

## บทที่ 12

### คลื่น

#### (Waves)

คลื่นเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงาน คลื่นเกิดจากการที่แหล่งกำเนิดของคลื่นถูกรบกวน เช่น เมื่อกระตุกเชือกเราจะเห็นคลื่นในเส้นเชือก เมื่อโยนก้อนหินลงไปในสระน้ำเราจะเห็นคลื่นตีวงออกไปเรื่อยๆ และจะสังเกตเห็นได้ว่าน้ำไม่ได้เคลื่อนที่ไปกับคลื่น ถ้าลองสังเกตจากจอกแหวนหรือผักตบชวา เวลาเกิดคลื่นน้ำเราจะมองเห็นคล้ายกับว่ามันเคลื่อนที่ไปตามคลื่น แต่จริงๆ แล้วมันอยู่กับที่เพียงแต่เคลื่อนที่ขึ้นลงเท่านั้น

คลื่นบางชนิดต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายโอนพลังงาน เราเรียกคลื่นชนิดนี้ว่า คลื่นเชิงกล มีคลื่นอีกชนิดหนึ่งที่ไม่อาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ เช่น แสงอาทิตย์สามารถส่องมาถึงโลกเราได้ ทั้งๆ ที่มีส่วนที่เป็นสุญญากาศกั้นอยู่ระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ คลื่นประเภทนี้ เรียกว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคลื่นนี้ยังรวมคลื่นวิทยุ คลื่นความร้อน คลื่นแสง รังสีเอกซ์ และคลื่นที่ใช้ในการสื่อสารระบบดาวเทียม เป็นต้น

#### 12.1 การแผ่ของคลื่น (Wave propagation)

โดยทั่วไปเมื่อพูดถึงคลื่นก็มักจะพูดถึงคลื่นซึ่งเกิดตามธรรมชาติที่เห็นได้ง่ายๆ เช่น คลื่นน้ำในทะเล คลื่นเสียงที่ทำให้ลำโพงเกิดการสั่นสะเทือน คลื่นร้าวขึงที่สลับปลิวตามแรงลม ตลอดจนคลื่นที่เกิดการทดลอง เช่น คลื่นเส้นเชือก คลื่นสปริง เป็นต้น ถ้าโยนก้อนหินเล็ก ๆ ก้อนหนึ่งลงกระทบผิวน้ำทันทีที่ก้อนหินสัมผัสกับผิวน้ำจะเกิดคลื่นน้ำออกจากตำแหน่งนั้นแล้วแผ่ออกไปเป็นวงกลม แสดงว่าคลื่นน้ำมีการเคลื่อนที่ ตามที่กล่าวมาในลักษณะการแผ่ ถ้ามีโบ้ไม้ลอยอยู่บนผิวน้ำ ณ บริเวณนั้น คลื่นน้ำก็จะเคลื่อนที่หรือแผ่เลยไปโดยที่โบ้ไม้ไม่ได้เคลื่อนที่ตามคลื่นน้ำไปด้วย แต่จะปรากฏคลื่นที่ขึ้นๆ ลงๆ ในแนวดิ่งเป็นส่วนใหญ่เราสามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ดังนี้ เมื่อก้อนหินกระทบผิวน้ำ ข้อมมีการถ่ายโอนพลังงานในลักษณะการรบกวนโดยที่อนุภาคน้ำจะเคลื่อนที่หรือเคลื่อนย้ายตำแหน่งกลับไปกลับมา ไม่ไกลจากตำแหน่งเดิมและมีการนำพาพลังงานต่อเนื่อง จึงมีผลทำให้อนุภาคอื่นของน้ำที่อยู่ใกล้เคียง เคลื่อนย้ายตำแหน่งกลับไปกลับมาในลักษณะที่คล้ายกัน เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งมีการพาพลังงานไปถึงตำแหน่งที่มีวัตถุอื่นๆ เช่น โบ้ไม้ โบ้ไม้นั้นก็จะรับพลังงานในลักษณะการรบกวน

เช่นกัน จึงเคลื่อนที่ขึ้นลง จากเหตุการณ์นี้ จึงบอกได้ว่าอนุภาคน้ำเคลื่อนย้ายตำแหน่งเพียงเล็กน้อยโดยมิได้เคลื่อนที่ตามคลื่นน้ำไปด้วยจะมีเฉพาะแต่พลังงานเท่านั้นที่ถ่ายโอนผ่านอนุภาคน้ำอย่างต่อเนื่องตามแนวทางที่คลื่นน้ำแผ่ไป ซึ่งเป็นตัวอย่างของลักษณะการเคลื่อนที่แบบคลื่น

## 12.2 คลื่นเชิงกล (Mechanical wave)

คลื่นเชิงกล คือคลื่นที่ต้องอาศัยตัวกลางในการเดินทาง จากต้นทางไปยังบริเวณอื่น ลักษณะของคลื่นประเภทนี้ต้องมีตัวกลางเป็นแหล่งรับการส่งผ่านพลังงาน ตัวอย่างเช่น คลื่นน้ำ คลื่นแผ่นดินไหว คลื่นเส้นเชือก คลื่นสปริง และคลื่นเสียง เป็นต้น สำหรับการที่จะเกิดคลื่นเชิงกลได้ ต้องประกอบด้วย องค์ประกอบสามอย่างคือ

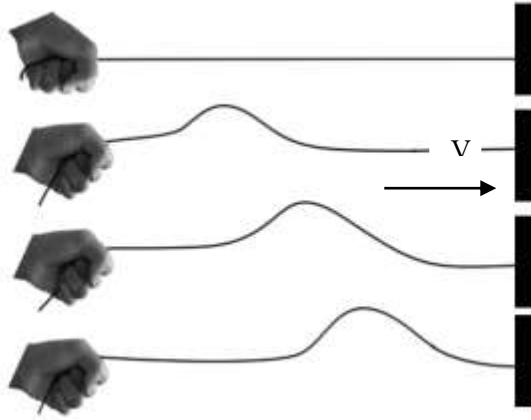
1. ต้องมีแหล่งกำเนิดคลื่น
2. ต้องมีตัวกลางทำหน้าที่เป็นตัวส่งผ่านคลื่น
3. ต้องมีกลไก หรือกรรมวิธีที่ทำให้เกิดอิทธิพลร่วมระหว่างอนุภาคของตัวกลางที่อยู่ใกล้เคียง

ตัวอย่างของคลื่นเชิงกล ได้แก่ คลื่นเสียง คลื่นในเส้นเชือก เป็นต้น

## 12.4 คลื่นตามขวาง (Transverse wave)

คลื่นตามขวาง คือคลื่นที่มีอนุภาคตัวกลางที่นำพาพลังงานพลังงาน หรือสนามที่เปลี่ยนแปลงไปพร้อมกับการแผ่คลื่น มีทิศทางของการเปลี่ยนแปลงในลักษณะขวาง หรือตั้งฉากกับทิศทางการแผ่ของคลื่นเอง เช่น คลื่นในเชือก เป็นต้น

พิจารณากรณีคลื่นในเชือกที่ยาวมากและขึงตึง ถ้ากระตุกปลายเชือกขึ้นแล้วกลับลงที่เดิมหนึ่งครั้งเราจะเห็นคลื่นคลหนึ่งคลื่นเคลื่อนที่ไปในเชือกด้วยอัตราเร็วคงตัว ถ้าเชือกนั้นเป็นชนิดเอกพันธ์ และแรงตึงในเชือกมีค่าคงตัว ดังภาพที่ 12.1



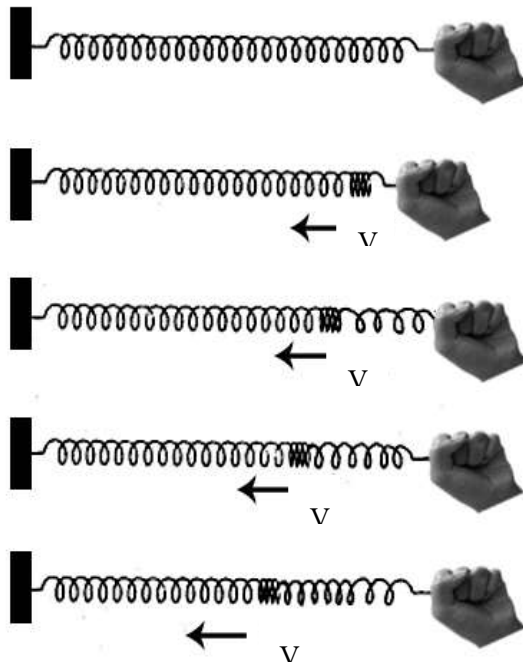
ภาพที่ 12.1 คลื่นเคลื่อนตามขวางในเชือกเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็ว  $v$

ถ้ากระตุกปลายเชือกขึ้นลงแบบซิมเปิลฮาร์โมนิกด้วยขนาด  $A$  เมตร คาบ  $P$  วินาที ความถี่  $f$  เฮิร์ตซ์ เราจะเห็น ขบวนคลื่นตามขวางที่มีขนาด  $A$  เมตร คาบ  $P$  วินาที ความถี่  $f$  เฮิร์ตซ์ เคลื่อนที่ไปในเชือกด้วยความเร็วคงตัว

### 12.5 คลื่นตามยาว (Longitudinal wave)

คลื่นตามยาว คือคลื่น ที่มีการเคลื่อนย้ายของอนุภาคตัวกลาง ซึ่งเป็นแหล่งการถ่ายโอนพลังงาน ในลักษณะด้านแนวนาน หรือแนวเดียวกับทิศการแผ่คลื่น เช่น คลื่นเสียง และคลื่นในสปริง คลื่นตามยาวทุกชนิดจะเป็นคลื่นเชิงกล คือ ต้องมีตัวกลางในการนำพา

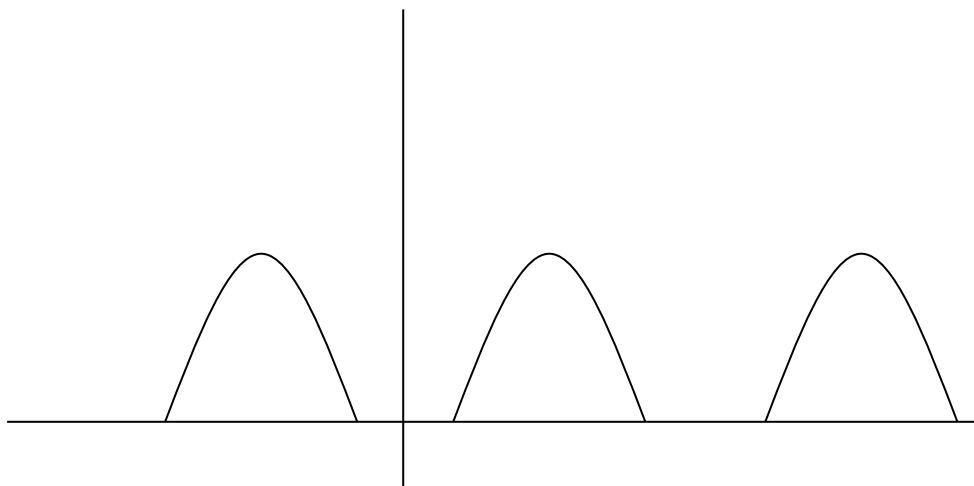
พิจารณาการอัดสปริงจะเห็นส่วนอัดเคลื่อนที่ไปในสปริงดังภาพที่ 12.2 อนุภาคของลวดสปริงสั่นในแนวเดียวกับทิศของการเดินทางของคลื่น (ทิศส่วนที่อัดเคลื่อนที่ไป)



ภาพที่ 12.2 คลื่นตามยาวในเส้นลวดสปริงเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $V$

### 12.6 ฟังก์ชันคลื่นและสมการของคลื่น (Wave equation and function)

พิจารณาฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์  $y = f(x)$  ซึ่งมีกราฟเป็นรูปพัลส์ของคลื่น ดังภาพที่ 12.3

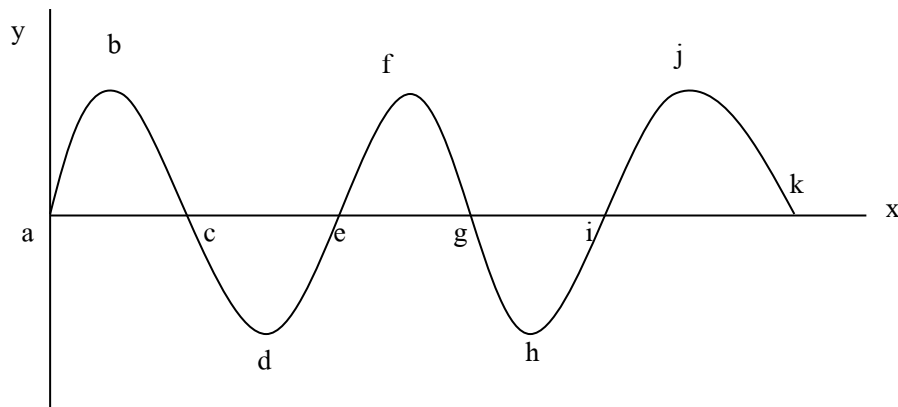


ภาพที่ 12.3 ลักษณะคลื่น

ถ้าแทน  $x$  ด้วย  $x - s$  จะได้  $y = f(x - s)$  จะมีรูปร่างเหมือนเดิม เพียงแต่ย้ายไปทางขวาตามแกน  $x$  เป็นระยะทาง  $s$  ในทำนองเดียวกัน ถ้าแทน  $x$  ด้วย  $x + s$  จะได้กราฟมีรูปร่างคงเดิมให้อัตราเร็วของคลื่นเคลื่อนที่ไป 1 เมตร ไปตามแกน  $x$  เท่ากับ  $v$  ในเวลา  $t$  คลื่นจะเคลื่อนที่ได้ระยะทางเป็น  $s$  ดังนั้น  $s = vt$  และจะเขียนฟังก์ชัน  $y$  ได้ คือ  $y = f(x - vt)$  สำหรับแกน  $+x$  และ  $y = f(x + vt)$  สำหรับแกน  $-x$

## 12.7 คลื่นฮาร์มอนิก (Harmonic wave)

พิจารณาส่วนประกอบของคลื่นฮาร์มอนิกรูปไซน์ดังภาพที่ 12.4



ภาพที่ 12.4 ส่วนประกอบของคลื่น

จากภาพที่ 12.4 เป็นลักษณะของคลื่นไซน์ซึ่งมีลักษณะเคลื่อนที่ขึ้นลงซ้ำกันไปเรื่อยๆ โดยจากภาพเราสามารถที่จะพิจารณาส่วนประกอบของคลื่นได้คือ

- 1) ความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) คือ ช่วงระยะที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ครบหนึ่งรอบ เช่น ในรูปคือ ระยะ  $a$  ถึง  $e$  หรือระยะ  $b$  ถึง  $f$  เป็นต้น
- 2) แอมพลิจูดของคลื่น ( $A$ ) คือ การกระจัดที่คลื่นเคลื่อนที่ขึ้นไปถึงจุดสูงสุด หรือเป็นระยะทอ้งคลื่น ตัวอย่างของแอมพลิจูดในรูปคือ  $b, d, f$  เป็นต้น
- 3) คาบ ( $T$ ) คือ ระยะเวลาที่คลื่นใช้ในการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ
- 4) ความถี่ ( $f$ ) คือ จำนวนรอบของคลื่นในเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบหรือคาบ ซึ่งความถี่จะเป็นส่วนกลับของคาบหรือมีค่าเท่ากับ  $1/T$

- 5) ความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) คือ จำนวนรอบเชิงมุมที่คลื่นกวาดไปได้ในขณะที่เคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ โดยระยะของความถี่เชิงมุมจะวัดเป็นเรเดียน ความถี่เชิงมุมมีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที
- 6) ความเร็วของคลื่น ( $v$ ) คือ อัตราเร็วในการแผ่หรือเคลื่อนที่ของคลื่น

สำหรับความเร็ว ความถี่ และความยาวคลื่น มีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$v = f\lambda \quad (12-1)$$

และความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่น ความถี่เชิงมุม และเลขคลื่น ( $k$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการข้างล่าง

$$v = \frac{\omega}{k} \quad (12-2)$$

สำหรับการเดินทางของคลื่นแบบฮาร์โมนิก เราจะได้สมการการเดินทางของคลื่นชนิดนี้คือ

สำหรับการเคลื่อนที่ไปทางแกน  $+x$   $y = A \sin k(x - vt)$

สำหรับการเคลื่อนที่ไปทางแกน  $-x$   $y = A \sin k(x + vt)$

สำหรับค่า  $k$  คือ เลขคลื่น มีค่าเท่ากับ  $\frac{2\pi}{\lambda}$  และเมื่อเรานำค่า  $k$  ไปแทนจะได้

$$y = A \sin \left( \frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi \frac{v}{\lambda} t \right) \quad (12-3)$$

และเนื่องจาก  $v = f\lambda$

และ  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{\lambda} v = kv \quad (12-4)$

ดังนั้นเราสามารถที่จะเขียนสมการอีกแบบหนึ่งได้คือ

$$y = A \sin(kx - \omega t) \quad (12-5)$$

และเมื่อใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และคาบ คือ  $f = \frac{1}{T}$  เราสามารถที่จะเขียนสมการได้อีกแบบหนึ่งคือ

$$y = A \sin 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \quad (12-6)$$

เราสามารถหาความเร็วของฟังก์ชันคลื่นได้จาก

$$U = \frac{dY}{dt} \quad (12-7)$$

จะได้  $U = -\omega A \cos(kx - \omega t)$  และเราสามารถที่จะหาความเร่งได้จาก

$$a = \frac{dU}{dt} \quad (12-8)$$

จะได้  $a = -\omega^2 A \sin(kx - \omega t) = -\omega^2 y$

**ตัวอย่างที่ 12.1** คลื่นขบวนหนึ่งมีการเคลื่อนที่โดยแทนได้ด้วยสมการ  $y = 3 \sin 2\pi(4x - 1000t)$

จงหา

- ก) คาบ
- ข) ความถี่
- ค) ความยาวคลื่น
- ง) อัตราเร็วของคลื่นและทิศทางการเคลื่อนที่

จ) แอมพลิจูด

ฉ) ระยะการกระจัดที่ตำแหน่ง  $x = 3$  เมตร,  $t = 0$  วินาที

**วิธีทำ** เปรียบเทียบสมการที่โจทย์กำหนดกับสมการคลื่นจะได้

ก) คาบ  $T = \frac{1}{500} = 0.002$  วินาที

ข) ความถี่  $f = \frac{1}{T} = 500$  เฮิรตซ์

ค) ความยาวคลื่น  $\lambda = \frac{1}{2} = 0.5$  เมตร

ง) อัตราเร็ว  $v = f\lambda = (500)(0.5) = 250$  เมตรต่อวินาที

จ) แอมพลิจูด  $A = 3$  เมตร

ข) ระยะการกระจัด แทนค่า  $x = 3$  และ  $t = 0$  จะได้

$$y = 3\sin 2\pi(2(3) - 1000(0)) = 0$$

## 12.8 ความเร็วของคลื่นในเส้นเชือก (Velocity of standing wave)

คลื่นในเส้นเชือกเป็นลักษณะของคลื่นเชิงกลที่เรามองเห็นได้ง่ายที่สุด โดยเราสามารถที่จะคำนวณหาความเร็วของคลื่นในเส้นเชือกได้จากสมการ

$$v = \sqrt{\frac{F \cdot l}{m}} \quad (12-9)$$

เมื่อ  $l$  คือ ความยาวของเส้นเชือก

$m$  คือ มวลของเส้นเชือก

$F$  คือ แรงตึงในเส้นเชือก หรือแรงที่กระทำทำให้เกิดคลื่นในเส้นเชือก

เมื่อกำหนดให้

$$\mu = \frac{m}{l} \quad (12-10)$$

จะได้สมการของความเร็วในเส้นเชือกคือ

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (12-11)$$

**ตัวอย่างที่ 12.2** เชือกที่มีความยาวสม่ำเสมอเส้นหนึ่งมีความยาว 5 เมตร มีมวล 14.5 กรัม เชือกจะต้องมีความตึงเท่าไรจึงจะทำให้คลื่นความถี่ 120 เฮิรตซ์ ที่อยู่บนเส้นเชือกมีความยาวคลื่นเท่ากับ 60 เซนติเมตร และจะต้องแขวนมวลเท่าไรจึงจะทำให้เชือกมีความตึงเท่านี้

**วิธีทำ** หาความเร็วของคลื่นในเส้นเชือกได้จากสมการ

$$v = f \lambda$$

แทนค่าความยาวคลื่นจะได้

$$v = (0.6)(120) = 72 \text{ m/s}$$

หาความตึงในเส้นเชือกโดยใช้สมการ

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

จะได้

$$F = \mu v^2$$

$$F = \frac{0.00145}{5} (72)^2$$

$$F = 1.5 \text{ N}$$

หามวลที่จะใช้แขวนในเส้นเชือกจาก

$$F = mg$$

จะได้

$$m = \frac{1.5}{9.8} = 0.153 \text{ kg}$$

นั่นคือจะต้องแขวนมวลที่มีขนาด 153 กรัมนั่นเอง

## 12.9 คลื่นนิ่ง (Standing wave)

คลื่นนิ่ง เป็นคลื่นที่เกิดจากผลลัพธ์ของคลื่นสองขบวนที่มีแอมพลิจูดและความถี่ตรงกัน มีความยาวคลื่นเท่ากัน ทำให้เมื่อคลื่นเคลื่อนที่สวนกันแล้วเกิดการรวมกันของคลื่น เมื่อเรามองจะเสมือนว่าเป็นคลื่นลูกเดียวที่มีการเคลื่อนที่อยู่นิ่ง เราจึงเรียกว่า คลื่นนิ่ง ซึ่งได้ผลดังนี้

1. เกิดจุดบัพ (Node) ซึ่งจุดเหล่านี้จะหยุดนิ่งตลอดเวลา
2. เกิดจุดปฏิบัพ (Antinode) ซึ่งจุดเหล่านี้อยู่ตรงกลางระหว่างจุดบัพสองจุดที่ติดกันและมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา
3. ระยะห่างระหว่างจุดบัพที่ติดกันจะห่างกัน  $\lambda/2$
4. ระยะห่างระหว่างจุดปฏิบัพที่ติดกันจะห่างกัน  $\lambda/2$
5. แอมพลิจูดรวมที่จุดปฏิบัพเป็นสองเท่าของแอมพลิจูดของคลื่นแต่ละขบวนที่มารวมกัน

6. ระยะสูงสุดของจุดปฏิบัติถึงระยะต่ำสุดของจุดปฏิบัติ เรียกว่า ช่วงกว้างของคลื่น
7. เวลาที่จุดปฏิบัติเคลื่อนที่จากจุดสูงสุดมายังจุดต่ำสุดจะเป็น  $T/2$
8. คลื่นผลลัพธ์ในช่วงจุดปฏิบัติสองจุดที่ติดกันเรียกว่า ลูป
9. ถ้าระยะระหว่างจุดตรึง 2 จุดห่างกัน  $L$  คลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นในระหว่างจุดตรึงทั้งสองนี้มีจำนวน  $n$  ลูป คือ ความยาวเชือก  $\lambda/2$  สามารถเกิดคลื่นได้ 1 ลูปถ้าเชือกยาว  $L$  เกิดคลื่นได้จำนวน  $n$  ลูป

ดังนั้น

$$n = \frac{2L}{\lambda} \quad (13-12)$$

10. ถ้า  $f_n$  เป็นความถี่ที่ทำให้เกิดคลื่นนิ่งจำนวน  $n$  ลูป ในระหว่างจุดตรึงสองจุดที่ห่างกัน  $L$  และคลื่นมีความเร็ว  $v$  จะได้จากสมการความเร็ว

$$v = f_n \lambda$$

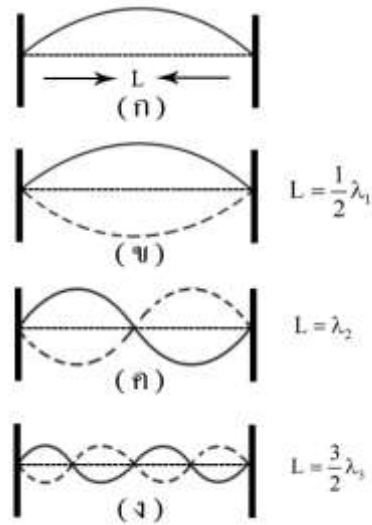
และ

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

$$f_n \lambda = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

หรือ

$$\frac{2Lf_n}{n} = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$



ภาพที่ 12.5 คลื่นนิ่ง

จากภาพที่ 12.5 เราเรียกคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นที่มีจำนวนรูปร่างต่างกันตามการเรียกชื่อความถี่ หรือลำดับของฮาร์โมนิก ดังต่อไปนี้

- (ก) คลื่นมูลฐาน (Fundamental Frequency)
- (ข) คลื่นความถี่มูลฐานหรือฮาร์โมนิกที่ 1
- (ค) โอเวอร์โทนที่ 1 หรือ ฮาร์โมนิกที่ 2
- (ง) โอเวอร์โทนที่ 2 หรือฮาร์โมนิกที่ 3

$$\text{ดังนั้น} \quad f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (12-13)$$

$$\text{หรือ} \quad f_n = n \left( \frac{v}{2L} \right) \quad (12-14)$$

ความถี่  $f_n$  ทุกๆค่าของ  $n$  เรียกว่า ความถี่ธรรมชาติ

- ความถี่ธรรมชาติทุกค่า จะอยู่ในอนุกรมฮาร์โมนิก คือเป็นผลคูณของจำนวนเต็ม (1, 2, 3, ...) กับความถี่ต่ำสุด

- ความถี่ต่ำที่สุด เมื่อ  $n=1$  เมื่อ  $f_1 = \left(\frac{v}{2L}\right)$  เป็นฮาร์โมนิกที่ 1 เรียกว่า ความถี่มูลฐาน นอกนั้นเป็นฮาร์โมนิกอันดับเรียงลงไป และเรียกว่า โอเวอร์โทนทุกๆค่าดังนี้

เมื่อ  $n = 2$  ได้  $f_2 = 2f_1$  เป็นฮาร์โมนิกที่ 2 เรียกว่า โอเวอร์โทนที่ 1

เมื่อ  $n = 3$  ได้  $f_3 = 3f_1$  เป็นฮาร์โมนิกที่ 3 เรียกว่า โอเวอร์โทนที่ 2

เมื่อ  $n = n$  ได้  $f_n = nf_1$  เป็นฮาร์โมนิกที่  $n$  เรียกว่า โอเวอร์โทนที่  $n-1$

11. ถ้ามีแรงกระทำต่อวัตถุชิ้นหนึ่ง โดยมีความถี่ของการกระทำเท่ากับความถี่ธรรมชาติค่าใดค่าหนึ่งของวัตถุชิ้นนั้น วัตถุจะสั่นแรงมาก คือมีช่วงกว้างมาก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดการสั่นพ้อง
12. ถ้าคลื่นสองขบวนเคลื่อนที่ในทิศตรงกันข้ามดังนี้

$$y_1 = y_m \sin(kx + \omega t) \quad (12-15)$$

และ  $y_2 = y_m \sin(kx - \omega t) \quad (12-16)$

เมื่อคลื่นไม่มีความหน่วง โดยแอมพลิจูด ความถี่ และความยาวคลื่น เท่ากัน ผลรวมของคลื่นทั้งสองทำให้เกิดเป็นคลื่นนิ่ง ในทางคณิตศาสตร์เขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 \\ &= y_m [\sin(kx + \omega t) + \sin(kx - \omega t)] \end{aligned} \quad (12-17)$$

จากค่าเอกลักษณ์ทางตรีโกณมิติ  $\sin \theta_1 + \sin \theta_2 = 2 \sin \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_2) \cos \frac{1}{2}(\theta_1 - \theta_2)$

ดังนั้น

$$y = 2y_m \sin kx \cos \omega t \quad (12-18)$$

ถ้า  $x = 0$  ที่ด้านซ้ายมือสุดของเส้นเชือก แล้วด้านขวามือสุด  $x = L$  โดยที่  $L$  เป็นความยาวของเชือกและถ้าเชือกถูกตรึงไว้ทั้งสองข้าง ทำให้  $y = 0$  ที่  $x = 0$  และ  $x = L$  จากสมการ (12-18) เป็นไปได้ตามภาวะที่หนึ่ง ( $y = 0$  ที่  $x = 0$ ) และจะเป็นไปได้ในภาวะที่สองถ้า

$$k = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots, n\pi \quad (12-19)$$

เมื่อ  $n =$  จำนวนเต็ม โดยที่  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad (12-20)$$

ซึ่งตรงกับข้อ (9) ดังได้กล่าวแล้ว

สมการ (12-18) ตามภาวะที่  $\lambda = \frac{2L}{n}$  เป็นสมการคณิตศาสตร์ที่แสดงของความเป็นคลื่นนิ่ง ซึ่งจะชี้ให้เห็นว่าอนุภาคหนึ่งที่ตำแหน่ง  $x$  มีการสั่นแบบซิมเปิลฮาร์โมนิกส์ และอนุภาคทั้งหมดของเส้นเชือกจะสั่นด้วยความถี่  $f = \frac{\omega}{2\pi}$  แต่แอมพลิจูดจะขึ้นกับค่า  $x$  และเท่ากับ  $2y_m \sin kx$  และค่าแอมพลิจูดที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ  $2y_m$

เมื่อ  $kx = \pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2, \dots$  และในทำนองเดียวกันนี้จึงเขียนได้ว่า

$$x = \frac{\lambda}{4}, 3\frac{\lambda}{4}, 5\frac{\lambda}{4}, \dots \quad (12-21)$$

ซึ่งเป็นตำแหน่งของ  $x$  ที่ตรงกับตำแหน่งปฏิบัพนั่นเอง

## 12.10 คลื่นเสียง (Sound wave)

คลื่นเสียงเป็นตัวอย่างของคลื่นที่อาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ที่พบเห็นได้ง่ายชนิดหนึ่ง โดยลักษณะของคลื่นเสียงจะเป็นคลื่นตามยาวซึ่งมีลักษณะอัดเข้าออก โดยความเร็วของคลื่นเสียงนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวกลางที่คลื่นใช้ในการเคลื่อนที่ และอุณหภูมิในขณะที่คลื่นเสียงเคลื่อนที่ สำหรับความเร็วของคลื่นเสียงที่ใช้อากาศเป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ที่เราสามารถที่จะคำนวณได้จากสมการ

$$v = 331 + 0.6t \quad (12-23)$$

เมื่อ  $t$  คือ อุณหภูมิในขณะนั้นมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

ความเร็วของคลื่นเสียงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่แตกต่างกันสามารถคำนวณได้จาก สมการ

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (12-24)$$

เมื่อ  $B$  คือ ค่ามอดูลัสเชิงปริมาตร

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของสสาร

**ตัวอย่างที่ 12.3** เหล็กก้อนหนึ่งมีความหนาแน่น 10 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมีค่าบัลค์มอดูลัส  $6 \times 10^{10}$  นิวตันต่อตารางเมตร จงหาค่าความเร็วของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ผ่านเหล็กก้อนนี้

วิธีทำ จากสมการความเร็ว

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

แทนค่า

$$v = \sqrt{\frac{10 \times 10^6}{10}}$$

$$= \sqrt{10^5} \text{ เมตรต่อวินาที}$$

ดังนั้นความเร็วของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ผ่านเหล็กเท่ากับ 1,000 เมตรต่อวินาที

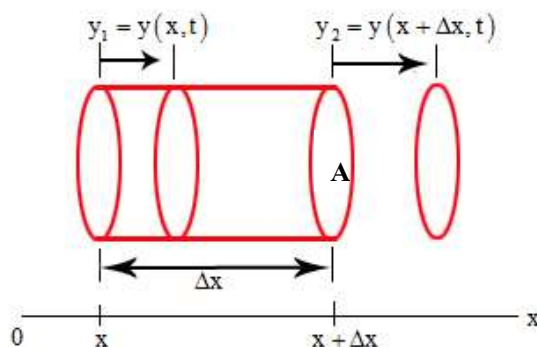
### 12.11 ลักษณะของคลื่นเสียง (Characteristic of sound wave)

คลื่นเสียงที่มีลักษณะเป็นรูปไซน์เคลื่อนที่อยู่ในตัวกลางสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการได้ ดังนี้

$$y = A \sin(kx - \omega t) \quad (12-25)$$

เมื่อ  $y$  คือ ระยะกระจัดวัดจากระยะสมดุล

$A$  คือ แอมพลิจูด เป็นระยะกระจัดสูงสุดวัดจากระยะสมดุล



ภาพที่ 12.6 ปริมาตรของแก๊สรูปทรงกระบอกมีพื้นที่หน้าตัด  $A$

จากภาพที่ 12.6 ความยาวของทรงกระบอกขณะที่ยังไม่มีคลื่นเสียงผ่านเท่ากับ  $\Delta x$  แต่ถ้าขณะที่คลื่นเสียงผ่านไปตามแนวยาว ปลายข้างซ้ายของทรงกระบอกจะเคลื่อนที่ไปได้ระยะทาง  $y_1$  และปลายข้างขวาจะเคลื่อนที่ไปได้ระยะทาง  $y_2$  ทำให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ  $A(y_2 - y_1)$

พิจารณาปริมาตรของแก๊สรูปทรงกระบอก พื้นที่หน้าตัด  $A$  ดังภาพที่ 12.8 เริ่มต้นยังไม่มีคลื่นเสียงผ่านมีปริมาตรเท่ากับ  $A\Delta x$  แต่เมื่อมีคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่าน การเปลี่ยนแปลงของปริมาตร  $\Delta V$  จะเท่ากับ

$$A(y_2 - y_1) = A[y(x + \Delta x, t) - y(x, t)]$$

ใส่ค่าลิมิตโดยให้  $\Delta x \rightarrow 0$  อัตราส่วนของปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปต่อปริมาตรเดิม จะเป็น

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{y(x + \Delta x, t) - y(x, t)}{\Delta x} = \frac{\partial y}{\partial x} \quad (12-28)$$

จากนิยามของบัลค์โมดูลัส  $B$ ,  $p = -B \frac{\Delta V}{V}$  เราจะได้

$$p = -B \left( \frac{dy}{dx} \right) \quad (12-29)$$

ถ้า  $\frac{dy}{dx}$  เป็นบวก แสดงว่าระยะกระจัดที่เคลื่อนที่ทางปลายข้างขวา จะมากกว่าปลายซ้าย ปริมาตรของทรงกระบอกจะเพิ่มขึ้น แต่ความดันกลับลดลง เหตุผลนี้จึงต้องใส่เครื่องหมายลบที่หน้าสมการบน จากสมการ (12-27) เราจะได้

$$p = BkA \cos(kx - \omega t) \quad (12-30)$$

ความดันในสมการบนเปลี่ยนแปลงในลักษณะของรูป  $\cos$  ดังนั้น แอมพลิจูดของความดันคือ

$$P_{\max} = BkA \quad (12-31)$$

$P_{\max}$  เป็นสัดส่วนตรงกับแอมพลิจูด และเลขคลื่น โดยเลขคลื่นเป็นสัดส่วนกลับกับความยาวคลื่น แสดงว่าความยาวคลื่นสั้นจะให้ความดันสูง คลื่นจะมีการบีบอัดตัวมากในทางกลับกันถ้าความยาวคลื่นยาวจะให้ความดันต่ำ คลื่นจะมีการบีบอัดตัวน้อย

**ตัวอย่างที่ 12.5** จากการตรวจวัดพบว่าความดันสูงสุดของเสียงที่มนุษย์สามารถฟังได้โดยไม่เจ็บปวดคือ 30 ปาสคาล (ความดันเกจ) จังหวะระยะกระจัดสูงสุด (แอมพลิจูด) ถ้าความถี่เป็น 1000 เฮิรตซ์ และมีอัตราเร็วเท่ากับ 350 เมตรต่อวินาที

**วิธีทำ** จาก

$$\begin{aligned}\omega &= (2\pi)(1000\text{Hz}) \\ &= 6283 \text{ s}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{จะได้} \quad k &= \frac{\omega}{c} = \frac{6283\text{s}^{-1}}{350\text{m/s}} \\ &= 18 \text{ m}^{-1}\end{aligned}$$

บัลค์โมดูลัส คือ

$$\begin{aligned}B &= \gamma p \\ &= (1.4)(1.01 \times 10^5 \text{ Pa}) \\ &= 1.42 \times 10^5 \text{ Pa}\end{aligned}$$

จากสมการ (12-5) เราจะได้

$$\begin{aligned}A &= \frac{P_{\max}}{Bk} \\ &= \frac{30\text{Pa}}{(1.42 \times 10^5 \text{ Pa})(18.0\text{m}^{-1})} \\ &= 1.18 \times 10^{-5} \text{ เมตร} \\ &= 0.0118 \text{ มิลลิเมตร}\end{aligned}$$

เสียงเบาที่สุดที่มนุษย์สามารถได้ยินที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ มีความดัน  $3 \times 10^{-5}$  ปาสคาล คำนวณแอมพลิจูดได้เท่ากับ  $10^{-9}$  เซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นของแสงสีเหลืองซึ่งเท่ากับ  $6 \times 10^{-5}$  เซนติเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางของโมเลกุลซึ่งมีค่าประมาณ  $10^{-8}$  เซนติเมตร จะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดที่เล็กขนาดนี้หูของมนุษย์ยังสามารถได้ยิน ฉะนั้นหูจึงเป็นอวัยวะที่ละเอียดอ่อนน่าทึ่งมากอย่างยิ่ง

## 12.12 ความเข้มของเสียง (Sound intensity)

ความเข้มของเสียง ( $I$ ) คือ อัตราการถ่ายโอนพลังงานเฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งจะเท่ากับ ผลคูณของความดันในสมการ(12-31) กับความเร็วของอนุภาค  $v$  หาอนุพันธ์สมการ (12-27) เทียบกับเวลา จะได้

$$v = \omega A \cos(kx - \omega t) \quad (12-32)$$

$$pv = \omega B k A^2 \cos^2(kx - \omega t) \quad (12-33)$$

ความเข้มหาได้จากค่าเฉลี่ยของสมการ (12-33) โดยที่สามารถหาค่าเฉลี่ยของ  $\cos^2(kx - \omega t)$  ได้เป็น  $\frac{1}{2}$  ดังนั้น

$$I = \frac{1}{2} \omega B k A^2 \quad (12-34)$$

จาก  $\omega = ck$  และ  $c^2 = \frac{B}{\rho}$  แทนลงไปในสมการบนจะเปลี่ยนรูปเป็น

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\rho B} \omega^2 A^2$$

แสดง  $I$  ให้อยู่ในเทอมของความดันสูงสุด โดยใช้สมการ(12-31) และ  $\omega = ck$  แทนลงไปในสมการบน จะได้

$$I = \frac{\omega p_{\max}^2}{2Bk} = \frac{c p_{\max}^2}{2B} \quad (12-35)$$

จาก  $c^2 = \frac{B}{\rho}$  เราสามารถเขียนสมการบนได้อีกรูปหนึ่ง คือ

$$I = \frac{p_{\max}^2}{2\rho c} = \frac{p_{\max}^2}{2\sqrt{B\rho}} \quad (12-36)$$

เพราะฉะนั้น เราสามารถคำนวณหาความเข้มเสียงที่มนุษย์สามารถรับฟังได้โดยไม่เจ็บปวด

$$(p_{\max} = 30 \text{ Pa}) \text{ ดังนี้ กำหนดให้ } \rho_{\text{อากาศ}} = 1.22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \quad c = 346 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{(30\text{Pa})^2}{2(1.22\text{ kg/m}^3)(346\text{ m/s})} \\
 &= 1.07 \text{ J/s/m}^2 \\
 &= 1.07 \text{ วัตต์ต่อตารางเมตร} \\
 &= 1.07 \times 10^{-4} \text{ วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร}
 \end{aligned}$$

สมมติว่า วัดความเข้มของเสียงที่ผิวของคลื่นทรงกลมรัศมี 20 m ได้  $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  ลองคำนวณหา กำลังของแหล่งกำเนิดเสียง เราจะต้องคำนวณหาพื้นที่ของครึ่งวงกลมก่อนซึ่งเท่ากับ  $\frac{\pi r^2}{2} \approx 2500$  ตารางเมตร ดังนั้น กำลังของแหล่งกำเนิดเสียงที่จุดกึ่งกลางของครึ่งวงกลมคือ  $(1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2})(2500 \text{ m}^2) = 2500$  วัตต์หรือ 2.5 กิโลวัตต์ เนื่องจากว่าหูของคนเรามีความไวต่อเสียงมาก จึงนิยมใช้มาตราส่วนเลขฐานสิบ (logarithmic) แทน ซึ่งเรียกใหม่ว่า ระดับความเข้มเสียง (Intensity level) ใช้อักษร  $\beta$  เป็นสัญลักษณ์แทน ดังนี้

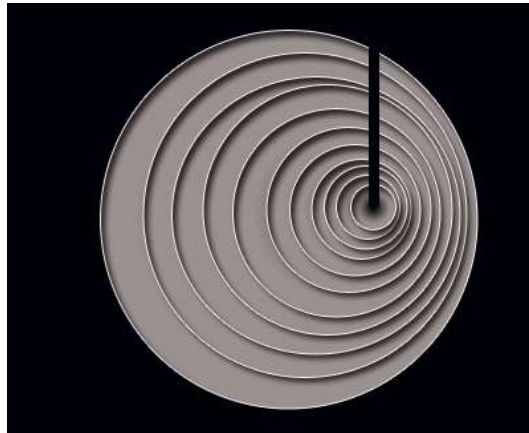
$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (12-37)$$

กำหนดให้  $I_0$  เป็นความเข้มเสียงอ้างอิง มีค่าเท่ากับ  $10^{-12}$  วัตต์/เมตร<sup>2</sup> ค่านี้คือความเข้มต่ำสุดที่มนุษย์สามารถได้ยิน ส่วนหน่วยเดซิเบล (dB) เดซิเป็น ตัวอุปสรรค (prefix) คือเป็น 1 ใน 10 ของเบล ชื่อนี้เป็นชื่อย่อของนายอเล็กซานเดอร์ เกรแฮมเบล เพื่อเป็นเกียรติกับท่านที่เป็นผู้กำเนิดโทรศัพท์คนแรกของโลก เมื่อแทนความเข้ม  $10^{-12}$  วัตต์ต่อตารางเมตร ลงไปในสมการ (12-37) จะคำนวณหาระดับความเข้มเสียงได้เท่ากับ 0 เดซิเบล เนื่องจากเรากำหนดให้  $I_0$  เป็นความเข้มเสียงอ้างอิง ส่วนความเข้มเสียงสูงสุดที่ได้อินก่อนจะถึงขีดเริ่มเจ็บปวด คือ 1 วัตต์ต่อตารางเมตรซึ่งจะเท่ากับระดับความเข้มเสียง 120 เดซิเบล

### 12.13 ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler effect)

ถ้าเราฟังเสียงของรถหวอขณะวิ่งเข้าหาตัวคุณเราจะรู้สึกว่าเสียงรถหวอแหลมและ แสบแก้วหูมาก ทั้ง ๆ ที่ถัรถหวออยู่เฉย ๆ เสียงจะไม่แหลมขนาดนี้ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น

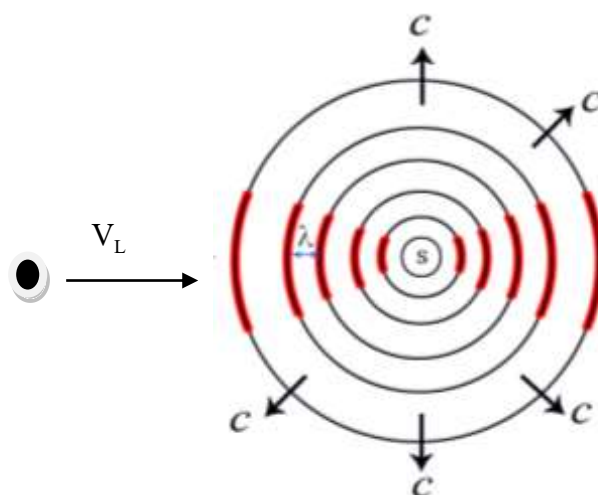
นี่เราเรียกว่า ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ ผู้ที่อธิบายคนแรกคือ นายคริสเตียน ดอปเพลอร์ ชาวออสเตรีย (1803-1853) ในปี ค.ศ. 1842



ภาพที่ 12.7 สร้างคลื่นน้ำขึ้นโดยใช้เครื่องสั่นสะเทือนที่มีความถี่แน่นอนค่าหนึ่งจุ่มลงไปในถาดน้ำ และให้เคลื่อนที่ไปทางขวา

จากภาพที่ 12.7 ให้แหล่งกำเนิดของคลื่นเคลื่อนที่ไปทางขวา ถ้าสังเกตให้ดีจะเห็นว่าความยาวคลื่นทางด้านหน้าของแหล่งกำเนิดคลื่นลดลง ส่วนทางด้านหลังกลับเพิ่มขึ้น จากสมการ  $f = \frac{c}{\lambda}$  จะได้ว่าความถี่น้ำแหล่งกำเนิดเพิ่มขึ้นส่วนด้านหลังลดลง

พิจารณาผู้ฟัง  $L$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v_L$  เข้าหาแหล่งกำเนิดคลื่นภาพที่ 12.8



ภาพที่ 12.8 ขณะที่ผู้ฟังเคลื่อนที่เข้าหาแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่นิ่ง ผู้ฟังจะได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงกว่าหยุดนิ่งกับที่

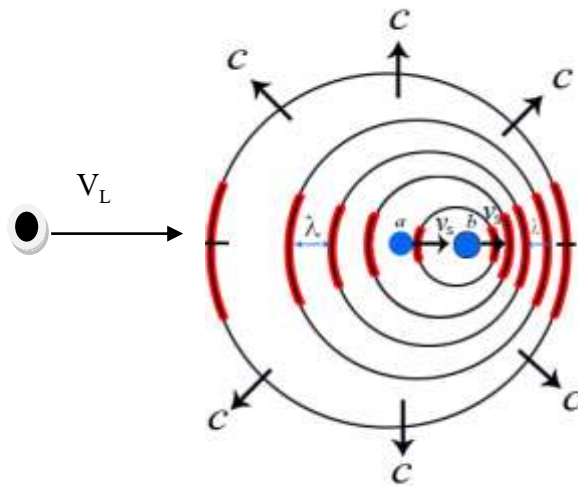
แหล่งกำเนิดให้คลื่นความถี่  $f_s$  และมีความยาวคลื่น  $\lambda = \frac{c}{f_s}$  วงกลมที่ล้อมรอบ

แหล่งกำเนิดคลื่นคือสันคลื่น แต่ละสันคลื่นห่างกันหนึ่งความยาวคลื่น คลื่นจะเคลื่อนเข้าหาผู้ฟังที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสัมพัทธ์กับผู้ฟังเท่ากับ  $c + v_L$  ดังภาพที่ 12.8 ฉะนั้นความถี่  $f_L$  หาได้ จาก

$$f_L = \frac{c + v_L}{\lambda} = \frac{c + v_L}{c/f_s} \quad (12-38)$$

หรือ

$$f_L = f_s \frac{c + v_L}{c} = f_s \left( 1 + \frac{v_L}{c} \right) \quad (12-39)$$



ภาพที่ 12.9 แหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่ไปทางขวา คลื่นทางด้านหน้าจะถูกอัดให้แคบลง ส่วนคลื่นทางด้านหลังจะขยายตัวกว้างขึ้น

แต่ถ้าแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v_s$  ดังภาพที่ 12.9 ความยาวคลื่นทางด้านหน้าจะเปลี่ยนเป็น

$$\lambda_a = \frac{c - v_s}{f_s} \quad (12-40)$$

ส่วนทางด้านหลังจะเปลี่ยนเป็น

$$\lambda_b = \frac{c + v_s}{f_s} \quad (12-41)$$

ผู้ฟังจะได้ยินความถี่จากการที่แหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่ไปทางขวาดังนี้  
แทนสมการ (12-41) ลงในสมการ (12-39) จะได้

$$\begin{aligned} f_L &= \frac{c+v_L}{\lambda} = \frac{c+v_L}{(c+v_s)/f_s} \\ \text{หรือ} \quad \frac{f_L}{c+v_L} &= \frac{f_s}{c+v_s} \end{aligned} \quad (12-42)$$

ถ้าผู้ฟังและแหล่งกำเนิดเสียงอยู่กับที่  $v_L$  และ  $v_s$  จะเป็นศูนย์ จะได้  $f_L = f_s$  แต่เมื่อไรก็ตามที่แหล่งกำเนิดเสียงหรือผู้ฟังเคลื่อนที่ตรงกันข้ามกับรูปที่เขียน เครื่องหมายก็จะเปลี่ยนตรงกันข้ามไปด้วย

**ตัวอย่างที่ 12.6** กำหนดให้  $f_s$  เท่ากับ 300 เฮิรตซ์ และ  $c$  เท่ากับ 300 เมตรต่อวินาที ความยาวคลื่นขณะที่แหล่งกำเนิดเสียงยังไม่ได้เคลื่อนที่หาได้จาก  $\frac{c}{f_s}$  เท่ากับ 1 เมตร จงหา

ก) ความยาวคลื่นที่อยู่หน้าแหล่งกำเนิดดังภาพ(12.13) ถ้าความเร็วของแหล่งกำเนิดเสียงเป็น 30 เมตรต่อวินาที

หน้าแหล่งกำเนิด

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{c-v_s}{f_s} \\ &= \frac{300\text{m/s}-30\text{m/s}}{300\text{Hz}} \\ &= 0.9 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

หลังแหล่งกำเนิด

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{c+v_s}{f_s} \\ &= \frac{300\text{m/s}+30\text{m/s}}{300\text{Hz}} \\ &= 1.1 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

ข) ความถี่ที่ผู้ฟังได้ยินถ้าผู้ฟัง  $L$  ดังภาพที่ 13.13 หยุดนิ่ง ส่วนแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ออกจากผู้ฟังด้วยความเร็ว 30 เมตรต่อวินาที

ให้  $v_L = 0$  และ  $v_s = 30$  เมตรต่อวินาที

$$\text{เราจะได้} \quad f_L = f_s \frac{c}{c+v_s}$$

$$\begin{aligned}
&= (300\text{Hz}) \frac{300\text{m/s}}{300\text{m/s} + 30\text{m/s}} \\
&= 273 \text{ เฮิรตซ์}
\end{aligned}$$

ค) ความถี่ที่ผู้ฟังได้ยินถ้าแหล่งกำเนิดหยุดนิ่ง และผู้ฟังเคลื่อนที่ไปทางซ้ายด้วยความเร็ว 30 เมตรต่อวินาที

จากที่เรากำหนดไว้เบื้องต้น ความเร็วของผู้ฟังถ้าไปทางขวาให้เป็นบวก แต่ถ้าไปในทิศตรงกันข้ามคือไปทางซ้ายก็ให้เป็นลบ จะได้

$$\begin{aligned}
v_L &= -30 \text{ เมตรต่อวินาที} \\
v_s &= 0 \\
f_L &= f_s \frac{c - v_L}{c} \\
&= (300\text{Hz}) \frac{300\text{m/s} - 30\text{m/s}}{300\text{m/s}} \\
&= 270 \text{ เฮิรตซ์}
\end{aligned}$$

ข้อสังเกต ผู้ฟังจะได้ยินความถี่น้อยกว่าความถี่ของแหล่งกำเนิดเสียง

เมื่อเขียนถึงความเร็ว  $v_L$ ,  $v_s$  และ  $c$  เราหมายถึง ความเร็วที่สัมพันธ์กับอากาศ อย่างไรก็ตามคลื่นบางชนิด เช่น คลื่นวิทยุ และคลื่นแสง ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ต้องอาศัยตัวกลางดังเช่นอากาศเหมือนคลื่นเสียง แต่ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ก็ยังคงใช้ได้ อย่างไรก็ตาม การคำนวณการเคลื่อนไปของความถี่จากปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ต้องอาศัยทฤษฎีสัมพัทธภาพ ซึ่งจะได้อธิบายต่อไปในบททฤษฎีสัมพัทธภาพ แต่ในบทนี้เราจะขอ นำสมการสำเร็จรูปมาใช้ก่อน โดยกำหนดให้  $c$  เป็นความเร็วแสง ผู้สังเกตอยู่นิ่ง และแหล่งกำเนิดแสงเคลื่อนที่ออกจากผู้สังเกตด้วยความเร็ว  $v$  จะได้  $f_L < f_s$

$$f_L = \left( \sqrt{\frac{c-v}{c+v}} \right) f_s \quad (12-43)$$

แต่ถ้าแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่เข้าหาผู้สังเกตด้วยความเร็ว  $v$  จะได้  $f_L > f_s$

$$f_L = \left( \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} \right) f_s \quad (12-44)$$

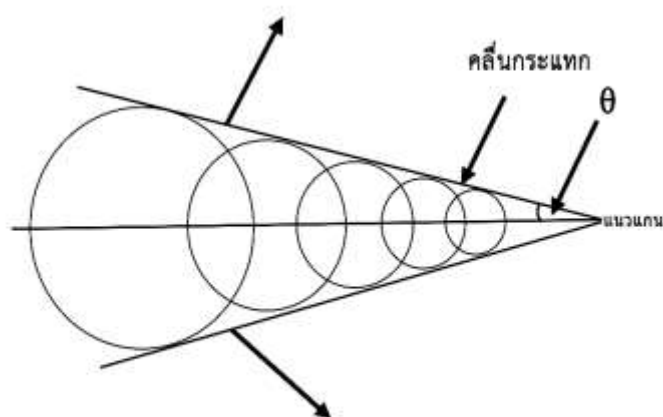
ผลลัพธ์ที่ได้มีลักษณะคล้าย ๆ กับของคลื่นเสียง แตกต่างกันก็เพียงแต่ในรูปของสมการการคำนวณเท่านั้น

ปรากฏการณ์คอปเพลอร์ของแสงนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมเพื่อตรวจวัดความเร็วของรถยนต์ได้ โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าปืนเรดาร์ ยิ่งลำแสงออกไปสะท้อนกับรถที่ต้องการตรวจจับความเร็ว คลื่นที่สะท้อนออกจากตัวรถ ทำหน้าที่เสมือนแหล่งกำเนิดที่เคลื่อนที่ได้ ฉะนั้นความถี่จะเปลี่ยนไป เมื่อเทียบกับความถี่เดิมเราสามารถคำนวณกลับไปหาความเร็วของรถได้ ซึ่งภายในตัวปืนจะมีเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กติดอยู่ ความเร็วจะถูกแปลงออกเป็นตัวเลข ถ้าวัดคันนี้ซึ่งเกินกว่าความเร็วที่กำหนด ตำรวจจราจรก็จะวิทูสั่งให้จุดสกัดข้างหน้าปรับรถคันนี้ตามระเบียบ

ปรากฏการณ์คอปเพลอร์ของแสงมีความสำคัญมากทางด้านดาราศาสตร์ ได้มีการตรวจพบว่าความถี่ของแสงจากดาวฤกษ์อันไกลโพ้น มีการเลื่อนไปของความถี่ ทำให้เราสามารถคำนวณหาความเร็วของดาวฤกษ์ดวงนั้นได้ จากการสังเกตช่วยให้นักวิทยาศาสตร์ยืนยันทฤษฎีการกำเนิดของจักรวาลที่เชื่อกันมานานแล้วว่าเกิดจากการระเบิดครั้งใหญ่เมื่อหลายพันล้านปีก่อน ซึ่งขณะนี้มันกำลังขยายตัวออกไปอยู่ตลอดเวลา

#### 12.14 คลื่นกระแทก (Shock wave)

เมื่อต้นกำเนิดเสียงเคลื่อนที่เร็วกว่าความเร็วของคลื่นเสียง เช่น เครื่องบินที่บินเร็วกว่าเสียง เรือที่แล่นเร็วกว่าคลื่นน้ำ เป็นต้น



ภาพที่ 13.10 คลื่นกระแทก

พิจารณาในสามมิติ หน้าคลื่นกระแทกจะเป็นรูปกรวย (Cone) เช่น คลื่นกระแทกที่เกิดจากเครื่องบินที่บินเร็วเหนือเสียงในอากาศ

พิจารณาในสองมิติ หน้าคลื่นกระแทกจะเป็นแนวเส้นตรง เช่น คลื่นกระแทกที่เกิดจากเรือที่แล่นเร็วกว่าคลื่นน้ำ

หน้าคลื่นของคลื่นกระแทกเรียกว่า ซองคลื่น (Envelope)

อัตราส่วนของอัตราเร็วของต้นกำเนิดคลื่นต่ออัตราเร็วของคลื่น เรียกว่า เลขมัค (Mach number)

$$\text{Mach Number} = \frac{v_s}{v} = \frac{1}{\sin \theta}$$

|       |          |   |                                                          |
|-------|----------|---|----------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $v_s$    | = | อัตราเร็วของต้นกำเนิดคลื่น มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที     |
|       | $v$      | = | อัตราเร็วของคลื่น มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที              |
|       | $\theta$ | = | มุมระหว่างแนวแกนของคลื่นกระแทกกับหน้าคลื่นของคลื่นกระแทก |

## บทสรุป

พฤติกรรมของคลื่นเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ส่งพลังงาน โดยแบ่งออกเป็นคลื่นเชิงกลคลื่นที่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือคลื่นที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ และแบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคคือคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง สำหรับความเร็วของคลื่นในเส้นเชือกจะขึ้นอยู่กับแรงที่มำกระทำแล้วทำให้เกิดคลื่น ความยาวและมวลของเส้นเชือก ความเร็วของคลื่นเสียงในอากาศจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงความเร็วจะมาก ที่ตัวกลางที่แตกต่างกันความเร็วของคลื่นเสียงก็จะแตกต่างกันไป

## แบบฝึกหัด

- คลื่นเสียงเคลื่อนที่ไปในอากาศด้วยอัตราเร็วคงที่  $v$  เมื่อเคลื่อนที่ไปได้ 0.03 วินาที เฟสของคลื่นเสียงเปลี่ยนไป  $3\pi/2$  เรเดียน ในระยะทาง 10.5 วินาที จงหา  
ก) ความถี่                      ข) ความยาวคลื่น                      ค) อัตราเร็วของคลื่นเสียง
- จงหาว่าอัตราเร็วของคลื่นอัดในน้ำมีค่าเท่าไร กำหนดให้ค่ามอดูลัสเชิงปริมาตรของน้ำมีค่า  $2.2 \times 10^9$  นิวตันต่อตารางเมตร
- ถ้ามีเสียงยังป็นเกิดขึ้นที่ระยะห่างจากชายคนหนึ่ง 6 กิโลเมตร ชายคนนี้จะได้ยินเสียงหลังการยังป็นนานเท่าไร ถ้าอุณหภูมิขณะนั้นเท่ากับ 14 องศาเซลเซียส
- ส้อมเสียงอันหนึ่งสั่นที่ความถี่ 284 เฮิรตซ์ ในอากาศ จงคำนวณหาความยาวคลื่นของเสียงที่ปล่อย ออกมาที่ 25 องศาเซลเซียส
- สมชายยังป็นขึ้นฟ้าที่บริเวณหน้าผาผ่านไป 3 วินาที สมชายจึงได้ยินเสียงสะท้อนกลับมา หน้าผาที่สะท้อนเสียงกลับมามีอยู่ห่างจากสมชายเท่าไร
- จงคำนวณหาอัตราเร็วของเสียงในแก๊สนีออนที่ 27 องศาเซลเซียสสำหรับ นีออน  $M = 20.18$  กิโลกรัมต่อโมลจากสูตร  $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$  โดยที่  $\gamma = 1.67$
- เสียงมีความเข้ม  $3.00 \times 10^{-8}$  วัตต์ต่อตารางเมตร ระดับความเข้มเสียงนี้ในหน่วยเดซิเบลมีค่าเท่าไร
- มิเตอร์วัดระดับเสียงเครื่องหนึ่งอ่านระดับเสียงในห้องหนึ่งได้ 85 เดซิเบล ความเข้มของเสียงในห้องนั้นมีค่าเท่าไร
- ชายคนหนึ่งกำลังพิมพ์ดีด ทำให้เกิดเสียงที่มีระดับเสียงเฉลี่ยเท่ากับ 60 เดซิเบล ถ้ามีชายอีกสองคนกำลังพิมพ์ดีดพร้อมสมชาย โดยเสียงพิมพ์ดีดดังเท่ากัน ระดับความดังเสียงในหน่วยเดซิเบลจะเป็นเท่าไร
- แมลงวันบินในแนวเส้นตรงด้วยความเร็ว 0.1 เมตร/วินาที ออกห่างจากเด็กหนึ่งซึ่งยืนนิ่งในที่โล่ง จงหาว่าเด็กคนนั้นจะได้ยินเสียงการบินของแมลงวันอยู่ได้นานกี่วินาที กำหนดให้อัตราที่พลังงานเสียงที่แมลงวันส่งออกมาในขณะที่บินมีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-12}$  วัตต์ ทั้งนี้กำหนดให้ด้วยว่า เสียงที่เบาที่สุดที่มนุษย์ได้ยินมีความเข้มเสียงเป็น  $10^{-12}$  วัตต์/เมตร<sup>2</sup>

## เอกสารอ้างอิง

ก่องกัญจน์ ภัทรากาญจน์ และชนกาญจน์ ภัทรากาญจน์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2552).

**ฟิสิกส์ 1 ตัวอย่างและโจทย์พร้อมคำเฉลย.** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2549). **ฟิสิกส์ 1.** กรุงเทพฯ:

สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เชิญโชค ศรีขวัญ และคณะ, มหาวิทยาลัยมหิดล. (2546). **ฟิสิกส์ทั่วไป 1.** กรุงเทพฯ: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.

ทวี นิยมอ้อย, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. (2541). **ฟิสิกส์พื้นฐานระดับมหาวิทยาลัย 1.**

กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ปรเมษฐ์ ปัญญาเหล็ก, มหาวิทยาลัยศรีปทุม. (2553). **ปฏิบัติการฟิสิกส์ 1.** กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

สุชาติ สุภาพ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. (2558). **ฟิสิกส์ทั่วไป.** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ทริปเพิ้ล เอ็ดดูเคชั่น.

Fraser, G. (2006). **The New Physics for the Twenty-First Century.** Cambridge: Cambridge University Press.

Giambattista, A., Richardson, B.M., and Richardson, R.C. (2007). **College Physics 2<sup>nd</sup> ed.** Boston: Mc Graw Hill.

Serway, R. A., and Jewett, J. W. (2014). **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 9<sup>th</sup> ed.** Belmont: Brooks/Cole-Thomson Learning.

Serway, R.A., Vuille, C., and Hughes, J. (2015). **College Physics 10<sup>th</sup> ed.** Stamford: Cengage Learning.

Thornton, T.S., and Rex, A. (2013). **Modern Physics for Scientists and Engineers 4<sup>th</sup> ed.** Boston: Brooks/Cole- Cengage Learning.

Young, H.D., and Freedman, R.A. (2016). **Sear's & Zemansky's University Physics with Modern Physics 14<sup>th</sup> ed.** Essex: Pearson Education Limited.