

จากการค้นพบของเออร์สเต็ดทำให้ทราบว่า กระแสไฟฟ้าก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก ในบทนี้จะศึกษาวิธีคำนวณขนาดของสนามแม่เหล็ก โดยใช้กฎของแอมแปร์ และกฎของบิโอท์-ซาวาร์ท

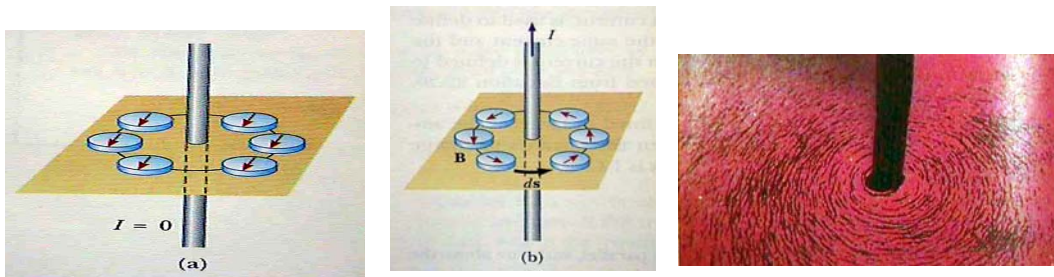
9.1 กฎของแอมแปร์

กฎของแอมแปร์ใช้ในการคำนวณสนามแม่เหล็ก เนื่องจากเส้นลวดยาวอนันต์และขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน มีลักษณะและแนวคิดคล้ายกฎของเกาส์ที่ใช้หาสนามไฟฟ้า กล่าวคือ การอินทิเกรตสนามแม่เหล็กรอบเส้นทางปิดใด ๆ (ซึ่งเทียบกับพื้นผิวของเกาส์) จะได้ปริมาณซึ่งมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กนั้น ๆ (เทียบกับประจุที่ก่อให้เกิดสนามไฟฟ้า) เขียนเป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I \tag{9-1}$$

กฎของแอมแปร์ใช้ได้เมื่อกระแสคงที่ และมีสมมาตรในระบบสูง (เช่นเดียวกับกฎของเกาส์)

9.1.1 สนามแม่เหล็กของเส้นลวดที่ยาวอนันต์



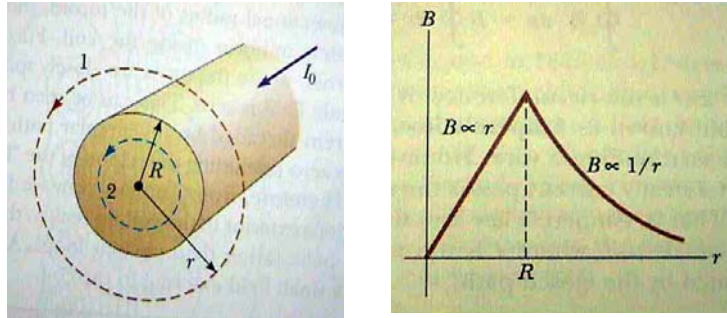
ภาพที่ 9-1 ทิศของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไหลในเส้นลวด

ภาพที่ 9-1 แสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กรอบ ๆ ลวดตัวนำเป็นศูนย์เมื่อกระแสเป็นศูนย์ และเมื่อมีกระแสไหล ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากกฎของแอมแปร์ เริ่มต้นจากการสร้างเส้นทางปิดสมมติ เป็นวงกลมรัศมี r พิจารณา สนามแม่เหล็กว่ามีทิศเดียวกับเวกเตอร์ ds ตลอดเส้นทางปิด ผลการอินทิเกรตจะได้

$$\begin{aligned} \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} &= \oint B ds \cos 0 = B \oint ds = B \cdot 2\pi r = \mu_0 I \\ B &= \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \end{aligned} \tag{9-2}$$

ตัวอย่างที่ 1 : (Serway 30.4) Long Current-Carrying Wire กระแส I_0 ไหลผ่านลวดตัวนำยาวมากที่มีรัศมี R ดังภาพ จงคำนวณสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสนี้ที่

- (a) ภายนอกลวด
(b) ภายในลวด



ภาพที่ 9-2 ภาพประกอบตัวอย่างที่ 1 และกราฟสนามแม่เหล็กเป็นฟังก์ชันของระยะทางจากแกนกลางลวด

วิธีทำ :

- (a) ภายนอกลวด สร้างวงปิดรัศมี r ($r > R$)

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

$$\oint B ds \cos 0^\circ = B \oint ds = B(2\pi r) = \mu_0 I_0 \Rightarrow B = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi r}$$

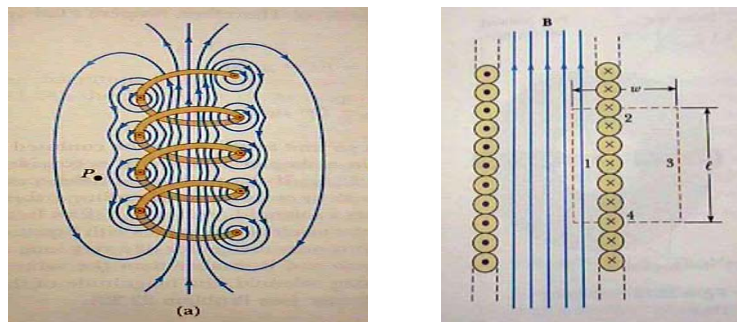
- (b) ภายในลวด สร้างวงปิดรัศมี r ($r < R$) และเทียบหากระแสที่ไหลผ่านหน้าตัดรัศมี r

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\pi r^2}{\pi R^2} \Rightarrow I = \frac{r^2}{R^2} I_0$$

$$B(2\pi r) = \mu_0 I = \mu_0 \frac{r^2}{R^2} I_0 \Rightarrow B = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi R^2} r$$

9.1.2 สนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์

ขดลวดโซลินอยด์คือลวดตัวนำที่พันกันเป็นรูปเกลียว การพันลวดเป็นรูปนี้สามารถก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กความเข้มสูงภายในขดลวด โดยสนามแม่เหล็กคือผลรวมเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กย่อย ๆ ของแต่ละเกลียวเข้าด้วยกันทั้งหมด ภาพแสดงเส้นแรงสนามแม่เหล็กภายในขดลวดโซลินอยด์มีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรง และสม่ำเสมอ



ภาพที่ 9-3 ทิศของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดโซลินอยด์

การคำนวณขนาดสนามแม่เหล็กใช้กฎของแอมแปร์ และกำหนดเส้นทางของการอินทิเกรตเชิงเส้นดังภาพ แบ่งเส้นทางปิด (Closed Path) ออกเป็น 4 ส่วน พิจารณาจากภาพ เส้นทางที่ 2,3 และ 4 $\vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$ ดังนั้น

ใช้กฎของแอมแปร์

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_{\text{path 1}} \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \int_{\text{path 1}} ds = B\ell \quad (9-3)$$

ใช้กฎของแอมแปร์

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = B\ell = \mu_0 NI$$

$$B = \mu_0 \frac{N}{\ell} I = \mu_0 nI$$

(9-4)

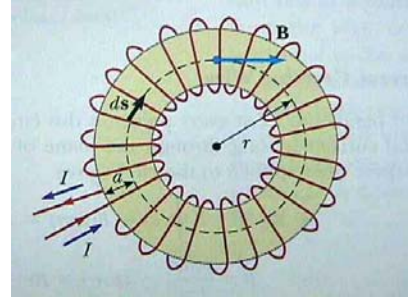
โดยที่ N คือจำนวนรอบ ดังนั้น NI คือ กระแสทั้งหมดภายในเส้นทางปิด และ $n = N/\ell$ คือ จำนวนรอบต่อความยาว

ตัวอย่างที่ 2 : (Serway 30.5) Toroid เส้นลวดตัวนำพันเป็นจำนวน N รอบเป็นขดลวดทอรอยด์มีรูปร่างแบบโดนัทตั้งภาพ หากทอรอยด์มีกระแส I_0 ไหลผ่าน จงหาสนามแม่เหล็ก ณ จุดที่ห่างจากจุดศูนย์กลาง r

วิธีทำ : สร้างวงปิดรัศมี r

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

$$\oint B \cdot ds \cos 0^\circ = B(2\pi r) = \mu_0 NI_0 \Rightarrow B = N \frac{\mu_0 I_0}{2\pi r}$$



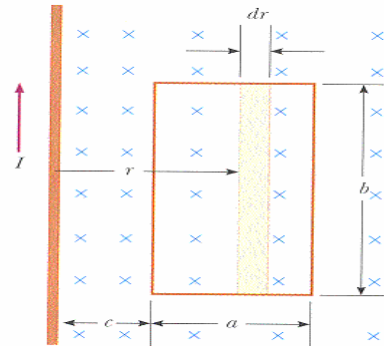
ภาพที่ 9-4 ภาพประกอบตัวอย่างที่ 2

ตัวอย่างที่ 3 : (Serway 30.8) Magnetic Flux กรอบลวดรูปสี่เหลี่ยมกว้าง a ยาว b โดยที่ด้านยาววางห่างจากเส้นลวดนำกระแส I เป็นระยะ c ที่ จงหาฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านกรอบลวดอันนี้

วิธีทำ : แบ่งพื้นที่กรอบลวด เป็นแถบย่อย ๆ ยาว b กว้าง dr พิจารณาฟลักซ์ที่ผ่าน $d\vec{A}$ นี้

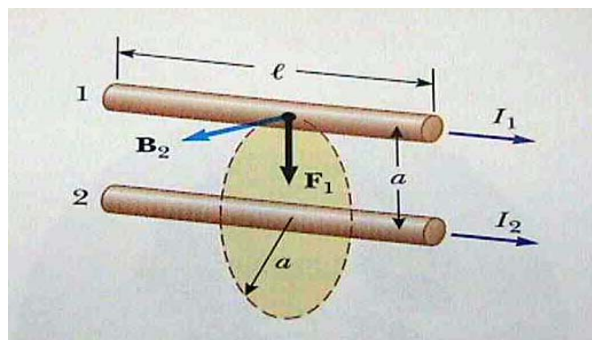
$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int B dA \cos 0^\circ = \int_c^{a+c} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} (b dr)$$

$$\Phi = \frac{\mu_0 b I}{2\pi} \int_c^{a+c} \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0 b I}{2\pi} [\ln r]_c^{a+c} = \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \ln \frac{a+c}{c}$$



ภาพที่ 9-5 ภาพประกอบตัวอย่างที่ 3

9.1.3 แรงที่กระทำระหว่างลวดตัวนำสองเส้น



ภาพที่ 9-6 ลวดตัวนำ 2 เส้นที่มีกระแสไหลในทิศเดียวกันจะมีแรงดึงดูดกัน

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi a} \quad (9-5)$$

$$F_1 = I_1 \ell B_2 = I_1 \ell \frac{\mu_0 I_2}{2\pi a} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \ell$$

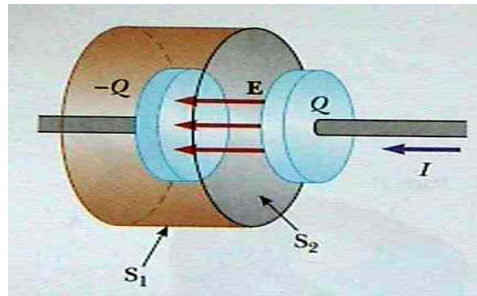
เมื่อลวดตัวนำสองเส้นที่มีกระแส I_1 และ I_2 สนามแม่เหล็กจากเส้นที่หนึ่งจะทำให้เกิดแรงบนเส้นลวดเส้นที่สอง และในทางกลับกันก็เกิดขึ้นคือเส้นลวดเส้นที่หนึ่งก็เกิดแรงกระทำเนื่องจากสนามจากเส้นที่สอง สามารถคำนวณแรงที่เกิดขึ้นนี้ได้โดยเริ่มต้นจากหาค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น แล้วไปคำนวณแรงที่กระทำต่ออีกเส้นหนึ่ง ทิศทางของ F_1 มีทิศทาง ดึงให้เส้นที่ 1 เข้าหาเส้นที่ 2 และจะมี แรง F_2 จะเป็นแรงปฏิกริยากับ F_1

จากการพิจารณาทิศของแรงจากภาพที่ 9-6 สรุปได้ว่า กระแสไปทางเดียวกันลวดทั้งสองดูดกัน แต่ถ้ากระแสไหลตรงข้ามกันลวดทั้งสองจะผลักกัน

9.1.4 กฎแอมแปร์ในรูปทั่วไปและกระแสกระจัด

พิจารณา แผ่นเก็บประจุรูปจานสองแผ่นดังภาพ ในขณะที่เก็บประจุ ไม่มีกระแสไหลผ่านจากแผ่นบวกไปยังแผ่นลบ แต่มีฟลักซ์ไฟฟ้าที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A เท่ากับ

$$\Phi_E = \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = EA \quad (9-6)$$



ภาพที่ 9-7 กระแสกระจัดระหว่างแผ่นที่สะสมประจุบวกและลบ

จากการคำนวณสนามไฟฟ้าเนื่องจากแผ่นเก็บประจุคู่ขนาน

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A} \quad (9-7)$$

แทนค่าสนามไฟฟ้าลงในสมการฟลักซ์ไฟฟ้า

$$\Phi_E = EA = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (9-8)$$

ย้ายข้างหาค่าประจุ และอัตราการเปลี่ยนแปลงประจุโดยการหาอนุพันธ์

$$Q = \epsilon_0 \Phi_E$$

$$\frac{dQ}{dt} = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (9-9)$$

ซึ่งหมายความว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงประจุที่มาสะสม จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ไฟฟ้าเทอม dQ/dt นี้ ไม่ใช่กระแสที่เคยกล่าวถึงในเรื่องกระแสไฟฟ้า เพราะอิเล็กตรอนที่นำกระแสไม่ได้เคลื่อนที่ไปตลอดทาง แมกซ์เวลล์ตั้งชื่อ dQ/dt ในกรณีเช่นนี้ว่า “กระแสกระจัด” (Displacement Current ใช้ตัวย่อ I_d) เราได้ดัดแปลงกฎของแอมแปร์เพื่อให้อธิบายมากขึ้น เรียกว่ากฎแอมแปร์-แมกซ์เวลล์ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 (I + I_d) = \mu_0 \left(I + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right) \quad (9-10)$$

จุดสำคัญของกฎนี้คือ “กระแสไฟฟ้า หรือ การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก”

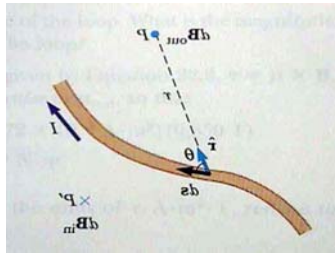
9.2 กฎของบิโอท์-ซาวาร์ต

กฎของบิโอท์-ซาวาร์ต ใช้คำนวณสนามแม่เหล็กจากกระแสไหลในลวดตัวนำที่มีรูปร่างใด ๆ เช่น โค้งหรือคดงได้ โดยการแบ่งตัวนำเป็นเวกเตอร์ส่วนย่อย $d\vec{s}$ (ซึ่งมีทิศตามกระแสไฟฟ้า) ซึ่งตัวนำส่วนนี้จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก $d\vec{B}$ ที่จุดที่ห่างออกไปเป็นระยะ r เขียนได้ในรูปสมการ

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2} \quad (9-11)$$

μ_0 คือค่าคงที่มีชื่อว่า Permeability of Free Space มีค่า $4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2} \quad (9-12)$$



ภาพที่ 9-8 สนามแม่เหล็กเกิดจากส่วนของลวดตัวนำโค้งตามกฎของบิโอท์-ซาวาร์ต

สนามแม่เหล็กรวม สามารถหาได้จากการอินทิเกรตเวกเตอร์เข้าด้วยกันทั้งหมด

ตัวอย่างที่ 4 : (Serway 30.1) Thin Straight Conductor จงคำนวณสนามแม่เหล็กที่เกิดจากเส้นลวดตรงที่มีความยาวไม่แน่นอน

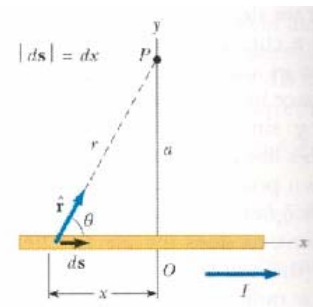
วิธีทำ : แบ่งลวดออกเป็นส่วนย่อย $d\vec{s}$ ที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก $d\vec{B}$

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dx \sin \theta}{r^2}$$

$$r = a \csc \theta; \quad x = -a \cot \theta; \quad dx = a \csc^2 \theta d\theta$$

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dx \sin \theta}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{(a \csc^2 \theta d\theta) \sin \theta}{a^2 \csc^2 \theta} = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \sin \theta d\theta$$

$$B = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \sin \theta d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$$



ภาพที่ 9-9 ภาพประกอบตัวอย่างที่ 4

ตัวอย่างที่ 5 : (Serway 30.3) Circular Current Loop จงคำนวณสนามแม่เหล็ก ณ จุด P ที่เกิดจากวงลวดตัวนำมีรัศมี R และมีกระแสไหล I ดังภาพ

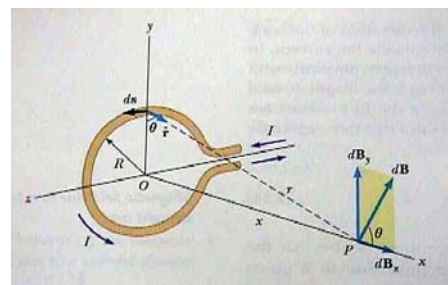
วิธีทำ : แบ่งลวดออกเป็นส่วนย่อย $d\vec{s}$ ที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก $d\vec{B}$

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{ds \times \hat{r}}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{ds}{(x^2 + R^2)}$$

$$B_x = \int dB \cos \theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{ds \cos \theta}{x^2 + R^2}$$

$$\cos \theta = \frac{R}{\sqrt{x^2 + R^2}}$$

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{R}{(x^2 + R^2)^{3/2}} \int ds = \frac{\mu_0 IR^2}{2(x^2 + R^2)^{3/2}}$$



ภาพที่ 9-10 ภาพประกอบตัวอย่างที่ 5

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	

 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
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
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
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
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
1. จลศาสตร์ (kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

