



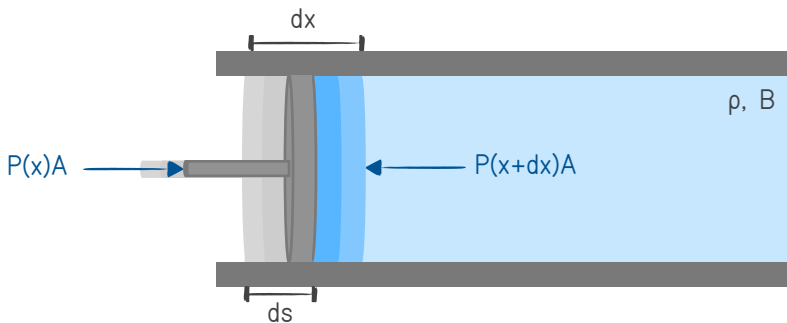
รูปภาพจาก : www.pixabay.com

บทที่ 12 เสียง

สิ่งมีชีวิตมากมายบนโลกสามารถรับรู้และตอบสนองต่อเสียงได้อย่างน่าตื่นตาตื่นใจ มีการใช้ประโยชน์มากมายจากเสียงทั้งในแง่ของการสื่อสาร สุนทรียภาพ ไปจนถึงการรักษาโรคภัย ในบทนี้จะอธิบายถึงการใช้ความรู้เกี่ยวกับคลื่นมาอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ของเสียง

อัตราเร็วเสียง (Speed of Sound Waves)

พิจารณาของไหลความหนาแน่น ρ ค่าบัคคโมดูลัส B อยู่ในท่อทรงกระบอกพื้นที่หน้าตัดคงที่ A โดยพิจารณาส่วนเล็กๆ ซึ่งมีความยาว dx และถูกอัดเข้ามาเป็นระยะ ds ดังรูปด้านล่าง



พิจารณาการสั่นของของไหลในท่อทรงกระบอก

จาก $\Sigma F_s = ma_s$

$$P(x)A - P(x+dx)A = (\rho V_0) \frac{\partial^2 s}{\partial t^2}$$

$$-(P(x+dx) - P(x))A = (\rho A dx) \frac{\partial^2 s}{\partial t^2}$$

$$-(P(x+dx) - P(x)) = \rho dx \frac{\partial^2 s}{\partial t^2}$$

$$-\frac{\partial(P(x+dx) - P(x))}{\partial x} dx = \rho dx \frac{\partial^2 s}{\partial t^2}$$

$$-\frac{\partial(P)}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 s}{\partial t^2}$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(-B \frac{dV}{V_0} \right) = \rho \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} \quad ; \quad B = -V_0 \frac{dP}{dV}$$

เสียง (Sound)

$$\begin{aligned}
 B \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\Delta s}{\Delta x} \right) &= \rho \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} \\
 \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} &= \frac{\rho}{B} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} \\
 \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} &= \frac{1}{(\sqrt{B/\rho})^2} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2}
 \end{aligned}$$

เทียบกับสมการคลื่นเชิงเส้นใน 1 มิติ $\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2}$

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

จาก

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

$$v = \sqrt{\frac{-V_0 \left(\frac{\Delta P}{\Delta V} \right)}{\rho}} \quad ; B = -V_0 \frac{dP}{dV}$$

$$v = \sqrt{\frac{-V_0 (P - P_0)}{\rho \Delta V}}$$

$$v = \sqrt{\frac{-V_0 \left(\frac{Nk_B T}{V} - \frac{Nk_B T}{V_0} \right)}{\rho \Delta V}} \quad ; PV = Nk_B T$$

$$v = \sqrt{\frac{-V_0 Nk_B T \left(\frac{1}{V} - \frac{1}{V_0} \right)}{\rho \Delta V}}$$

$$v = \sqrt{\frac{-V_0 Nk_B T (V_0 - V)}{\rho V V_0 \Delta V}}$$

เสียง (Sound)

$$v = \sqrt{\frac{-Nk_B T(-\Delta V)}{\rho V \Delta V}} \quad ; \quad \Delta V = V - V_0$$

$$v = \sqrt{\frac{Nk_B T}{\rho V}}$$

กำหนดให้ $\sqrt{\frac{Nk_B}{\rho V}} = C$ ซึ่งเป็นค่าคงที่ของระบบที่อุณหภูมิ T

จะได้ $v = C\sqrt{T}$

พิจารณาที่อุณหภูมิ 0°C (แทนด้วยอุณหภูมิ T_0 ซึ่งมีหน่วยเป็น K) และคลื่นเสียงมีอัตราเร็ว v_0

จะได้ $\frac{v}{v_0} = \frac{C\sqrt{T}}{C\sqrt{T_0}}$

$$v = v_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

แปลงอุณหภูมิจากหน่วย K เป็น $^\circ\text{C}$

$$v = v_0 \sqrt{\frac{273.15 + T}{273.15}}$$

$$v = v_0 \left(1 + \frac{T}{273.15}\right)^{1/2}$$

เสียง (Sound)

ที่อุณหภูมิ 0 °C อัตราเร็วเสียงประมาณ 331 m/s

จะได้
$$v = (331 \text{ m/s}) \left(1 + \frac{T}{273.15}\right)^{1/2}$$

จากการประมาณ $(1 \pm x)^n \approx 1 \pm nx$ เมื่อ $x \ll 1$ และพิจารณาเฉพาะในช่วง
ที่ $T \ll 273.15$ ดังนั้น $\frac{T}{273.15} \ll 1$

จะได้
$$v \approx (331 \text{ m/s}) \left(1 + \frac{T}{2(273.15)}\right)$$

$$v \approx (331 \text{ m/s}) \left(1 + \frac{T}{546.30}\right)$$

$$v \approx (331 + 0.606T) \text{ m/s}$$

พิจารณาสมการ $v = (331 \text{ m/s}) \left(1 + \frac{T}{273.15}\right)^{1/2}$ ที่นัยสำคัญ 3 ตำแหน่ง

ที่ $T = 39 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จะได้ $v = 354 \text{ m/s}$

ที่ $T = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จะได้ $v = 354 \text{ m/s}$

พิจารณาสมการ $v \approx (331 + 0.606T) \text{ m/s}$ ที่นัยสำคัญ 3 ตำแหน่ง

ที่ $T = 39 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จะได้ $v = 354 \text{ m/s}$

ที่ $T = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จะได้ $v = 355 \text{ m/s}$

จากข้อมูลด้านบนเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 40 °C การคำนวณจากสมการ

$$v = (331 \text{ m/s}) \left(1 + \frac{T}{273.15}\right)^{1/2} \text{ และ } v \approx (331 + 0.606T) \text{ m/s}$$

ที่นัยสำคัญ 3 ตำแหน่ง ค่า v จะเริ่มต่างกัน



อัตราเร็วของคลื่นเสียง

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

v คือ อัตราเร็วเสียง

B คือ บัคล์โมดูลัสของตัวกลางคลื่นเสียง

ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลางคลื่นเสียง

อัตราเร็วของเสียงกับอุณหภูมิ

$$v = (331 \text{ m/s}) \left(1 + \frac{T}{273.15}\right)^{1/2}$$

T คือ อุณหภูมิในหน่วย $^{\circ}\text{C}$

ในช่วงอุณหภูมิ $\pm 40^{\circ}\text{C}$ ประมาณได้ว่า

$$v \approx (331 + 0.606T) \text{ m/s}$$

ข้อสังเกต

อนุภาคตัวกลางไม่ได้เคลื่อนที่ไปกับคลื่นเสียง

อัตราเร็วเสียงในตัวกลางหนึ่ง ขึ้นกับสมบัติของตัวกลางนั้น ไม่เปลี่ยนแปลง

ไปตามการเปลี่ยนแปลงความถี่หรือความยาวคลื่น

ความถี่ของคลื่นเสียงไม่เปลี่ยนไปตามตัวกลาง

ถ้าหูได้รับเสียงสองเสียง แต่แยกสองเสียงนั้นออกจากกันไม่ได้จะได้ยินเสียง

ก้อง (Reverberation) แต่ถ้าหูแยกสองเสียงจากกันได้จะได้ยินเสียงสะท้อน (Echo)

Problem 12.1

ที่อุณหภูมิ $30.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะเริ่มได้ยินเสียงสะท้อนเมื่ออยู่ห่างจากกำแพงเป็นระยะเท่าใด
(Hint : หูของคนเราโดยปกติสามารถแยกเสียงสองเสียงได้ในช่วงเวลา 0.1 s)?

Answer : 17.5 m

Problem 12.2

เมื่อปรบมือเสียงดังระหว่างหน้าผาสองด้าน ปรากฏว่าได้ยินเสียงสะท้อนสองครั้ง
หลังจากปรบมือเป็นเวลา 2.00 s และ 4.00 s ถ้าอุณหภูมิของอากาศขณะนั้น
ประมาณ $30.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ระยะห่างระหว่างหน้าผาทั้งสองเป็นเท่าใด?

Answer : 1.05 km

Problem 12.3

เมื่อเกิดเหตุระเบิดกลางมหาสมุทร เรือลาดตระเวนลำหนึ่งตรวจจับสัญญาณคลื่นเสียงใต้ท้องเรือได้ก่อนสัญญาณคลื่นเสียงจากอากาศเป็นระยะเวลา 20.0 s ถ้าอัตราเร็วของเสียงในอากาศประมาณ 350 m/s และอัตราเร็วของเสียงในน้ำทะเลประมาณ 1,500 m/s เรือลาดตระเวนลำดังกล่าวอยู่ห่างจากเหตุระเบิดประมาณเท่าใด?

Answer : 9.13 km

Problem 12.4

เสียงเดินทางจากปลายรางโลหะได้เร็วกว่าเสียงในอากาศที่เดินทางระยะเดียวกับรางโลหะเป็นเวลา 0.01 s ถ้าอัตราเร็วของเสียงในอากาศประมาณ 350 m/s และอัตราเร็วของเสียงในโลหะดังกล่าวประมาณ 5,000 m/s รางโลหะดังกล่าวยาวประมาณเท่าใด?

Answer : 4 m

Problem 12.5

วัยรุ่นคนหนึ่งปรบมือเสียงดังใส่หน้าผา ปรากฏว่าได้ยินเสียงดังกล่าวสะท้อนกลับมาหลังจากปรบมือเป็นเวลา 0.80 s ต่อมาวัยรุ่นคนดังกล่าวได้เดินเข้าหาหน้าผาเป็นระยะ 35 m แล้วปรบมือเสียงดังใส่หน้าผาอีกครั้ง ปรากฏว่าได้ยินเสียงดังกล่าวสะท้อนกลับมาหลังจากปรบมือเป็นเวลา 0.60 s จุดแรกที่วัยรุ่นคนดังกล่าวปรบมือห่างจากหน้าผาเป็นระยะเท่าใด?

Answer : 140 m

Problem 12.6

เด็กคนหนึ่งยืนระหว่างหน้าผาสองแห่ง เมื่อปรบมือปรากฏได้ยินเสียงสะท้อนเมื่อเวลาผ่านไป 1.0 s, 3.0 s และ 4.0 s ถ้าอัตราเร็วของเสียงในอากาศประมาณ 350 m/s ระยะห่างระหว่างหน้าผาเป็นเท่าใด?

Answer : 0.70 km

Problem 12.7

เครื่องโซนาร์ปล่อยคลื่นความถี่ 5.0 kHz พบแผ่นวัตถุพื้นที่ $0.30 \text{ m} \times 0.30 \text{ m}$ ซึ่งอยู่ใต้ทะเลสะท้อนคลื่นดังกล่าวได้พอดี โดยคลื่นดังกล่าวถูกสะท้อนกลับมาหลังจากส่งสัญญาณออกไปเป็นเวลา 2.4 s วัตถุดังกล่าวอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำเท่าใด?

Answer : 1.8 km

Problem 12.8

เรือลำหนึ่งกำลังแล่นบนผิวน้ำด้วยความเร็วคงที่ 20 m/s ได้ส่งคลื่นโซนาร์ลงในทะเล พบว่าอีก 6.0 s เรือดังกล่าวได้รับคลื่นสะท้อน ถ้าอัตราเร็วของเสียงในทะเลประมาณ $1,500 \text{ m/s}$ ทะเลดังกล่าวลึกประมาณเท่าใด?

Answer : 4.5 km

Problem 12.9

บอลลูกเคลื่อนที่ขึ้นในแนวดิ่งด้วยอัตราเร็วคงที่ 20.0 m/s ขณะอยู่สูงจากพื้นดินระยะหนึ่ง ได้ปล่อยคลื่นเสียงด้วยความถี่ $1,000 \text{ Hz}$ ลงมา และได้รับสัญญาณสะท้อนกลับหลังจากปล่อยสัญญาณเป็นเวลา 4.00 s ถ้าอัตราเร็วของเสียงในอากาศประมาณ 350 m/s จงหาว่าตอนปล่อยคลื่นเสียงบอลลูกอยู่สูงจากพื้นเท่าใด?

Answer : 660 m

Problem 12.10

เรือจอดนิ่งบนผิวน้ำทะเล ใช้เครื่องโซนาร์ตรวจพบสัญญาณสะท้อนจากวัตถุต้องสงสัยเมื่อปล่อยคลื่นออกไปเป็นเวลา 0.40 s (ที่ส่งสัญญาณในวัตถุดังกล่าวเนื่องจากใช้เวลาสะท้อนน้อยกว่าพื้นทะเลบริเวณดังกล่าว) หลังจากได้รับสัญญาณอีก 30.0 s ต่อมาจึงทำการยิงคลื่นจากเครื่องโซนาร์อีกรอบ และพบสัญญาณสะท้อนจากวัตถุต้องสงสัยเมื่อปล่อยคลื่นออกไปเป็นเวลา 0.60 s ถ้าอัตราเร็วของคลื่นเสียงในน้ำทะเลประมาณ $1,500 \text{ m/s}$ จงหาอัตราเร็วเฉลี่ยของวัตถุต้องสงสัยดังกล่าว?

เสียง (Sound)

Answer : 4.9 m/s



ทบทวนการแทรกสอดของคลื่นสองขบวนจากแหล่งกำเนิดคลื่นอาพันธ์
กรณีที่มีเฟสเริ่มต้นเหมือนกัน

แทรกสอดแบบเสริม $\Delta r = m\lambda$; $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

แทรกสอดแบบหักล้าง $\Delta r = (m - \frac{1}{2})\lambda$; $m = 1, 2, 3, \dots$

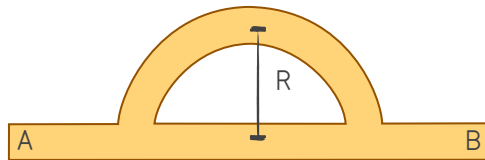
กรณีที่มีเฟสเริ่มต้นต่างกัน π (180°)

แทรกสอดแบบหักล้าง $\Delta r = m\lambda$; $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

แทรกสอดแบบเสริม $\Delta r = (m - \frac{1}{2})\lambda$; $m = 1, 2, 3, \dots$

Problem 12.11

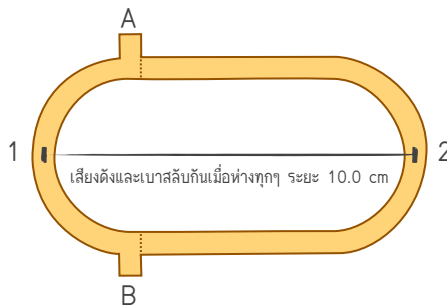
จากรูปด้านล่าง เมื่อส่งคลื่นเสียงความยาวคลื่น 60 cm เข้าไปทางด้าน A จงหา
รัศมี R ที่สั้นที่สุด ที่เสียงจะออกมาทางด้าน B ได้เบาที่สุด?



Answer : 26 cm

Problem 12.12

จากรูปด้านล่าง คลื่นเสียงเคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B ตามท่อในเส้นทางที่ 1 และเส้นทางที่ 2 พบว่าเสียงที่จุด B จะดังและเบาสลับกันเมื่อเลื่อนท่อที่ 2 ห่างออกจากจุดที่ 1 ทุกๆ ระยะ 10.0 cm ถ้าอัตราเร็วของเสียงอากาศในท่อดังกล่าวเท่ากับ 350 m/s คลื่นเสียงดังกล่าวมีความถี่เท่าใด?



Answer : 875 Hz

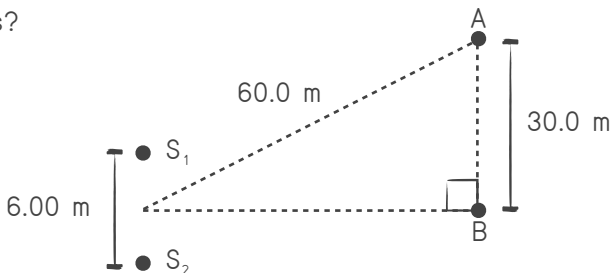
Problem 12.13

แหล่งกำเนิดเสียงห่างจากกำแพง 1.50 m และเครื่องรับสัญญาณเสียงห่างจากกำแพง 5.00 m (อยู่ฝั่งเดียวกับแหล่งกำเนิดเสียง) ถ้าขณะทำการทดลองเสียงในอากาศมีอัตราเร็วประมาณ 348 m/s ความถี่ต่ำสุดจากแหล่งกำเนิดที่ทำให้เครื่องรับสัญญาณเสียงได้รับเสียงเบาที่สุดเป็นเท่าใด (Hint : การสะท้อนทำให้คลื่นมีเฟสเปลี่ยนไป π)?

Answer : 116 Hz

Problem 12.14

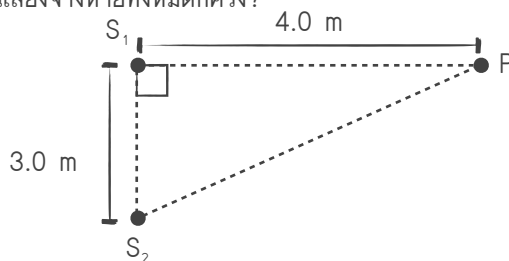
จากรูปด้านล่าง ลำโพง S_1 และ S_2 อยู่ห่างกัน 6.00 m ผู้สังเกตในจุด A ได้ยินเสียงดังชัดเจน ในช่วงเวลาที่ผู้สังเกตเดินจากจุด A ไปยังจุด B จะได้ยินเสียงหายไปทั้งหมดกี่ครั้ง ถ้าเสียงในการทดลองมีความถี่ 700 Hz และมีอัตราเร็ว 350 m/s?



Answer : 7 ครั้ง

Problem 12.15

จากรูปด้านล่าง ลำโพง S_1 และ S_2 อยู่ห่างกัน 3.0 m ปล่องความยาวคลื่นคงที่ 0.50 m เดิมผู้สังเกตอยู่ที่จุด P ซึ่งห่างจากจุด S_1 เป็นระยะ 4.0 m ได้ยินเสียงดังชัดเจน เมื่อผู้สังเกตดังกล่าวเดินเข้าไปยังลำโพง S_1 ตามแนวเส้นตรง $\overline{PS_1}$ ผู้สังเกตจะได้ยินเสียงจางหายทั้งหมดกี่ครั้ง?



12 - 18

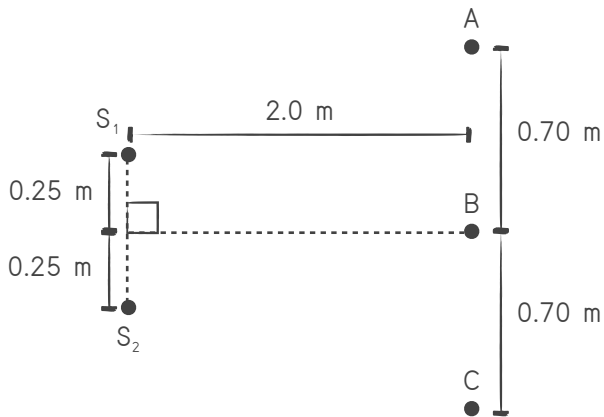
เสียง (Sound)

Answer : 4 ครั้ง

Pinfist : มัธยมศึกษาตอนปลาย และอุดมศึกษา

Problem 12.16

ในการทดลองการแทรกสอดของคลื่นเสียง เมื่อฟังเสียงจากทางด้านหน้าของลำโพง S_1 และ S_2 ที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวนอนซึ่งห่างจากลำโพง 2.0 m จะได้ยินเสียงดังชัดเจนที่จุด A, B และ C ดังรูปด้านล่าง ถ้าอัตราเร็วของเสียงในการทดลองประมาณ 350 m/s ความถี่ของเสียงในการทดลองจะเป็นเท่าใด?



Answer : 2.0 kHz

การเปลี่ยนแปลงของความดันในคลื่นเสียง (Pressure Variations in Sound Waves)

พิจารณากรณีคลื่นเสียงซึ่งเป็นคลื่นรูปไซน์

จะได้ $s(x,t) = s_{\max} \cos(kx \mp \omega t + \phi)$

จาก $B = -V_0 \frac{dP}{dV}$

$$dP = -\frac{B}{V_0} dV$$

$$dP = -\frac{B}{A dx} A ds$$

$$dP = -B \frac{\partial s}{\partial x}$$

$$dP = -B \frac{\partial}{\partial x} (s_{\max} \cos(kx \mp \omega t + \phi))$$

$$\Delta P = k B s_{\max} \sin(kx \mp \omega t + \phi)$$

$$\Delta P = \Delta P_{\max} \sin(kx \mp \omega t + \phi)$$



ความดันในตัวกลางของคลื่นเสียง

$$\Delta P = \Delta P_{\max} \sin(kx \mp \omega t + \phi)$$

ΔP คือ ความดันในตัวกลางของคลื่นเสียง

$\Delta P_{\max}$ คือ ความดันสูงสุดในตัวกลางของคลื่นเสียง

เสียง (Sound)

$$\Delta P_{\max} = kBs_{\max} = k\rho v^2 s_{\max} \quad ; \quad v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

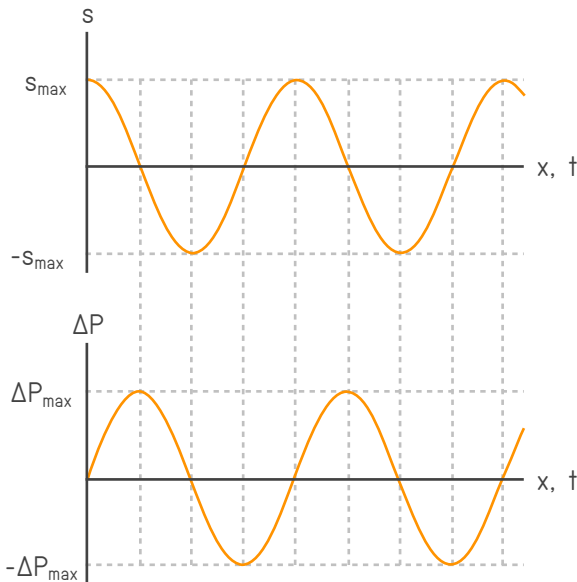
k คือ เลขคลื่น โดย $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

B คือ บัคส์โมดูลัสของตัวกลางคลื่นเสียง

$s_{\max}$ คือ แอมพลิจูดของคลื่นเสียง

ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลางคลื่นเสียง

v คือ อัตราเร็วของคลื่นเสียง



ข้อสังเกต

การที่แกนกราฟตั้งฉากกัน ไม่ได้หมายความว่าปริมาณนั้นตั้งฉากกัน

ค่าบวกหรือลบของความดัน บอกถึงค่าความดันที่มากกว่าหรือน้อยกว่าความ

ดันปกติ

พลังงานและกำลังของคลื่นเสียง (Energy and Power of Sound Waves)

พิจารณาพลังงานจลน์ของคลื่นในของไหลส่วนเล็กๆ มวล dm ซึ่งเป็นคลื่นรูปไซน์

โดย $s(x,t) = s_{\max} \cos(kx \mp \omega t + \phi)$

จาก $dK = \frac{1}{2} dm v_{\perp}^2$

$$dK = \frac{1}{2} dm \left(\frac{\partial s}{\partial t} \right)^2 \quad ; \quad v_{\perp} = \frac{\partial s}{\partial t}$$

$$dK = \frac{1}{2} (\rho dV_0) \left(\frac{\partial s}{\partial t} \right)^2 \quad ; \quad dm = \rho dV_0$$

$$dK = \frac{1}{2} (\rho dV_0) \left(\frac{\partial}{\partial t} (s_{\max} \cos(kx \mp \omega t + \phi)) \right)^2$$

$$dK = \frac{1}{2} (\rho dV_0) (\pm \omega s_{\max} \sin(kx \mp \omega t + \phi))^2$$

$$dK = \frac{1}{2} \rho \omega^2 s_{\max}^2 \sin^2(kx \mp \omega t + \phi) (Adx) \quad ; \quad dV_0 = Adx$$

$$dK = \frac{1}{2} \rho A \omega^2 s_{\max}^2 \sin^2(kx \mp \omega t + \phi) dx$$

$$dK = \frac{1}{2} \rho A \omega^2 s_{\max}^2 \frac{1}{2} [1 - \cos(2(kx \mp \omega t + \phi))] dx$$

$$dK = \frac{1}{4} \rho A \omega^2 s_{\max}^2 [1 - \cos(2(kx \mp \omega t + \phi))] dx$$



เสียง (Sound)

พิจารณาพลังงานกลในช่วง 1 ความยาวคลื่น (λ)

$$K = \frac{1}{4} \rho A \omega^2 s_{\max}^2 \int_0^{\lambda} (1 - \cos(2kx \mp 2\omega t + 2\phi)) dx$$

$$K = \frac{1}{4} \rho A \omega^2 s_{\max}^2 \left(x - \frac{1}{2k} \sin(2kx \mp 2\omega t + 2\phi) \right) \Big|_0^{\lambda}$$

$$K = \frac{1}{4} \rho A \omega^2 s_{\max}^2 \left(\lambda + \frac{1}{2k} \sin(4\pi \mp 2\omega t + 2\phi) - \frac{1}{2k} \sin(\mp 2\omega t + 2\phi) \right)$$

$$K = \frac{1}{4} \rho A \omega^2 s_{\max}^2 \lambda$$

พิจารณาพลังงานศักย์ของคลื่นในของไหลส่วนเล็กๆ มวล dm ซึ่งเป็นคลื่นรูปไซน์ ในขณะที่ลูกสูบกดเข้าไปเป็นระยะ ds จุดศูนย์กลางมวลของของไหลจะเคลื่อนที่เป็นระยะ $\frac{ds}{2}$ โดย $\Delta P = \Delta P_{\max} \sin(kx \mp \omega t + \phi)$

จะได้ $dU = -F \left(\frac{ds}{2} \right)$

$$dU = -\Delta P A \left(\frac{ds}{2} \right) \quad ; F = \Delta P A$$

$$dU = -\frac{1}{2} (\Delta P_{\max} \sin(kx \mp \omega t + \phi)) A ds$$

จาก $\Delta P_{\max} = k p v^2 s_{\max}$

จะได้ $dU = -\frac{1}{2} (k p v^2 s_{\max}) A \sin(kx \mp \omega t + \phi) ds$

$$dU = -\frac{1}{2} k p A \left(\frac{\omega}{k} \right)^2 s_{\max} \sin(kx \mp \omega t + \phi) ds \quad ; v = \frac{\omega}{k}$$

$$dU = -\frac{1}{2k} \rho A \omega^2 s_{\max} \sin(kx \mp \omega t + \phi) ds$$

เสียง (Sound)

จาก $s(x,t) = s_{\max} \cos(kx \mp \omega t + \phi)$

$$\frac{ds}{dx} = -ks_{\max} \sin(kx \mp \omega t + \phi)$$

$$ds = -ks_{\max} \sin(kx \mp \omega t + \phi) dx$$

จะได้

$$dU = -\frac{1}{2k} \rho A \omega^2 s_{\max} \sin(kx \mp \omega t + \phi) (-ks_{\max} \sin(kx \mp \omega t + \phi) dx)$$

$$dU = \frac{1}{2} \rho A \omega^2 s_{\max}^2 \sin^2(kx \mp \omega t + \phi) dx$$

$$dU = \frac{1}{2} \rho A \omega^2 s_{\max}^2 \sin^2(kx \mp \omega t + \phi) dx$$

$$dU = dK$$

$\therefore$ เมื่อพิจารณาพลังงานศักย์ในช่วง 1 ความยาวคลื่น (λ)

จะได้ $U = K = \frac{1}{4} \rho A \omega^2 s_{\max}^2 \lambda$

พลังงานรวมของของไหลในช่วง 1 ความยาวคลื่น (λ)

จะได้ $E = K + U = 2K = 2U = \frac{1}{2} \rho A \omega^2 s_{\max}^2 \lambda$

กำลังของของไหลในช่วง 1 ความยาวคลื่น (λ)

จะได้ $\wp = \frac{E}{T} = \frac{1}{2} \rho A \omega^2 s_{\max}^2 \frac{\lambda}{T} = \frac{1}{2} \rho A \omega^2 s_{\max}^2 v$





พลังงานของคลื่นเสียง (คลื่นของของไหล)

พลังงานของของไหลในช่วง 1 ความยาวคลื่น ที่มีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์

$$U = K = \frac{1}{4} \rho A \omega^2 s_{\max}^2 \lambda$$

และ $E = K + U = 2K = 2U = \frac{1}{2} \rho A \omega^2 s_{\max}^2 \lambda$

U คือ พลังงานศักย์ของของไหลในช่วง 1 ความยาวคลื่น

K คือ พลังงานจลน์ของของไหลในช่วง 1 ความยาวคลื่น

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

A คือ พื้นที่หน้าตัดของคลื่น

ω คือ ความถี่เชิงมุมของคลื่นของของไหล

$s_{\max}$ คือ แอมพลิจูดของคลื่นของของไหล

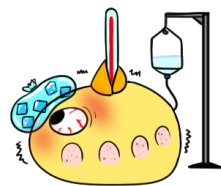
λ คือ ความยาวคลื่นของคลื่นของของไหล

E คือ พลังงานกลของของไหลในช่วง 1 ความยาวคลื่น

กำลังของของไหลในช่วง 1 ความยาวคลื่น ที่มีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์

$$\mathcal{P} = \frac{E}{T} = \frac{1}{2} \rho A \omega^2 s_{\max}^2 v$$

$\mathcal{P}$ คือ กำลังของของไหลในช่วง 1 ความยาวคลื่น



ความเข้มเสียง (Intensity of Sound Waves)



ความเข้มของเสียง

ความเข้ม (Intensity ; I [W/m^2 , kg/s^3])

$$I = \frac{\mathcal{P}}{A}$$

$\mathcal{P}$ คือ กำลังของคลื่น

A คือ พื้นที่ของหน้าคลื่น

Problem 12.17

แหล่งกำเนิดเสียงปล่อยเสียงออกมาทุกทิศทางด้วยกำลัง 80.0 W จงหา

- ความเข้มเสียงที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิด 4.00 m?
- ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดของเสียงที่มีความเข้มเสียงเท่ากับ $1.00 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$?

Answer : a) 0.398 W/m^2 and b) 25.2 km

Problem 12.18

งานดนตรีแห่งหนึ่งได้ทำการติดตั้งวัสดุดูดกลืนเสียงได้อย่างสมบูรณ์ ผู้ชมคนหนึ่งอยู่ห่างจากผู้เล่นดนตรีเป็นระยะ ℓ ถ้าต้องการความเข้มเสียงสูงขึ้นเป็นสองเท่า ผู้ชมคนดังกล่าวต้องอยู่ห่างจากผู้เล่นดนตรีเป็นระยะเท่าใด?

$$\text{Answer : } \frac{\ell}{\sqrt{2}}$$

Problem 12.19

ผู้สังเกตคนที่ 1 และ 2 อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงเป็นระยะ ℓ และ 4ℓ ตามลำดับ ถ้าผู้สังเกตคนที่ 2 ความเข้มเสียงได้ 50.0 W/m^2 ผู้สังเกตคนที่ 1 จะวัดความเข้มเสียงได้เท่าใด?

$$\text{Answer : } 800 \text{ W/m}^2$$

Problem 12.20

แมลงตัวหนึ่งบินออกจากผู้สังเกตในแนวเส้นตรงด้วยอัตราเร็ว 0.20 m/s ถ้าอัตราพลังงานเสียงที่แมลงดังกล่าวส่งออกมาในการบินมีค่าประมาณ $4\pi \times 10^{-12} \text{ W}$ และความเข้มเสียงน้อยสุดที่มนุษย์ได้ยินมีค่าประมาณ 10^{-12} W/m^2 ผู้สังเกตจะได้ยินเสียงแมลงดังกล่าวบินอยู่นานเท่าใด?

Answer : 5.0 s

Problem 12.21

ในการบินของแมลงตัวหนึ่งสร้างเสียงซึ่งมีกำลังเฉลี่ย $\pi \times 10^{-14} \text{ W}$ ในขณะที่แมลงดังกล่าวกำลังบินเป็นแนวเส้นตรงเข้าหาผู้สังเกต ผู้สังเกตจะเริ่มได้ยินเสียงบินของแมลงดังกล่าวที่ระยะห่างเท่าใด เมื่อความเข้มเสียงน้อยสุดที่มนุษย์ได้ยินมีค่าประมาณ 10^{-12} W/m^2 ?

Answer : 5.0 cm

Problem 12.22

ผู้สังเกตคนที่ 1 เห็นพลุระเบิดเหนือศีรษะขึ้นไปในระยะ 40 m ขณะเดียวกัน ผู้สังเกตคนที่ 2 อยู่ห่างจากผู้สังเกตคนที่ 1 ตามแนวราบเป็นระยะ 30 m ความเข้มเสียงที่ผู้สังเกตคนที่ 1 ได้ยิน เป็นกี่เท่าของความเข้มเสียงที่ผู้สังเกตคนที่ 2 ได้ยิน?

Answer : $\frac{25}{16}$

Problem 12.23

ผู้สังเกตคนที่ 1 และผู้สังเกตคนที่ 2 เห็นพลุระเบิดที่มุมเงย 37° และ 53° ตามลำดับ ความเข้มเสียงที่ผู้สังเกตคนที่ 1 ได้ยิน เป็นกี่เท่าของความเข้มเสียงที่ผู้สังเกตคนที่ 2 ได้ยิน?

Answer : $\frac{9}{16}$

Problem 12.24 Challenge

คลื่นเสียงสั้นด้วยความถี่ f_1 แอมพลิจูด s_1 และมีความเข้ม I_1 ถ้าความถี่ของคลื่นเปลี่ยนไปเป็น f_2 และแอมพลิจูดเปลี่ยนไปเป็น s_2 ความเข้มจะเป็นเท่าใด?

$$\text{Answer : } \frac{f_2^2 s_2^2 I_1}{f_1^2 s_1^2}$$

Problem 12.25 Challenge

คลื่นเสียงความถี่ 1,000 Hz ความเข้ม $1.00 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ อากาศมีความหนาแน่นประมาณ 1.29 kg/m^3 และอัตราเร็วของเสียงในอากาศเท่ากับ 343 m/s จงหาความดันสูงสุดและแอมพลิจูดของคลื่นเสียงดังกล่าว?

$$\text{Answer : } 10.7 \times 10^{-12} \text{ m and } 2.97 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

ระดับเสียง (Sound Level in Decibels)



ระดับเสียง

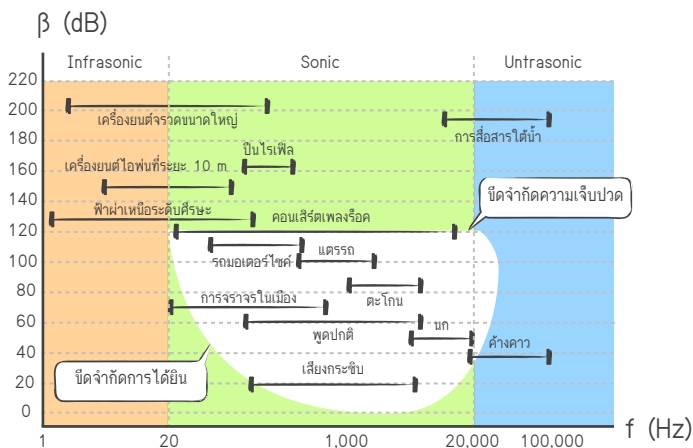
ระดับความดังของเสียงในมาตรวัดเดซิเบล (Decibels ; β [dB])

$$\beta = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

I คือ ความเข้มของเสียง

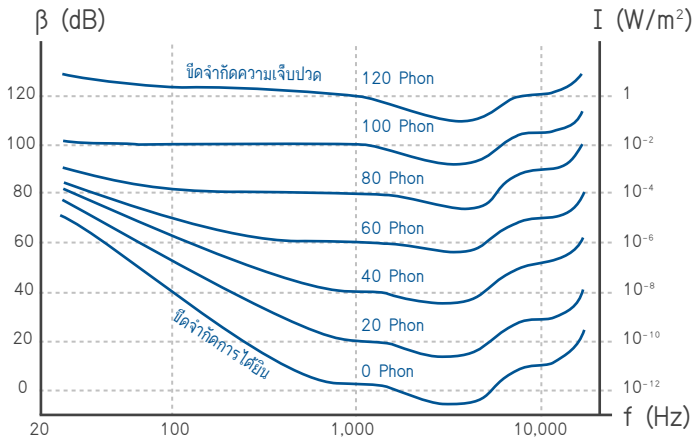
I_0 คือ ความเข้มของเสียงต่ำสุดที่มนุษย์ได้ยิน (ประมาณ 10^{-12} W/m^2)

หูของมนุษย์สามารถได้ยินความถี่ในช่วงประมาณ 20 - 20,000 Hz ในแต่ละระดับความถี่อาจมีความเข้มของเสียงต่ำสุดที่มนุษย์ได้ยินต่างกัน ตัวอย่างช่วงความถี่และระดับเสียงโดยประมาณของแหล่งกำเนิดต่างๆ (พื้นที่สีขาวคือระดับการได้ยินปกติของมนุษย์) เป็นไปตามแผนภาพด้านล่าง



เสียง (Sound)

ระดับความดังของเสียงที่มนุษย์รับรู้ใช้หน่วยเป็น “ฟอน (Phon)” คือ ระดับเสียงในหน่วยเดซิเบล (dB) ซึ่งอ้างอิงที่ความถี่ 1,000 Hz ดังรูปด้านล่าง



ข้อสังเกต

การสั่นบางชนิดทำให้เกิดเสียงที่มนุษย์ได้ยิน และการสั่นบางชนิดไม่เกิดเสียงที่มนุษย์ได้ยิน

เดซิเบลเป็นหน่วยวัดระดับเสียง ส่วนความดังของเสียง (มีหน่วยเป็นฟอน) ขึ้นกับการรับรู้ของแต่ละคน

การได้ยินเสียงไม่ได้ขึ้นอยู่กับระดับความดังของเสียงเพียงเท่านั้น ยังขึ้นกับระดับความถี่ของเสียงด้วย

ระดับสูงต่ำของเสียงขึ้นกับความถี่ของเสียง ไม่ขึ้นกับแอมพลิจูดของเสียง

มลพิษทางเสียง คือ เสียงรบกวนที่มีระดับเสียงสูง และเสียงรบกวนที่ก่อให้เกิดความรำคาญ หรือเสียงที่ไม่ต้องการ อาจเป็นอันตรายต่อ ผู้ฟัง ทั้งอันตรายต่อการได้ยิน และอันตราย ต่อสุขภาพและจิตใจ

Problem 12.26

ในวันที่หมอกหนา และอุณหภูมิเท่ากับ $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีเรือลำหนึ่งลอยอยู่กลางทะเลได้ปล่อยคลื่นเสียงกำลัง 1.0 W พบว่าได้ยินเสียงสะท้อนกลับมาหลังจากปล่อยคลื่นดังกล่าวเป็นเวลา 20 นาที เรือลำดังกล่าวได้ยินเสียงสะท้อนจริงหรือไม่ ถ้าจริงเรือลำดังกล่าวจะอยู่ห่างจากวัตถุสะท้อนเสียงดังกล่าวเท่าใด?

Answer : ไม่ได้ยินเสียงสะท้อน

Problem 12.27

หน้าต่างพื้นที่ 2.0 m^2 มีแหล่งกำเนิดเสียงหันตรงมายังหน้าต่างดังกล่าว ถ้าวัดระดับเสียงที่หน้าต่างได้ 100 dB กำลังเสียงที่ผ่านหน้าต่างดังกล่าวเป็นเท่าใด?

Answer : 0.020 W

Problem 12.28

เมื่อผู้สังเกตอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงเป็นระยะ 5.0 m วัดระดับเสียงได้ 50 dB
ถ้าผู้สังเกตอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงเป็นระยะ 50.0 m จะวัดระดับเสียงได้เท่าใด?

Answer : 30 dB

Problem 12.29

เครื่องยนต์หนึ่งเมื่อเปิดใช้งานจะมีความเข้มเสียงเท่ากับ $2.00 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$ จงหา

- a) ระดับความดังเมื่อเปิดใช้งาน 1 เครื่อง?
- b) ระดับความดังเมื่อเปิดใช้งาน 3 เครื่อง พร้อมกัน?

Answer : a) 53.0 dB and b) 57.8 dB

Problem 12.30

จงแสดงว่าความต่างของระดับความดังของเสียงในมาตรวัดแบบเดซิเบลระหว่าง β_1 และ β_2 สัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับตำแหน่งที่ได้รับเสียง (แหล่งกำเนิดเสียงเดียวกัน) r_1 และ r_2 ตามสมการ $\beta_2 - \beta_1 = 20\log(\frac{r_1}{r_2})$?

$$\text{Answer : } 20\log(\frac{r_1}{r_2})$$

Problem 12.31

ผู้สังเกตวัดระดับเสียงได้ 65 dB ถ้าผู้สังเกตเข้ามาใกล้แหล่งกำเนิดเสียงเป็นระยะ $\frac{1}{10}$ ของระยะเดิม ระดับเสียงที่วัดได้จะเป็นเท่าใด?

$$\text{Answer : } 85 \text{ dB}$$

Problem 12.32

วัดระดับเสียงที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดเสียง 10 m ได้เท่ากับ 90 dB ที่ตำแหน่งห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงเท่าใด จึงจะวัดระดับเสียงได้ 50 dB?

Answer : 1.0 km

Problem 12.33

ผู้สังเกตคนที่ 1 เห็นพลุระเบิดเหนือศีรษะขึ้นไปในแนวดิ่งเป็นระยะ 30 m ผู้สังเกตคนที่ 2 เห็นเหตุการณ์เดียวกัน และอยู่ห่างตามแนวราบจากผู้สังเกตที่ 1 เป็นระยะ 40 m ถ้าระดับเสียงที่ผู้สังเกตคนที่ 1 วัดได้เท่ากับ 120 dB ผู้สังเกตคนที่ 2 จะวัดระดับเสียงได้เท่าใด?

Answer : 116 dB

Problem 12.34

ถ้าต้องการเพิ่มระดับเสียงจากเดิม 10 dB จะต้องเพิ่มกำลังของแหล่งกำเนิดเสียงเป็นกี่เท่าจากเดิม?

Answer : 10

Problem 12.35

วัดระดับเสียงในจุดหนึ่งเท่ากับ 50 dB เมื่อเดินห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงออกมาจากเดิม 90 m วัดระดับเสียงเท่ากับ 30 dB จงหาลำดับของแหล่งกำเนิดเสียงดังกล่าว?

Answer : $4\pi \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$

Problem 12.36

เสียงจากแหล่งกำเนิดที่ 1 วัดระดับเสียงได้ 40 dB และเสียงจากแหล่งกำเนิดที่ 2 มีความเข้ม $0.20 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ ต้องใช้แหล่งกำเนิดเสียงที่ 1 จำนวนเท่าใดจึงจะได้ระดับเสียงเท่ากับแหล่งกำเนิดเสียงที่ 2?

Answer : 20

Problem 12.37

ภายในร้านอาหารวัดระดับเสียงเท่ากับ 100 dB ถ้าใช้เครื่องกรองเสียงปรากฏว่าลดความเข้มเสียงได้ 99.99% ของความเข้มเสียงเดิม คนที่ใช้เครื่องกรองเสียงดังกล่าวจะวัดระดับเสียงได้เท่าใด?

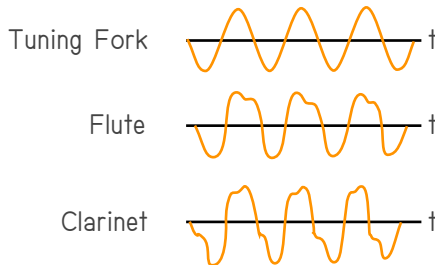
Answer : 60 dB

Problem 12.38

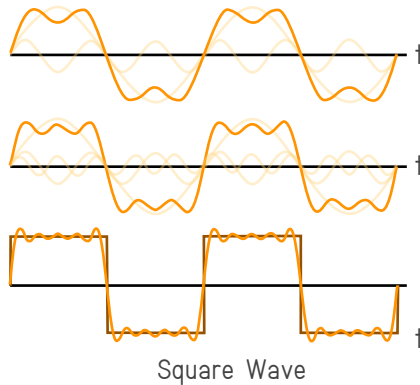
แหล่งกำเนิดเสียงพลังงานไฟฟ้าสร้างระดับเสียง 80 dB ที่ระยะห่างออกไป 1.0 m เปิดใช้เสียงดังกล่าวดำเนินเวลา 1,000 ชั่วโมง ถ้าสร้างระดับเสียง 100 dB ที่ระยะห่างออกไป 1.0 m จะเปิดได้นานเท่าใด?

Answer : 10 hr

รูปแบบของคลื่นที่ไม่ใช่รูปไซน์ (Nonsinusoidal Wave Patterns)



Fourier synthesis of a square wave

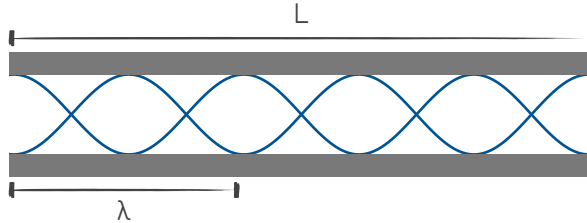


ข้อสังเกต

คุณภาพเสียงในทางฟิสิกส์ไม่ได้บอกถึงความไพเราะของเสียง แต่เป็นการ
ลักษณะเฉพาะของเสียง

คลื่นนิ่งของเสียง (Standing Waves of Sound)

คลื่นนิ่งในท่อปลายเปิด



n Harmonic (n Nodes) and $n - 1$ Overtone

จากรูป $L = \frac{n\lambda}{2}$

$\therefore \lambda_n = \frac{2L}{n}$

จาก $v = f_n \lambda_n$
 $v = f_n \left(\frac{2L}{n} \right)$
 $f_n = \frac{nv}{2L}$



คลื่นนิ่งในท่อปลายเปิด

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad \text{และ} \quad f_n = \frac{nv}{2L}$$

λ_n คือ ความยาวคลื่นของฮาร์โมนิกลำดับที่ n

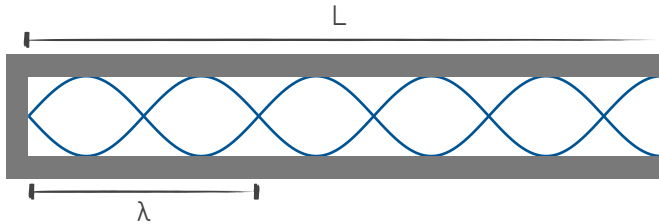
f_n คือ ความถี่คลื่นของฮาร์โมนิกลำดับที่ n

L คือ ระยะห่างระหว่างปลายตรึงสองด้าน

n คือ ลำดับของฮาร์โมนิก (จำนวนของ Nodes)

v คือ อัตราเร็วของคลื่น

คลื่นนิ่งในท่อปลายปิด



$2n - 1$ Harmonic (n Nodes หรือ n Antinodes) and $2n - 2$ Overtone

จากรูป
$$L = \frac{(2n - 1)\lambda}{4}$$

$\therefore \lambda_n = \frac{4L}{2n - 1}$

จาก
$$v = f_n \lambda_n$$

$$v = f_n \left(\frac{4L}{2n - 1} \right)$$

$$f_n = \frac{(2n - 1)v}{4L}$$



คลื่นนิ่งในท่อปลายปิด

$$\lambda_n = \frac{4L}{2n - 1} \quad \text{และ} \quad f_n = \frac{(2n - 1)v}{4L}$$

λ_n คือ ความยาวคลื่นของฮาร์โมนิกลำดับที่ $2n - 1$

f_n คือ ความถี่คลื่นของฮาร์โมนิกลำดับที่ n

L คือ ระยะห่างระหว่างปลายตรึงสองด้าน

n คือ ลำดับของฮาร์โมนิก (จำนวนของ Nodes หรือ Antinodes)

v คือ อัตราเร็วของคลื่น



ข้อสังเกต

คลื่นนิ่งของเสียงเกิดจากการรวมกันของคลื่นเสียงอาพันธ์สองขบวน
อนุภาคตัวกลางของเสียงในคลื่นนิ่งจะเคลื่อนที่ด้วยแอมพลิจูดสูงสุดที่ตำแหน่ง
ปฏิบัพ (Antinode) และจะอยู่นิ่งที่ตำแหน่งบัพ (Node)

Problem 12.39

สองความถี่ธรรมชาติที่อยู่ติดกันในกรณีท่อปลายเปิด คือ 500 Hz และ 600 Hz
จงหาความถี่มูลฐานและความยาวของท่อปลายเปิดดังกล่าว เมื่ออุณหภูมิของอากาศ
เท่ากับ 30.0 °C?

Answer : 1.75 m

เสียง (Sound)

Problem 12.40

คลื่นเสียงอัตราเร็ว 350 m/s ทำให้เกิดก้ำทอนลำดับที่ 1 ในกล่องซึ่งปิดทุกด้าน และมีความยาว 50.0 cm ความถี่ธรรมชาติของกล่องดังกล่าวเป็นเท่าใด?

Answer : 350 Hz

Problem 12.41

ในการทดลองการสั่นพ้องของเสียง ใช้ส้อมเสียงซึ่งทำให้เกิดการสั่นพ้องที่ตำแหน่ง 11.5 cm, 36.5 cm และ 61.5 cm ตามลำดับ ถ้าอัตราเร็วของเสียงเท่ากับ 350 m/s ความถี่ของส้อมเสียงดังกล่าวเป็นเท่าใด?

Answer : 700 Hz

Problem 12.42

หลอดเรโซแนนซ์ในการทดลองเรื่องเสียงซึ่งมีลักษณะเป็นท่อปลายปิด วัดความดันได้สูงสุด 3 ครั้งเมื่อเลื่อนลูกสูบไปตามความยาวของหลอดเรโซแนนซ์ โดยตำแหน่งสุดท้ายที่ลูกสูบห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงมากที่สุดมีระยะห่างจากปลายกระบอกสูบเท่ากับ 100 cm ถ้าคลื่นเสียงมีอัตราเร็ว 348 m/s คลื่นเสียงจากจากแหล่งกำเนิดเสียงดังกล่าวนี้อาจมีความถี่เท่าใด?

Answer : 435 Hz

Problem 12.43

เคาะส้อมเสียงความถี่ 346 Hz หน้าหลอดกำทอน ทำให้เกิดกำทอนครั้งแรกที่ระยะ 25 cm อุณหภูมิของอากาศเป็นเท่าใด?

Answer : 25 °C

Problem 12.44

ฮาร์โมนิกที่ 2 ของท่อปลายเปิด และฮาร์โมนิกที่ 3 ของท่อปลายปิดมีความถี่ค่าเดียวกัน อัตราส่วนความยาวของท่อปลายเปิดต่อท่อปลายปิดเป็นเท่าใด?

Answer : $\frac{4}{3}$

Problem 12.45

แหล่งกำเนิดเสียงความถี่ 700 Hz จ่อปลายท่อหลอดแก้วพื้นที่หน้าตัด 10.0 cm^2 ยาว 15.0 cm และมีปลายด้านหนึ่งเป็นปลายปิด ต้องเติมน้ำปริมาตรน้อยสุดเท่าใด เพื่อให้เกิดเสียงดังชัดเจนที่สุดจากหลอดแก้วดังกล่าว เมื่ออัตราเร็วของเสียงเท่ากับ 350 m/s ?

Answer : 25.0 cm^3

Problem 12.46

การทดลองการสั่นพ้องในหลอดเรโซแนนซ์ใน 4 หลอด ได้ยินเสียงดังสุดครั้งแรกเมื่อลูกสูบอยู่ที่ตำแหน่งจากปากหลอด 12.0 cm, 13.0 cm, 11.5 cm และ 11.5 cm ตามลำดับ และได้ยินเสียงดังสุดครั้งต่อไปเมื่อลูกสูบอยู่ที่ตำแหน่งจากปากหลอด 36.0 cm, 37.5 cm, 35.5 cm และ 35.0 cm ตามลำดับ ถ้าอัตราเร็วของเสียงในการทดลองเท่ากับ 336 m/s ความถี่ของเสียงในการทดลองเป็นเท่าใด?

Answer : 700 Hz

Problem 12.47

ในการทดลองการสั่นพ้องของเสียง เมื่อทำการเลื่อนลูกสูบออกช้าๆ จะได้ยินเสียงดังสุด 2 ครั้งเมื่อใช้ความถี่ f_1 และจะได้ยินเสียงดังสุด 5 ครั้ง เมื่อใช้ความถี่ f_2 โดยที่เสียงดังสุดครั้งสุดท้ายของทั้งสองความถี่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกันพอดี ถ้าความถี่ $f_1 = 900 \text{ Hz}$ ความถี่ f_2 จะเป็นเท่าใด?

Answer : 2.70 kHz

Problem 12.48

ท่อออร์แกนปลายปิดยาว 0.75 m เกิดกำทอนครั้งแรกที่ความถี่มูลฐาน ที่อุณหภูมิ 25 °C ความถี่กำทอนนี้จะเป็น?

Answer : 115 Hz

Problem 12.49

ท่อน้ำทรงกระบอกสูง 150 cm ใส่ น้ำจนเต็มแล้วทำการเจาะรูด้านล่างให้น้ำไหลออกอย่างช้าๆ เมื่อเคาะส้อมเสียงความถี่ 400 Hz ปรากฏว่าเมื่อน้ำลดลง 21.9 cm ได้เกิดการสั่นพ้องครั้งแรก และเมื่อระดับน้ำลดลงไปอีก 43.7 cm ได้เกิดการสั่นพ้องครั้งที่สอง จงหา

- อัตราเร็วของคลื่นเสียงในท่อดังกล่าว?
- จะได้ยินการสั่นพ้องทั้งหมดกี่ครั้ง?

Answer : a) 350 m/s and b) 3 ครั้ง

บีต (Beats)

พิจารณาคลื่นสองขบวนที่มีเฟสเริ่มต้น แอมพลิจูด และอัตราเร็วเท่ากัน แต่มีความถี่ต่างกันเล็กน้อย (ความยาวคลื่นต่างกัน) โดยคลื่นทั้งสองขบวนมีสมการเป็น

$$y_1 = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_1}x - 2\pi f_1 t\right) \text{ และ } y_2 = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_2}x - 2\pi f_2 t\right)$$

เพื่อความสะดวกจะพิจารณาที่ตำแหน่ง $x = 0$ จะได้

$$y = y_1 + y_2$$

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

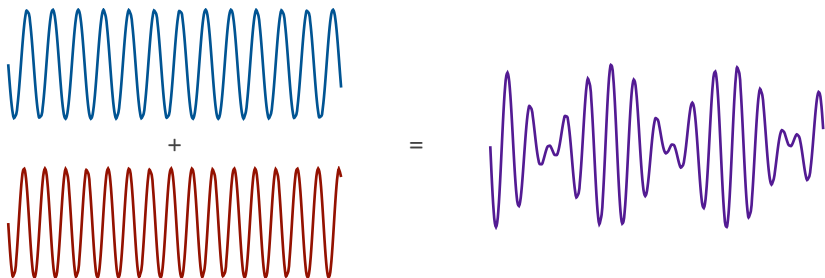
$$y = A \cos(2\pi f_1 t) + A \cos(2\pi f_2 t) \quad ; \cos(-\theta) = \cos(\theta)$$

$$\text{จาก } \cos(a) + \cos(b) = 2\cos\left(\frac{a-b}{2}\right)\cos\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

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

$$y = 2A \cos\left(2\pi\left(\frac{f_b}{2}\right)t\right) \cos(2\pi f_{av} t)$$

$$\text{เมื่อ } f_b = |f_1 - f_2| \text{ และ } f_{av} = \frac{f_1 + f_2}{2}$$





บีทส์ (Beats)

บีทส์ (Beats) คือ ปรากฏการณ์ที่คลื่นซึ่งมีความถี่ต่างกันเล็กน้อย (f_1 ต่างกับ f_2 อยู่เล็กน้อย) มารวมกัน ทำให้ความถี่ที่ผู้สังเกตได้รับเปลี่ยนไป และสังเกตได้ถึง Nodes และ Antinodes ของคลื่นสลับกันดังนี้

ความถี่ที่สังเกตได้ (ความถี่ที่ได้ยิน)
$$f_{av} = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

จำนวนครั้งที่ดัง หรือเบาใน 1 วินาที (ความถี่บีทส์)
$$f_b = |f_1 - f_2|$$

Problem 12.50

คลื่นเสียงสองขบวนมีแอมพลิจูดเท่ากัน มีความถี่ 400 Hz และ 404 Hz คลื่นทั้งสองเมื่อรวมกันแล้วจะมีความถี่และความถี่บีทส์เท่าใด?

Answer : $f_{av} = 402 \text{ Hz}$ and $f_b = 4 \text{ Hz}$

Problem 12.51

ส้อมเสียงความถี่ 440 Hz ทำให้เกิดบีทส์ 3.0 Hz กับส้อมเสียงอีกอันหนึ่ง ส้อมเสียงดังกล่าวมีความถี่เท่าใด?

Answer : 437 Hz and 443 Hz

Problem 12.52

เมื่อเคาะส้อมเสียงพร้อม 2 อันพร้อมกัน วัดความถี่ได้ 553 Hz ซึ่งเสียงดังกล่าวจะมีการดังและเบาสลับกัน โดยใน 1 วินาทีจะมีเสียงดัง 4 ครั้ง ส้อมเสียงอื่นที่มีความถี่มากกว่าจะมีความถี่เป็นเท่าใด?

Answer : 555 Hz

Problem 12.53

ส้อมเสียง 3 อันความถี่ $f_1 < f_2 < f_3$ เมื่อเคาะส้อมเสียงอันที่ 1 กับอันที่ 2 พร้อมกัน ทำให้เกิดบีตส์ 2 Hz เมื่อเคาะส้อมเสียงอันที่ 2 กับอันที่ 3 พร้อมกัน ทำให้เกิดบีตส์ 4 Hz ถ้าเคาะเสียงอันที่ 1 กับอันที่ 3 พร้อมกัน จะเกิดบีตส์เท่าใด?

Answer : 6 Hz

Problem 12.54

ส้อมเสียง 3 อันความถี่ $f_1 = 440$ Hz, f_2 และ f_3 โดย $f_2 > f_3$ และ $f_2 > f_1$ เมื่อเคาะส้อมเสียงอันที่ 1 และ 2 พร้อมกัน ทำให้เกิดบีตส์ 11 ครั้งใน 2.0 s เมื่อเคาะส้อมเสียงอันที่ 2 และ 3 พร้อมกัน ทำให้เกิดบีตส์ 7.0 ครั้งใน 2.0 s ส้อมเสียงอันที่ 3 มีความถี่เท่าใด?

Answer : 442 Hz

Problem 12.55

ท่อออร์แกนปลายเปิดสองท่อยาว 0.500 m และ 0.504 m ตามลำดับ โดยท่อออร์แกนทั้งสองให้ความถี่มูลฐานพร้อมกัน ถ้าอัตราเร็วของเสียงในอากาศเท่ากับ 348 m/s จะเกิดเสียงดังกี่ครั้งในช่วงเวลา 10.0 s?

Answer : 30

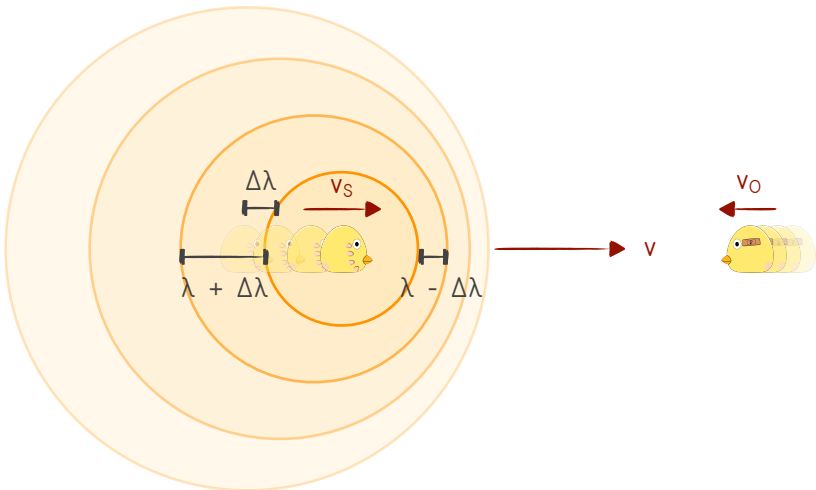
Problem 12.56

ท่อปลายปิดยาวเท่ากันสองท่อ ท่อที่หนึ่งเกิดการสั่นพ้องที่ความถี่ต่ำสุด 480 Hz ณ อุณหภูมิ 15.0 °C ถ้าท่อที่สองมีอุณหภูมิในท่อเท่ากับ 20.0 °C เมื่อทำให้เกิดเสียงพร้อมกันจะเกิดบีตส์เท่าใด?

Answer : 4 Hz

ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (The Doppler Effect)

พิจารณากรณีที่คลื่นความถี่ f ความยาวคลื่น λ และอัตราเร็ว v ถูกปล่อยออกอย่างต่อเนื่องจากแหล่งกำเนิดซึ่งเคลื่อนที่ไปทางทิศ $+x$ ด้วยความเร็วขนาด v_s ซึ่ง $v_s < v$ และผู้สังเกตกำลังเคลื่อนที่ไปทางทิศ $-x$ ด้วยความเร็วขนาด v_o เข้าหาแหล่งกำเนิดคลื่น ซึ่ง $v_o < v$ ดังรูปด้านล่าง



พิจารณาความเร็วของคลื่นเทียบกับผู้สังเกต

กำหนดให้ $\vec{v}_{WO}$ คือ ความเร็วของคลื่นเทียบกับผู้สังเกต

$\vec{v}_{WE}$ คือ ความเร็วของคลื่นเทียบกับกรอบเฉื่อย ซึ่ง $|\vec{v}_{WE}| = v$

$\vec{v}_{OE}$ คือ ความเร็วของผู้สังเกตเทียบกับกรอบเฉื่อย ซึ่ง $|\vec{v}_{OE}| = v_o$

จาก

$$\vec{v}_{WO} = \vec{v}_{WE} + \vec{v}_{EO}$$

$$\vec{v}_{WO} = \vec{v}_{WE} - \vec{v}_{OE}$$

$$v_{WO} = v - (\mp v_o)$$

$$v_{WO} = v \pm v_o$$

เสียง (Sound)

โดยใช้ $v + v_o$ เมื่อผู้สังเกตเคลื่อนที่เข้าหาแหล่งกำเนิดคลื่น และใช้ $v - v_o$ เมื่อผู้สังเกตเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดคลื่น

พิจารณาความยาวคลื่นที่ผู้สังเกตได้รับ

กำหนดให้ λ' คือ ความยาวคลื่นที่ผู้สังเกตได้รับ

จะได้ $\lambda' = \lambda \mp \Delta\lambda$

$$\lambda' = \frac{v}{f} \mp v_s T$$

$$\lambda' = \frac{v}{f} \mp \frac{v_s}{f}$$

$$\lambda' = \frac{v \mp v_s}{f}$$

โดยใช้ $\frac{v - v_s}{f}$ เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เข้าหาผู้สังเกต และใช้ $\frac{v + v_s}{f}$ เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ออกจากผู้สังเกต

พิจารณาความถี่ที่ผู้สังเกตได้รับ (f_o)

จาก $f_o = \frac{v_{wo}}{\lambda'}$

$$f_o = \frac{v \pm v_o}{\frac{v \mp v_s}{f}}$$

$$f_o = \left(\frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} \right) f$$





ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (The Doppler Effect)

ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (The Doppler Effect) คือ ปรากฏการณ์ที่ผู้สังเกตได้สังเกตความถี่ของคลื่นเปลี่ยนไปจากความถี่ที่แหล่งกำเนิดคลื่นปล่อยออกมา เนื่องจากผู้สังเกตหรือแหล่งกำเนิดคลื่นมีการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่น้อยกว่าอัตราเร็วของคลื่น ซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการ

$$f_o = \left(\frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} \right) f$$

f_o คือ ความถี่ของคลื่นที่ผู้สังเกตได้รับ

f คือ ความถี่ของคลื่นที่แหล่งกำเนิดคลื่นปล่อยออกมา

v คือ อัตราเร็วของคลื่นเทียบกับกรอบเฉื่อย

v_o คือ อัตราเร็วของผู้สังเกตเทียบกับกรอบเฉื่อย (ใช้เครื่องหมาย + เมื่อผู้สังเกตเคลื่อนที่เข้าหาแหล่งกำเนิดคลื่น และใช้เครื่องหมาย - เมื่อผู้สังเกตเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดคลื่น)

v_s คือ อัตราเร็วของแหล่งกำเนิดคลื่นเทียบกับกรอบเฉื่อย (ใช้เครื่องหมาย - เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เข้าหาผู้สังเกต และใช้เครื่องหมาย + เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ออกจากผู้สังเกต)

ข้อสังเกต

ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ของเสียงเป็นปรากฏการณ์ที่รับรู้ได้ทั้งมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น



Problem 12.57

รถกู้ภัยเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 10.0 m/s พร้อมกับเปิดไซเรนความถี่ $1,000 \text{ Hz}$ มีรถยนต์คันหนึ่งเคลื่อนที่สวนทางรถกู้ภัยดังกล่าวด้วยอัตราเร็ว 20.0 m/s ถ้าอัตราเร็วของเสียงในอากาศเท่ากับ 350 m/s รถยนต์คันดังกล่าวจะได้ยินเสียงไซเรนความถี่เท่าใด?

Answer : 1.09 kHz **Problem 12.58**

คลื่นเสียงอัตราเร็ว 350 m/s ความยาวคลื่น 4.00 m ถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดซึ่งกำลังเคลื่อนที่ออกจากผู้สังเกตด้วยอัตราเร็ว 50 m/s ถ้าผู้สังเกตอยู่นิ่ง ผู้สังเกตจะวัดคาบของคลื่นเสียงดังกล่าวได้เท่าใด?

Answer : 0.013 s

Problem 12.59

ในตอนเช้าขณะที่อากาศเย็นสบาย อุณหภูมิเท่ากับ 23.3°C นิสิตได้ทำนาฬิกาปลุกตกจากริมหน้าต่างซึ่งสูง 11.5 m ปรากฏว่าขณะที่นาฬิกาปลุกตกถึงพื้นเสียงปลุกได้ดังขึ้นพอดี โดยเสียงนาฬิกาปลุกดังกล่าวมีความถี่ 500 Hz จงหา

- อัตราเร็วของเสียง?
- ขนาดความเร็วของนาฬิกาปลุกขณะตกถึงพื้นพอดี?
- ความถี่ของเสียงปลุกขณะที่นาฬิกาปลุกตกถึงพื้นพอดี?

Answer : a) 345 m/s , b) 15.0 m/s and c) 479 Hz

Problem 12.60

ลำโพงมวล 5.00 kg ติดกับสปริงซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ 20.0 N/m เมื่อดึงลำโพงออกมาจากสมดุลเป็นระยะ 50.0 cm แล้วปล่อยให้ลำโพงเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายบนพื้นลื่นในแนวราบ ถ้าลำโพงปล่อยเสียงความถี่คงที่ 400 Hz ออกมาและผู้สังเกตกำลังวิ่งเข้าหาลำโพงด้วยอัตราเร็วคงที่เท่ากับ 10.0 m/s (กำหนดให้อัตราเร็วของเสียงในอากาศเท่ากับ 349 m/s) จงหา

- อัตราเร็วสูงสุดของลำโพง?
- ความถี่สูงสุดที่ผู้สังเกตได้ยิน?
- ความถี่ต่ำสุดที่ผู้สังเกตได้ยิน?

Answer : a) 1.00 m/s , b) 413 Hz and c) 410 Hz

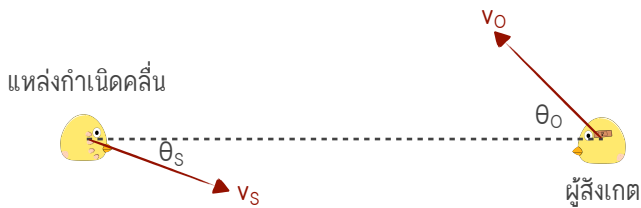
Problem 12.61

นิสิตคนหนึ่งเคาะลิ่มเสียงความถี่ 400 Hz พร้อมกับเดินเข้าหากำแพงด้วยอัตราเร็วคงที่ 1.00 m/s ถ้าอัตราเร็วของเสียงในอากาศเท่ากับ 350 m/s จงหาความถี่ที่นิสิตจะได้ยินเสียงที่สะท้อนซึ่งรวมกับเสียงที่เคาะออกไป และนิสิตจะได้ยินเสียงดังประมาณกี่ครั้งใน 1.00 s?

Answer : 2 Hz

Problem 12.62 Challenge

คลื่นอัตราเร็ว v ความถี่ f ถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดซึ่งเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว v_s และผู้สังเกตเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว v_o ดังรูปด้านล่าง ถ้า $v_s < v$ และ $v_o < v$ จงหาความถี่ของคลื่นที่ผู้สังเกตได้รับ โดยตอบในรูปของ f , v_s , v_o , θ_s และ θ_o ?

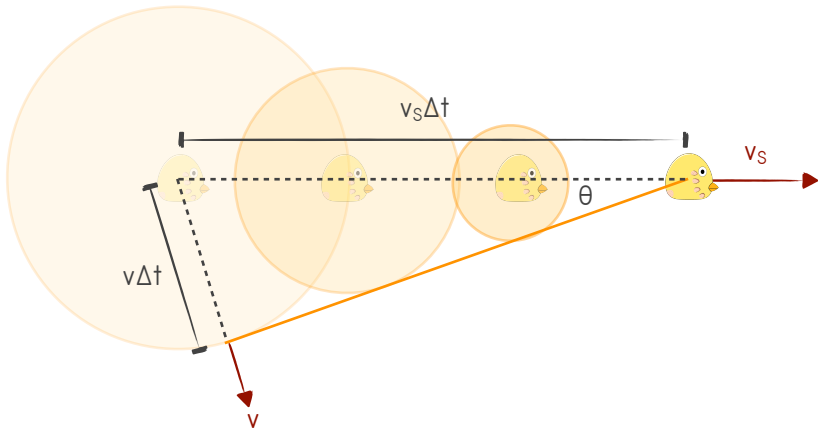


เสียง (Sound)

$$\text{Answer : } \left(\frac{v + v_o \cos \theta_o}{v - v_s \cos \theta_s} \right) f$$

คลื่นกระแทก (Shock Waves)

พิจารณาคลื่นอัตราเร็ว v ถูกปล่อยออกมาอย่างต่อเนื่องจากแหล่งกำเนิด ซึ่งมีอัตราเร็ว v_s โดยที่ $v_s \geq v$ ดังรูปด้านล่าง



เลขมัค (Mach Number)

เลขมัค (Mach Number ; M [[ไม่มีหน่วย]]) คือ อัตราเร็วของแหล่งกำเนิดคลื่นเทียบกับอัตราเร็วของคลื่น

$$M = \frac{v_s}{v} = \frac{v_s \Delta t}{v \Delta t} = \frac{1}{\sin \theta}$$

v_s คือ อัตราเร็วของแหล่งกำเนิดคลื่นเทียบกับกรอบเฉื่อย

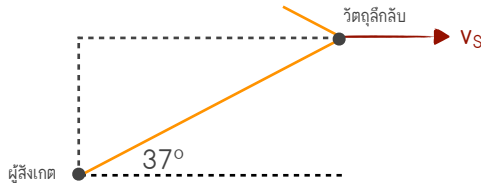
v คือ อัตราเร็วของคลื่นเทียบกับกรอบเฉื่อย

θ คือ มุมครึ่งหนึ่งของยอดกรวยคลื่นกระแทก

เสียง (Sound)

Problem 12.63

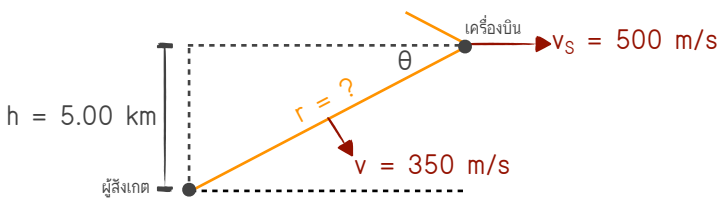
วัตถุลึกลับเคลื่อนที่ในระดับราบผ่านผู้สังเกต ผู้สังเกตจะได้ยินเสียงจากวัตถุลึกลับเมื่อเห็นวัตถุดังกล่าวที่มุมเงย 37° วัตถุลึกลับดังกล่าวมีอัตราเร็วเป็นกี่เท่าของอัตราเร็วเสียงในขณะนั้น?



Answer : $\frac{5}{3}$

Problem 12.64

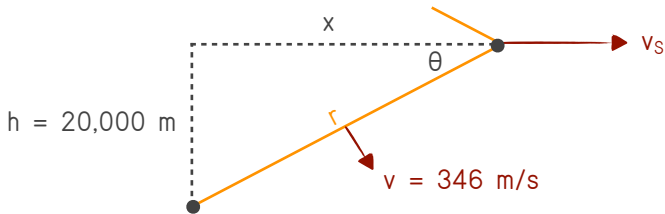
เครื่องบินเคลื่อนที่ในแนวระดับสูงจากพื้นดิน 5.00 km ด้วยอัตราเร็ว 500 m/s ถ้าอัตราเร็วของเสียงในอากาศเท่ากับ 350 m/s ผู้สังเกตบนพื้นดินจะได้ยินเสียงจากเครื่องบินลำดังกล่าวเมื่อเครื่องบินอยู่ห่างจากผู้สังเกตเท่าใด?



Answer : 7.14 km

Problem 12.65

จรวดเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในแนวระดับด้วยอัตราเร็ว 2.00 มัค ที่เวลา $t = 0$ s จรวดดังกล่าวอยู่สูงเหนือหัวผู้สังเกตพอดีดังรูปด้านล่าง โดยอยู่สูงจากหัวผู้สังเกต $20,000$ m ถ้าอัตราเร็วเสียงในอากาศมีขนาดประมาณ 346 m/s จงหา

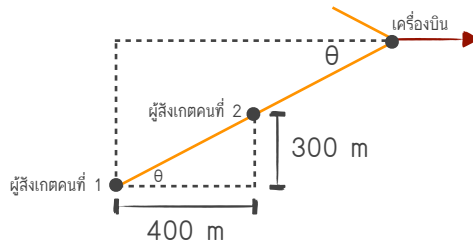


- ขณะที่ผู้สังเกตได้ยินคลื่นกระแทก จรวดอยู่ห่างจากผู้สังเกตเท่าใด?
- ผู้สังเกตจะได้ยินคลื่นกระแทกที่เวลาเท่าใด?

Answer : a) 40.0 km and b) 50.0 s

Problem 12.66

เครื่องบินเคลื่อนที่ในแนวระดับผ่านผู้สังเกตสองคน โดยผู้สังเกตคนที่สองอยู่ห่างจากผู้สังเกตคนที่หนึ่งเป็นระยะ 400 m และอยู่ในระดับที่สูงกว่าผู้สังเกตคนที่หนึ่ง 300 m ถ้าผู้สังเกตทั้งสองได้ยินเสียงคลืนกระทบพร้อมกัน เครื่องบินลำดังกล่าวมีอัตราเร็วเป็นกี่เท่าของอัตราเร็วเสียงในขณะนั้น?



Answer : $\frac{5}{3}$



เสียง (Sound)

