

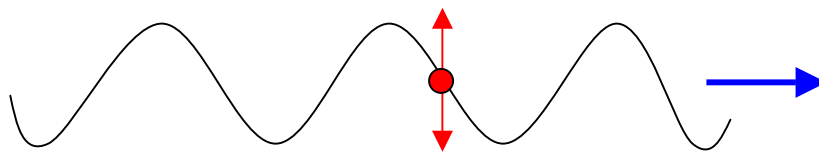
บทที่ 11 การเคลื่อนที่แบบคลื่น

1. บทนำ

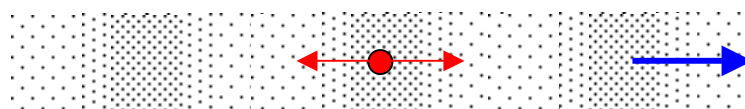
คลื่น แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ **คลื่นกล (Mechanical waves)** และ **คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves)**

คลื่นกล คือคลื่นที่อาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ เช่น คลื่นเสียง ต้องอาศัยโมเลกุลของอากาศเป็นตัวกลาง คลื่นน้ำ อาศัยโมเลกุลของน้ำเป็นตัวกลาง คลื่นเส้นเชือก อาศัยตัวเชือกเป็นตัวกลาง ดังนั้น คลื่นที่อาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ เกิดจากการที่**คลื่นไปรบกวนตัวกลาง (Disturbance)** เพื่อส่งถ่ายพลังงาน ต่อเนื่องไปเป็นทอด ๆ

- คลื่นกลที่ตัวกลางมีการเคลื่อนที่ขวางกับทิศของคลื่น เรียกว่า **คลื่นตามขวาง (Transverse wave)** เช่น คลื่นน้ำ ซึ่งโมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ขึ้นลง



- คลื่นกลที่ตัวกลางมีการเคลื่อนที่ในแนวเดียวกันกับทิศของคลื่น เรียกว่า **คลื่นตามยาว (Longitudinal wave)** เช่น คลื่นเสียง ซึ่งโมเลกุลของอากาศ มีการสั่นกลับไปกลับมา เป็นคลื่นความดันอัด-ขยาย



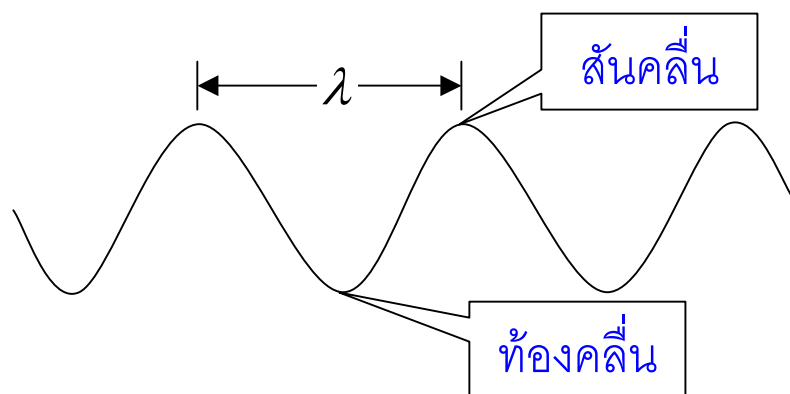
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือคลื่นที่ไม่อาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ เช่น แสง สัญญาณวิทยุ สัญญาณโทรทัศน์ สัญญาณโทรศัพท์พกพา ริงส์เอ็กซ์ เป็นต้น
คลื่นมีสมบัติอยู่ 4 ข้อ คือ

1. **การสะท้อน** คลื่นเดินทางกระทบเข้าสู่ผิวรอยต่อระหว่างตัวกลาง ทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นกลับตัวกลางเดิม เรียกว่า คลื่นสะท้อน

2. **การหักเห** คลื่นเดินทางกระทบเข้าสู่ผิวรอยต่อระหว่างตัวกลาง เกิดคลื่นเข้าไปในตัวกลางใหม่ เรียกคลื่นหักเห ซึ่งมีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปจากเดิม

3. **การแทรกสอด** เกิดจากคลื่นตั้งแต่สองขบวนขึ้นไป เดินทางมารวมกัน แบบ Superposition คลื่นลัพธ์หลังการรวม เป็นคลื่นขบวนใหม่เกิดขึ้น

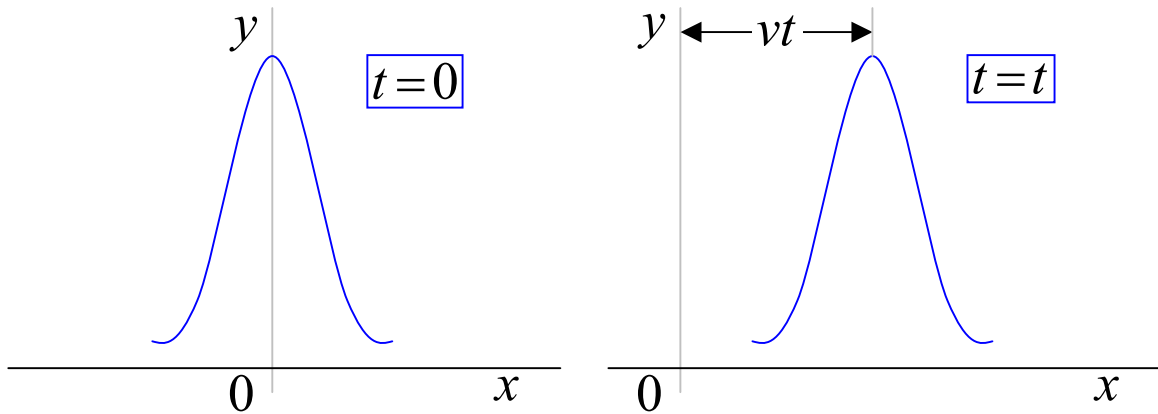
4. **การเลี้ยวเบน** เกิดจากคลื่นเดินทางผ่านสิ่งกีดขวาง หรือผ่านช่องแคบ เล็ก ๆ ซึ่งมีขนาดประมาณ หรือเล็กกว่า ความยาวคลื่น ทำให้สามารถเลี้ยวเบนผ่านสิ่งกีดขวางได้ เกิดลวดลายการเลี้ยวเบนเป็นริ้วได้



จากรูป ระยะระหว่างสันคลื่น หรือ ระยะระหว่างท้องคลื่น เรียกว่า ความยาวคลื่น λ ดังนั้นความยาวคลื่นคือระยะที่คลื่นเคลื่อนที่กลับมาซ้ำเฟสเดิมอีกครั้ง และ คลื่นเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ ใช้ระยะเวลาเท่ากับ 1 คาบ T ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วคลื่นดังสมการ $v = f\lambda$ โดย f คือความถี่การสั่น

2. สมการการเคลื่อนที่แบบคลื่น

พิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นตามรูป ที่เวลาต่างกัน ให้คลื่นเคลื่อนที่ไปตามแกน x ไปทางขวามือด้วยความเร็ว v



กำหนดให้คลื่นที่ $t=0$ เป็นฟังก์ชัน $y=f(x)$ ดังนั้นคลื่นที่เวลา $t=t$ เป็นฟังก์ชัน $y=f(x-vt)$ ในขณะเดียวกัน หากคลื่นเคลื่อนที่ไปด้านซ้าย จะได้ฟังก์ชันคลื่นดังฟังก์ชัน $y=f(x+vt)$ ดังนั้นสมการทั่วไป เขียนได้ว่า

$$y = f(x \pm vt)$$

สมมติให้ $z = x - vt$

หาค่าอนุพันธ์ของ z เทียบกับการกระจัด x และ เวลา t ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{\partial z}{\partial x} &= \frac{\partial(x-vt)}{\partial x} = 1 \\ \frac{\partial z}{\partial t} &= \frac{\partial(x-vt)}{\partial t} = -v\end{aligned}$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ว่า $y = f(z)$

หาค่าอนุพันธ์ของ y เทียบกับการกระจัด x ได้ดังนี้

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial z} \frac{\partial (x-vt)}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial z}$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial y}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) = \frac{\partial y}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right) = \frac{\partial y}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right) = \frac{\partial y}{\partial z} \frac{\partial (x-vt)}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 y}{\partial z^2}$$

ดังนั้นได้ความสัมพันธ์ว่า $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 y}{\partial z^2}$

หาค่าอนุพันธ์ของ y เทียบกับเวลา t ได้ดังนี้

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\partial y}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial y}{\partial z} \frac{\partial (x-vt)}{\partial t} = -v \frac{\partial y}{\partial z}$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial y}{\partial t} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right) = \frac{\partial y}{\partial z} \left(-v \frac{\partial y}{\partial z} \right) = \frac{\partial y}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} \left(-v \frac{\partial y}{\partial z} \right) = \frac{\partial y}{\partial z} (-v) \left(-v \frac{\partial y}{\partial z} \right) = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial z^2}$$

ดังนั้นได้ความสัมพันธ์ว่า $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial z^2}$

จากอนุพันธ์ y เทียบกับการกระจัด x และเวลา t ได้ความสัมพันธ์

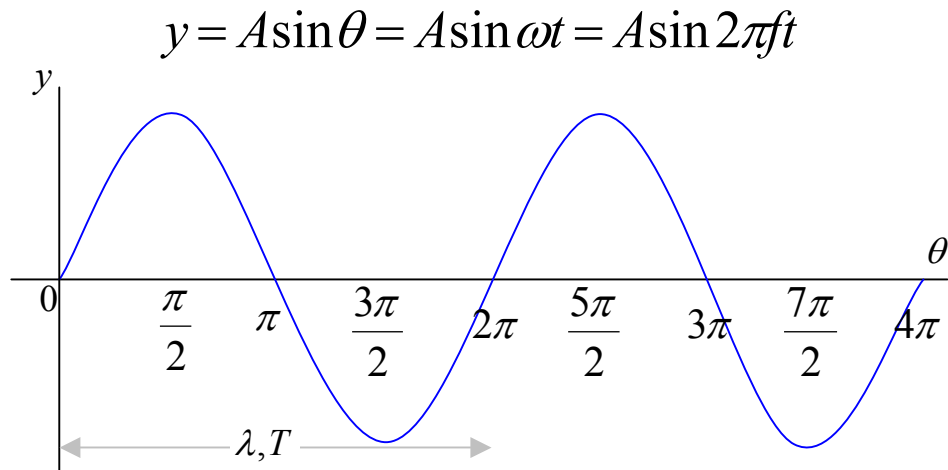
$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

เรียกสมการนี้ว่า สมการคลื่น (Wave equation) โดยที่ $y(x,t)$ คือ ฟังก์ชันคลื่น (Wave function)

การเคลื่อนที่ตามความสัมพันธ์นี้แสดงว่า เกิดคลื่นที่มีการกระจัดในแนวแกน y ซึ่งเคลื่อนที่ไปตามแกน x ด้วยความเร็ว v

3. สมการการเคลื่อนที่แบบคลื่นไซน์

ถ้าแหล่งกำเนิดคลื่นรบกวนแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นเรียกว่า คลื่นไซน์เขียนเป็นสมการได้ว่า



มุม θ สามารถเขียนในรูปการกระจัด x ได้คือ $\theta \propto x$

สามารถเขียนได้ว่า $\theta = kx$

เมื่อ $\theta = 2\pi \text{ radian}$; $x = \lambda$

ดังนั้น $2\pi = k\lambda$; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

คลื่นไซน์เขียนได้ว่า $y = A \sin \theta = A \sin \frac{2\pi x}{\lambda}$

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปทางขวามือ ให้อนุภาคทางขวามือมีเฟสน้อยกว่าด้วยเฟสขนาดมุม ϕ เราจะเขียนสมการคลื่นเคลื่อนที่ไปทางขวาดังนี้

$$y = A \sin(\omega t - \phi)$$

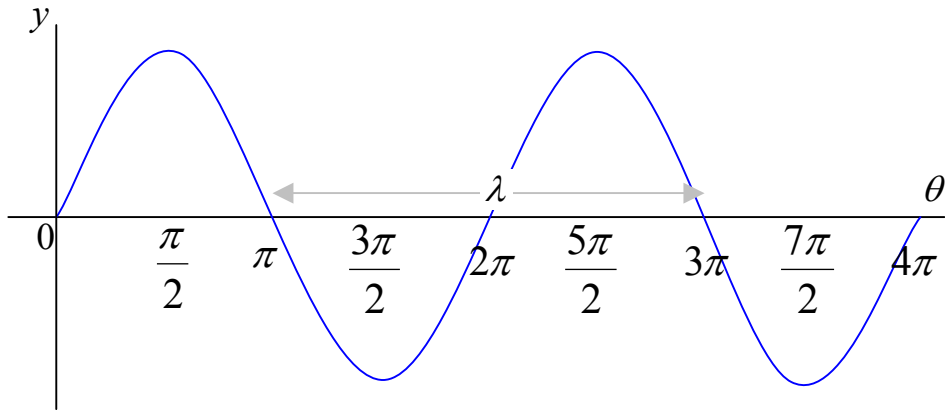
สามารถเขียนในรูปของการกระจัด x ได้

$$y = A \sin(\omega t - kx)$$

ดังนั้น สมการคลื่น เขียนได้เป็น $y(x,t) = A \sin(\omega t - kx)$

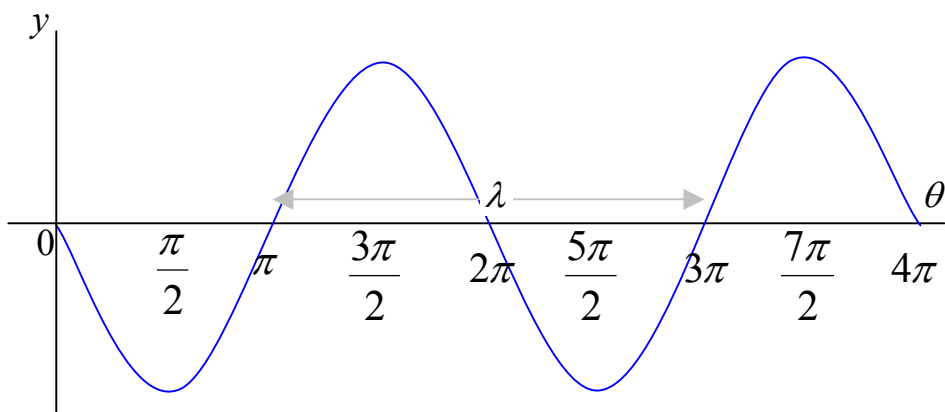
พิจารณาที่จุดกำเนิด $x=0$ ได้ความสัมพันธ์ว่า

$$y(0,t) = A \sin \omega t = A \sin 2\pi \frac{t}{T}$$



หรือในการเคลื่อนที่ไปทางขวา ที่เวลา $t=0$ จะเขียนได้ว่า

$$y(x,0) = A \sin(-kx) = -A \sin(kx) = -A \sin 2\pi \frac{x}{\lambda}$$



ดังนั้น โดยภาพรวม สามารถเขียนสมการคลื่นไซน์ในรูปแบบสมการคลื่นทั่วไป

$$y(x,t) = A \sin(\omega t \pm kx)$$

$$y(x,t) = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} \pm \frac{x}{\lambda} \right)$$

พิจารณา อนุพันธ์อันดับสองของสมการ $y(x,t) = A\sin(\omega t - kx)$

เทียบกับเวลา $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\omega^2 A\sin(\omega t - kx)$

เทียบกับกระจัด $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -k^2 A\sin(\omega t - kx)$

จากอนุพันธ์ ทั้งสองสมการ มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\omega^2}{k^2} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

จะเห็นได้ว่า เป็นสมการทั่วไปของคลื่น (**Wave equation**) ในหนึ่งมิติ

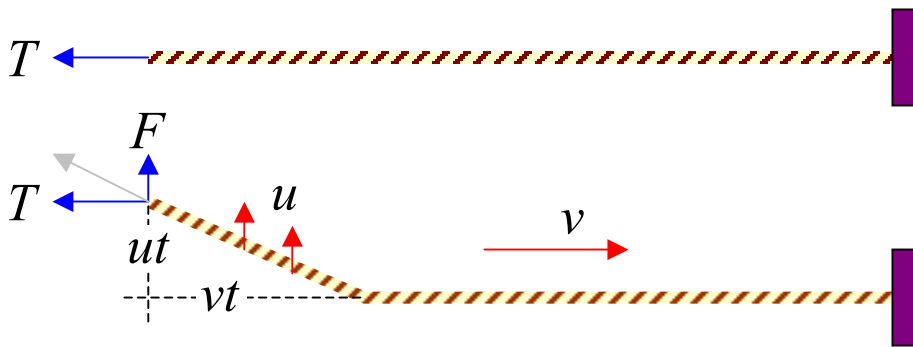
4. อัตราเร็วของคลื่น

ความเร็วคลื่น v อาจเรียกว่าความเร็วเฟสของคลื่น ที่ขณะใด ๆ

$$v = \frac{s}{t} = \frac{\lambda}{T} = f\lambda$$

4.1 อัตราเร็วของคลื่นตามขวาง

พิจารณา เชือกยาว l มีมวล m ถูกขึงให้ตึง T เมื่อเราออกแรง F ดึงเชือกไปทางด้านบน ทำให้เชือกมีความเร็ว u ในขณะที่คลื่นตามขวางเคลื่อนที่ไปทางขวาด้วยอัตราเร็ว v



ลักษณะของรูปสามเหลี่ยมของแรงกับการกระจัด มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมคล้าย จะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$\frac{F}{T} = \frac{ut}{vt} \quad ; \quad F = \frac{u}{v}T$$

พิจารณามวลของเชือกที่เคลื่อนที่ m_0 จะมีเพียงส่วนเดียวของมวลทั้งหมด เมื่อ $vt \gg ut$ จะเห็นได้ว่า ความยาวของเชือกส่วนที่เคลื่อนที่มีค่าประมาณ vt ดังนั้น มวลของเชือกส่วนที่เคลื่อนที่ m_0 มีค่าเท่ากับ $\frac{m_0}{vt} = \frac{m}{l}$

$$m_0 = m \frac{vt}{l}$$

ดังนั้น การดล หรือโมเมนตัมของมวลเชือก มีค่าเปลี่ยนไปเท่ากับ

$$m_0 u = \left(m \frac{vt}{l}\right) u - 0$$

จากการดล ได้ว่า

$$Ft = \left(m \frac{vt}{l}\right) u$$

$$\frac{u}{v} T = \left(m \frac{v}{l}\right) u$$

$$v^2 = \frac{T}{m/l}$$

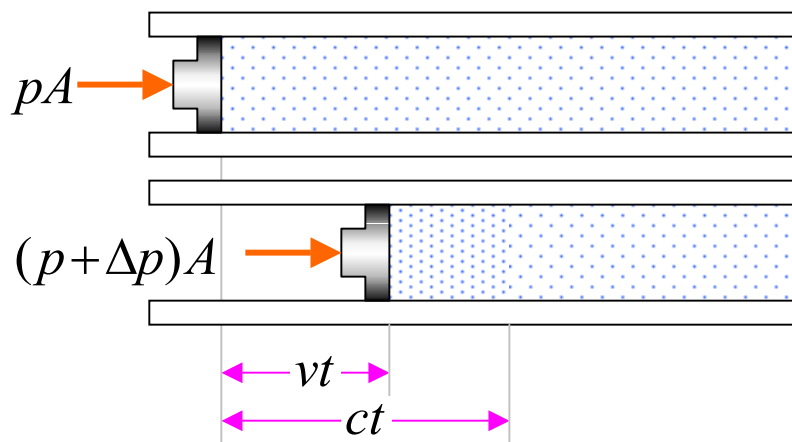
กำหนดให้ อัตราส่วนมวลต่อความยาวเชือกเท่ากับ $\mu = \frac{m}{l}$

ดังนั้น อัตราเร็วของคลื่นตามขวางในเส้นเชือก มีค่าเท่ากับ

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

ซึ่งสัมพันธ์กับความตึงเชือกและอัตราส่วนมวลต่อความยาวเชือก ดังสมการ

4.2 อัตราเร็วของคลื่นตามยาว



พิจารณา ลูกสูบที่ปลายซ้ายของท่อเคลื่อนที่ไปทางขวาด้วยความเร็ว v คลื่นเคลื่อนที่ไปทางขวาด้วยความเร็ว c โดยที่ $ct \gg vt$ แรงรวมที่กระทำต่อ

ของไหลเป็น $(p + \Delta p)A - pA = \Delta pA$

ของไหลที่ถูกอัดมีมวลเป็น ρctA

ดังนั้นโมเมนตัมตามยาวเป็น $(\rho ctA)V$

จากทฤษฎี การดล - โมเมนตัม

$$(\Delta pA)t = (\rho ctA)V$$

$$\Delta p = \rho cV$$

จากนิยามของมอดูลัสเชิงปริมาตร β จะได้

$$\beta = -\frac{\Delta p}{\Delta V/V_0}$$

ดังนั้น ความเร็วของคลื่นตามยาวของของไหล

$$c = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}}$$

ในทำนองเดียวกัน ความเร็วของคลื่นตามยาวของของแข็ง มีความสัมพันธ์

$$c = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

กรณีของก๊าซอุดมคติ ในกระบวนการอะเดียแบติก ปริมาณความร้อนคงที่จะ
ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน P และปริมาตร V ของก๊าซอุดมคติ เป็น

$$PV^\gamma = K \quad ; \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

$$\ln P + \gamma \ln V = 0$$

ค่าอนุพันธ์ของสมการเท่ากับ $\frac{dP}{P} + \gamma \frac{dV}{V} = 0$

$$\frac{dP}{P} = -\gamma \frac{dV}{V}$$

$$\beta_a = -\frac{dP}{dV/V} = \gamma P$$

กรณี อะเดียบาติก จะมีอัตราเร็วของคลื่นตามยาวในก๊าซ

$$c = \sqrt{\frac{\beta_a}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$$

มอดูลัสเชิงปริมาตร ไอโซเทอร์มอล เป็น $\beta_a = P$

สำหรับก๊าซอุดมคติ

$$PV = nRT$$

$$\frac{P}{\rho} = \frac{RT}{M}$$

ความเร็วของคลื่นตามยาวของก๊าซอุดมคติ เท่ากับ

$$c = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}$$

ในกรณีของก๊าซ ชนิดหนึ่ง ๆ จะมี γ, R และ M คงตัว

ความเร็วของคลื่นตามยาวของก๊าซ ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังสมการ

$$c \propto \sqrt{T}$$

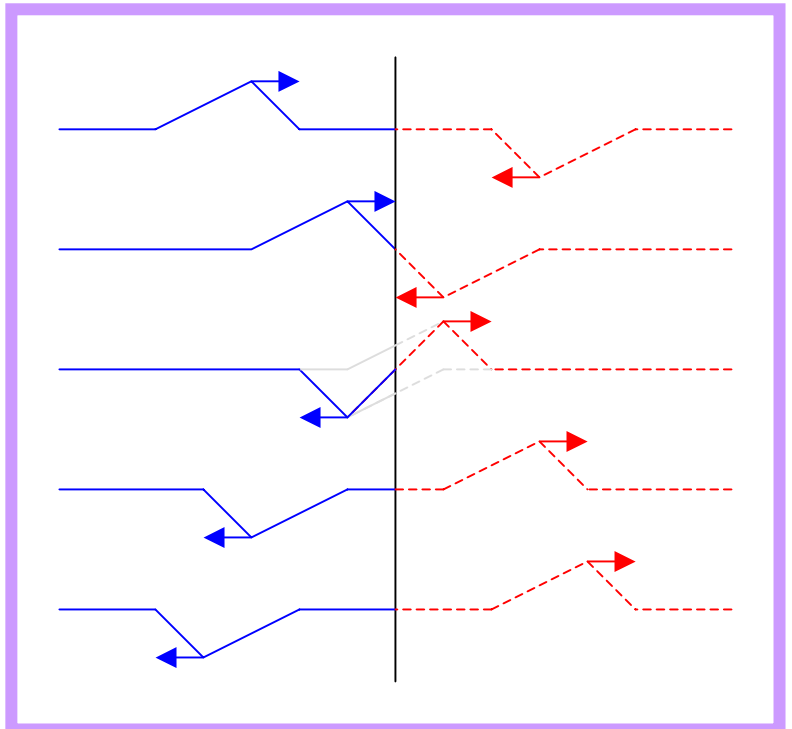
4.3 อัตราเร็วของอนุภาคในตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่

ในกรณีที่เป็นคลื่นไซน์ จะเกิดจากสิ่งรบกวนที่มีการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก อนุภาคจะมีการเคลื่อนที่ดังสมการต่อไปนี้

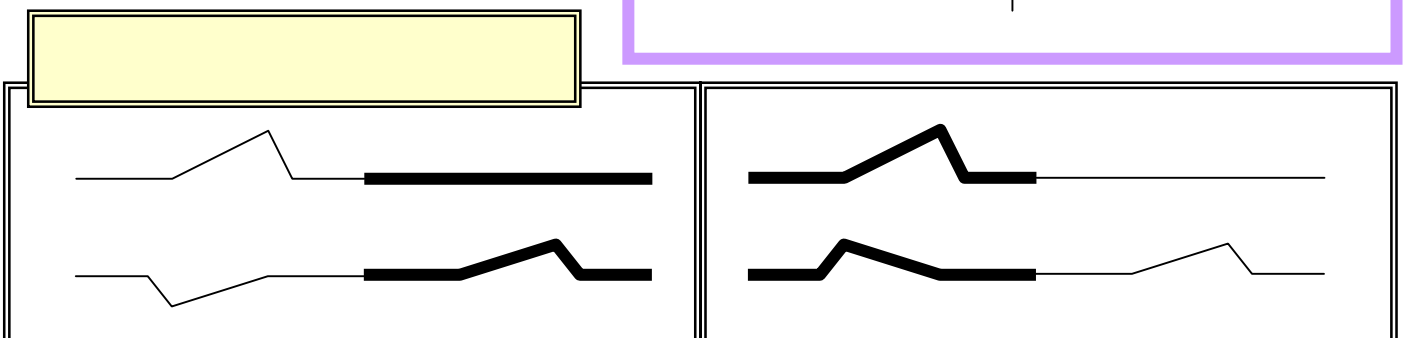
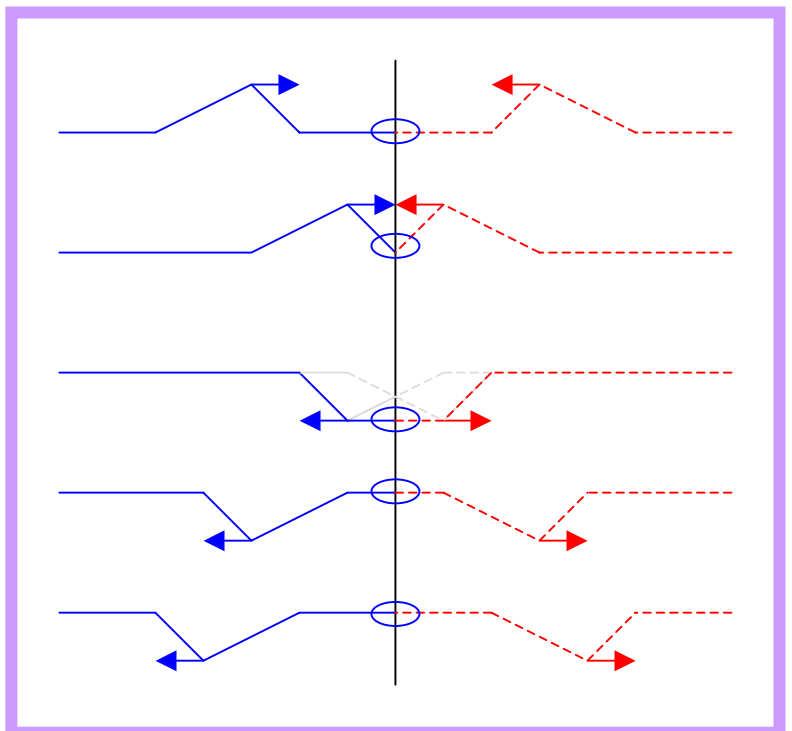
การกระจัด	$y = A \sin \theta = A \sin \omega t$ $v = \omega A \cos \omega t$
ความเร็ว	$v = \omega A \sqrt{1 - \sin^2 \omega t}$ $v = \pm \omega A \sqrt{A^2 - y^2}$ $v_{\max} = \pm \omega A$
ความเร่ง	$a = -\omega^2 y = -\omega^2 A \sin \omega t$ $a_{\max} = -\omega^2 A$

5. การสะท้อนของคลื่น

คลื่นพัลส์ เคลื่อนที่ในเส้นเชือก ปลายข้างหนึ่ง ถูกตรึงไว้
 คลื่นที่สะท้อนกลับ จะมีเฟสเปลี่ยนไป 180° จากคลื่นกระทบ ดังรูป (คลื่นที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยไปมาก)

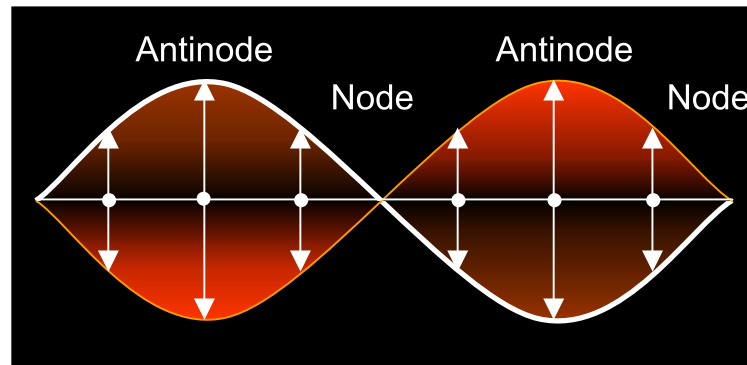


คลื่นพัลส์ เคลื่อนที่ในเส้นเชือก ปลายข้างหนึ่งเป็นอิสระ
 คลื่นที่สะท้อนกลับ จะมีเฟสคงเดิม จากคลื่นกระทบ ดังรูป (คลื่นที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากไปน้อย)



6. คลื่นนิ่ง (Standing wave)

เมื่อมีคลื่นสองขบวนเหมือนกันทุกอย่าง แต่เคลื่อนที่สวนทิศกัน ในตัวกลางเดียวกัน คลื่นรวมจากหลักการ superposition ที่ได้ จะเป็นดังรูปเรียกว่า คลื่นนิ่ง



สมการของคลื่นนิ่งหาได้จากผลรวมของสองสมการคลื่นที่มีแอมพลิจูดคาบ และความยาวคลื่นเท่ากัน แต่เคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามดังนี้

$$y_1 = A \sin(\omega t - kx) ; y_2 = A \sin(\omega t + kx)$$

$$y_1 + y_2 = A \sin(\omega t - kx) + A \sin(\omega t + kx)$$

$$y_1 + y_2 = (2A \cos \omega t) \sin kx$$

จะเห็นได้ว่า คลื่นนิ่งมีแอมพลิจูดแปรผันตามเวลา ดังสมการ

จากรูปจะเห็นได้ว่า ตำแหน่งบัพ Node นั้น ค่า $kx = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$ ดังนั้นค่าระยะ x ของตำแหน่งบัพ เปรียบเทียบกับ λ ได้ดังสมการ

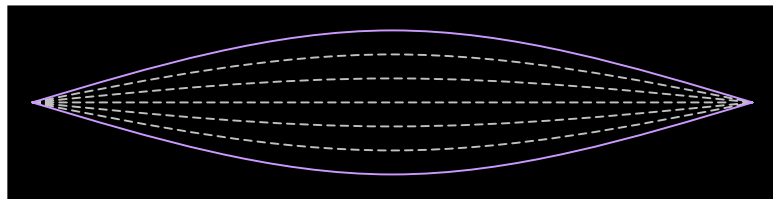
$$x = \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, \dots, \frac{n\lambda}{2} ; n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

และความถี่ที่ทำให้เกิดคลื่นนิ่ง เรียก ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) หรือความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance frequency)

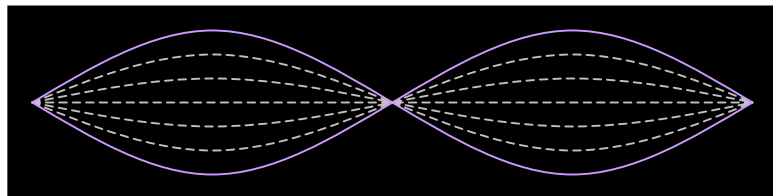
7. คลื่นนิ่งของเส้นลวดตรึงสองปลายแน่น

กำหนดให้ระยะระหว่างสองปลายมีค่าเท่ากับ คลื่นนิ่งที่เกิดขึ้น เกิดจาก คลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนที่รวมกันจากทั้งสองปลาย จากรูป คลื่นนิ่ง สามารถมีได้หลายหลุม Loop ซึ่งเรียกการเกิดอย่างนี้ว่า Normal mode ระยะกระจัดของคลื่นนิ่ง ที่เป็นศูนย์ เรียกว่าบัพ

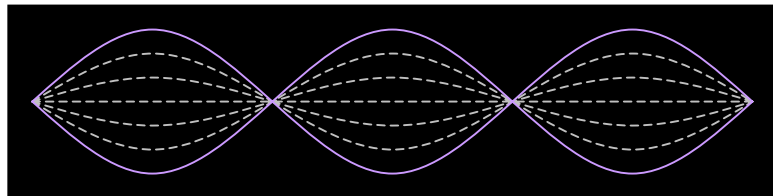
1 Loop



2 Loop



3 Loop



จากรูป 1 Loop , 2 Loop , 3 Loop ได้ความสัมพันธ์

$$L = \frac{1\lambda}{2}, \frac{2\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}$$

สามารถเขียนสมการขึ้นกับจำนวนหลุมได้เป็น

$$L = \frac{n\lambda}{2} \quad ; \quad n=1,2,3,..$$

จากความถี่ของคลื่นเท่ากับ $f = \frac{c}{\lambda}$

หรือ $f = \frac{nc}{2L}$ โดยที่ $c = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$

กรณีที่ $n=1$ จะได้ความถี่ต่ำที่สุด $f_1 = \frac{c}{2L}$ เรียกว่า ความถี่มูลฐาน

(Fundamental frequency) หรือ ฮาร์โมนิกที่ 1 (First harmonic)

กรณีที่ $n=2$ จะได้ความถี่ $f_2 = \frac{2c}{2L} = \frac{c}{L} = 2f_1$ เรียกว่า โอเวอร์โทนที่ 1

ซึ่งจากสมการจะเห็นได้ว่า ความถี่โอเวอร์โทนที่ 1 เป็น 2 เท่าของความถี่มูลฐาน เรียกว่า ฮาร์โมนิกที่ 2 (Second harmonic)

กรณีที่ $n=3$ จะได้ความถี่ $f_3 = \frac{3c}{2L} = 3f_1$ เรียกว่า โอเวอร์โทนที่ 2 ซึ่ง

จากสมการจะเห็นได้ว่า ความถี่โอเวอร์โทนที่ 2 เป็น 3 เท่าของความถี่มูลฐาน เรียกว่า ฮาร์โมนิกที่ 3 (Third harmonic)

ถ้าปลายทั้งสองของเส้นลวดถูกตรึงที่ $x=0$ และ $x=L$ เมื่อ

$$\sin kL = 0 \quad ; \quad kL = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots, n\pi$$

ซึ่งพิจารณาท่าแหน่งบัพ และจาก $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ได้สมการว่า

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad \text{โดยที่ } n = \text{integer}$$

พิจารณาท่าแหน่งปฏิบัพ แอมพลิจูดของการเคลื่อนที่เป็น $2A \sin kx$ ซึ่งจะ
มีแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $2A$ เมื่อ

$$kx = \frac{1\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots$$

$$x = \frac{1\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots$$

ความถี่มูลฐานของการสั่นของเส้นลวดเป็น

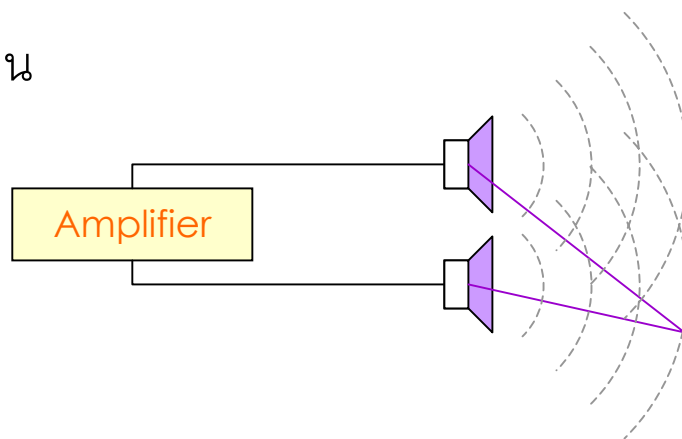
$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

8. เรโซแนนซ์ (การสั่นพ้อง)

การที่วัตถุสามารถสั่นได้โดยมีคาบที่แน่นอน ถูกกระทำจากคลื่นซึ่งมาจากภายนอกที่มีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติการสั่นของวัตถุนั้น ๆ ผลที่ได้จะทำให้วัตถุมีการสั่นที่มีแอมพลิจูดสูงขึ้นจากเดิมมาก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า **เรโซแนนซ์** หรือการสั่นพ้อง เช่น การสั่นของสายกีตาร์ ซึ่งไม่ได้ถูกดีด เพียงแต่ได้รับเสียงจากภายนอกซึ่งมีความถี่สอดคล้องกับ Normal mode ของสายกีตาร์ หรือ การแตกของแก้วแชมเปญ ซึ่งได้รับเพียงเสียงที่มีความถี่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของแก้วใบนั้น เป็นต้น

9. การแทรกสอดของคลื่นตามยาว

พิจารณาการแทรกสอดของแหล่งกำเนิดคลื่นอาพันธ์ ดังนั้น พิจารณาการแทรกสอดแบบเสริมกันได้ว่า ผลต่างของเส้นทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นทั้งสอง มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น หรือ การแทรกสอดแบบหักล้างกันได้ว่า ผลต่างของเส้นทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นทั้งสอง มีค่าเป็นเศษส่วนของความยาวคลื่น



คลื่นเสริมกันเมื่อ

$$S_1P - S_2P = n\lambda \quad ; \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

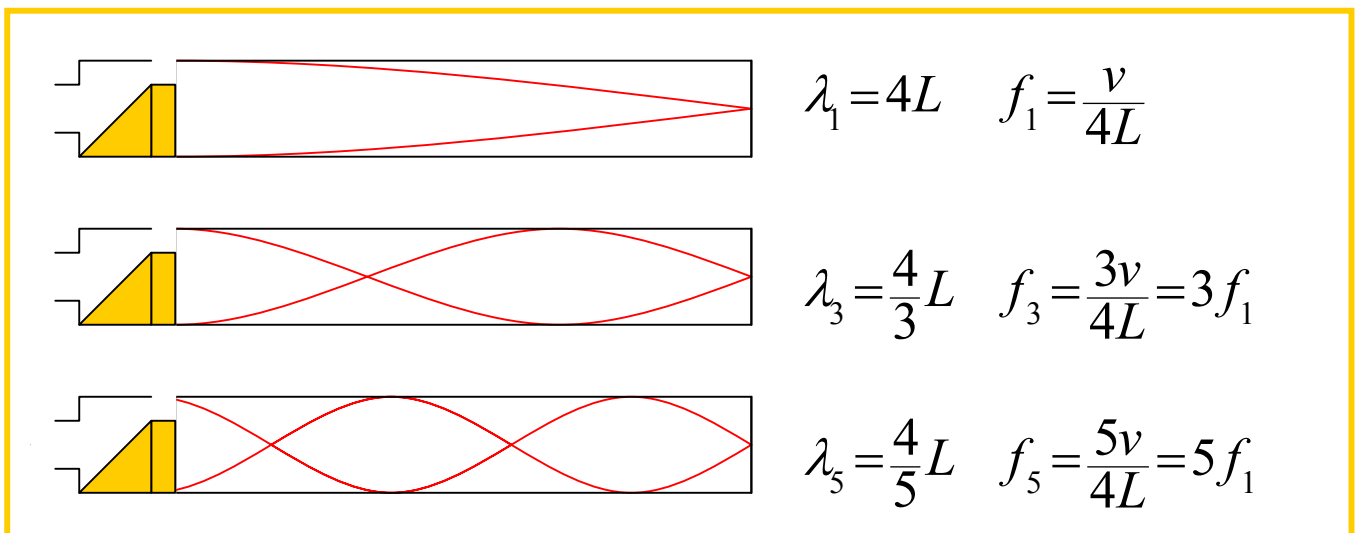
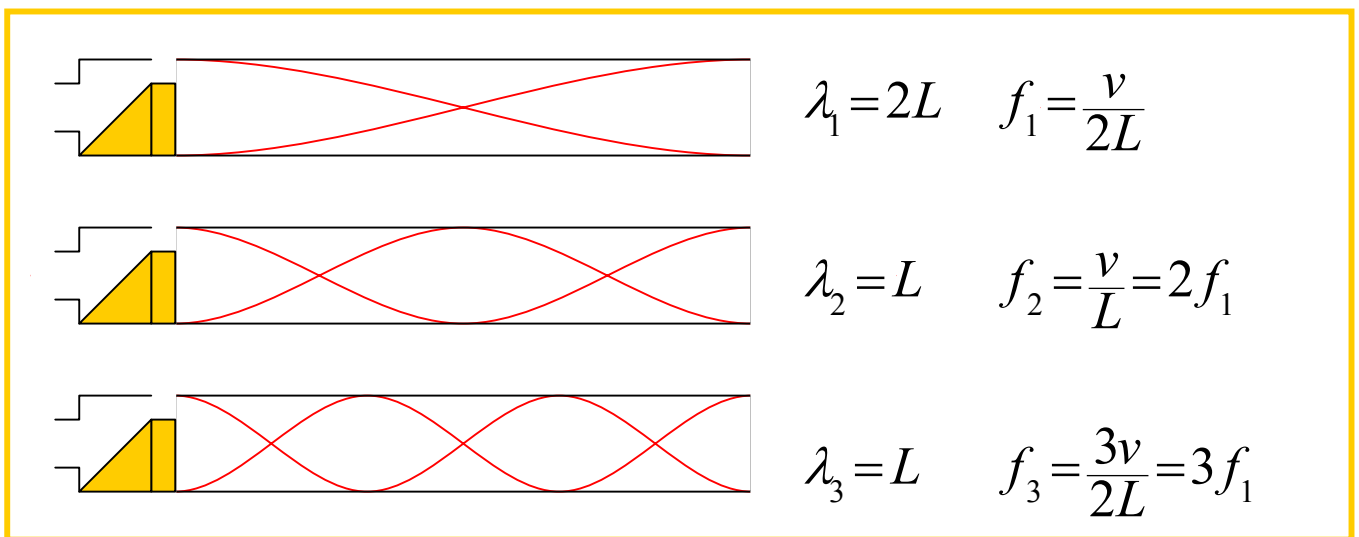
คลื่นหักล้างกันเมื่อ

$$S_1P - S_2P = (n - \frac{1}{2})\lambda \quad ; \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

10. คลื่นนิ่งตามยาวในท่อออร์แกน

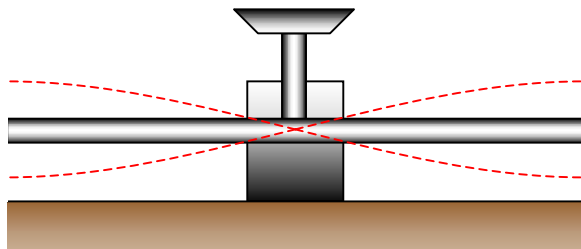
คลื่นนิ่งในท่อออร์แกน เกิดจากคลื่นตามยาวที่เคลื่อนกันแทรกสอดกันภายในท่อ ที่ปลายปิดของท่อ จะมีลักษณะเป็น Node เนื่องจากที่ปลายปิดโมเลกุลของอากาศไม่สามารถเคลื่อนที่ตามยาวได้ ดังนั้นการกระจัดจึงเป็น Node ที่ปลายปิดคลื่นที่สะท้อนจะกลับเฟส 180° ซึ่งตรงข้ามกับคลื่นความดัน มีเฟสต่างกัน 90° ในลักษณะเดียวกัน ที่ปลายเปิด คลื่นความดันจะเป็น Node และการกระจัดจะเป็น Antinode

พิจารณาคำคลื่นนิ่งในท่อออร์แกน ปลายปิด 1 ข้าง

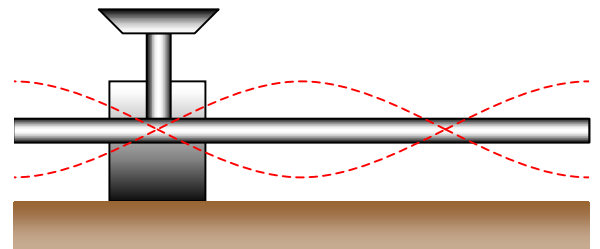


11. คลื่นนิ่งในแท่งและแผ่น

พิจารณาแท่งวัตถุยาว L ที่ถูกยึดบริเวณกลางแท่ง และปล่อยให้ที่ปลายแท่งวัตถุมีการสั่น ดังรูป



$$\lambda_1 = 2L \quad f_1 = \frac{v}{2L}$$



$$\lambda_2 = L \quad f_2 = \frac{v}{L}$$

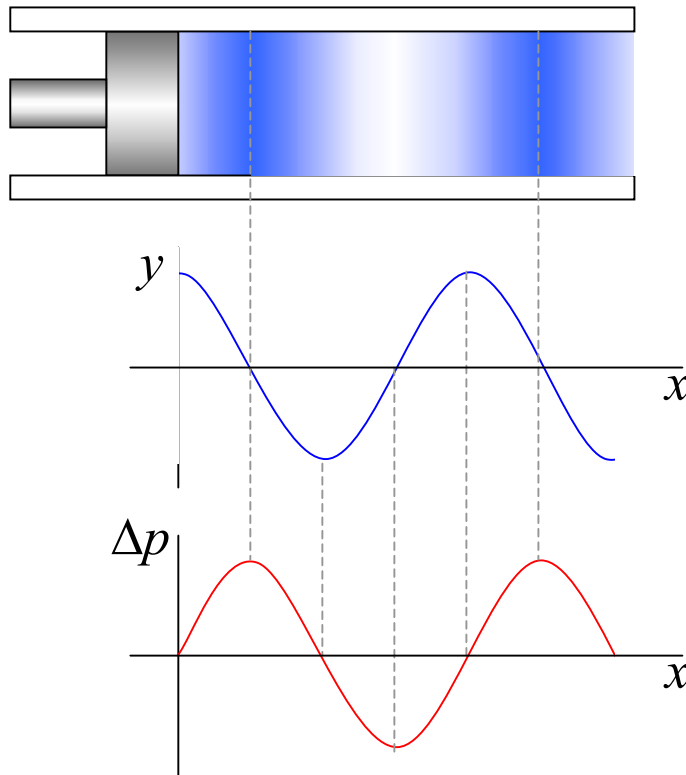
12. ความเข้มของคลื่น

ความเข้มของคลื่น **Intensity** คือกำลังของคลื่นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

$$I = \frac{\text{Power}}{\text{Area}} = \frac{Fv}{A} = pv ; p = \text{pressure}$$

จากนิยาม บัลด์มอดูลัส **Bulk's modulus** การเปลี่ยนแปลงความดันของก๊าซ

$$\Delta p = -\beta \frac{\Delta V}{V_0}$$



พิจารณา คลื่นเคลื่อนที่จากระยะ Δx ไปเป็น $x + \Delta x$ ระยะ Δy คือตำแหน่งใด ๆ ในช่วง $x + \Delta x$ ดังนั้นปริมาตร $V_0 = A\Delta x$ และ $\Delta V = A\Delta y$ โดยที่ พื้นที่หน้าตัดที่เคลื่อนที่ตามยาวเท่ากับ A

$$\Delta p = -\beta \frac{\Delta V}{V_0} = -\beta \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

พิจารณาที่ระยะเล็ก ๆ $\Delta x \rightarrow 0$ ได้ว่า

$$\Delta p = -\beta \frac{\partial}{\partial x} A \cos(kx - \omega t) = \beta k A \sin(kx - \omega t)$$

จากสมการ $y(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$; $v = A \omega \sin(kx - \omega t)$

ความเข้มของคลื่น เท่ากับ

$$pv = \beta k \omega A^2 \sin^2(kx - \omega t)$$

โดยค่าเฉลี่ยของฟังก์ชัน เท่ากับ $\sin^2(kx - \omega t) \approx \frac{1}{2}$

ดังนั้น ความเข้มของคลื่น เท่ากับ

$$I = pv = \frac{1}{2} \beta k \omega A^2$$

แอมพลิจูดความดัน p คือ $p = \beta k A$ และ $v = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}}$ จะได้ว่า

$$I = \frac{1}{2} \beta k \omega A^2 = \frac{p^2}{2\rho v}$$

สามารถสรุปได้ว่า ความเข้มของคลื่น ขึ้นกับค่ากำลังสองของแอมพลิจูด

ความดันมากที่สุด ที่หูสามารถทนฟังได้คือ $p = 30 \text{ N/m}^2$ พิจารณา
ความหนาแน่นของอากาศประมาณ 1.22 kg/m^3 และอัตราเร็วของเสียงใน
อากาศประมาณ 346 m/s

$$I = 1.06 \text{ W/m}^2$$

แอมพลิจูดความดันเสียงค่อนที่สุดที่ได้ยินคือ $p = 3 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ โดยมี
ความเข้มเสียงเท่ากับ $I = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

13. ระดับความเข้มและความดัง

หูมนุษย์มีความไวต่อความเข้มเสียงเป็นแบบสเกลลอการิทึม จึงนิยามระดับความเข้ม β ของคลื่นเสียงว่า

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (dB)$$

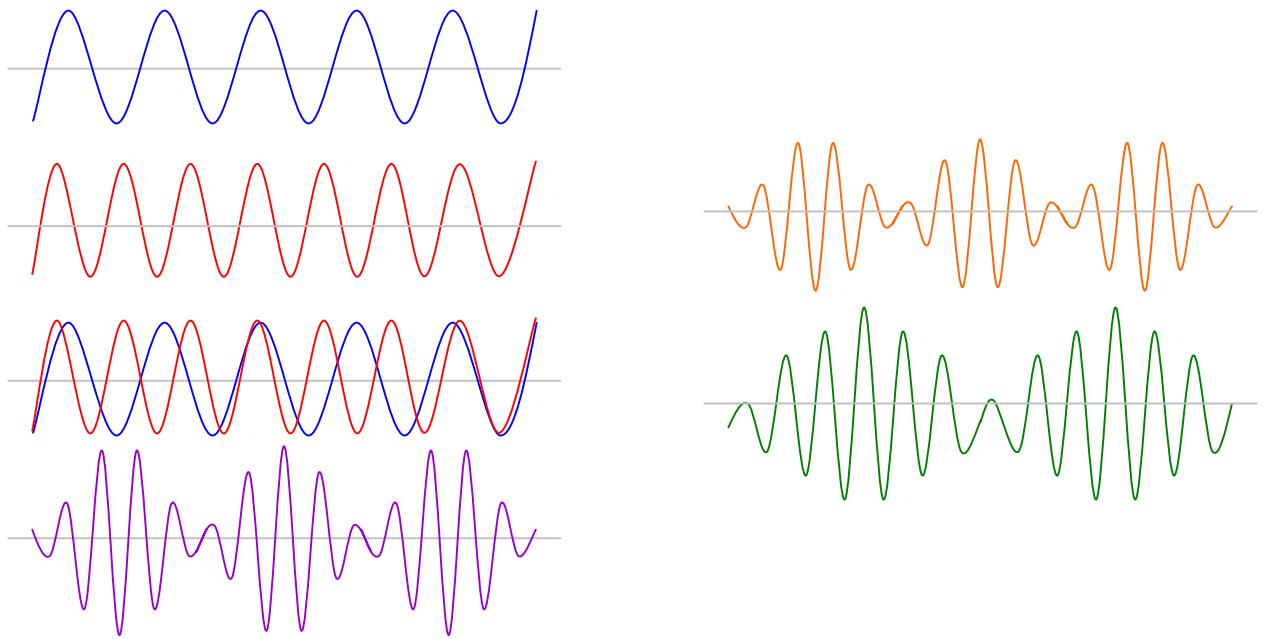
ที่ความเข้มค่อนยที่สุดที่ได้ยิน มีค่าเท่ากับ $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ ซึ่งสอดคล้องกับระดับความดัง 0 เดซิเบล และความเข้มที่รู้สึกเกิดการเจ็บปวด มีค่าประมาณ $I = 1 \text{ W/m}^2$ ซึ่งสอดคล้องกับระดับความดัง 120 เดซิเบล เรียกว่า มลภาวะทางเสียงเป็นพิษ

ตาราง ระดับเสียงจากต้นกำเนิดต่าง ๆ

แหล่งกำเนิดเสียง	ระดับความเข้ม dB
ใกล้เครื่องบินขับไล่	150
ไซเรน คอนเสิร์ตหรือค	120
รถไฟฟ้าใต้ดิน	100
ถนนจราจรพลุกพล่าน	80
สนทนา ปกติ	50
ยุงบิน	40
กระซิบ	30
ใบไม้ไหว	10
ขีดจำกัด การได้ยิน	0

14. บีตส์ (Beats)

บีตส์ เกิดขึ้นเมื่อคลื่นสองขบวนมีแอมพลิจูดเท่ากัน แต่มีความถี่ต่างกันเล็กน้อย เคลื่อนที่ผ่านบริเวณเดียวกันมาแทรกสอดกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดและความดัง



พิจารณา บีตส์ ในเชิงคณิตศาสตร์ ดังต่อไปนี้

$$y_1 = A \cos(2\pi f_1 t)$$

$$y_2 = A \cos(2\pi f_2 t)$$

$$y = y_1 + y_2 = A \cos(2\pi f_1 t) + A \cos(2\pi f_2 t)$$

$$y = [2A \cos 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right) t] \cos 2\pi \left(\frac{f_1 + f_2}{2}\right) t$$

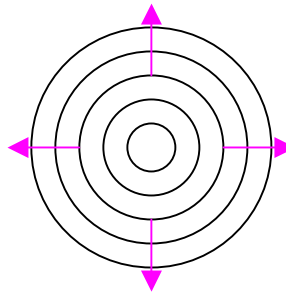
การสั่นผลลัพธ์มีความถี่ $\frac{f_1 + f_2}{2}$ จะเกิดบีตส์ หรือแอมพลิจูดสูงสุดเมื่อ

$\cos 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right) t$ มีค่าเท่ากับ $+1$ หรือ -1 โดยที่บีตส์เท่ากับ $f_b = |f_1 - f_2|$

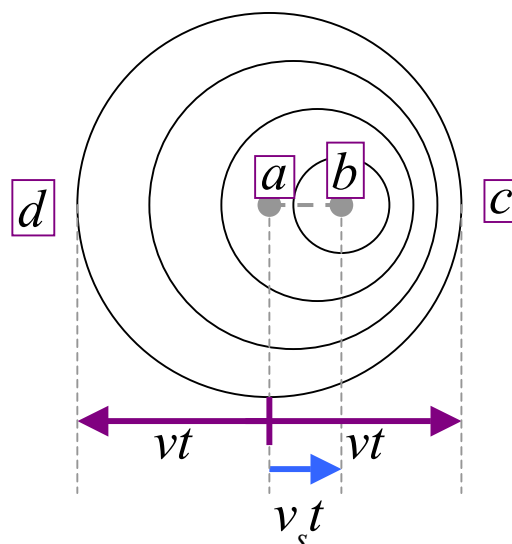
15. ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler)

ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ของเสียง เป็นปรากฏการณ์ที่ความถี่ของเสียงที่ผู้ฟังได้รับเปลี่ยนไปจากเดิม เนื่องจากต้นกำเนิดเสียงหรือผู้ฟังหรือทั้งสองมีการเคลื่อนที่

เมื่อผู้ฟังและต้นกำเนิดเสียงอยู่กับที่ ลักษณะของหน้าคลื่นจะเป็นวงกลมสม่ำเสมอ ดังนั้น ความถี่ และ ความยาวคลื่นด้านหน้าและหลัง เท่ากันทุกด้าน ดังรูป



พิจารณา แหล่งกำเนิดคลื่น เคลื่อนที่ไปทางขวา จากจุด a ไปยังจุด b ด้วยความเร็ว v_s ดังนั้น ระยะทางที่เคลื่อนที่ได้มีค่าเท่ากับ $v_s t$ ในขณะเดียวกัน คลื่นที่ปล่อยออกมา เคลื่อนที่เป็นวงกลมตลอดเวลา แต่ที่ขณะใด ๆ แหล่งกำเนิดคลื่นอยู่ใกล้หน้าคลื่นด้านหนึ่ง มากกว่าอีกด้านหนึ่ง ดังรูป



ความยาวคลื่น มีค่าเท่ากับ ระยะที่คลื่นเคลื่อนที่ ส่วนจำนวนคลื่น

$$\lambda_{front} = \frac{vt - v_s t}{f_s t} = \frac{v - v_s}{f_s} \quad \text{และ} \quad \lambda_{back} = \frac{vt + v_s t}{f_s t} = \frac{v + v_s}{f_s}$$

กำหนดให้ แหล่งกำเนิด **Source** ปล่อยคลื่นความถี่ f_s ถ้าหากผู้ฟัง **Observer** เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v_o หรือ แหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v_s ความถี่ที่ผู้ฟังได้รับคือ f ซึ่งกำหนดให้ความเร็วเสียงในอากาศของบริเวณนั้น ๆ มีค่าเท่ากับ v จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$f = f_s \frac{(v \pm v_o)}{(v \pm v_s)}$$

การพิจารณา เครื่องหมาย + หรือ - นั้น เป็นไปตามการอิงให้เข้ากับ เหตุการณ์ในชีวิตประจำวัน เช่น รถพยาบาลเปิดไซเรน เคลื่อนที่เข้าหาผู้สังเกต ผู้สังเกตจะได้ยินเสียงไซเรนความถี่สูงขึ้น แต่เมื่อรถพยาบาลเคลื่อนที่ ออกจากผู้สังเกต เสียงที่ได้ยิน จะมีความถี่ต่ำกว่าปกติ เป็นต้น ในทำนอง เดียวกัน จะเห็นว่า หากผู้สังเกตเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว เข้าหาแหล่งกำเนิด เสียง ที่ได้ยินจะมีความถี่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน หรือหากผู้สังเกตออกจาก แหล่งกำเนิด เสียงที่ได้ยินจะมีความถี่ต่ำลง เป็นต้น

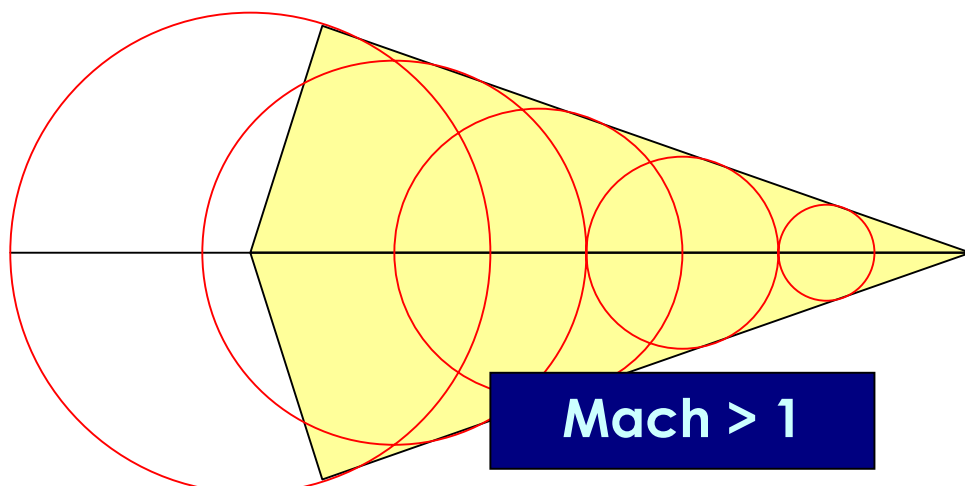
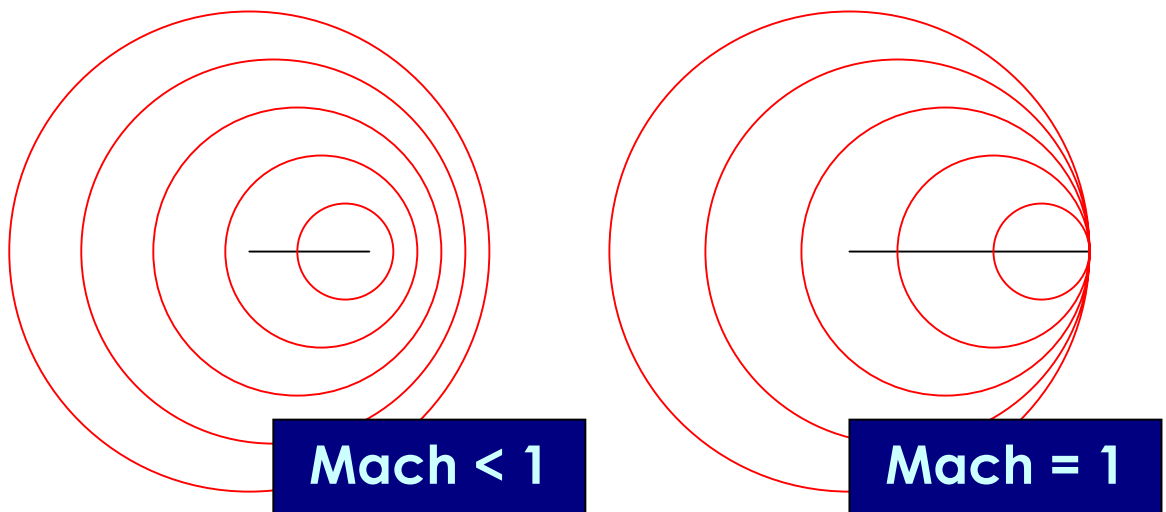
ดังนั้น ความถี่เสียงโดยสรุปจะได้ว่า เมื่อแหล่งกำเนิด และหรือ ผู้สังเกต มีการเคลื่อนที่เข้าหากัน จะทำให้เสียงมีความถี่สูงขึ้นนั่นเอง หรือ แหล่งกำเนิดและหรือผู้สังเกต เคลื่อนที่ออกจากกัน เสียงที่ได้ยินจะมีความถี่ เสียงต่ำลง

16. คลื่นกระแทก (Shock wave)

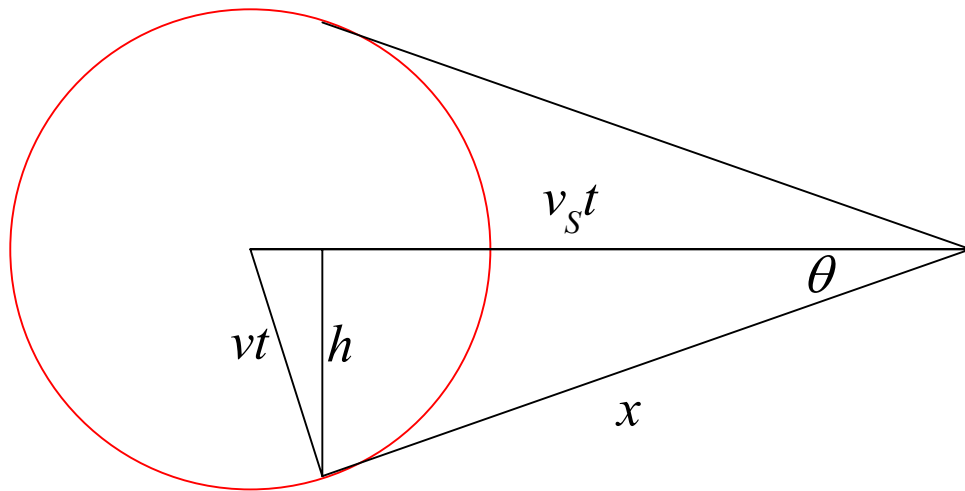
คลื่นกระแทก เกิดได้จากการที่ แหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เร็วกว่า ความเร็วคลื่นในตัวกลางนั้น ๆ เช่น เครื่องบินขับไล่เร็วเหนือเสียง ดังนั้น อัตราเร็วของแหล่งกำเนิดส่วนด้วยอัตราเร็วของคลื่น เรียกว่า เลขมัค Mach number

$$Mach (M) = \frac{v_s}{v}$$

กรณี แหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ช้ากว่าความเร็วคลื่น เลขมัคจะน้อยกว่า 1 เรียกว่า Subsonic หากแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่เท่ากับความเร็วคลื่น เลขมัคจะมีค่าเท่ากับ 1 เรียกว่า Criticalsonic ดังรูป



การคำนวณเกี่ยวกับระยะทางการเคลื่อนที่ของวัตถุที่มีอัตราเร็วมากกว่าอัตราเร็วเสียง






$$\sin \theta = \frac{vt}{v_s t} = \frac{v}{v_s} \quad \text{และ} \quad \sin \theta = \frac{h}{x}$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$\sin \theta = \frac{h}{x} = \frac{v}{v_s} = \frac{1}{Mach}$$

การเกิดคลื่นกระแทก สามารถเกิดได้กับคลื่นชนิดอื่นได้อีกด้วย

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	

