้าคือ สสารที่ยอมให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างง่ายดายในเนื้อสาร ฉนวนเป็น สสารที่ไม่ค่อยยอมให้ประจุเคลื่อนที่ โดยโลหะทั่วไปจะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี และ อโลหะส่วนมาก จะเป็นฉนวน



**กฎของคูลอมบ์:** เป็นกฎพื้นฐานของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างประจุแบบจุด สำหรับประจุ  $q_1$  และ  $q_2$  ที่อยู่ห่างกันที่ระยะ  $r$  ขนาดของแรงระหว่างประจุ

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

ทั้งสองจะแปรผันตรงกับ ผลคูณ  $q_1 q_2$  และ แปรผกผันกับ  $r^2$

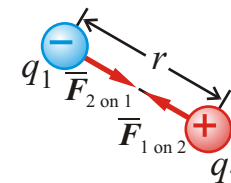
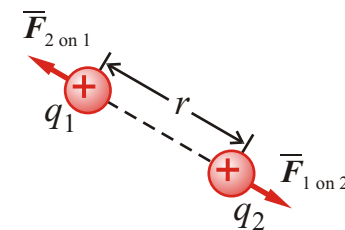
$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.988 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$$

แรงบนประจุทั้งสองจะมีแนวแรงอยู่บนเส้นที่เชื่อมระหว่างประจุ โดย

จะเป็นแรงผลักหาก  $q_1$  และ  $q_2$  มีเครื่องหมายเหมือนกัน และ เป็นแรงดูดถ้ามันมีเครื่องหมายต่างกัน

แรงคู่นี้จะอยู่ในรูปแบบแรงกิริยา-แรงปฏิกิริยา และ สอดคล้องกับกฎข้อที่สามของนิวตัน

ในระบบหน่วย SI หน่วยของ ประจุไฟฟ้าคือ คูลอมบ์ และเขียนย่อเป็น C



หลักการทับซ้อนของแรง บอกว่า เมื่อประจุสองตัวขึ้นไปออกแรงกระทำต่อประจุตัวหนึ่ง แรงรวมบน ประจุนั้นก็จะเป็น ผลรวมแบบเวกเตอร์ของแรงที่เกิดจากประจุแต่ละตัวที่กระทำต่อประจุนั้น

## บทที่ 21 ประจุไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า (Electric Charge and Electric Field)

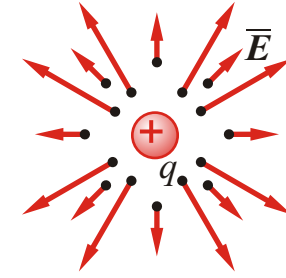
สนามไฟฟ้า:  $\vec{E}$  เป็นปริมาณเวกเตอร์ที่นิยามจากแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุ

โดยแรงนี้คือ แรงที่กระทำบนประจุทดสอบที่วาง ณ จุดใด ๆ และ

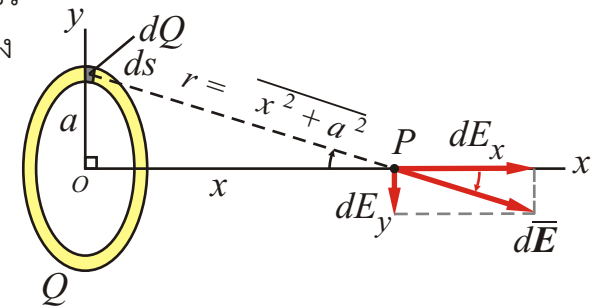
ประจุทดสอบนี้ต้องมีค่าประจุน้อยเพียงพอที่จะไม่รบกวนประจุที่ก่อให้เกิดสนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุแบบจุด จะมีทิศพุ่งออก หรือพุ่งเข้าหาประจุ ในทุกทิศทาง

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0}$$

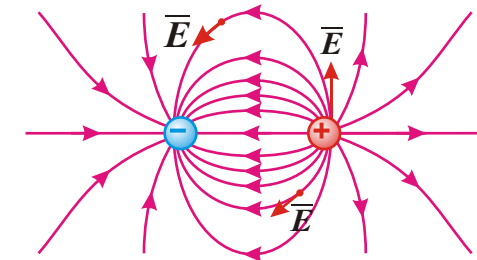
$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$$



การทับซ้อนของสนามไฟฟ้า: บอกว่า สนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุต่าง ๆ จะเป็นผลรวมแบบเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุแต่ละตัว โดยในการคำนวณสนามไฟฟ้าจากประจุที่กระจายอยู่อย่างต่อเนื่องนั้นทำได้โดยการแบ่งเป็นส่วนเล็ก ๆ แล้วคำนวณสนามไฟฟ้าจากแต่ละส่วน และ จากนั้นก็ทำการรวมแบบเวกเตอร์ของสนามในแต่ละส่วนประกอบ ซึ่งโดยทั่วไปทำได้โดยการอินทิเกรต การกระจายของประจุนั้นอาจถูกอธิบายด้วยความหนาแน่นประจุเชิงเส้น ความหนาแน่นประจุบนผิว และ ความหนาแน่นประจุในปริมาตร



เส้นสนามไฟฟ้า: เส้นสนามจะเป็นการนำเสนอสนามไฟฟ้าด้วยรูปภาพ โดยทิศทางของสนามไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ บนเส้นสนามหนึ่ง ก็คือ ทิศของเส้นสัมผัสเส้นสนามนั้น จำนวนของเส้นต่อพื้นที่ (ที่ตั้งฉากกับเส้นแรงนั้น) จะแปรผันโดยตรงกับขนาดของสนามไฟฟ้าที่จุดนั้น



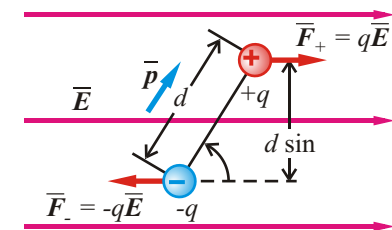
ไดโพลไฟฟ้า: คู่ของประจุที่มีขนาดประจุ  $q$  เท่ากัน แต่มีเครื่องหมายตรงกันข้าม และอยู่ห่างกันด้วยระยะทาง  $d$  โมเมนต์ไดโพลไฟฟ้า  $\vec{p}$  นิยามโดยมีขนาด  $p$  เท่ากับ  $qd$  และทิศทางของ  $\vec{p}$  คือจากประจุลบไปสู่ประจุบวก ไดโพลไฟฟ้าในสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  จะได้รับทอร์ก  $\vec{\tau}$  เท่ากับผลคูณแบบเวกเตอร์ของ  $\vec{p}$  และ  $\vec{E}$

พลังงานศักย์  $U$  สำหรับไดโพลไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับมุมระหว่าง  $\vec{p}$  และ  $\vec{E}$

$$= pE \sin$$

$$= \vec{p} \cdot \vec{E}$$

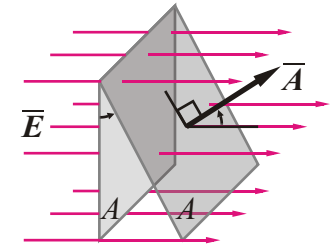
$$U = -\vec{p} \cdot \vec{E}$$



## บทที่ 22 กฎของเกาส์ (Gauss's Law)

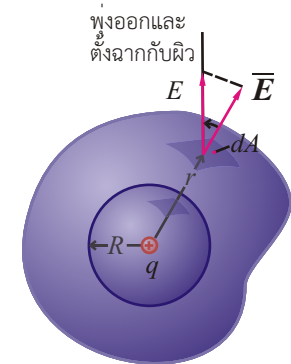
**ฟลักซ์ไฟฟ้า:** ฟลักซ์ไฟฟ้าเป็นตัววัดการไหลของสนามไฟฟ้าผ่านพื้นผิว โดยมีค่าเท่ากับผลคูณของพื้นที่ผิวกับสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกับผิวนั้น โดยการหาปริมาณนี้อาจต้องอินทิเกรตหากแบ่งพิจารณาเป็นพื้นผิวเล็ก ๆ

$$\begin{aligned} \Phi_E &= \int E \cos \theta \, dA \\ &= \int \vec{E} \cdot d\vec{A} \end{aligned}$$



**กฎของเกาส์:** บอกว่าฟลักซ์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านผิวปิดใด ๆ มีค่าเท่ากับค่าคงที่คูณกับประจุรวมในผิวปิด  $Q_{\text{encl}}$  นั้น โดยฟลักซ์ไฟฟ้านี้สามารถเขียนได้ในรูปอินทิกรัลของสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  โดยกฎของเกาส์นี้อาจมองว่า คล้าย ๆ กับกฎของคูลอมบ์ แต่การใช้กฎนี้รวมกับการพิจารณาความสมมาตรของปัญหาแล้ว จะทำให้ปัญหานั้นแก้ได้ง่ายขึ้น

$$\begin{aligned} \Phi_E &= \oint E \cos \theta \, dA \\ &= \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} \\ &= \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0} \end{aligned}$$



เมื่อมีประจุส่วนเกินอยู่หนึ่งบนตัวนำ มันจะกระจายอยู่บนผิว และ  $\vec{E} = 0$  ทุกจุดในเนื้อสาร

บทที่ 22 กฎของเกาส์ (Gauss's Law)

สนามไฟฟ้าจากการกระจายประจุแบบต่าง ๆ ตารางข้างล่างแสดงรูปแบบสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุที่เรียงตัวแบบต่าง ๆ โดยที่  $q$ ,  $Q$ , , และ ในตารางนี้ เป็นขนาดของปริมาณ

การกระจายประจุ	จุดในสนามไฟฟ้า	ขนาดของสนามไฟฟ้า
จุดประจุเดี่ยว $q$	ระยะห่าง $r$ จาก $q$	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$
ประจุ $q$ บนผิวของตัวนำทรงกลมรัศมี $R$	ภายนอกทรงกลม $r > R$	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$
	ภายในทรงกลม $r < R$	$E = 0$
เส้นลวดยาวอนันต์ ที่มีความหนาแน่นประจุต่อหน่วยความยาว	ระยะห่าง $r$ จากเส้นลวด	$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r}$
ตัวนำทรงกระบอกยาวอนันต์รัศมี $R$ ที่มีความหนาแน่นประจุต่อหน่วยความยาว	ภายนอกทรงกระบอก $r > R$	$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r}$
	ภายในทรงกระบอก $r < R$	$E = 0$
ทรงกลมที่เป็นฉนวนรัศมี $R$ และมีประจุ $Q$ กระจายสม่ำเสมอภายในทรงกลม	ภายนอกทรงกลม $r > R$	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$
	ภายในทรงกลม $r < R$	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q r}{R^3}$
แผ่นขนาดอนันต์ที่มีประจุกระจายสม่ำเสมอ และมีประจุต่อหน่วยพื้นที่	จุดใด ๆ	$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$
แผ่นตัวนำที่มีประจุเครื่องหมายตรงกันข้าม และมีประจุต่อหน่วยพื้นที่ $+$ และ $-$	จุดใด ๆ ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง	$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$

## บทที่ 23 ศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential)

**พลังงานศักย์ไฟฟ้า:** แรงไฟฟ้าที่เกิดจากประจุที่หยุดนิ่งเป็นแรงที่อนุรักษ์ งาน  $W$  ที่ทำโดยแรงไฟฟ้าบนอนุภาคที่มีประจุที่เคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าสามารถนำเสนอได้โดยการเปลี่ยนฟังก์ชันพลังงานศักย์  $U$

พลังงานศักย์ไฟฟ้าสำหรับจุดประจุ  $q$  และ  $q_0$  ขึ้นกับระยะห่าง  $r$  ระหว่างประจุทั้งสอง พลังงานศักย์ไฟฟ้าสำหรับประจุ  $q_0$  ตัวหนึ่งจะสามารถนำเสนอได้เป็นผลรวมของผลของประจุ  $q_1, q_2, q_3$  โดยขึ้นกับระยะห่างระหว่างประจุ  $q_0$  กับระยะห่างกับประจุอื่น ๆ

$$W_{a \rightarrow b} = U_a - U_b$$

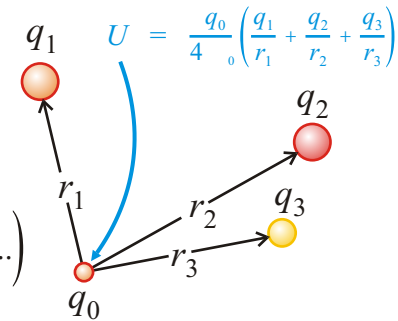
$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r}$$

(จุดประจุสองตัว)

$$U = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} + \dots \right)$$

$$= \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

(ของ  $q_0$  เมื่อมีจุดประจุอื่น ๆ)



**ศักย์ไฟฟ้า:** ศักย์  $V$  คือ พลังงานศักย์ต่อหน่วยประจุ ความต่างศักย์ระหว่างสองจุดใด ๆ เท่ากับงานที่ต้องทำในการย้ายประจุทดสอบขนาดหนึ่งหน่วยระหว่างสองจุดนั้น ศักย์  $V$  เนื่องมาจากการมีประจุสามารถคำนวณได้จากการรวม (ถ้าประจุเป็นจุด) หรือ การอินทิเกรต (ถ้าประจุกระจายอยู่)

ความต่างศักย์ระหว่างสองจุด  $a$  และ  $b$  เรียกว่าศักย์ของ  $a$  เทียบกับ  $b$  และหาได้จากการอินทิเกรตตามเส้นของ สนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  การหาศักย์ไฟฟ้าที่จุดใด ๆ ทำได้โดยหา  $\vec{E}$  แล้วทำการอินทิเกรต

$$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

(เนื่องจากจุดประจุ)

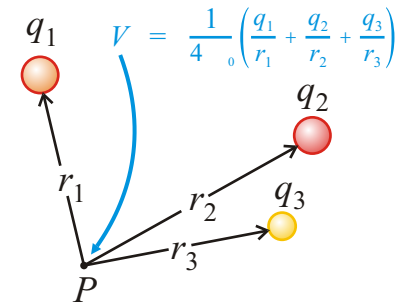
$$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

(เนื่องจากกลุ่มของจุดประจุ)

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r}$$

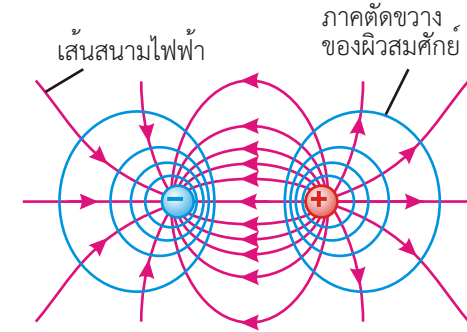
(เนื่องจากการกระจายของประจุ)

$$V_a - V_b = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_a^b E \cos \theta \, dl$$



## บทที่ 23 ศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential)

**ผิวสมศักย์:** คือ ผิวที่มีค่าศักย์เท่ากัน โดยเส้นสนามจะตั้งฉากกับผิวนี้ ที่จุดที่เส้นสนามตัดกับผิว เมื่อประจุทั้งหมดอยู่หนึ่ง ผิวของตัวนำไฟฟ้าจะเป็นผิวสมศักย์ และทุกจุดภายในตัวนำจะมีศักย์เท่ากัน หากตัวนำมีโพรงและไม่มีประจุอยู่ภายใน ทุกส่วนในโพรงจะมีศักย์เท่ากัน และ จะไม่มีประจุที่ผิวในโพรง



**การหาสนามไฟฟ้าจากศักย์ไฟฟ้า:** ถ้าหากเราทราบศักย์ไฟฟ้า  $V$  ที่ตำแหน่งใด ๆ ในระบบพิกัด  $x, y$  และ  $z$  เราจะทราบสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  ณ จุดใด ๆ ได้จากการหาอนุพันธ์ย่อย

$$E_x = -\frac{V}{x} \quad E_y = -\frac{V}{y} \quad E_z = -\frac{V}{z}$$

$$\vec{E} = -\left(\hat{i} \frac{V}{x} + \hat{j} \frac{V}{y} + \hat{k} \frac{V}{z}\right)$$

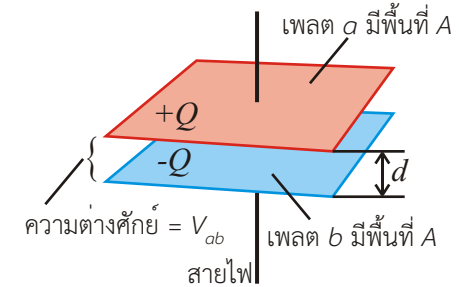
(รูปแบบเวกเตอร์)

## บทที่ 24 ความจุไฟฟ้าและไดอิเล็กทริก (Capacitance and Dielectrics)

**ตัวเก็บประจุ และ ความจุไฟฟ้า:** ตัวเก็บประจุคือตัวนำคู่หนึ่งที่ถูกกั้นกลางด้วยฉนวน เมื่อตัวเก็บประจุถูกประจุไฟ มันจะมีประจุขนาด  $Q$  (ที่มีเครื่องหมายต่างกัน) อยู่บนตัวนำทั้งสอง และจะมีความต่างศักย์  $V_{ab}$  ระหว่างตัวนำทั้งสอง ความจุไฟฟ้า  $C$  นิยามจากอัตราส่วน  $Q$  ต่อ  $V_{ab}$  ในระบบหน่วย SI ค่าความจุไฟฟ้า จะมีหน่วยเป็น ฟารัด (F):  $1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$

$$C = \frac{Q}{V_{ab}}$$

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$



ตัวเก็บประจุแบบเพลตขนานกันประกอบด้วยแผ่นตัวนำ ที่มีพื้นที่  $A$  และ อยู่ห่างกัน  $d$  ถ้าระหว่างเพลตนี้เป็นสุญญากาศ แล้ว ค่าความจุไฟฟ้าจะขึ้นกับ  $A$  และ  $d$  เท่านั้น สำหรับรูปทรงอื่น ๆ ค่าความจุไฟฟ้าจะสามารถหาได้ด้วยนิยาม  $C = Q/V_{ab}$

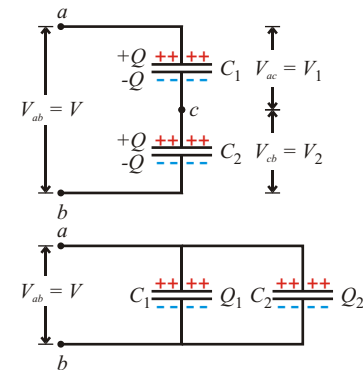
**การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมและขนาน:** เมื่อนำตัวเก็บประจุที่มีความจุไฟฟ้า  $C_1, C_2, C_3, \dots$  มาต่ออนุกรมกันจะได้ ส่วนกลับของค่าความจุสมมูล  $C_{eq}$  เท่ากับผลรวมของส่วนกลับของค่าความจุแต่ละตัว เมื่อนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน ค่าความจุสมมูล  $C_{eq}$  จะเท่ากับผลรวมของค่าความจุแต่ละตัว

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

(ตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน)

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

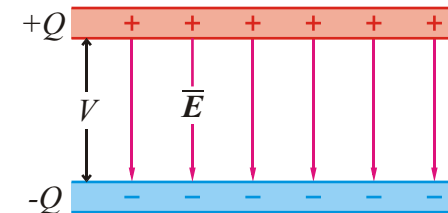
(ตัวเก็บประจุต่อขนานกัน)



**พลังงานในตัวเก็บประจุ:** พลังงาน  $U$  ที่ใช้ในการประจุตัวเก็บประจุ  $C$  ให้มีความต่างศักย์  $V$  และ ประจุ  $Q$  จะเท่ากับพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุ พลังงานนี้อาจถูกมองว่าเป็นพลังงานที่ใช้ให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำ ความหนาแน่นพลังงาน  $u$  (พลังงานต่อปริมาตร) จะแปรผันโดยตรงกับค่ากำลังสองของขนาดของสนามไฟฟ้า

$$U = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV$$

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$





## บทที่ 24 ความจุไฟฟ้าและไดอิเล็กทริก (Capacitance and Dielectrics)

**ไดอิเล็กทริก:** เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกถูกนำมาวางอยู่ระหว่างตัวนำในตัวเก็บประจุ ค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น  $K$  เท่า โดยค่านี้เรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ ปริมาณ  $= K_0$  นี้เรียกว่า ค่าความซาบซึมได้ของสนามไฟฟ้า (permittivity) ของไดอิเล็กทริก สำหรับประจุที่มีขนาดคงที่บนตัวเก็บประจุ ประจุที่ถูกเหนี่ยวนำบนผิวของไดอิเล็กทริกจะลดขนาดสนามไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ระหว่างเพลตด้วยสัดส่วน  $K$  เท่า ประจุที่ผิวจะทำให้เกิดโพลาไรเซชัน ซึ่งก็คือการเรียงตัวประจุในวัสดุไดอิเล็กทริก

ภายใต้สนามที่มีขนาดสูง สารไดอิเล็กทริกจะนำไฟฟ้า ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric breakdown) โดยค่าสนามสูงสุดที่วัสดุสามารถทนได้โดยที่ยังไม่เกิดการนำไฟฟ้านั้น เรียกว่า ความแข็งแรงไดอิเล็กทริก (dielectric strength)

ในไดอิเล็กทริก ความหนาแน่นพลังงานจะมีสูตรเดียวกับความหนาแน่นพลังงานในสุญญากาศ เพียงแต่เปลี่ยน  $\epsilon_0$  เป็น  $\epsilon = K \epsilon_0$

กฎของเกาส์ในวัสดุไดอิเล็กทริก มีรูปแบบเดียวกับ ในสุญญากาศ โดยมีส่วนต่างอยู่สองจุด คือ  $\vec{E}$  จะเปลี่ยนเป็น  $K\vec{E}$  และ  $Q_{\text{encl}}$  จะเปลี่ยนเป็น  $Q_{\text{encl-free}}$  โดยที่  $Q_{\text{encl-free}}$  จะเป็นประจุอิสระที่อยู่ในผิวเกาส์เซียน

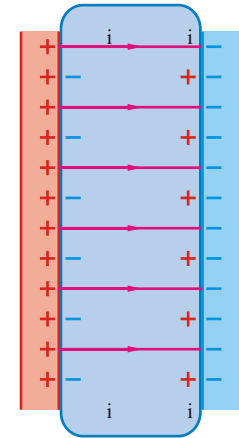
$$C = KC_0 = K \epsilon_0 \frac{A}{d} = \frac{A}{d}$$

(ตัวเก็บประจุแบบเพลตขนานที่บรรจุด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก)

$$u = \frac{1}{2} K \epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} E^2$$

$$\oint K \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{encl-free}}}{\epsilon_0}$$

ไดอิเล็กทริกระหว่างเพลต

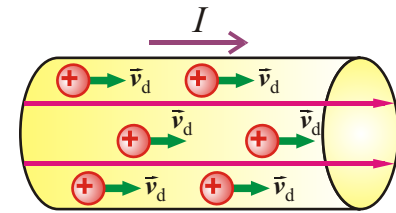


# บทที่ 25 กระแสไฟฟ้า ความต้านทาน และ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Current, Resistance, and Electromotive Force)

**กระแสและความหนาแน่นกระแส:** กระแสไฟฟ้าคือปริมาณประจุที่ไหลผ่านพื้นที่หนึ่ง ต่อหน่วยเวลา ในหน่วย SI กระแสจะมีหน่วยเป็นแอมแปร์ และเท่ากับหนึ่งคูลอมบ์ต่อวินาที ( $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ ) กระแส  $I$  ที่ไหลผ่านพื้นที่  $A$  จะขึ้นกับความหนาแน่น  $n$  และประจุ  $q$  ของประจุพาหะ และ ขึ้นกับความเร็ว-พัดพา  $\vec{v}_d$  ความหนาแน่นกระแสคือกระแสต่อหน่วยพื้นที่ โดยทั่วไปเราจะมองกระแส ว่าเป็นการไหลของประจุบวก ทั้ง ๆ ที่จริง ๆ แล้วประจุพาหะอาจจะ เป็นประจุลบ หรือ ประจุทั้งสองเครื่องหมาย

$$I = \frac{dQ}{dt} = n|q|v_d A$$

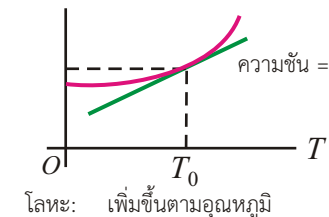
$$\vec{J} = nq\vec{v}_d$$



**สภาพต้านทานไฟฟ้า:** สภาพต้านทานไฟฟ้า ของวัสดุคือสัดส่วนของขนาดของสนามไฟฟ้าต่อความหนาแน่นกระแส ตัวนำไฟฟ้าที่ดี มีค่าสภาพต้านทานต่ำ ฉนวนที่ดี มีค่าสภาพต้านทานสูง สำหรับวัสดุทั่วไป กฎของโอห์ม ที่ว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า จะมีค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับขนาดของสนามไฟฟ้า  $E$  ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และ สำหรับการเปลี่ยนอุณหภูมิน้อย ๆ การเปลี่ยนค่าสภาพต้านทานจะแปรผันตรงกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยที่ คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าสภาพต้านทาน

$$= \frac{E}{J}$$

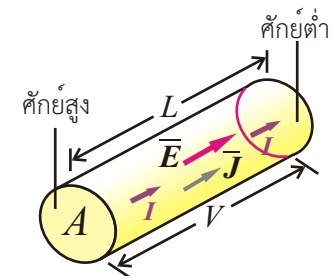
$$(T) = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_0)]$$



**ตัวต้านทาน:** สำหรับวัสดุที่ประพฤติตัวตามกฎของโอห์ม ความต่างศักย์  $V$  ที่คร่อมตัวอย่างวัสดุนี้ จะแปรผันตรงกับกระแสที่ไหลผ่านวัสดุ อัตราส่วน  $V/I = R$  คือค่าความต้านทาน ในหน่วย SI ค่าความต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์ม ( $1 \Omega = 1 \text{ V/A}$ ) ค่าความต้านทานของตัวนำทรงกระบอกจะขึ้นกับค่าสภาพต้านทาน , ความยาว  $L$ , และ พื้นที่หน้าตัด  $A$

$$V = IR$$

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

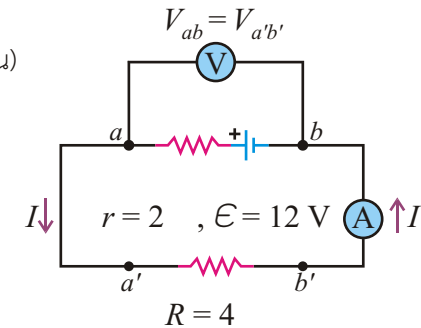


# บทที่ 25 กระแสไฟฟ้า ความต้านทาน และ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Current, Resistance, and Electromotive Force)

**วงจรและแรงเคลื่อนไฟฟ้า:** วงจรหนึ่งจะครบวงจรก็ต่อเมื่อทางเดินกระแสมีลักษณะต่อเนื่อง วงจรที่ครบและนำกระแสจะต้องมีแหล่งจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force, emf)  $\mathcal{E}$  ในระบบหน่วย SI ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ (1 V) แหล่งจ่ายในอุดมคติจะมีความต่างศักย์คงที่ และไม่ขึ้นกับกระแสที่ไหลผ่าน แต่ในแหล่งจ่ายจริง จะมีค่าความต้านทานภายใน  $r$  และค่าความต่างศักย์ที่วัดที่จุดเชื่อมต่อ  $V_{ab}$  จะขึ้นกับกระแส

$$V_{ab} = \mathcal{E} - Ir$$

(แหล่งจ่ายที่มีสภาพต้านทานภายใน)



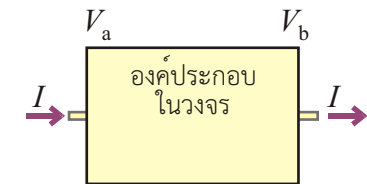
**พลังงานและกำลังในวงจร:** ส่วนประกอบในวงจรที่มีความต่างศักย์คร่อม  $V_a - V_b = V_{ab}$  และ กระแส  $I$  จะนำพลังงานเข้าสู่วงจร ถ้ากระแสมีทิศทางจากจุดที่ศักย์ต่ำไปสู่จุดที่มีศักย์สูงกว่า และ จะนำพลังงานออกจากวงจร ถ้ามีทิศตรงกันข้าม ค่ากำลัง (อัตราการไหลของพลังงาน) จะเท่ากับ ค่าความต่างศักย์คูณกับค่ากระแส ตัวต้านทานจะนำพลังงานไฟฟ้าออกจากวงจรเสมอ

$$P = V_{ab}I$$

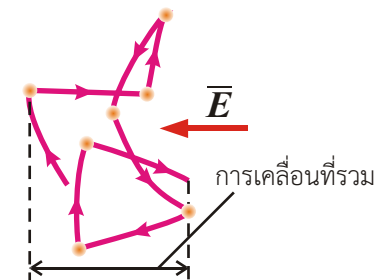
(องค์ประกอบทั่วไปในวงจร)

$$P = V_{ab}I = I^2R = \frac{V_{ab}^2}{R}$$

(กำลังที่เข้าสู่ตัวต้านทาน)



**การนำไฟฟ้าในโลหะ:** ในระดับจุลภาค การนำไฟฟ้าในโลหะคือการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างอิสระในผลึกของโลหะ โดยอิเล็กตรอนนี้อาจชนแกนไอออนในผลึก ในโมเดลหยาบ ๆ แบบดั้งเดิมของการเคลื่อนที่นี้ ค่าสภาพต้านทานของวัสดุจะเกี่ยวโยงกับน้ำหนักอิเล็กตรอน, ประจุ, ความเร็วในการเคลื่อนที่แบบสุ่ม, ความหนาแน่น, และ ระยะเวลาอิสระเฉลี่ยระหว่างการชน



## บทที่ 26 วงจรไฟฟ้ากระแสตรง (Direct-Current Circuits)

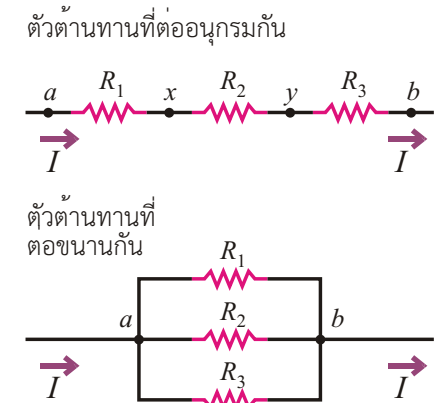
**ตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมและขนาน:** เมื่อตัวต้านทาน  $R_1, R_2, R_3, \dots$  ต่ออนุกรมกัน ค่าความต้านทานสมมูล  $R_{eq}$  จะเป็นผลรวมของความต้านทานของแต่ละตัว กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานทุกตัวจะมีค่าเท่ากันในวงจรที่ต่อแบบอนุกรม เมื่อตัวต้านทานต่อแบบขนานกัน ส่วนกลับของค่าความต้านทานสมมูล  $R_{eq}$  จะเป็นผลรวมของส่วนกลับของความต้านทานของแต่ละตัว โดยตัวต้านทานทุกตัวที่ต่อแบบขนานกันนี้จะมี ความต่างศักย์ระหว่างปลายขั้วทั้งสองเท่ากัน

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

(ตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกัน)

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

(ตัวต้านทานที่ต่อขนานกัน)



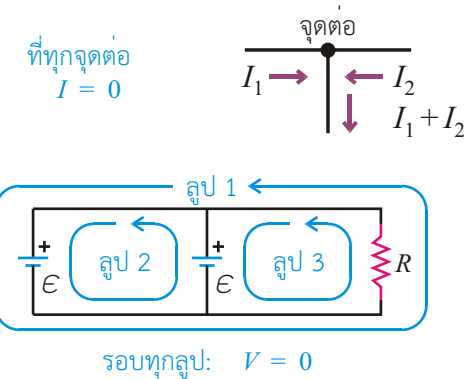
**กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's rules):** กฎจุดต่อของเคอร์ชอฟฟ์ มาจากกฎการอนุรักษ์ประจุ กฎนี้บอกว่า ผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าสู่จุดต่อต้องเป็นศูนย์ กฎลูปของเคอร์ชอฟฟ์มาจากกฎการอนุรักษ์พลังงาน และ กฎการอนุรักษ์ของสนามไฟฟ้า กฎนี้บอกว่า ผลรวมของความต่างศักย์รอบ ๆ ลูปนี้ต้องเป็นศูนย์ การใช้กฎเหล่านี้ต้องพิจารณาเครื่องหมายของ กระแสและศักย์เป็นสำคัญ

$$\sum I = 0$$

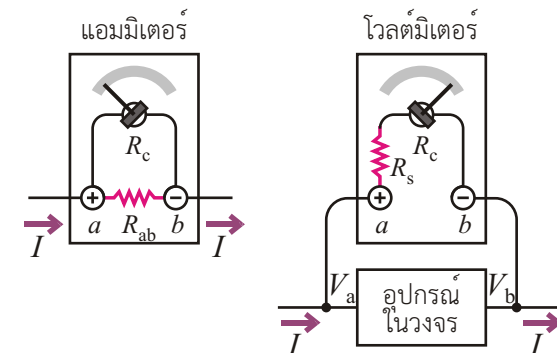
(กฎจุดต่อ)

$$\sum V = 0$$

(กฎลูป)



**เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า:** ในกัลวานอมิเตอร์แบบอาร์ซอนวาล (d'Arsonval galvanometer) การเบนของเข็มจะแปรผันโดยตรงกับกระแสในขดลวด สำหรับกระแสสูง จะมีการต่อตัวต้านทานแบบขนาน เพื่อให้กระแสบางส่วนไหลผ่านมัน และ เรียกเครื่องมือนี้ว่า แอมมิเตอร์ ถ้าขดลวดนี้ต่อแบบอนุกรมกับความต้านทาน ที่ประพจน์ดีตัวตามกฎของโอห์ม มิเตอร์นี้จะสามารถใช้เทียบค่าความต่างศักย์หรือแรงดันได้ และเรียกเครื่องมือนี้ว่า เป็น โวลต์มิเตอร์ แอมมิเตอร์ที่ดี จะมีความต้านทานต่ำมาก โวลต์มิเตอร์ที่ดีจะมีความต้านทานสูงมาก



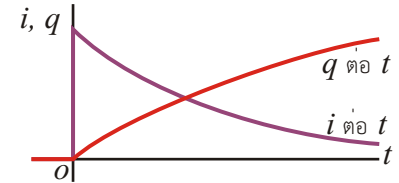
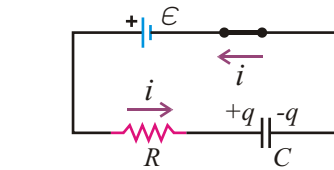
## บทที่ 26 วงจรไฟฟ้ากระแสตรง (Direct-Current Circuits)

**วงจร R-C:** เมื่อตัวเก็บประจุถูกประจุจากแบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทาน กระแสและประจุในตัวเก็บประจุจะมีค่าไม่คงที่ โดยประจุจะเข้าสู่ค่าสุดท้าย ในขณะที่ กระแสจะเข้าสู่ศูนย์ ทั้งกระแสและประจุในวงจรเปลี่ยนแปลงตามลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล ภายหลังระยะเวลา  $= RC$  ประจุจะมีค่ามากกว่า  $1/e$  ของค่าสุดท้าย เราเรียกระยะเวลานี้ว่าค่าคงที่เวลาหรือเวลาผ่อนคลายของวงจร เมื่อตัวเก็บประจุนั้นถูกนำประจุออก ค่ากระแสและประจุจะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล และ มีค่าคงที่เวลาเหมือนกับกับกรณีที่ประจุไฟ

การประจตัวเก็บประจุ

$$q = C\mathcal{E}(1 - e^{-t/RC})$$
$$= Q_f(1 - e^{-t/RC})$$

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-t/RC}$$
$$= I_0 e^{-t/RC}$$

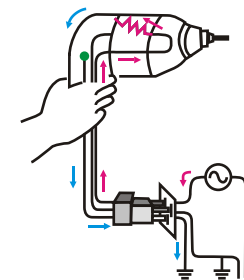


การคายประจุของตัวเก็บประจุ

$$q = Q_0 e^{-t/RC}$$

$$i = \frac{dq}{dt} = -\frac{Q_0}{RC} e^{-t/RC}$$
$$= I_0 e^{-t/RC}$$

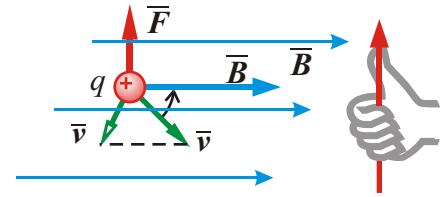
**การเดินสายไฟฟ้าในบ้าน:** ระบบไฟฟ้าในบ้านจะมีอุปกรณ์ไฟฟ้าหลาย ๆ ตัวต่ออยู่แบบขนาน กับสายส่งกำลังที่ประกอบด้วยสายตัวนำคู่หนึ่ง โดยสายหนึ่งจะมีไฟ และ สายอีกเส้นหนึ่งจะเป็นกลาง โดย อาจมีการเพิ่มสายไฟที่เรียกว่า สายดิน เข้าไปด้วยเพื่อความปลอดภัย ปริมาณกระแสสูงสุดที่ใช้ได้นั้น จะถูกกำหนดโดยขนาดของสายและอุณหภูมิสูงสุดที่สายจะทนได้ การป้องกันกระแสเกินและอันตรายจากไฟฟ้านั้นทำได้โดยการใส่ฟิวส์ หรือ เบรกเกอร์ไฟฟ้า



## บทที่ 27 สนามแม่เหล็กและแรงแม่เหล็ก (Magnetic Field and Magnetic Forces)

**แรงแม่เหล็ก:** การปฏิสัมพันธ์กันทางแม่เหล็กเป็นการปฏิสัมพันธ์กันอย่างพื้นฐานระหว่างประจุที่เคลื่อนที่ โดยการปฏิสัมพันธ์นี้จะอธิบายโดยเวกเตอร์ สนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  อนุภาคที่มีประจุ  $q$  ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $\vec{v}$  ในสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  จะได้รับแรง  $\vec{F}$  ที่ตั้งฉากกับทั้ง  $\vec{v}$  และ  $\vec{B}$   
ในหน่วย SI สนามแม่เหล็กนี้มีหน่วยเป็นเทสลา ( $1 \text{ T} = 1 \text{ N/A}\cdot\text{m}$ )

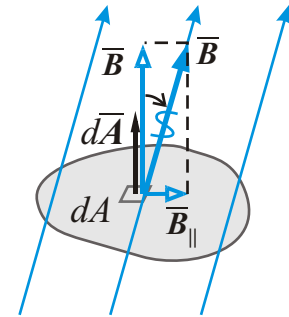
$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$



**สนามแม่เหล็กและฟลักซ์:** สนามแม่เหล็กสามารถถูกแสดงได้ด้วยเส้นสนามแม่เหล็ก แต่ละจุดบนเส้นสนามแม่เหล็กจะมีทิศทางของสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  ในทิศของเส้นสัมผัส โดยหากเส้นสนามนี้ใกล้กันมาก ขนาดของสนามก็จะมีค่ามากด้วย ฟลักซ์แม่เหล็ก  $\Phi_B$  ที่ไหลผ่านพื้นที่หนึ่งจะนิยามในทำนองเดียวกับฟลักซ์ไฟฟ้า ในหน่วย SI ฟลักซ์แม่เหล็กนี้มีหน่วยเป็น เวเบอร์ ( $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T}\cdot\text{m}^2$ ) ฟลักซ์สุทธิที่ผ่านผิวปิดใด ๆ มีค่าเป็นศูนย์ (กฎของเกาส์สำหรับแม่เหล็ก) กฎนี้ส่งผลให้เส้นสนามแม่เหล็กจะบรรจบบนตัวมันเองเสมอ

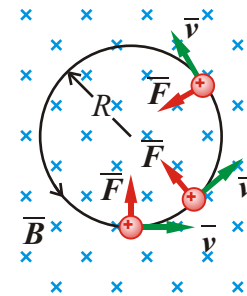
$$\begin{aligned} \Phi_B &= \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \\ &= \int B \cos \theta \, dA \\ &= \int \vec{B} \cdot \vec{dA} \end{aligned}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (\text{ผิวปิด})$$



**การเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก:** แรงแม่เหล็กจะตั้งฉากกับ  $\vec{v}$  เสมอ อนุภาคที่เคลื่อนที่อยู่เนื่องจากสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ภายในสนามที่สม่ำเสมอ อนุภาคจะเคลื่อนที่เป็นวงกลม รัศมี  $R$  หากมันมีความเร็วตั้งต้น  $v$  ที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กขนาด  $B$  โดยการเคลื่อนที่นี้จะขึ้นกับ ขนาดของสนาม  $B$ , มวลของอนุภาค  $m$ , ความเร็ว  $v$ , และ ประจุ  $q$

$$R = \frac{mv}{|q|B}$$



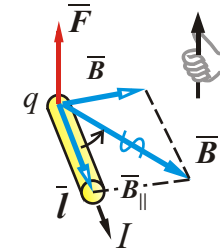
เราสามารถนำ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตัดกัน มาใช้เป็นตัวเลือกความเร็ว แรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กจะหักล้างกันอย่างสมบูรณ์ เมื่อ  $v = E/B$

## บทที่ 27 สนามแม่เหล็กและแรงแม่เหล็ก (Magnetic Field and Magnetic Forces)

**แรงแม่เหล็กที่กระทำบนตัวนำ:** ส่วนของตัวนำที่เป็นเส้นตรงที่นำกระแส / ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ  $\vec{B}$  จะมีแรง  $\vec{F}$  ที่ตั้งฉากกับทั้ง  $\vec{B}$  และ เวกเตอร์  $\vec{l}$  โดยเวกเตอร์  $\vec{l}$  นี้จะมีทิศชี้ไปตามทิศของกระแสและมีขนาดเท่ากับความยาวของส่วนของตัวนำนี้ ความสัมพันธ์ทำนองเดียวกันนี้จะให้แรง  $d\vec{F}$  บนส่วนของตัวนำเล็ก ๆ  $d\vec{l}$  ที่นำกระแส

$$\vec{F} = I \vec{l} \times \vec{B}$$

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$$

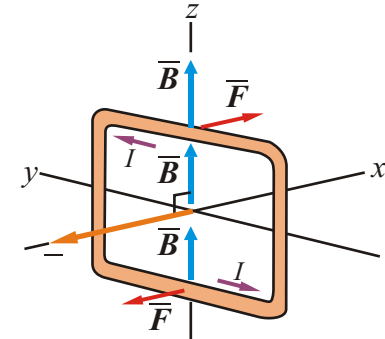


**ทอร์กแม่เหล็ก:** มันจะไม่มีแรงแม่เหล็กสุทธิมากระทำ วงรูปของกระแสที่มีพื้นที่  $A$  และ กระแส  $I$  ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ  $\vec{B}$  แต่ จะมีทอร์กแม่เหล็กที่มีขนาด เวกเตอร์ของทอร์ก - จะสามารถเขียนได้ในรูปของโมเมนต์แม่เหล็ก  $\vec{\mu} = I\vec{A}$  ของวงรูป พลังงานศักย์  $U$  ของโมเมนต์แม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  ก็สามารถเขียนได้ในรูปของโมเมนต์แม่เหล็ก - เช่นกัน โมเมนต์แม่เหล็กของลูปจะขึ้นกับกระแสและพื้นที่เท่านั้น และ ไม่ขึ้นกับรูปร่างของวงรูป

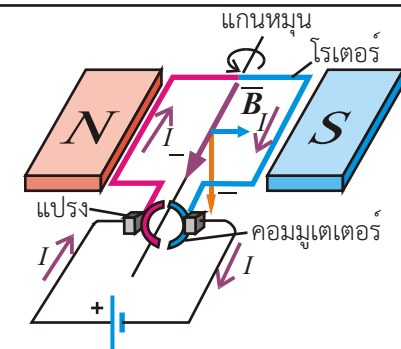
$$\tau = IBA \sin \theta$$

$$\vec{\mu} = I\vec{A}$$

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu B \cos \theta$$

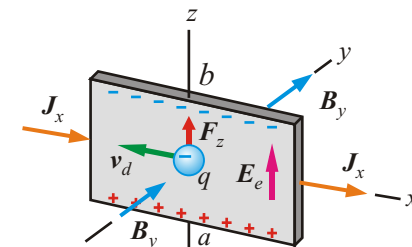


**มอเตอร์ไฟฟ้า:** ในมอเตอร์กระแสตรง สนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดทอร์กบนโรเตอร์ที่มีกระแสไหล การหมุนของโรเตอร์ในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่เรียกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ (back emf) สำหรับมอเตอร์แบบอนุกรม ที่ขดลวดของโรเตอร์ต่อแบบขนานกับขดลวดที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วปลายจะเป็นผลรวมของ แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับและแรงดันที่ตกเนื่องจากความต้านทานภายใน  $Ir$



**ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect):** คือการเกิดความต่างศักย์ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสในตัวนำ เมื่อตัวนำนั้นอยู่ในสนามแม่เหล็ก ศักย์ของฮอลล์นี้จะถูกกำหนดโดยสนามไฟฟ้าที่สมดุลกับแรงแม่เหล็กที่กระทำบนประจุที่กำลังเคลื่อนที่ การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์นี้สามารถนำมาใช้บอกเครื่องหมายของประจุที่เป็นพาหะ และ ความหนาแน่น  $n$  ของประจุ

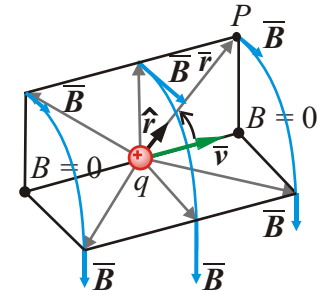
$$nq = \frac{J_x B_y}{E_z}$$



## บทที่ 28 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (Sources of Magnetic Field)

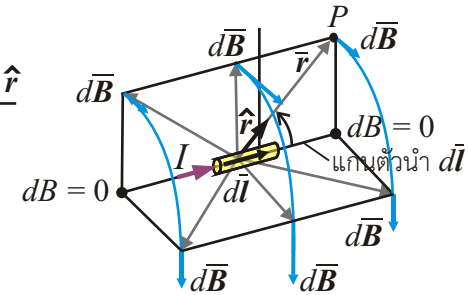
**สนามแม่เหล็กจากประจุที่เคลื่อนที่:** สนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  ที่เกิดจากประจุ  $q$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $\vec{v}$  ขึ้นกับ ระยะห่าง  $r$  ระหว่างจุดประจุที่เป็นแหล่งกำเนิด กับ จุดที่วัดค่าสนาม  $\vec{B}$  ทิศทางของสนาม  $\vec{B}$  นี้จะตั้งฉากกับทั้ง  $\vec{v}$  และ  $\vec{r}$  ซึ่งคือทิศทางเดียวกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยจากจุดประจุถึงจุดที่วัดค่าสนาม หลักการทับซ้อนของสนามแม่เหล็กบอกว่าสนามแม่เหล็กรวม  $\vec{B}$  ที่เกิดจากประจุที่เคลื่อนที่หลาย ๆ ตัว จะเป็นผลรวมแบบเวกเตอร์ของสนามที่เกิดจากแต่ละจุดประจุ

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \vec{v} \times \hat{r}}{r^2}$$



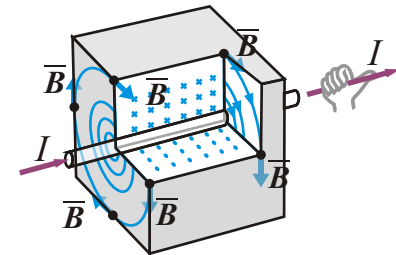
**สนามแม่เหล็กจากตัวนำที่นำกระแส:** กฎของบีโอตต์ และ ซาวาร์ต (Bio-Savart law) บอกว่า จะมี สนามแม่เหล็ก  $d\vec{B}$  ที่เกิดจากส่วนของตัวนำ  $d\vec{l}$  ที่นำกระแส  $I$  โดยสนาม  $d\vec{B}$  นี้จะตั้งฉากกับทั้ง  $d\vec{l}$  และ  $\vec{r}$  ซึ่งคือทิศทางเดียวกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยจากส่วนของตัวนำถึงจุดที่วัดค่าสนาม โดยสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  ที่เกิดจากตัวนำที่นำกระแสนี้ จะเป็นอินทิกรัลของ  $d\vec{B}$  บนความยาวของตัวนำที่พิจารณา

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$



**สนามแม่เหล็กจากเส้นตัวนำที่นำกระแส:** สนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  ที่ระยะ  $r$  จากตัวนำที่เป็นเส้นตรงยาวและนำกระแส  $I$  จะแปรผกผันกับ  $r$  เส้นสนามแม่เหล็กจะเป็นวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกับจุดศูนย์กลางของสายตัวนำ โดยทิศทางจะสอดคล้องกับกฎมือขวา

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2r} \hat{\phi}$$

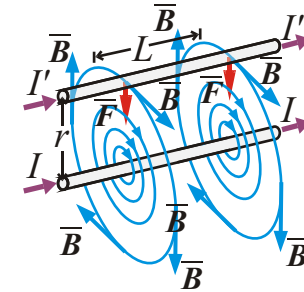




## บทที่ 28 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (Sources of Magnetic Field)

**แรงแม่เหล็กระหว่างตัวนำที่นำกระแส:** ตัวนำยาว ๆ ที่วางขนานกัน และนำกระแส จะมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ถ้าหากตัวนำนี้มีกระแสไหลในทิศทางเดียวกัน และ จะมีแรงผลักกัน หากกระแสไหลในทิศตรงกันข้าม แรงแม่เหล็กต่อหน่วยความยาวระหว่างตัวนำนี้จะขึ้นกับกระแสที่ไหล  $I$  และ  $I'$  และ ระยะห่างระหว่างกัน  $r$  นิยามของแอมแปร์ขึ้นกับความสัมพันธ์นี้

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I I'}{2 r}$$



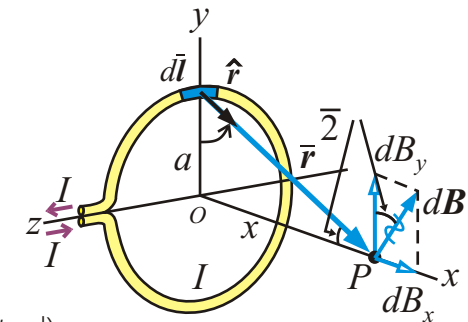
**แรงแม่เหล็กจากกระแสที่ไหลวนลูป:** เราสามารถใช้กฎของบีโอดต์ และ ซาวาร์ต ในการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากตัวนำที่มีกระแสไหลวนเป็นลูปวงกลมที่มีรัศมี  $a$  และ กระแส  $I$  สนามนี้จะขึ้นกับระยะทาง  $x$  ระหว่างจุดกึ่งกลางลูปบนแกนของมันไปยังจุดที่ต้องการทราบค่าสนาม ถ้าหากมี  $N$  ลูป ค่าสนามนี้จะเพิ่มขึ้น  $N$  เท่า ที่จุดกึ่งกลางของลูป  $x = 0$

$$B_x = \frac{\mu_0 I a^2}{2(x^2 + a^2)^{3/2}}$$

(ลูปวงกลม)

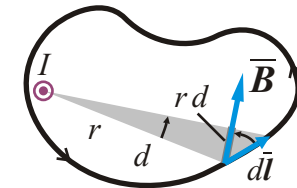
$$B_x = \frac{\mu_0 N I}{2a}$$

(ที่จุดกึ่งกลางลูปวงกลม  $N$  ลูป)



**กฎของแอมแปร์:** บอกว่า อินทิกรัลตามเส้นของสนามแม่เหล็ก  $B$  รอบ ๆ ทางเดินปิดใด ๆ จะเท่ากับ  $\mu_0$  คูณกับค่ากระแสรวมที่ไหลผ่านพื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยทางเดินปิดนั้น เครื่องหมายของกระแสนั้นกำหนดได้จากกฎมือขวา

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{encl}}$$

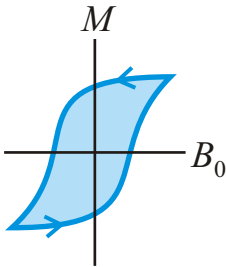


บทที่ 28 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (Sources of Magnetic Field)

สนามแม่เหล็กจากการนำกระแสในตัวนำแบบต่าง ๆ: ในแต่ละกรณีตัวนำนำกระแส /

การกระจายกระแส	จุดในสนามแม่เหล็ก	ขนาดของสนามแม่เหล็ก
ตัวนำเส้นตรงยาว	ระยะห่าง $r$ จากตัวนำ	$B = \frac{\mu_0 I}{2 r}$
ลูปวงกลมรัศมี $a$	บนแกนของลูป	$B = \frac{\mu_0 I a^2}{2(x^2 + a^2)^{3/2}}$
	จุดกึ่งกลางของลูป	$B = \frac{\mu_0 I}{2a}$ (สำหรับ $N$ ลูป จะคูณด้วย $N$ )
ตัวนำทรงกระบอกยาวที่มีรัศมี $R$	ภายในตัวนำ $r < R$	$B = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{r}{R^2}$
	ภายนอกตัวนำ $r > R$	$B = \frac{\mu_0 I}{2 r}$
ขดลวดโซเลนอยด์ยาว ที่มีขดลวดจำนวน $n$ รอบต่อความยาวที่ใกล้ ๆ จุดกึ่งกลาง	ภายในโซเลนอยด์ ใกล้ ๆ จุดกึ่งกลาง	$B = \mu_0 n I$
	ภายนอกโซลินอยด์	$B$
ขดลวดโซเลนอยด์ที่พันเป็นทอรรอยด์ จำนวน $N$ รอบ	ภายในโซเลนอยด์ ที่ระยะ $r$ จากแกนสมมาตร	$B = \frac{\mu_0 N I}{2 r}$
	ภายนอกโซเลนอยด์	$B$

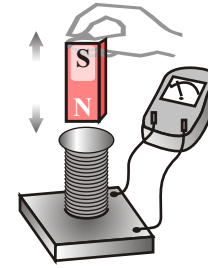
**วัสดุแม่เหล็ก:** ในวัสดุแม่เหล็ก การที่มันมีอำนาจแม่เหล็ก (magnetization) คือการที่มันสามารถทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  เพิ่มเติมได้ สำหรับวัสดุ แม่เหล็กแบบพารา (paramagnetic) และ แม่เหล็กแบบไดอา (diamagnetic) เราจะแทน  $\mu_0$  ด้วย  $\mu = K_m \mu_0$  โดย  $K_m$  คือค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ (permeability) ของวัสดุแม่เหล็ก และ  $K_m$  คือค่าการซึมผ่านสัมพัทธ์ ค่าสภาพรับไว้ได้ของการเป็นแม่เหล็ก (magnetic susceptibility) คือ  $\chi_m$  จะนิยามโดย  $\chi_m = K_m - 1$  สำหรับค่าสภาพรับไว้ได้นี้จะมีค่าบวกน้อย ๆ สำหรับวัสดุแม่เหล็กพารา และ เป็นลบน้อย ๆ สำหรับวัสดุแม่เหล็กไดอา สำหรับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร ค่า  $K_m$  จะมีค่ามากกว่าหนึ่งมาก ๆ และ ไม่คงที่ วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรบางชนิดเป็นแม่เหล็กถาวร ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถคงอำนาจแม่เหล็กอยู่หลังจากนำสนามแม่เหล็กภายนอกออก



## บทที่ 29 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction)

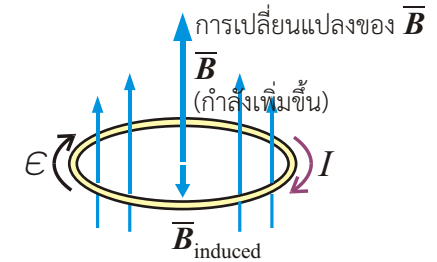
**กฎของฟาราเดย์:** บอกว่า แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในลูปปิด จะเท่ากับ ค่าลบของ อัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านลูปนั้นตามเวลา โดยความสัมพันธ์นี้จะใช้ได้ กลับทั้งจากกรณีที่มีการเปลี่ยนของสนามแม่เหล็กหรือการเคลื่อนที่ของลูป หรือทั้งสองอย่าง

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$



การเคลื่อนที่ของแม่เหล็กจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่ไหลผ่านขดลวด และเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในขดลวด

**กฎของเลนซ์:** บอกว่า กระแสเหนี่ยวนำหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะพยายามต่อต้านหรือทำลายการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่ทำให้เกิดมัน กฎของเลนซ์นี้สามารถแสดงได้จากกฎของฟาราเดย์ และสามารถนำไปใช้ได้ง่าย



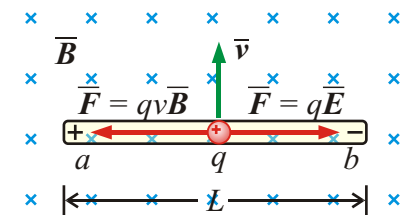
**แรงเคลื่อนไฟฟ้าเคลื่อนที่ (Motional emf):** ถ้าตัวนำเคลื่อนที่ใน สนามแม่เหล็ก จะเกิดการเหนี่ยวนำค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเคลื่อนที่

$$\mathcal{E} = vBL$$

(ตัวนำยาว  $L$  ที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  โดยที่  $\vec{L}$  และ  $\vec{v}$  ตั้งฉากกับ  $\vec{B}$  และตั้งฉากซึ่งกันและกัน)

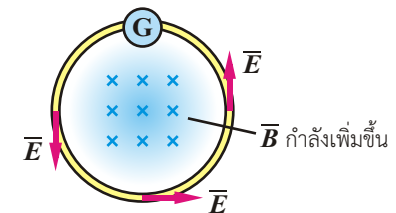
$$\mathcal{E} = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

(บางส่วนของหรือทุกส่วนของลูปปิดเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$ )



**สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ:** เมื่อมีการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กบนตัวนำที่อยู่นิ่ง ก็จะมีสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $\vec{E}$  ที่มีได้มาจากสนามไฟฟ้าสถิตย์ สนามไฟฟ้านี้จะไม่อนุรักษ์และไม่สามารถนำไปเกี่ยวข้องกับศักย์ไฟฟ้าได้

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$



## บทที่ 29 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction)

**กระแสจัดและสมการของแมกซ์เวลล์:** สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะทำให้เกิดกระแสจัด (displacement current)  $i_D$  ที่จะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กในลักษณะเดียวกับกระแสในตัวนำ ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กและ แหล่งกำเนิดสามารถเขียนได้เป็นสี่สมการ ที่เรียกว่า สมการของแมกซ์เวลล์ โดยสมการทั้งหมดจะก่อกำเนิดความสัมพันธ์ขั้นพื้นฐานของสนาม  $\vec{E}$  และ  $\vec{B}$  กับแหล่งกำเนิด

$$i_D = \frac{d}{dt} \epsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

(กระแสจัด)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (i_C + i_D)_{\text{encl}}$$

(กฎของแอมแปร์สำหรับสนามไฟฟ้า)

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \oint \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

(กฎของเฟรเดอริกสำหรับสนามแม่เหล็ก)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left( i_C + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} \right)_{\text{encl}}$$

(กฎของแอมแปร์ที่พิจารณากระแสจัดด้วย)

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \oint \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

(กฎของฟาราเดย์)

## บทที่ 30 ความเหนี่ยวนำ (Inductance)

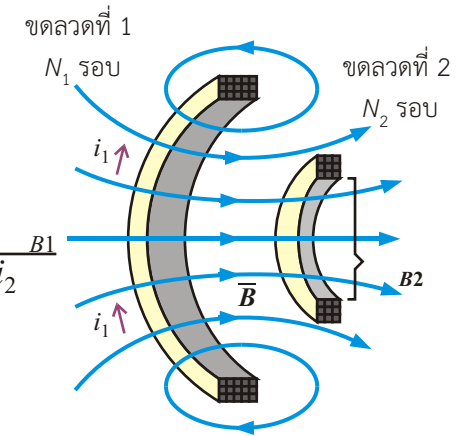
**ความเหนี่ยวนำร่วมกัน:** เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแส  $i_1$  ในวงจรที่ 1 จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กในวงจรที่ 2 แรงเคลื่อนไฟฟ้า  $\mathcal{E}_2$  จะถูกเหนี่ยวนำในวงจรที่ 2 ในทำนองเดียวกัน หากมีการเปลี่ยนแปลงกระแส  $i_2$  ในวงจรที่ 2 จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กในวงจรที่ 1 แรงเคลื่อนไฟฟ้า  $\mathcal{E}_1$  จะถูกเหนี่ยวนำในวงจรที่ 1 ค่าความเหนี่ยวนำร่วมกัน  $M$  จะขึ้นกับลักษณะรูปร่างของขดลวดทั้งสองที่มีจำนวนรอบ  $N_1$  และ  $N_2$  โดยเราสามารถเขียน  $M$  ได้ในเทอมของฟลักซ์แม่เหล็กเฉลี่ย  $B_2$  ที่ผ่านขดลวดที่ 2 ที่เกิดจากกระแส  $i_1$  ในขดลวดที่ 1 หรือในเทอมของฟลักซ์แม่เหล็กเฉลี่ย  $B_1$  ที่ผ่านขดลวดที่ 1 ที่เกิดจากกระแส  $i_2$  ในขดลวดที่ 2 ในหน่วย SI หน่วยของความเหนี่ยวนำร่วมคือ เฮนรี และย่อว่า H

$$\mathcal{E}_2 = M \frac{di_1}{dt}$$

และ

$$\mathcal{E}_1 = M \frac{di_2}{dt}$$

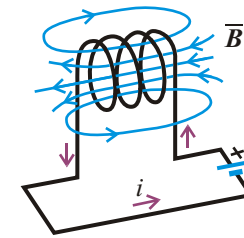
$$M = \frac{N_2 B_2}{i_1} = \frac{N_1 B_1}{i_2}$$



**ความเหนี่ยวนำภายใน:** การเปลี่ยนแปลงกระแส  $i$  ในวงจรใด ๆ จะก่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายใน  $\mathcal{E}$  ความเหนี่ยวนำ (หรือความเหนี่ยวนำภายใน)  $L$  จะขึ้นกับลักษณะรูปร่างของวงจรและวัสดุรอบ ๆ มัน ความเหนี่ยวนำของขดลวดจำนวน  $N$  รอบจะสัมพันธ์กับค่าฟลักซ์เฉลี่ย  $B$  ที่ผ่านขดลวด ที่เกิดจากกระแส  $i$  ในขดลวดนั้น ตัวเหนี่ยวนำคืออุปกรณ์ในวงจรที่จะมีขดลวดเป็นส่วนประกอบ และ มีค่าความเหนี่ยวนำสูง

$$\mathcal{E} = L \frac{di}{dt}$$

$$L = \frac{N}{i} B$$



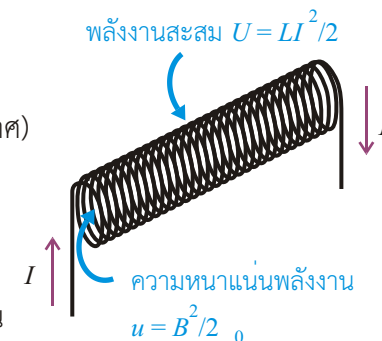
**พลังงานในสนามแม่เหล็ก:** ตัวเหนี่ยวนำที่มีความเหนี่ยวนำ  $L$  และนำกระแส  $I$  จะมีพลังงาน  $U$  ที่เชื่อมโยงกับสนามแม่เหล็กในตัวเหนี่ยวนำ ความหนาแน่นของพลังงานในสนามแม่เหล็ก  $u$  (พลังงานต่อหน่วยปริมาตร) จะแปรผันตรงกับขนาดของสนามแม่เหล็กยกกำลังสอง

$$U = \frac{1}{2} LI^2$$

$$u = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (\text{ในสุญญากาศ})$$

$$u = \frac{B^2}{2}$$

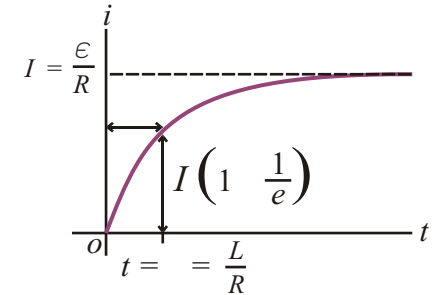
(ในวัสดุที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ )



## บทที่ 30 ความเหนี่ยวนำ (Inductance)

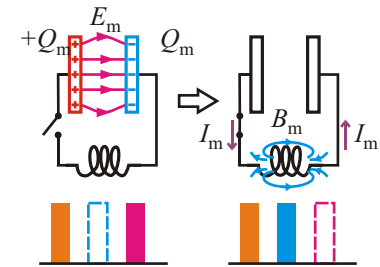
**วงจร R-L:** ในวงจรที่มีตัวต้านทาน  $R$ , ตัวเหนี่ยวนำ  $L$ , และ แหล่งกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า การเปลี่ยนของกระแสจะมีลักษณะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ค่าคงที่เวลา คือเวลาที่ต้องการ สำหรับการเปลี่ยนกระแสไปสู่ค่าที่ต่างจากค่าสุดท้ายไม่เกิน  $1/e$  ของค่าสุดท้าย

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



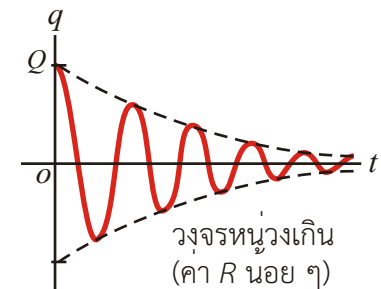
**วงจร L-C:** วงจรที่มีตัวเหนี่ยวนำ  $L$  และ ตัวเก็บประจุ  $C$  จะมีการแกว่งกวัดทางไฟฟ้าที่ความถี่เชิงมุม ที่ขึ้นกับ  $L$  และ  $C$  วงจรดังกล่าวจะมีความเหมือนกับตัวแกว่งกวัดทางกลแบบฮาร์มอนิก โดยความเหนี่ยวนำ  $L$  จะเหมือนกับมวล  $m$  ส่วนกลับของความจุไฟฟ้า  $1/C$  จะเหมือนกับค่าคงที่แรง  $k$  ประจุ  $q$  จะเหมือนกับค่าการขจัด  $x$  และ กระแส  $i$  จะเหมือนกับความเร็ว  $v_x$

$$= \sqrt{\frac{1}{LC}}$$



**วงจรอนุกรม L-R-C:** วงจรที่มี ความเหนี่ยวนำ ความต้านทาน และ ความจุไฟฟ้าจะมีการแกว่งกวัดทางไฟฟ้าแบบหน่วง (damped oscillation) หากมีความต้านทานต่ำเพียงพอความถี่ ' ของการแกว่งกวัดแบบหน่วงจะขึ้นกับค่าของ  $L$ ,  $R$ , และ  $C$  เมื่อค่า  $R$  เพิ่มขึ้น การหน่วงก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ถ้า  $R$  มีค่ามากกว่าค่าหนึ่ง จะเกิดลักษณะหน่วงเกิน (overdamped) และจะไม่แกว่งกวัด การข้ามผ่านระหว่างแกว่งกวัดแบบหน่วงและแบบหน่วงเกินจะเกิดเมื่อ  $R^2 = 4L/C$  และเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขนี้ การแกว่งกวัดจะเป็นแบบหน่วงวิกฤต (critical damped)

$$' = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L}}$$



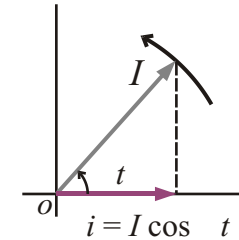
## บทที่ 31 ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current)

**เฟสเซอร์ และ ไฟฟ้ากระแสสลับ:** เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสลับ หรือ แหล่งกำเนิดกระแสสลับ สร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแบบคลื่นรูปไซน์ แรงดันหรือกระแสแบบคลื่นรูปไซน์ สามารถถูกแสดงได้ด้วยเฟสเซอร์ ซึ่งคือ เวกเตอร์ที่หมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ เท่ากับค่าความเร็วเชิงมุมของคลื่นรูปไซน์นั้น ขนาดความยาวภาพฉายบนแกนนอนที่เวลาใด ๆ คือ ค่าของปริมาณนั้น ณ ขณะนั้น

$$I_{\text{rav}} = \frac{2}{\pi} I = 0.637 I$$

$$I_{\text{rms}} = \frac{I}{\sqrt{2}}$$

$$V_{\text{rms}} = \frac{V}{\sqrt{2}}$$

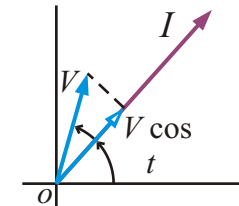


สำหรับกระแสไฟฟ้าแบบคลื่นรูปไซน์ ค่าเฉลี่ยและค่า rms (รากที่สองของค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง) ของกระแส จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของกระแส / ในทำนองเดียวกันกับค่า rms ของแรงดันรูปไซน์ก็จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของแรงดัน

**แรงดัน กระแส และ มุมเฟส:** โดยทั่วไปค่าแรงดัน ณ ขณะใด ๆ ระหว่างจุดสองจุดในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับจะมีเฟสต่างกันกับกระแสที่ผ่านจุดนั้น ปริมาณ จะเรียกว่ามุมเฟสของแรงดัน เทียบกับ กระแส

$$i = I \cos t$$

$$v = V \cos ( t + \phi )$$

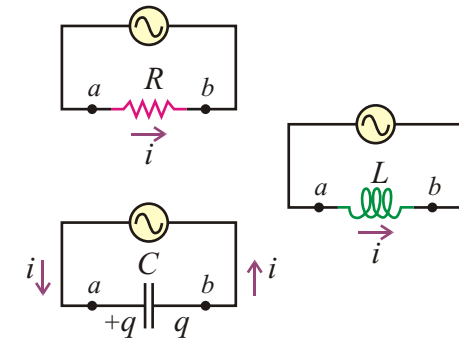


**ความต้านทานและรีแอคแทนซ์:** แรงดันที่ตกคร่อม  $R$  จะมีเฟสตรงกับกระแส แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ  $L$  จะมีเฟสนำกระแสอยู่  $90^\circ$  ( $= +90^\circ$ ) ขณะที่แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C$  จะมีเฟสตามหลังกระแสอยู่  $90^\circ$  ( $= -90^\circ$ ) ค่าแรงดันที่คร่อมอุปกรณ์แต่ละตัวจะเป็นสัดส่วนกับขนาดกระแส / ค่ารีแอคแทนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ  $X_L = \omega L$  และ ค่ารีแอคแทนซ์ของตัวเก็บประจุ  $X_C = 1 / \omega C$

$$V_R = IR$$

$$V_L = IX_L$$

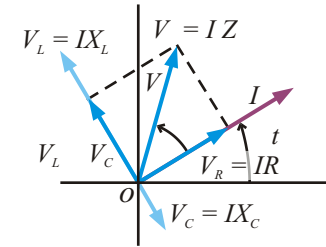
$$V_C = IX_C$$



## บทที่ 31 ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current)

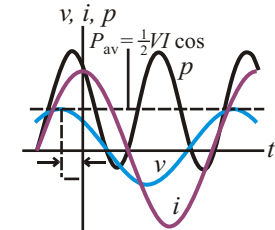
**อิมพีแดนซ์ และ วงจร  $L$ - $R$ - $C$  ที่ต่อแบบอนุกรม:** โดยทั่วไปในวงจรกระแสสลับ ค่าแรงดันและ กระแสจะสัมพันธ์กันด้วยค่าอิมพีแดนซ์  $Z$  ในวงจร  $L$ - $R$ - $C$  ที่ต่อกันแบบอนุกรม ค่าของ  $L$ ,  $R$ ,  $C$ , และ ค่าความถี่เชิงมุม จะกำหนดอิมพีแดนซ์ และมุมเฟส ของแรงดันเทียบกับกระแส

$$\begin{aligned} V &= IZ \\ Z &= \frac{R^2 + (X_L - X_C)^2}{R^2 + [L(1/C)]^2} \\ \tan &= \frac{L}{R} \cdot \frac{1}{C} \end{aligned}$$



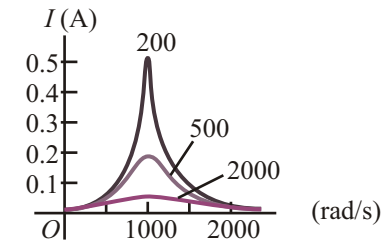
**กำลังงานในวงจรกระแสสลับ:** ค่าเฉลี่ยกำลังงานขาเข้า  $P_{av}$  สู่วงจรไฟฟ้ากระแสสลับจะขึ้นกับค่าขนาดแรงดันและกระแส (หรือค่า rms ของมัน) และมุมเฟส ของแรงดันเทียบกับกระแส ปริมาณ  $\cos$  เรียกว่า แฟกเตอร์กำลัง (power factor)

$$\begin{aligned} P_{av} &= \frac{1}{2}VI \cos \\ &= V_{rms} I_{rms} \cos \end{aligned}$$



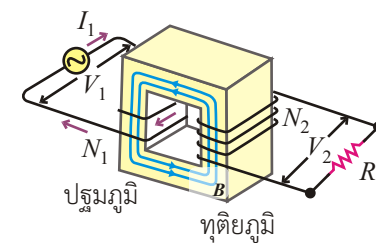
**เรโซแนนซ์ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ:** ในวงจร  $L$ - $R$ - $C$  ที่ต่อแบบอนุกรม กระแส จะมีค่าสูงสุดและอิมพีแดนซ์จะมีค่าต่ำที่สุดที่ความถี่เชิงมุมเท่ากับค่าความถี่เชิงมุม เรโซแนนซ์ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเรโซแนนซ์ (resonance) ที่จุดเรโซแนนซ์ นี้ ค่าแรงดันและกระแส จะมีเฟสตรงกัน และ อิมพีแดนซ์  $Z$  จะเท่ากับค่าความต้านทาน  $R$

$$\omega = \frac{1}{LC}$$



**หม้อแปลงไฟฟ้า:** ใช้สำหรับแปลงระดับแรงดันและกระแสในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ หม้อแปลงในอุดมคติจะไม่มี การสูญเสียพลังงาน ถ้าขดลวดปฐมภูมิมีจำนวนขดลวด  $N_1$  และขดลวดทุติยภูมิมีจำนวนขดลวด  $N_2$  สัดส่วนของขนาด (หรือ ค่า rms) ของแรงดันทั้งสองจะขึ้นกับสัดส่วนของจำนวนขดลวด ผลคูณของขนาด (หรือ ค่า rms) ของแรงดันและกระแส ในขดลวดทั้งสอง จะเท่ากัน

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{V_1} &= \frac{N_2}{N_1} \\ V_1 I_1 &= V_2 I_2 \end{aligned}$$





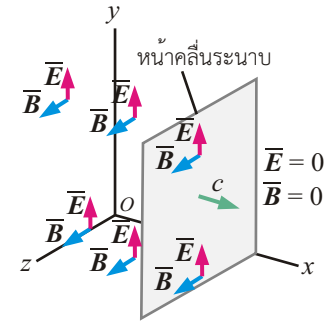
## บทที่ 32 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves)

**สมการแมกเวลล์ และ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า:** สมการแมกเวลล์ทำนายการมีอยู่จริงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกไปในสุญญากาศที่ความเร็วแสง  $c$  สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความถี่จากอย่างน้อย 1 ถึง  $10^{24}$  Hz และ มีความยาวคลื่นช่วงกว้างมาก แสงที่ตามองเห็นจะมีความยาวคลื่น 400 ถึง 700 nm ซึ่งเป็นเพียงช่วงแคบ ๆ ในสเปกตรัม ในคลื่นระนาบ  $\vec{E}$  และ  $\vec{B}$  จะสม่ำเสมอในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น กฎของฟาราเดย์และกฎของแอมแปร์จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ  $\vec{E}$  และ  $\vec{B}$  และเพื่อให้ความสัมพันธ์นี้เป็นจริง  $c$  จะเขียนได้ในเทอมของ  $\epsilon_0$  และ  $\mu_0$  คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง สนามของ  $\vec{E}$  และ  $\vec{B}$  จะตั้งฉากกับทิศทางการแผ่อกและตั้งฉากซึ่งกันและกัน ทิศทางการแผ่อกคือทิศของ  $\vec{E} \times \vec{B}$

$$E = cB$$

$$B = \frac{1}{c} E$$

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

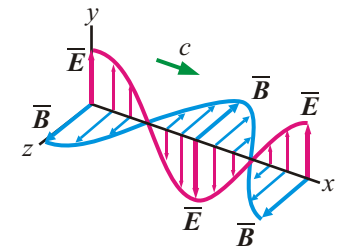


**คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบคลื่นรูปไซน์:** คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นคลื่นระนาบแบบคลื่นรูปไซน์ ที่เคลื่อนที่ในทิศทางตามแกน  $+x$  ในสุญญากาศ จะสามารถเขียนได้ในรูปของฟังก์ชันไซน์

$$\vec{E}(x, t) = \hat{j} E_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

$$\vec{B}(x, t) = \hat{k} B_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

$$E_{\max} = c B_{\max}$$



**คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสสาร:** เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ในวัสดุไดอิเล็กทริก ความเร็วคลื่น  $v$  จะมีค่าน้อยกว่าความเร็วแสงในสุญญากาศ  $c$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon K}} = \frac{1}{\epsilon_0 K} \frac{1}{\sqrt{\mu_0}}$$

$$= \frac{c}{K}$$

## บทที่ 32 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves)

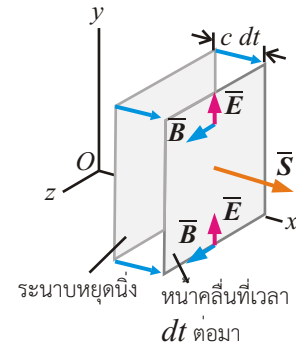
พลังงานและโมเมนตัมในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า: อัตราการไหลของพลังงาน (พลังงานต่อหน่วยพื้นที่) ในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศจะแสดงด้วยพอยน์ติงเวกเตอร์ (Poynting vector)  $\vec{S}$  ขนาดของค่าเฉลี่ยตามเวลาของเวกเตอร์นี้คือค่าความเข้ม / ของคลื่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะนำพาโมเมนตัมด้วย เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระทบผิว ก็จะปล่อยความดันการแผ่รังสี (radiation pressure)  $p_{\text{rad}}$  ถ้าผิวนี้ตั้งฉากกับทิศทางการแผ่ของคลื่นและดูดซับคลื่นทั้งหมด  $p_{\text{rad}} = I/c$  แต่ถ้าผิวนี้สะท้อนได้อย่างสมบูรณ์  $p_{\text{rad}} = 2I/c$

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

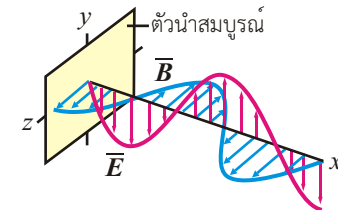
$$\begin{aligned} I = S_{\text{av}} &= \frac{E_{\text{max}} B_{\text{max}}}{2 \mu_0} = \frac{E_{\text{max}}^2}{2 \mu_0 c} \\ &= \frac{1}{2} \mu_0 \epsilon_0 E_{\text{max}}^2 \\ &= \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_{\text{max}}^2 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{A} \frac{dp}{dt} = \frac{S}{c} = \frac{EB}{\mu_0 c}$$

(อัตราการไหลของโมเมนตัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า)



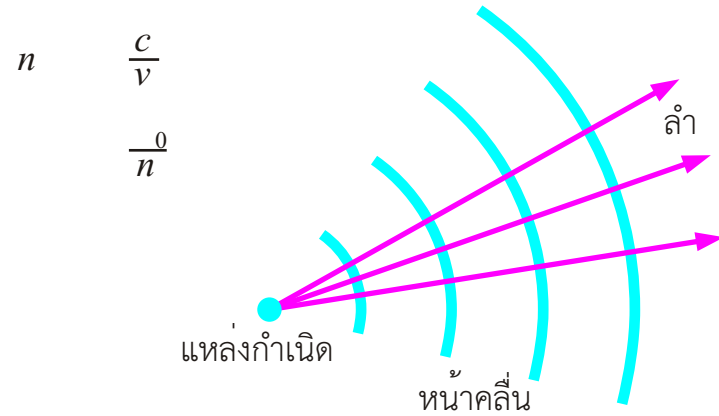
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบคลื่นนิ่ง: ถ้าผิวที่สะท้อนคลื่นได้อย่างสมบูรณ์ ตั้งอยู่ที่ตำแหน่ง  $x = 0$  คลื่นที่กระทบและคลื่นที่สะท้อนจะก่อให้เกิดคลื่นนิ่ง ระนาบบัพ (nodal plane) ของ  $\vec{E}$  จะอยู่ที่  $kx = 0, \pi, 2\pi, \dots$  และระนาบบัพของ  $\vec{B}$  จะอยู่ที่  $kx = \pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2, \dots$  ที่แต่ละจุดความต่างเฟสของ  $\vec{E}$  และ  $\vec{B}$  ที่เปลี่ยนแปลงแบบไซน์จะเท่ากับ  $90^\circ$



# บทที่ 33 ธรรมชาติและการแผ่กระจายของแสง (The Nature and Propagation of Light)

**แสงและคุณสมบัติของมัน:** แสงคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อมันถูกปล่อยหรือดูดกลืน มันจะแสดงคุณสมบัติเป็นอนุภาค มันจะถูกปลดปล่อยจากประจุไฟฟ้าที่ถูกเร่ง ความเร็วแสง เป็นค่าคงที่พื้นฐานทางฟิสิกส์

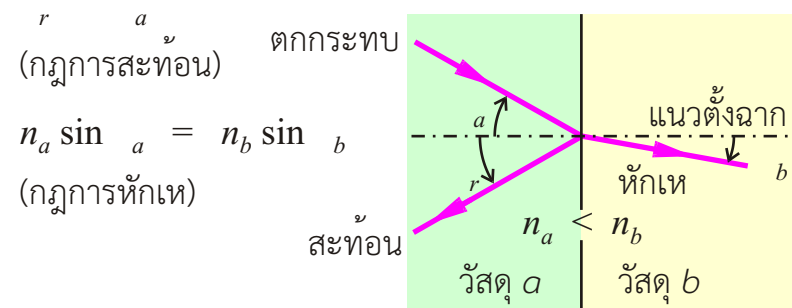
หน้าคลื่นคือผิวที่มีค่าเฟสคงที่ หน้าคลื่นนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเดียวกับความเร็วในการแผ่กระจายของคลื่น ลำคลื่นคือเส้นที่แสดงทิศทางการแผ่กระจาย และตั้งฉากกับหน้าคลื่น การนำเสนอแสงด้วยลำคลื่นเป็นพื้นฐานของทัศนศาสตร์แบบเรขาคณิต



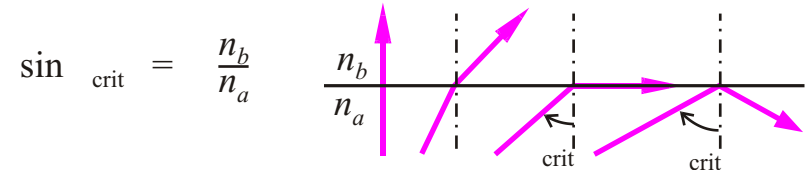
เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนึ่งสู่อีกตัวกลางหนึ่ง ความถี่ของแสงจะไม่เปลี่ยนแต่ความยาวคลื่น และความเร็วคลื่นจะแปรเปลี่ยน ค่าดัชนีหักเหของวัสดุ  $n$  จะเป็นสัดส่วนระหว่างความเร็วแสงในสุญญากาศกับความเร็วในวัสดุ ถ้า  $c_0$  คือความยาวคลื่นในสุญญากาศ คลื่นเดียวกันจะมีความยาวคลื่น ในวัสดุที่มีดัชนีหักเห  $n$

การแปรเปลี่ยนของดัชนีหักเห  $n$  ต่อความยาวคลื่น นั้นเรียกว่า การกระจาย (dispersion) โดยปกติ  $n$  ลดลงเมื่อ  $\lambda$  เพิ่มขึ้น

**การสะท้อน (reflection) และการหักเห (refraction)** ที่ผิวเรียบระหว่างวัสดุทางแสง 2 ชนิด ลำแสงที่ตกกระทบ สะท้อน และ หักเห และ ทิศตั้งฉากของผิวจะอยู่บนระนาบหนึ่ง เรียกว่า ระนาบตกกระทบ กฎการสะท้อนเสนอว่ามุมตกกระทบและมุมสะท้อนจะเท่ากัน กฎการหักเหจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบ กับ มุมหักเห โดยขึ้นกับดัชนีหักเหของสสาร เราจะวัด มุมตกกระทบ มุมสะท้อน และ มุมหักเหจาก ทิศตั้งฉากของผิว



**การสะท้อนกลับหมด:** เมื่อลำแสงเคลื่อนที่ภายในวัสดุที่มีดัชนีหักเหสูงคือ  $n_a$  ไปสู่วัสดุที่มีดัชนีหักเหต่ำกว่า  $n_b$  การสะท้อนกลับหมดจะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสเมื่อมุมตกกระทบเกินกว่ามุมวิกฤติ  $\theta_{crit}$

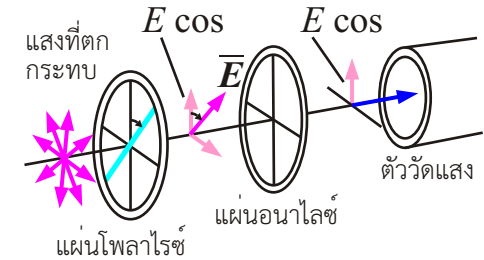


# บทที่ 33 ธรรมชาติและการแผ่กระจายของแสง (The Nature and Propagation of Light)

**โพลาไรเซชันของแสง** ทิศทางการโพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น คือ ทิศทางของสนาม  $\vec{E}$  ตัวกรองโพลาไรเซชันจะอนุญาตให้คลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นในทิศทางแกนหนึ่งผ่าน และกันมิให้คลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับแกนนั้นผ่าน เมื่อมีแสงที่มีโพลาไรเซชันแน่นอนที่มีความเข้ม  $I_{\max}$  ถูกส่งผ่านตัวกรอง

$$I = I_{\max} \cos^2$$

(กฎของมาลูลัส)



โพลาไรเซชันที่ทำหน้าที่เป็นตัววิเคราะห์ ความเข้มแสง  $I$  ของแสงที่ส่งผ่าน

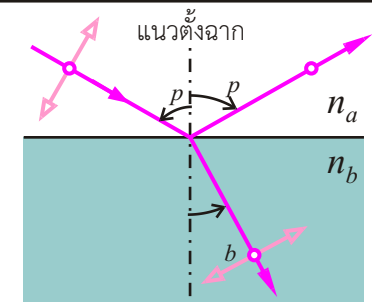
จะขึ้นกับมุม ระหว่างทิศทางการโพลาไรเซชันและทิศของแกนโพลาไรซ์ของตัววิเคราะห์ เมื่อคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นสองคลื่นที่มีเฟสต่างกัน มารวมกันจะเกิดเป็นแสงที่มีโพลาไรเซชันแบบวงกลม หรือ แบบวงรี ในกรณีนี้ เวกเตอร์  $\vec{E}$  จะไม่จำกัดอยู่ในระนาบของทิศทางการแผ่กระจาย แต่จะถูกอธิบายด้วย วงกลม หรือ วงรีในระนาบ ที่ตั้งฉากกับทิศทางการแผ่กระจาย

แสงจะถูกกระเจิงด้วยโมเลกุลของอากาศ แสงที่กระเจิงบางส่วนจะมีทิศทางการโพลาไรซ์

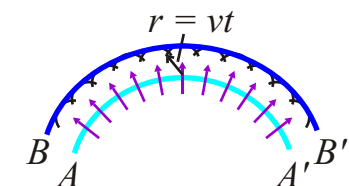
**โพลาไรเซชันด้วยการสะท้อน:** เมื่อลำแสงที่ไม่โพลาไรซ์ตกกระทบบนผิวระหว่างวัสดุสองชนิด กฎของบรีวสเตอร์ (Brewster's law) บอกว่าแสงสะท้อนจะมีโพลาไรเซชันตั้งฉากกับระนาบของการตกกระทบบ (ขนานกับผิวสัมผัส) ถ้ามุมตกกระทบบเท่ากับมุมโพลาไรซ์  $p$

$$\tan p = \frac{n_b}{n_a}$$

(กฎของบรีวสเตอร์)

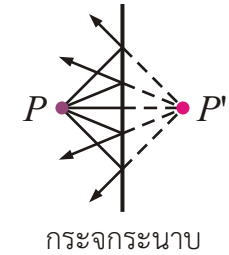


**หลักการของฮอยเกนส์ (Huygen's principle):** บอกว่าเมื่อเราทราบตำแหน่งของหน้าคลื่น ที่ขณะใดขณะหนึ่ง ตำแหน่งของหน้าคลื่นในเวลาต่อมาจะสามารถสร้างได้จากวาดคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นเล็ก ๆ บนหน้าคลื่นเดิม เราสามารถนำหลักการของฮอยเกนส์นี้ไปสังเคราะห์กฎการสะท้อนและการหักเหได้



## บทที่ 34 ทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต (Geometric Optics)

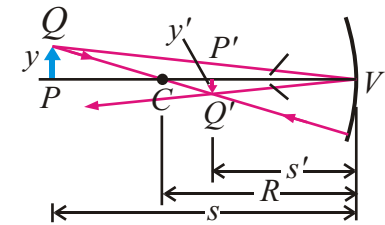
**การสะท้อนและการหักเหที่ผิวระนาบ:** เมื่อลำแสงลู่ออกจากจุดวัตถุ  $P$  และ ถูกสะท้อนและหักเห ที่ทิศทางของ ลำแสงที่กระจายออกจะเหมือนกับแสงที่พุ่งออกจากจุด  $P'$  ที่เรียกว่า จุดภาพ (image point) ถ้าลำแสงลู่อู่เข้าสู่ จุด  $P'$  จริง ๆ และลู่ออกหลังจากนั้น  $P'$  นี้จะเป็นภาพจริงของ  $P$  และถ้าลำแสงนั้นเสมือนว่าจะลู่ออกมาจาก  $P'$  มันจะเป็นภาพเสมือน (virtual image) ภาพอาจจะเป็นภาพหัวตั้งหรือภาพหัวกลับ



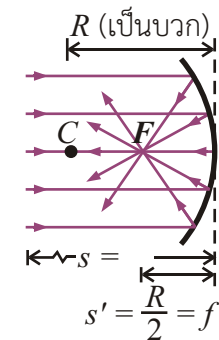
กระจกเงา

**กำลังขยายด้านข้าง (lateral magnification):** กำลังขยายด้านข้าง  $m$  ใน ภาพจากการสะท้อนหรือหักเห นิยามจาก สัดส่วนของความสูงภาพ  $y'$  ต่อ ความสูงวัตถุ  $y$  เมื่อ  $m$  มีค่าเป็นบวก ภาพจะหัวตั้ง เมื่อ  $m$  เป็นลบ ภาพจะ หัวกลับ

$$m = \frac{y'}{y}$$

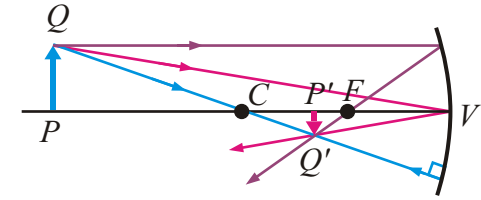


**จุดโฟกัสและระยะโฟกัส:** จุดโฟกัสของกระจกคือจุดที่ลำแสงขนานลู่อู่เข้าหลังจากที่สะท้อนจากกระจกเว้า หรือ เป็นจุดที่เสมือนว่าแสงลู่ออกมาจากจุดนั้นหลังจากสะท้อนจากกระจกนูน ลำแสงลู่ออกจากจุดโฟกัสของกระจกเว้าจะกลายเป็นลำแสงขนานหลังจากสะท้อน ลำแสงที่กำลังลู่อู่เข้าสู่จุดโฟกัสของกระจกนูนจะขนานกันหลังจากสะท้อน ระยะห่างจากจุดโฟกัสกับจุดยอดเรียกว่า ระยะโฟกัส และแทนด้วย  $f$  เรานิยามจุดโฟกัสของเลนส์ ในลักษณะเดียวกัน



## บทที่ 34 ทศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต (Geometric Optics)

**ความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุและระยะภาพ:** ตารางข้างล่างสรุป สูตรสำหรับระยะวัตถุ  $s$  และระยะภาพ  $s'$  สำหรับกระจกเงาและกระจกโค้ง และ ผิวหักเหเดี่ยว สมการสำหรับผิวระนาบสามารถหาได้จากสมการสำหรับผิวโค้งเมื่อกำหนดให้  $R =$



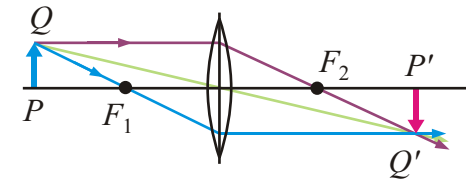
	กระจกเรียบ	กระจกโค้ง	ผิวหักเหเรียบ	ผิวหักเหโค้ง
ระยะระหว่างวัตถุกับภาพ	$\frac{1}{s} \quad \frac{1}{s'}$	$\frac{1}{s} \quad \frac{1}{s'} \quad \frac{2}{R} \quad \frac{1}{f}$	$\frac{n_a}{s} \quad \frac{n_b}{s'}$	$\frac{n_a}{s} \quad \frac{n_b}{s'} \quad \frac{n_b - n_a}{R}$
กำลังขยายด้านข้าง	$m \quad -\frac{s'}{s}$	$m \quad -\frac{s'}{s}$	$m \quad -\frac{n_a s'}{n_b s}$	$m \quad -\frac{n_a s'}{n_b s}$

ความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุและระยะภาพจะเป็นจริงสำหรับลำแสงที่ใกล้หรือเกือบจะขนานกับแกนแสง (optic axis) ลำเหล่านี้นี้เรียกว่า ลำข้างแกน (paraxial rays) ลำแสงที่ไม่ใช่ลำข้างแกนจะไม่ลู่อเข้าอย่างถูกต้องสู่จุดภาพ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ความพร่าเหตุขอบเลนส์ (spherical aberration)

**เลนส์บาง:** ความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุ-ภาพสำหรับเลนส์บาง แสดงในสมการ (1) จะเหมือนกับกระจกโค้ง สมการที่ (2) นี้เรียกว่า สมการข้างทำเลนส์ ซึ่งจะบอกความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะโฟกัสของเลนส์กับดัชนีหักเหของเลนส์ และ รัศมีความโค้งของผิวเลนส์

$$\frac{1}{s} \quad \frac{1}{s'} \quad \frac{1}{f} \quad (1)$$

$$\frac{1}{f} \quad (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2)$$



**กฎการให้เครื่องหมาย:** กฎนี้ใช้กับการสะท้อนและหักเหของผิวเรียบและผิวโค้ง

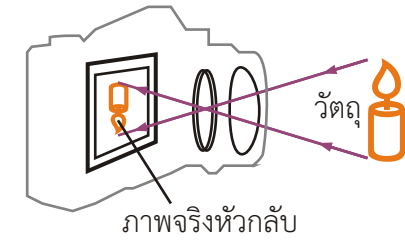
$s > 0$  เมื่อวัตถุอยู่ด้านที่แสงพุ่งเข้าสู่ผิว (วัตถุจริง)  $s < 0$  ในอีกทิศทางหนึ่ง  
 $s' > 0$  เมื่อภาพอยู่ด้านที่แสงพุ่งออกจากผิว (ภาพจริง)  $s' < 0$  ในอีกทิศทางหนึ่ง  
 $R > 0$  เมื่อจุดศูนย์กลางความโค้งอยู่ในด้านที่แสงพุ่งออกจากผิว  $R < 0$  ในอีกทิศทางหนึ่ง  
 $m > 0$  เมื่อภาพหัวตั้ง  $m < 0$  เมื่อภาพหัวกลับ

## บทที่ 34 ทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต (Geometric Optics)

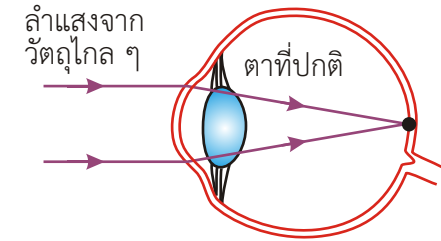
**กล้องถ่ายรูป:** กล้องถ่ายรูปก่อให้เกิดภาพจริงหัวกลับขนาดย่อ บนฉากที่เป็นผิวที่ไวต่อแสง ปริมาณแสงที่กระทบผิวนี้นี้จะถูกควบคุมจากความเร็วชัตเตอร์และขนาดรูเปิด (aperture) ความเข้มแสงจะแปรผกผันกับกำลังสองของ ตัวเลขเอฟ (f-number) ของเลนส์

ตัวเลขเอฟ

$$\frac{\text{ระยะโฟกัส}}{\text{ขนาดรูเปิด}} = \frac{f}{D}$$

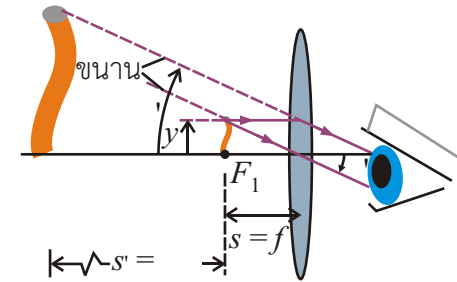


**ดวงตา:** ในดวงตา การหักเหที่ผิวของกระจกตา (cornea) ทำให้เกิดภาพจริงบนเรตินา (retina) การปรับเปลี่ยนไปตามระยะภาพทำได้โดยการบีบเลนส์ ทำให้มันนูนขึ้นและระยะโฟกัสลดลง สายตาสั้น (myopic) คือการมีดวงตาที่ยาวเกินไป และ สายตายาว (hyperopic) คือการมีดวงตาที่สั้นเกินไป กำลังของเลนส์ ในหน่วย D (diopeters) คือส่วนกลับของระยะโฟกัสในหน่วยเมตร

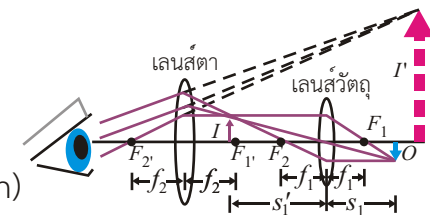


**แว่นขยายอย่างง่าย:** จะสร้างภาพเสมือนที่มีขนาดมุม ' ' ใหญ่กว่าขนาดมุม ของวัตถุที่ระยะ 25 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดใกล้ที่สุดสำหรับการมองอย่างสบาย กำลังขยายเชิงมุม M ของแว่นขยายอย่างง่ายคือสัดส่วนของขนาดมุมของภาพเสมือนต่อขนาดมุมของวัตถุที่ระยะเดียวกัน

$$M = \frac{25 \text{ cm}}{f}$$

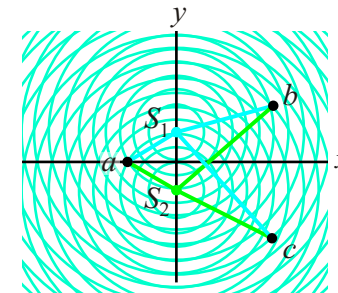


**กล้องจุลทรรศน์และกล้องโทรทรรศน์:** ในกล้องจุลทรรศน์ เลนส์วัตถุ (objective lens) จะทำให้เกิดภาพแรกในตัวกล้อง และ เลนส์ตาจะทำให้เกิดภาพเสมือนจากภาพแรก โดยส่วนมากอยู่ที่ตำแหน่งอนันต์ กล้องโทรทรรศน์จะทำงานโดยหลักการเดียวกันแต่วัตถุจะอยู่ที่ตำแหน่งไกลมาก ๆ ในกล้องโทรทรรศน์แบบสะท้อน เลนส์วัตถุจะถูกแทนที่ด้วยกระจกเว้า ซึ่งทำให้สามารถกำจัดความพร่าสี (chromatic aberration)



## บทที่ 35 การแทรกสอด (Interference)

**การแทรกสอดและแหล่งกำเนิดแสงสมนัย:** แสงสีเดียว (Monochromatic light) คือ แสงที่มีความถี่เดียว ความสมนัย (coherence) คือ ความสัมพันธ์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงของเฟสระหว่างคลื่นสองคลื่น การซ้อนทับของคลื่นจากแหล่งกำเนิดแสงสมนัยสีเดียวจะทำให้เกิดรูปแบบการแทรกสอด หลักการซ้อนทับกัน บอกว่าขนาดของคลื่นรวมที่จุดใด ๆ จะเป็นผลรวมของขนาดคลื่นจากคลื่นแต่ละตัว



**การแทรกสอดของแสงจากแหล่งกำเนิดสองแหล่ง:** เมื่อแหล่งกำเนิดสองแหล่งกำเนิดแสงที่มีเฟสตรงกัน การแทรกสอดแบบเสริมกันจะเกิดขึ้นที่จุดที่มีความต่างของความยาวทางเดินคลื่นจากแหล่งกำเนิดทั้งสอง เป็นศูนย์หรือเป็นจำนวนเต็มของความยาวคลื่น การแทรกสอดแบบหักล้างจะเกิดขึ้นที่จุดที่มีความต่างของความยาวทางเดินคลื่นจากแหล่งกำเนิดทั้งสองเป็นค่าครึ่งหนึ่งของจำนวนเต็มของความยาวคลื่น ถ้าแหล่งกำเนิดทั้งสองมีระยะห่างกัน  $d$  และจุด  $P$  ห่างจากแหล่งกำเนิดมาก ๆ เส้นตรงจากแหล่งกำเนิดถึงจุด  $P$  จะทำมุม กับเส้นที่ตั้งฉากกับเส้นระหว่างแหล่งกำเนิด เงื่อนไขที่ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน แสดงดังสมการ (1) และเงื่อนไขที่ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน แสดงดังสมการ (2) เมื่อมุม นี้เล็กมาก ๆ ตำแหน่ง  $y_m$  ของแถบสว่างที่  $m$  บนแผ่นรับภาพที่อยู่ระยะ  $R$  จากแหล่งกำเนิดจะเป็นไปตามสมการ (3)

$$d \sin \theta = m \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

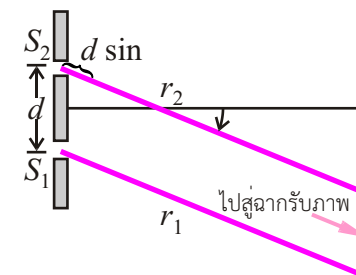
(การแทรกสอดแบบเสริมกัน)

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

(การแทรกสอดแบบหักล้าง)

$$y_m = R \frac{m \lambda}{d} \quad (3)$$

(แถบสว่าง)





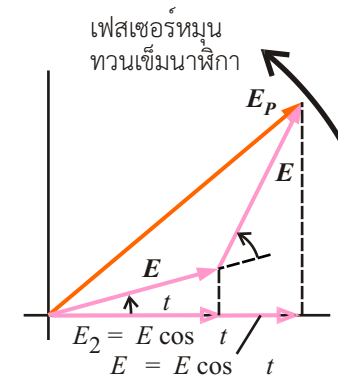
## บทที่ 35 การแทรกสอด (Interference)

**ความเข้มของรูปแบบการแทรกสอด:** เมื่อคลื่นรูปไซน์สองคลื่นที่มีขนาด  $E$  และความต่างเฟส มาซ้อนทับกัน ขนาดคลื่นรวม  $E_P$  และ ความเข้ม  $I$  จะแสดงได้ดังสมการ (1) และ (2) ถ้าแหล่งกำเนิดสองแหล่งมีเฟสตรงกัน ความต่างเฟส ที่จุด  $P$  (อยู่ที่ระยะ  $r_1$  จากแหล่งกำเนิดที่ 1 และ อยู่ที่ระยะ  $r_2$  จากแหล่งกำเนิดที่ 2) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างของความยาวทางเดินคลื่น  $r_2 - r_1$

$$E_P = 2E \left| \cos \frac{\delta}{2} \right| \quad (1)$$

$$I = I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) \quad \text{หรือ} \quad \delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r$$



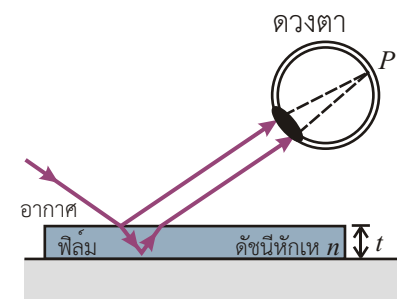
**การแทรกสอดในฟิล์มบาง:** เมื่อแสงสะท้อนจากทั้งสองด้านของฟิล์มบางที่มีความหนา  $t$  และ ไม่มีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้นที่ผิวทั้งสอง การแทรกสอดแบบเสริมกันของคลื่นสะท้อนจะเกิดขึ้นเมื่อ  $2t$  เป็นจำนวนเต็มเท่าของค่าความยาวคลื่น เมื่อมีการเลื่อนเฟสไปครึ่งคลื่นบนผิวหนึ่ง เงื่อนไขข้างต้นจะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง การเลื่อนเฟสแบบครึ่งคลื่นนี้จะเกิดขึ้นในระหว่างการสะท้อนเมื่อดัชนีหักเหของวัสดุที่สองมีค่ามากกว่าดัชนีหักเหของวัสดุที่หนึ่ง

$$2t = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

(การสะท้อนแบบเสริมกันจากฟิล์มบาง โดยไม่มีการเลื่อนเฟส)

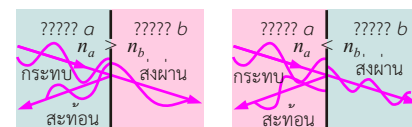
$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

(การสะท้อนแบบหักล้างจากฟิล์มบาง โดยไม่มีการเลื่อนเฟส)

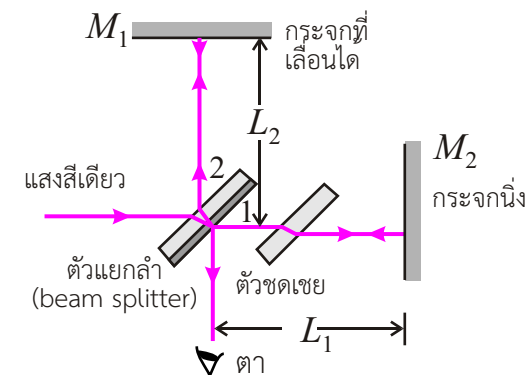


$$2t = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

(การสะท้อนแบบเสริมกันจากฟิล์มบาง โดยมีการเลื่อนเฟสไปครึ่งคลื่น)



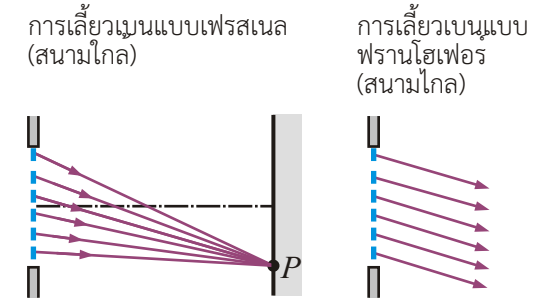
**มาตรแทรกสอดแบบมิเชลสัน (Michelson interferometer):** ใช้แหล่งกำเนิดแสงสีเดียว โดยมันสามารถนำมาใช้ในการวัดแบบละเอียดมาก ๆ ของค่าความยาวคลื่น จุดประสงค์ดั้งเดิมของมันคือการนำไปวัดการเคลื่อนที่ของโลกเทียบกับอีเธอร์ ซึ่งถูกตั้งสมมติฐานว่าเป็นตัวกลางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่มีใครสามารถตรวจจับอีเธอร์นี้ได้ และ แนวคิดนี้จึงถูกละทิ้งไป ความเร็วแสงมีค่าคงที่ในทุกผู้สังเกต ความรู้ในส่วนนี้เป็นพื้นฐานของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ



## บทที่ 36 การเลี้ยวเบน (Diffraction)

### การเลี้ยวเบนแบบเฟรสเนลและแบบฟรานโฮเฟอร์ (Fresnel and Fraunhofer diffraction):

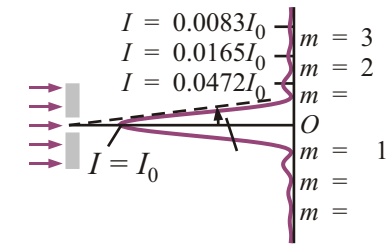
การเลี้ยวเบนจะเกิดขึ้นเมื่อแสงผ่านช่องหรือผ่านขอบวัตถุ เมื่อแหล่งกำเนิดและผู้สังเกตอยู่ห่างจากผิวของวัตถุที่กันเราจะสามารถพิจารณาแสงที่ออกมาว่าเป็นลำขนาน และเรียกมันว่าการเลี้ยวเบนแบบฟรานโฮเฟอร์ แต่เมื่อแหล่งกำเนิดหรือผู้สังเกตอยู่ค่อนข้างใกล้กับผิวของวัตถุที่กัน การเลี้ยวเบนจะเป็นแบบเฟรสเนล



**การเลี้ยวเบนจากสลิตเดี่ยว:** แสงสีเดียวถูกส่งผ่านสลิตแคบ ๆ ที่มีความกว้าง  $a$  ทำให้เกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนบนฉากที่อยู่ไกล สมการ (1) คือ เงื่อนไขที่ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน (แถบมืด) ที่จุด  $P$  ที่มุม  $\theta$  และ สมการ (2) จะบอกความเข้มของรูปแบบที่สังเกตได้ โดยที่เป็นฟังก์ชันของ

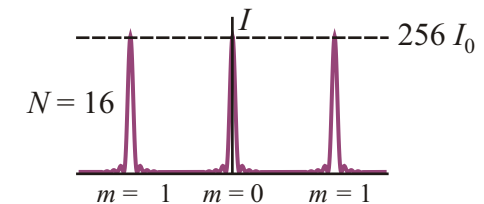
$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{a} \quad (m = 1, 2, \dots)$$

$$I = I_0 \left\{ \frac{\sin \left( \frac{a \sin \theta}{\lambda} \right)}{\frac{a \sin \theta}{\lambda}} \right\}^2$$



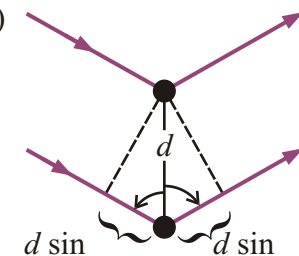
**เกรตติงเลี้ยวเบน:** ประกอบด้วยสลิตที่วางขนานกันจำนวนมาก โดยสลิตแต่ละเส้นวางห่างกัน  $d$  เงื่อนไขที่ทำให้ความเข้มของรูปแบบการแทรกสอดสูงสุด เหมือนกับในกรณี การเกิดรูปแบบจากแหล่งกำเนิดสองแหล่ง แต่ค่าความเข้มสูงสุดจะสูงและเกิดที่มุมแคบมาก

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$



**การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์:** ผลึกจะสามารถทำหน้าที่เป็นเกรตติงแบบ 3 มิติ สำหรับรังสีเอกซ์ ที่มีความยาวคลื่นในระดับเดียวกับขนาดของระยะห่างระหว่างอะตอมในผลึก การแทรกสอดแบบเสริมกันจะเกิดขึ้นเมื่อมุมที่ตกกระทบและมุมกระเจิง (วัดจากระนาบในผลึก) เท่ากัน และ เมื่อ เงื่อนไขแบรกก์ (Bragg condition) เป็นจริง

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$



## บทที่ 36 การเลี้ยวเบน (Diffraction)

รูเปิดวงกลม และ พลังในการแยกแยะ: รูปแบบการเลี้ยวเบนจากรูเปิดวงกลม ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$  จะมีจุดสว่างตรงกลาง เรียกว่า จานแอร์ (Airy disk) และ อนุกรมของวงแหวนมืดและสว่าง สมการ (1) จะบอกค่ารัศมีเชิงมุม  $\theta_1$  ของวงแหวนแถบมืดแรก และเท่ากับขนาดเชิงมุมของ จานแอร์ การเลี้ยวเบนกำหนดลิมิตของความละเอียด (ความคมของภาพ) ของอุปกรณ์ทางแสง ตามกฎเกณฑ์ของเรย์ลี (Rayleigh's criterion) วัตถุแบบจุดสองชิ้น จะเริ่มถูกแยกแยะได้เมื่อระยะห่างเชิงมุม มีค่าตามสมการ (1)

$$\sin \theta_1 = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (1)$$

จานแอร์  
(Airy disk)

