



BUKU AJAR

Integrasi Nilai-Nilai Al-Islam Melalui Gelombang Optik

PENULIS

Septi Budi Sartika
Ria Wulandari



Buku Ajar

Integrasi Nilai-nilai Islam melalui Gelombang Optik

Oleh ;
Dr. Septi Budi Sartika, S.Pd., M.Pd
Ria Wulandari, S.Pd., M.Pd



Diterbitkan oleh
UMSIDA PRESS
Jl. Mojopahit 666 B Sidoarjo
ISBN : 978-623-6292-27-3
Copyright 2021

Authors

All rights reserved

Buku Ajar
Integrasi Nilai-nilai Islam melalui Gelombang Optik

Penulis:

Dr. Septi Budi Sartika, S.Pd., M.Pd
Ria Wulandari, S.Pd., M.Pd

ISBN :

978-623-6292-27-3

Editor:

M. Tanzil Multazam, .SH, .M.Kn
Mahardika Darmawan Kusuma Wardana, .S.Pd, .M.Pd

Copy Editor :

Wiwit Wahyu Wijayanti

Design Sampul dan Tata Letak:

Wiwit Wahyu Wijayanti

Penerbit:

UMSIDA Press
Anggota IKAPI No. 218/Anggota Luar Biasa/JTI/2019
Anggota APPTI No. 002 018 1 09 2017

Redaksi

Universitas Muhammadiyah Sidoarjo
Jl. Mojopahit No 666B
Sidoarjo, Jawa Timur

Cetakan Pertama, Juli 2021

©Hak Cipta dilindungi undang undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dengan sengaja, tanpa ijin tertulis dari penerbit.

Prakata

Integrasi Nilai-nilai Islam melalui Gelombang Optik merupakan mata kuliah wajib pada Program Studi Pendidikan IPA. Buku ini disusun dengan tujuan untuk mengantarkan mahasiswa kepada pemahaman tentang konsep-konsep Gelombang Optik, serta integrasinya dalam Nilai-nilai Islam. Penulisan buku ajar Integrasi Nilai-nilai Islam melalui Gelombang Optik ditulis dalam 6 bab. Buku ini memulai materi pembahasannya dengan mengenalkan Osilasi Harmonis, diharapkan mampu mengonsepkkan dan mengaplikasikan Sistem Osilasi dengan satu derajat kebebasan, Sistem Osilasi dengan dua derajat kebebasan dan Pemaknaan Nilai-nilai Al Islam dalam osilasi harmonis. Bab 2 menjelaskan tentang Kinemtaika Gelombang. Bab 2 menjelaskan Dinamika Dan Energetika Gelombang, Bab 4 Modulasi Gelombang. Bab 5 Gelombang Elektromagnetik. Bab 6 Optika Fisis. Memadukan islam dengan ilmu-ilmu alam adalah satu pemikiran yang didasarkan pada asumsi bahwa pengembangan ilmu-ilmu Qauliyah dalam konteks keislaman merupakan suatu keharusan bagi kelanjutan peradaban umat manusia yang harmonis di masa depan. Kepastian kebenaran ilmu-ilmu Al-Quran tidak dapat ditandingi, karena ilmu-ilmu itu berupa hukum-hukum yang langsung diturunkan dari Allah Swt. Sedangkan ilmuilmu kauniah kebenarannya ditentukan oleh hasil analisis akal manusia. Dengan demikian, kebenaran ilmu-ilmu kauniyah harus melalui proses penalaran otak manusia, dan itulah sebabnya harus merujuk kepada Al-Quran diselaraskan dengan hukumhukum dari Allah Swt. Satu diantara yang dimaksud adalah dengan mempelajari Integrasi Nilai-nilai Islam melalui Gelombang Optik.

Daftar Isi

Prakata	ii
Daftar Isi	iii
Bab 1	1
Osilasi Harmonis	1
1.1 Fenomena Osilasi	1
1.2 Osilasi Pegas	4
1.3 Osilasi Bandul	5
1.4 Energi pada GHS	7
1.5 Gerak Harmonik Teredam	8
1.6 Osilasi Paksa dan Resonansi	10
1.7 Ringkasan	15
1.8 Latihan Soal	16
Bab 2	17
Kinematika Gelombang	17
2.1 Fenomena Kinematika Gelombang	17
2.2 Persamaan Diferensial Gelombang	17
2.3 Solusi Persamaan Gelombang	18
2.4 Superposisi Dua Gelombang dan Layangan	19
2.5 Kecepatan Grup dan Dispersi	24
2.6 Efek Doppler	25
2.7 Hukum Snellius tentang Pemantulan dan Transmisi Gelombang	29
2.8 Refraksi Gelombang	31
2.9 Pemaknaan Nilai-Nilai Al Islam dalam Kinematika Gelombang	33
2.10 Ringkasan	33
2.11 Latihan Soal	34
Bab 3	35
Dinamika & Energetika Gelombang	35
3.1 Fenomena Dinamika Gelombang	35
3.2 Gelombang dalam Medium Elastis	35
3.3 Gelombang Bunyi di Udara	39
3.4 Sumber-sumber Bunyi	41
3.5 Gelombang Permukaan Air	44
3.6 Energi dan Momentum Gelombang	45
3.7 Pemaknaan Nilai-Nilai Al Islam dalam Dinamika dan Energetika Gelombang	46

3.8 Ringkasan	46
3.9 Latihan Soal	47
Bab 4	49
Modulasi Gelombang	49
4.1 Fenomena Modulasi Gelombang	49
4.2 Representasi Gelombang dengan Deret Fourier	49
4.3 Gelombang Pembawa dan Gelombang Modulasi	55
4.4 Pemaknaan Nilai-Nilai Al Islam dalam Modulasi Gelombang	58
4.5 Ringkasan	58
4.6 Latihan Soal	59
Bab 5	61
Gelombang Elektromagnetik	61
5.1 Fenomena Gelombang Elektromagnetik	61
5.2 Persamaan Maxwell dalam Listrik Magnet	61
5.3 Gelombang Elektromagnetik dalam Suatu Medium	63
5.4 Pemantulan dan Pembiasan Gelombang Elektromagnetik	63
5.5 Perpaduan Gelombang Elektromagnetik	66
5.6 Pemaknaan Nilai-Nilai Al Islam dalam Gelombang Elektromagnetik	66
5.7 Ringkasan	67
5.8 Latihan Soal	67
Bab 6	69
Optika Fisis	69
6.1 Fenomena Optika Fisis	69
6.2 Interferometer	69
6.3 Difraksi Fresnel	71
6.4 Difraksi Fraunhofer	72
6.5 Pemaknaan Nilai-Nilai Al Islam dalam Optika Fisis	76
6.5 Ringkasan	78
6.7 Latihan Soal	79

Bab 1

Osilasi Harmonis

1.1 Fenomena Osilasi



Gambar 1.1: Kereta Api Melintasi Rel (Cesilia, 2019)

Getaran tanah merupakan suatu gelombang yang bergerak di dalam tanah dan disebabkan oleh adanya sumber energi seperti gempa bumi atau aktivitas manusia seperti kegiatan peledakan, konstruksi, dan kereta api. Getaran tanah akibat beban kereta api yang berasal dari getaran dinamis akan di terima rel kereta dan diteruskan ke dasar tanah. Besarnya getaran dinamis meningkat sebanding dengan meningkatnya kecepatan kereta tersebut. Kereta api dengan kecepatan tinggi memiliki getaran yang lebih besar dari pada kereta api dengan kecepatan normal. Apabila kecepatan gelombang getaran yang dihasilkan kereta lebih besar dari kecepatan gelombang Rayleigh di dalam tanah maka getaran tanah yang dihasilkan akan memiliki dampak yang besar (Shih, Thomson and Ntotsios, 2018).

Getaran dan gerak gelombang saling berhubungan erat. Getaran atau osilasi merupakan gerak bolak balik melewati titik kesetimbangan. Getaran dapat menimbulkan gelombang seperti gelombang air atau gelombang yang berjalan melalui tali. Peristiwa osilasi lainnya yang dapat diamati antara lain benda di ujung pegas, garpu tala, pendulum, laba-laba mendeteksi mangsanya melalui getaran sarangnya, mobil berosilasi ke atas dan ke bawah ketika melewati jalan bergelombang, jembatan bergetar ketika truk dengan muatan berat berjalan di atasnya, gerak selaput suara manusia, dan gerak dawai gitar. Ciri dari peristiwa osilasi adalah meskipun bergerak, benda yang berosilasi tidak berpindah tempat. Lalu apakah manfaat osilasi? Diskusikan bersama teman sejawat kalian.

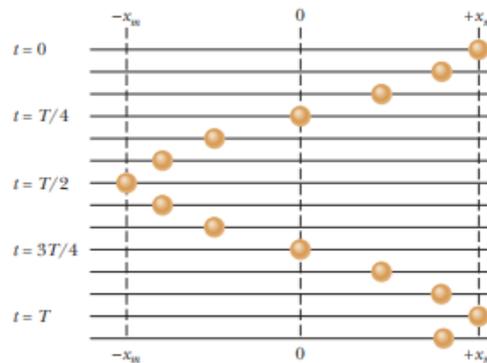
Getaran bebas dan getaran paksa merupakan pengelompokkan getaran secara umum. Getaran yang terjadi pada saat suatu sistem berosilasi karena pengaruh gaya yang bekerja dalam sistem itu sendiri tanpa adanya gaya yang berasal dari luar disebut getaran bebas. Kondisi awal pada sistem yaitu y_0 dan atau v_0 dapat menunjukkan adanya getaran bebas. Gerakan bolak-balik pada bandul/ pendulum merupakan contoh dari getaran bebas. Getaran yang terjadi pada suatu sistem yang berosilasi yang disebabkan oleh rangsangan berupa gaya eksitasi dari luar sistem tersebut (gaya yang terjadi berulang-ulang) disebut getaran paksa. Getaran yang terjadi pada mesin diesel yang sedang bekerja merupakan contoh getaran paksa. Sistem akan bergetar pada frekuensi tertentu, apabila terdapat gaya eksitasi yang bersilasi harmonik dengan frekuensi tertentu. Hal ini akan berbeda ketika gaya eksitasi sama dengan salah satu frekuensi alamiah

akan menyebabkan resonansi yang akan menyebabkan kerusakan sistem. Contohnya kerusakan pada jembatan, struktur bangunan, turbin, hingga sayap pesawat terbang.

Sejumlah pola getaran atau modus getar akan menyebabkan suatu sistem menjadi bergetar. Jumlah derajat kebebasan sistem sangat dipengaruhi oleh jumlah modus getar. Idealisasi suatu sistem getaran mempunyai jumlah satu, dua, atau sejumlah N derajat kebebasan. Derajat kebebasan menunjukkan jumlah besaran fisika (simpangan) yang digunakan untuk menyatakan keadaan gerak suatu sistem secara lengkap. Derajat kebebasan dibagi menjadi dua yaitu satu derajat kebebasan untuk sistem yang gerakannya dapat dinyatakan dengan satu besaran fisika tertentu dan multi derajat kebebasan (multi degree of freedom) untuk sistem yang gerakannya dapat dinyatakan secara lengkap oleh N besaran fisika (yang mewakili simpangan).

1.1.1 Sistem Osilasi dengan Satu Derajat Kebebasan

Sistem osilasi dengan satu derajat kebebasan meliputi osilasi pegas, osilasi bandul, dan osilasi rangkaian LC. Pada osilasi pegas, dinyatakan oleh posisi terhadap titik setimbang. Pada osilasi bandul, dinyatakan oleh sudut antara tali dan garis vertikal. Pada osilasi rangkaian LC, dinyatakan oleh arus atau muatan didalam kapasitor.



Gambar 1.2: Partikel Bergerak Bolak Balik dalam Gerak Harmonik Sederhana. (Halliday and Resnick, 2011)

Setiap gerak berulang (bolak balik atau berosilasi) melalui sebuah titik setimbangnya yang tetap dalam interval waktu tertentu dinamakan gerak periodik. Gambar 1.2 menunjukkan suatu partikel yang bergerak bolak balik melalui titik setimbangnya (berada pada sumbu x). Partikel yang berosilasi akan melakukan sejumlah getaran dalam satu satuan waktu yang dinyatakan dengan frekuensi. Simbol frekuensi adalah f dengan satuan Hertz. 1 Hertz = 1 Hz = jumlah osilasi tiap detik (s^{-1}). Waktu yang dibutuhkan untuk melakukan satu kali osilasi (satu siklus) disebut dengan periode. Simbol periode adalah T dengan satuan detik.

$$T = \frac{1}{f} \text{ dan } f = \frac{1}{T}$$

Apabila Gambar 1.2 diputar berlawanan arah jarum jam sebesar 900 maka akan diperoleh gerak partikel mengikuti fungsi cosinus (Gambar 1.3). Berdasarkan Gambar 1.3, posisi partikel yang berosilasi secara harmonik dapat dinyatakan sebagai fungsi waktu dan mengikuti persamaan:

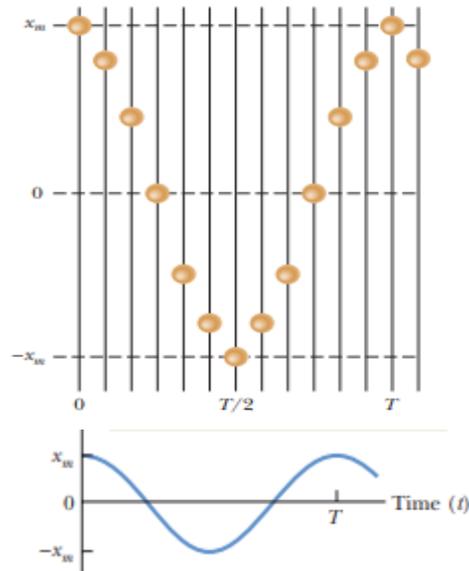
$$x(t) = x_m \cos(\omega t + \phi)$$

dengan x_m , ω , dan ϕ adalah konstanta

Keterangan:

$x(t)$: posisi sebagai fungsi waktu

- x_m : amplitudo
 $(\omega t + \phi)$: fase
 ϕ : sudut fase (bergantung pada posisi dan kecepatan ketika partikel pada $t = 0$)
 ω : kecepatan sudut



Gambar 1.3: Gerak Partikel Mengikuti Fungsi Cosinus. (Halliday and Resnick, 2011)

Untuk menafsirkan konstanta ω , perlu diperhatikan bahwa $x(t)$ harus kembali ke nilai awalnya setelah satu periode sehingga $x(t) = x(t + T)$ untuk semua t . Dengan mengasumsikan $\phi = 0$, maka dapat dituliskan:

$$x_m \cos \omega t = x_m \cos \omega (t + T)$$

Fungsi cosinus akan berulang ketika fase meningkat sebesar 2π rad sehingga persamaan 1.3 dapat dituliskan:

$$\omega t + 2\pi = \omega (t + T)$$

$$2\pi = \omega T$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

Untuk mendapatkan kecepatan partikel yang bergerak harmonik, diperoleh dengan menurunkan persamaan 1.2, diperoleh:

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \frac{d}{dt} [x_m \cos (\omega t + \phi)]$$

$$v(t) = -\omega x_m \sin (\omega t + \phi)$$

$$v_{\max} = \omega x_m$$

Percepatan gerak harmonik sederhana diperoleh dari menurunkan persamaan 1.5 sehingga diperoleh:

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d}{dt} [-\omega x_m \sin (\omega t + \phi)]$$

$$a(t) = -\omega^2 x_m \cos (\omega t + \phi)$$

$$a(t) = -\omega^2 x(t)$$

$$a_{\max} = -\omega^2 x_m \text{ (note: } x_m = A)$$

Contoh soal 1

Suatu benda bergerak mengikuti persamaan berikut ini

$$x = 0,3 \cos 8t$$

Tentukan: (a) amplitudo; (b) frekuensi; (c) periode, (d) laju maksimum, dan (e) percepatan maksimum

Jawab:

Menyamakan bentuk persamaan $x = 0,3 \cos 8t$ dengan $x(t) = x_m \cos (\omega t + \phi)$

a. amplitudo (A atau x_m) = 0,3 m

b. $\omega = 2\pi f = 8$ maka $f = \frac{8}{2\pi} = \frac{8}{2 \cdot 3,14} = 1,27 \text{ Hz}$

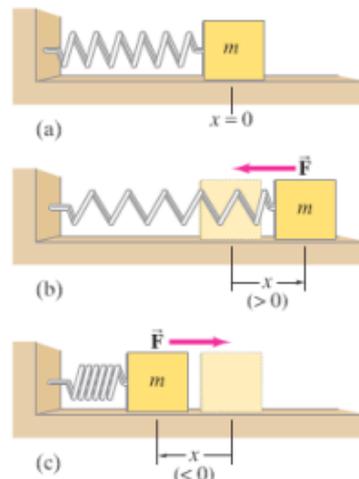
c. $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1,27} = 0,79 \text{ s}$

d. $v_{\text{maks}} = \omega x_m = 8 \cdot 0,3 = 2,4 \text{ m/s}$

e. $a_{\text{maks}} = \omega^2 x_m = 8^2 \cdot 0,3 = 19,2 \text{ m/s}^2$

1.2 Osilasi Pegas

Bentuk sederhana dari gerak periodik direpresentasikan oleh sebuah benda yang berosilasi di ujung pegas yang sama. Massa pegas diabaikan dan dipasang secara horizontal sehingga benda dengan massa m yang terpasang pada pegas dapat bergerak tanpa gesekan pada permukaan horizontal seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.4a. Setiap pegas memiliki panjang alami dimana pada keadaan ini pegas tidak mengerahkan gaya pada massa m . Posisi massa di titik ini disebut posisi kesetimbangan. Ketika benda dipindah ke kanan (meregangkan pegas) atau ke kiri (menekan pegas) maka pegas akan mengerahkan gaya pada massa m untuk mengembalikan massa m ke posisi setimbangnya (Gambar 1.4b dan 1.4c).



Gambar 1.4: Benda dengan massa m Berosilasi pada Pegas yang Sama. (Giancoli, 2005)

Gaya ini disebut dengan gaya pemulih (restoring force). Besarnya gaya pemulih berbanding lurus dengan perpindahan x dari pegas yang diregangkan atau ditekan dari posisi setimbang dan dinyatakan dengan:

$$F = -kx$$

Tanda $(-)$ menunjukkan bahwa F adalah gaya pemulih yang berlawanan arah dengan perpindahan x . Pada Gambar 1.4b, ketika massa m bergerak ke kanan, x berarah positif tetapi arah gaya pemulihnya ke kiri (arah negatif). Demikian sebaliknya seperti pada Gambar 1.4c.

Ketika massa m bergerak ke kiri, x berarah negatif tetapi arah gaya pemulihnya ke kanan (arah positif). Persamaan 1.7 disebut hukum Hooke dengan:

$$F = \text{gaya} \quad (\text{N})$$

$$k = \text{konstanta pegas} \quad (\text{N/m})$$

$$x = \text{perpindahan dari pegas} \quad (\text{m})$$

Note: semakin besar nilai k , semakin besar gaya yang dibutuhkan untuk meregangkan pegas sejauh jarak tertentu. Artinya, semakin kaku pegas, semakin besar konstanta pegas

Pada benda yang berosilasi, percepatan bervariasi terhadap waktu. Dengan menggunakan hukum kedua Newton, dapat diketahui gaya yang bekerja pada suatu partikel sehingga mendapatkan percepatan tersebut.

$$F = m a = m (-\omega^2 x) = - (m \omega^2) x$$

dengan mensubstitusikan hukum Hooke ke persamaan 1.8 diperoleh:

$$F = - kx = - (m \omega^2) x$$

$$k = m \omega^2$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Sistem massa balok seperti pada Gambar 1.4 membentuk osilasi harmonik sederhana linier atau osilasi linier, dimana linier menunjukkan bahwa F sebanding dengan x . Dengan mensubstitusi persamaan 1.4 dan 1.9 akan diperoleh persamaan periode untuk pegas yang berosilasi yaitu

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$\text{frekuensi: } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

dengan:

$$T = \text{periode} \quad (\text{s})$$

$$f = \text{frekuensi} \quad (\text{Hz})$$

$$m = \text{massa benda} \quad (\text{kg})$$

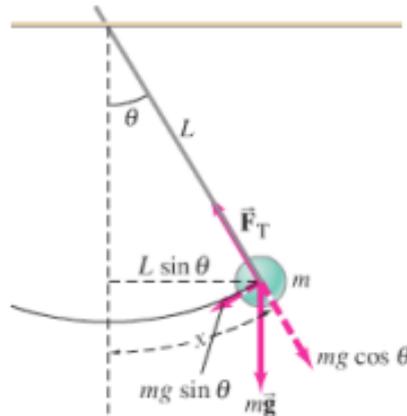
$$k = \text{konstanta pegas} \quad (\text{N/m}^2)$$

Dari persamaan 1.10 terlihat bahwa semakin besar massa maka semakin panjang periode dan semakin kaku pegas (k besar) maka semakin pendek periodenya. Hal ini sesuai karena massa yang lebih besar berarti memiliki banyak inersia dan karena itu responsnya lebih lambat (percepatan yang lebih kecil). Dan k yang lebih besar berarti gaya yang lebih besar sehingga responnya lebih cepat (percepatan lebih besar). Persamaan 1.10 tidak hanya berlaku untuk pegas saja tetapi untuk semua jenis gerak harmonik sederhana yang gerakannya dipengaruhi gaya pemulih yang sebanding dengan perpindahan (Persamaan 1.7).

1.3 Osilasi Bandul

Sebuah objek kecil (bandul pendulum) yang digantungkan di ujung tali yang tidak bermassa merupakan sistem sebuah pendulum sederhana. Pendulum sederhana akan bergerak bolak-balik yang mengabaikan gesekan seperti gerak harmonik sederhana: dengan simpangan terbesar atau amplitudo yang sama di kedua sisi yang melewati titik kesetimbangan yang digantung secara vertikal, bandul pendulum berosilasi sepanjang busur lingkaran akan memiliki kecepatan maksimum. Persamaan $x = L \theta$ merupakan perpindahan dari pendulum

sepanjang busur lingkaran, di mana L ialah panjang tali dan θ ialah sudut yang dibentuk oleh tali terhadap garis vertikal (Gambar 1.5).



Gambar 1.5: Pendulum Sederhana. (Giancoli, 2005)

Apabila gaya pemulih sebanding dengan x atau θ , gerakannya akan harmonik sederhana. Gaya pemulih besarnya sama dengan komponen berat (mg) yang menyinggung busur yaitu:

$$F = - mg \sin \theta$$

tanda (-) menunjukkan adanya gaya yang arahnya berlawanan dengan perpindahan sudut θ .

Note: Gerak tidak harmonik sederhana akan terjadi apabila nilai F sebanding dengan sudut $\sin \theta$ dan tidak dengan θ itu sendiri. Sudut θ kecil dapat disetting untuk mengatasi permasalahan ini. Apabilai nilai sudut θ kecil, maka $\sin \theta$ akan mendekati sudut θ (dalam satuan Radian). Perhatikan Tabel 1.

Tabel 1.1: Sin θ Pada Sudut Kecil

θ (derajat)	θ (radian)	Sin θ	% Perbedaan
0	0	0	0
1 ⁰	0,01745	0,07145	0,005 %
5 ⁰	0,08727	0,08716	0,1 %
10 ⁰	0,17453	0,17365	0,5 %
15 ⁰	0,26180	0,25882	1,1 %
20 ⁰	0,34907	0,34202	2,0 %
30 ⁰	0,52360	0,50000	4,5 %

Berdasarkan Tabel 1, maka sudut yang digunakan adalah di bawah 15⁰ dengan perbedaan kurang dari 1%. Panjang busur $x = L \theta$ akan mendekati panjang θ , maka θ harus bernilai kecil (Gambar 1.5). Pendekatan untuk sudut θ kecil yaitu:

$$F = - mg \sin \theta \approx - mg \theta$$

dengan mensubstitusi $x = L \theta$ atau $\theta = x/L$ diperoleh:

$$F \approx - \frac{mg}{L} x$$

Apabila θ bernilai kecil, maka gerakan disebut sebagai gerak harmonik sederhana yang mengikuti persamaan Hukum Hooke, $F = - kx$. Dengan demikian nilai k sebagai konstanta gaya adalah $k = \frac{mg}{L}$

Substitusi ke persamaan 1.10 maka akan diperoleh periode untuk pendulum sederhana yaitu:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{mg/L}} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (1.12)$$

$$\text{frekuensi } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}}$$

(1.13)

dengan:

T = periode (s)

f = frekuensi (Hz)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

L = panjang tali (m)

Berdasarkan persamaan 1.12 dan 1.13 diketahui bahwa massa bandul tidak memengaruhi frekuensi dan periode suatu pendulum sederhana.

1.4 Energi pada GHS

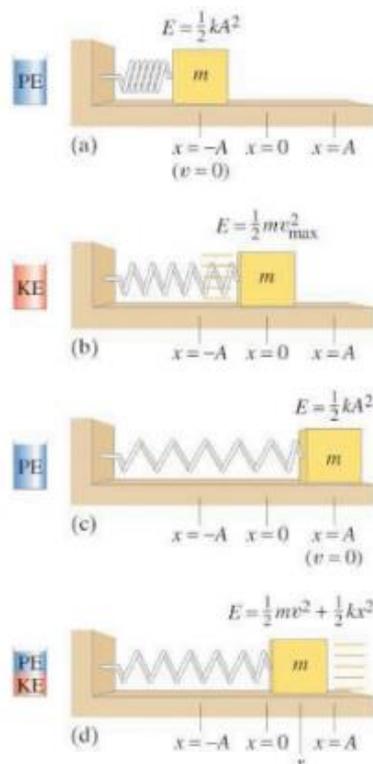
Usaha digunakan untuk meregangkan atau menekan sebuah pegas. Energi potensial pegas akan tersimpan di dalam pegas yang tertekan dan teregang. Persamaan matematis energi potensial sebagai berikut:

$$E_p = 1/2 kx^2$$

Energi mekanik atau energi total E merupakan penjumlahan energi potensial dan energi kinetik yaitu:

$$E = 1/2 mv^2 + kx^2$$

Note: kecepatan benda dengan massa m ketika berada pada jarak m dari titik kesetimbangan disebut v. Gerak harmonik sederhana akan terjadi apabila tidak ada gesekan. Pada waktu benda bermassa bersosilasi bolak-balik, maka energi akan berubah dari energi potensial ke energi kinetik, dan kembali lagi (Gambar 1.6).



Gambar 1.6: Energi Berubah dari EK menjadi EP dan Kembali Lagi Sementara Pegas Berosilasi. (Giancoli, 2005)

Berdasarkan Gambar 1.6a dan 1.6c, di saat $x = -A$ dan $x = +A$, saat pegas ditekan atau diregangkan maka semua energi tersimpan dalam bentuk energi potensial. Massa akan berhenti sesaat sebelum berubah arah pada titik ini, di mana $v = 0$.

$$E = \frac{1}{2} m (0)^2 + \frac{1}{2} k A^2 = \frac{1}{2} k A^2$$

Dengan demikian, **energi mekanik total dari osilator harmonik sederhana sebanding dengan kuadrat amplitudo.**

Pada titik setimbang (Gambar 1.6b), $x = 0$, semua energi merupakan energi kinetik:

$$E = \frac{1}{2} m v_{maks}^2 + \frac{1}{2} k (0)^2 = \frac{1}{2} m v_{maks}^2 \quad (1.16)$$

Berdasarkan Gambar 1.6b, pada titik-titik pertengahan terjadi sebagian berbentuk energi kinetik dan sebagian lain energi potensial, apabila kedua energi dikonversikan menjadi energi mekanik maka berlaku persamaan 1.14 dan 1.15 yaitu:

$$E = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} k x^2$$

$$\frac{1}{2} k A^2 = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} k x^2$$

Contoh Soal 2

Sebuah benda bermassa 200 gram melakukan gerak harmonis sederhana pada sebuah garis lurus. Jika benda mempunyai simpangan 2 cm, gaya pulihnya 20.000 dyne. Bila $A = 5$ cm, tentukanlah: (a) periode, (b) kecepatan maksimum, (c) percepatan maksimum, (d) $E_{K_{maks}}$, dan (e) $E_{P_{maks}}$

Diketahui: $m = 200$ gram

$$x = 2 \text{ cm}$$

$$F = 20.000 \text{ dyne}$$

Jawab:

$$a. \quad k = \frac{F}{x} = \frac{20.000}{2} = 10^4 \text{ dyne/cm}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{200}{10^4}} = \frac{2\pi}{10} \sqrt{2} = 0,9 \text{ s}$$

$$b. \quad v_{maks} = \omega A = \frac{2\pi}{T} A = \frac{2\pi}{0,9} \cdot 5 = 35 \text{ cm/s}$$

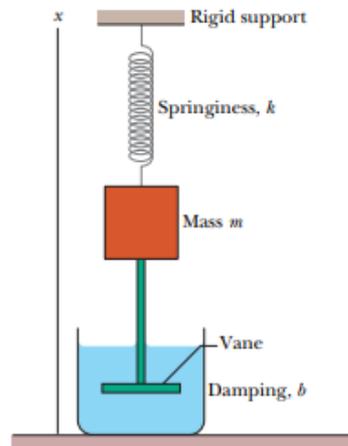
$$c. \quad a_{maks} = -\omega^2 A = -\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 A = -\left(\frac{2\pi}{0,9}\right)^2 \cdot 5 = -243,4 \text{ cm/s}^2$$

$$d. \quad E_{K_{maks}} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \cdot 200 \cdot (35)^2 = 1,225 \times 10^5 \text{ erg}$$

$$e. \quad E_{P_{maks}} = \frac{1}{2} k A^2 = \frac{1}{2} \cdot 10^4 \cdot 5^2 = 1,25 \times 10^5 \text{ erg}$$

1.5 Gerak Harmonik Teredam

Pendulum yang berayun dalam kehidupan sehari-hari, gerakan maksimumnya akan perlahan berkurang selama waktu tertentu dan osilasi akan berhenti. Sebuah pendulum akan berayun sebentar dalam air karena air dapat memberikan gaya pada pendulum yang cepat menghilangkan gerak. Sebuah pendulum yang berayun di udara dapat bergerak lebih baik tetapi pada akhirnya akan berhenti karena udara memberikan gaya hambat pada pendulum (gesekan bekerja pada titik penyangganya) yang kemudian mentransfer energi dari gerakan pendulum tersebut. Ketika gerak sebuah osilator dikurangi sebuah gaya eksternal, osilator dan gerakannya dikatakan teredam. Redaman pada umumnya disebabkan oleh hambatan udara dan gesekan internal di dalam sistem yang beresilasi. Energi yang didisipasikan menjadi energi kalor menyebabkan penurunan amplitudo osilasinya. Contoh ideal dari isolator teredam dapat dilihat pada Gambar 1.7.



Gambar 1.7: Sebuah Osilator Teredam. Baling- Baling Direndam dalam Cairan yang Memberikan Suatu Gaya Redaman pada Balok Karena Balok Berosilasi Paralel dengan Sumbu x. (Halliday and Resnick, 2011)

Sebuah balok dengan massa m berosilasi vertikal pada sebuah pegas yang memiliki konstanta pegas k . Dari balok, tongkat memanjang ke baling-baling (diasumsikan balok dan baling-baling tak bermassa) yang terendam dalam cairan. Cairan akan memberikan gaya yang menghambat di atasnya dan juga pada seluruh sistem yang berosilasi ketika baling-baling bergerak naik turun. Setelah beberapa lama, energi mekanik sistem balok-pegas menyusut karena energi berubah menjadi energi panas pada cairan dan baling-baling.

Asumsikan cairan memberikan gaya redaman (*damping force*) \vec{F}_d sebanding dengan kecepatan \vec{v} pada baling-baling dan balok, maka untuk komponen sepanjang x akan diperoleh:

$$F_d = -bv$$

dengan: b adalah konstanta redaman (kg/s)

Tanda (-) menunjukkan \vec{F}_d melawan gerak

Gaya pegas yang bekerja pada balok adalah $F_p = -kx$ sehingga hukum kedua Newton pada komponen-komponen sepanjang sumbu x adalah:

$$F = ma$$

$$F_d + F_p = ma$$

$$-bv - kx = ma$$

Substitusi dx/dt untuk v dan d^2x/dt^2 untuk a , maka akan diperoleh:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0$$

Solusi persamaan yang diperoleh adalah:

$$x(t) = x_m e^{-bt/2m} \cos(\omega' t + \phi)$$

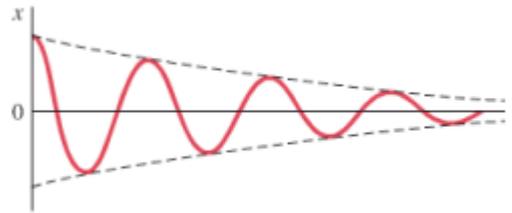
dengan: x_m = amplitudo dan $\omega' t$ adalah frekuensi sudut dari osilator teredam yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\omega' t = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{b^2}{4m^2}}$$

Ketika osilator teredam, energi mekanik tidak konstan tetapi berkurang dengan waktu. Jika redaman kecil, nilai x_m pada $E = \frac{1}{2} k A^2$ (ingat bahwa $x_m = A$) diganti dengan $x_m e^{-bt/2m}$ (amplitudo maksimum dari osilasi teredam) sehingga diperoleh:

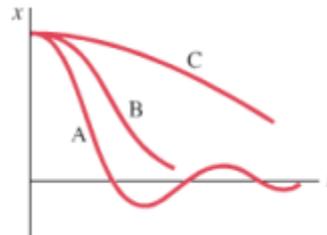
$$E = \frac{1}{2} k x_m^2 e^{-bt/2m}$$

Berdasarkan persamaan 1.20, diketahui bahwa seperti amplitudo, bahwa energi mekanik berkurang secara eksponensial seiring waktu (Gambar 1.8).



Gambar 1.8: Fungsi Perpindahan $x(t)$ untuk Osilator Teredam. Amplitudo Menurun Secara Eksponensial dengan Waktu. (Giancoli, 2005)

Tiga kasus umum dari sistem teredam kuat ditunjukkan pada Gambar 1.9. Kurva A ialah sistem yang membuat osilasi sebelumnya tidak bergerak atau situasi teredam kurang (*underdamped*). Kurva C ialah sistem yang redamannya cukup besar sehingga tidak terdapat osilasi karena membutuhkan waktu yang lama untuk mencapai kesetimbangan atau situasi teredam lebih (*overdamped*). Kurva B ialah sistem yang redaman mencapai perpindahan nol dalam waktu yang cukup singkat atau situasi redaman kritis (*critical damping*).



Gambar 1.9: Fungsi Grafik yang merepresentasikan gerak osilasi teredam-kurang (A), teredam-kritis (B), dan teredam-lebih (C). (Giancoli, 2005)

1.6 Osilasi Paksa dan Resonansi

Contoh dari osilasi bebas adalah ketika seseorang berayun dalam ayunan tanpa ada yang mendorongnya. Namun, ketika seseorang mendorong ayunan secara periodik, ayunan telah dipaksa atau didorong sehingga memiliki osilasi paksa. Terdapat dua frekuensi sudut yang dihubungkan dengan sistem yang mengalami osilasi paksa yaitu: (1) frekuensi sudut alami ω sistem, yang merupakan frekuensi sudut dimana sistem akan berosilasi jika tiba-tiba terganggu dan kemudian dibiarkan bebas berosilasi dan (2) frekuensi sudut ω_d dari gaya penggerak eksternal menyebabkan osilasi paksa terjadi.

Perhatikan kembali Gambar 1.7. Sistem dapat digambarkan sebagai osilator harmonik sederhana dipaksa ketika kaitan kaku (*rigid support*) dibiarkan bergerak ke atas dan ke bawah pada frekuensi sudut variabel ω_d . Osilator paksa berosilasi dengan frekuensi sudut ω_d dari gaya dorong dan perpindahan $x(t)$ sebesar:

$$x(t) = x_m \cos(\omega_d t + \phi)$$

dengan: x_m adalah amplitudo osilasi

Besarnya amplitudo perpindahan x_m tergantung pada fungsi ω_d dan ω . Amplitudo kecepatan v_m dari osilasi memiliki nilai terbesar saat:

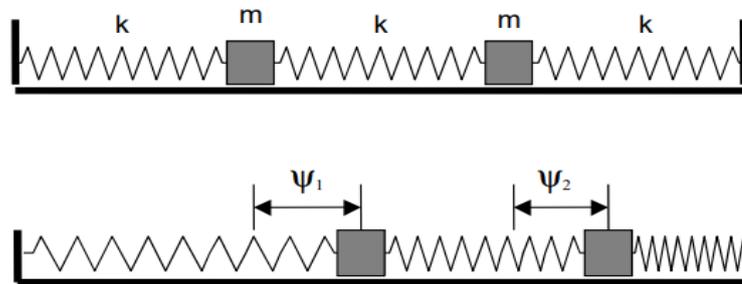
$$\omega_d = \omega$$

Persamaan 1.22 juga berlaku untuk amplitudo perpindahan x_m osilasi terbesar. Oleh karena itu, ketika mendorong ayunan di frekuensi sudut alaminya, perpindahan dan kecepatan amplitudonya akan meningkat ke nilai yang besar. Sedangkan ketika mendorong di frekuensi

lain, baik yang lebih tinggi maupun yang lebih rendah, amplitudo perpindahan dan kecepataannya akan semakin kecil.

1.6.1 Sistem Osilasi dengan Dua Derajat Kebebasan

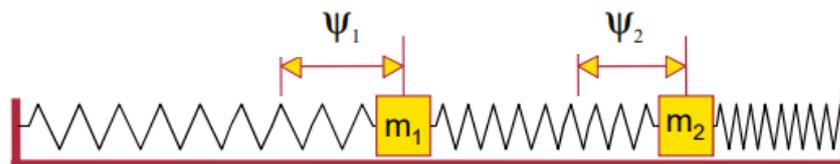
Derajat kebebasan sistem osilasi menunjukkan banyaknya besaran fisika sejenis yang mengalami perubahan secara periodik. Oleh karena itu derajat kebebasan menentukan banyaknya fungsi yang harus ada agar keadaan sistem osilasi dapat digambarkan secara lengkap. Sistem osilasi dengan dua derajat kebebasan dapat disebut juga dengan osilasi gandeng. Variabel persamaan pada osilasi gandeng saling berkaitan, artinya variabel yang satu tidak dapat terlepas dari variabel lainnya. Dengan kata lain persamaan osilasinya merupakan persamaan terganteng atau mengandung ψ_1 dan ψ_2 secara serentak. Contoh dari peristiwa ini adalah pegas yang memiliki dua simpangan yang berbeda. Perhatikan Gambar 1.10.



Gambar 1.10: Sistem pegas ganda: (a) keadaan setimbang (b) keadaan umum

Terdiri atas 3 buah pegas yang memiliki konstanta k yang sama dan 2 benda dengan massa m yang sama merupakan konsep dari sistem pegas gandeng. Berdasarkan gambar 1.10a, sebuah sistem pegas dengan permukaan datar dan gesekan diabaikan. Sebuah benda yang berada di ujung ditarik dan dilepaskan, maka sistem akan berosilasi seperti pada gambar 1.10b.

Untuk benda m_1 , Hukum II Newton: $\sum F = m_1 a$



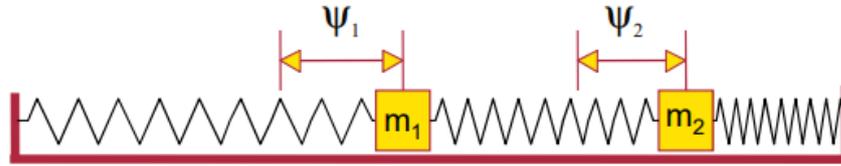
$$F_1 + F_2 = m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2}$$

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = -k_1 x_1 - k_2 (x_1 - x_2)$$

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = -(k_1 + k_2) x_1 + k_2 x_2$$

$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} = -\frac{(k_1 + k_2)}{m_1} x_1 + \frac{k_2}{m_1} x_2$$

Untuk benda m_2 , Hukum II Newton: $\sum F = m_2 a$



$$F_2 + F_3 = m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2}$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -k_2 (x_2 - x_1) - k_3 x_2$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -(k_2 + k_3)x_2 + k_2 x_1$$

$$\frac{d^2 x_2}{dt^2} = \frac{k_2}{m_2} x_1 - \frac{(k_2 + k_3)}{m_2} x_2$$

Diasumsikan bahwa osilasi terjadi dalam mode normal, artinya kedua besaran berosilasi dengan frekuensi dan fase yang sama sehingga solusi kedua persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut:

$$x_n = A_n \cos(\omega t + \phi)$$

dengan $n = 1$, substitusikan kedalam persamaan 1.17 sehingga diperoleh:

$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} = -\frac{(k_1 + k_2)}{m_1} x_1 + \frac{k_2}{m_1} x_2$$

$$a_1 = -\frac{(k_1 + k_2)}{m_1} x_1 + \frac{k_2}{m_1} x_2$$

$$-\omega^2 x_1 = -\frac{(k_1 + k_2)}{m_1} x_1 + \frac{k_2}{m_1} x_2$$

$$\left[-\omega^2 + \frac{(k_1 + k_2)}{m_1} \right] x_1 - \frac{k_2}{m_1} x_2 = 0$$

dengan $n = 2$, substitusikan kedalam persamaan 1.18 sehingga diperoleh:

$$\frac{d^2 x_2}{dt^2} = \frac{k_2}{m_2} x_1 - \frac{(k_2 + k_3)}{m_2} x_2$$

$$a_2 = \frac{k_2}{m_2} x_1 - \frac{(k_2 + k_3)}{m_2} x_2$$

$$-\omega^2 x_2 = \frac{k_2}{m_2} x_1 - \frac{(k_2 + k_3)}{m_2} x_2$$

$$-\frac{k_2}{m_2} x_1 + \left[-\omega^2 + \frac{(k_2 + k_3)}{m_2} \right] x_2 = 0$$

Persamaan 1.23 dan 1.24 dapat dinyatakan dalam matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} (-\omega^2 + a) & b \\ c & (-\omega^2 + d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 0$$

dengan:

$$a = \frac{(k_1 + k_2)}{m_1} ; b = -\frac{k_2}{m_1} ; c = -\frac{k_2}{m_2} ; d = \frac{(k_2 + k_3)}{m_2}$$

Pada persamaan 1.27, ruas kanan bernilai nol sehingga determinan matriks pada ruas kiri harus sama dengan nol sehingga diperoleh:

$$(-\omega^2 + a)(-\omega^2 + d) - bc = 0$$

$$(\omega^2)^2 - (a + d)\omega^2 + ad - bc = 0$$

untuk mendapatkan nilai akar-akarnya dapat menggunakan rumus akar kuadrat sebagai berikut:

$$(\omega^2)_{1,2} = \frac{(a+d)}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(a+d)^2 - 4(ad-bc)}$$

tanda positif untuk mode tinggi dan tanda negatif untuk mode rendah

Note: Jika: $\omega_1^2 > \omega_2^2$

Maka ω_1^2 memiliki mode tinggi

Untuk kasus $k_1 = k_2 = k_3 = k$ dan $m_1 = m_2 = m$, maka: (Lihat Kembali persamaan 1.23 dan 1.24)

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_1}{dt^2} &= -\frac{(k_1 + k_2)}{m_1} x_1 + \frac{k_2}{m_1} x_2 = -\frac{2k}{m} x_1 + \frac{k}{m} x_2 \\ \frac{d^2 x_2}{dt^2} &= \frac{k_2}{m_2} x_1 - \frac{(k_2 + k_3)}{m_2} x_2 = \frac{k}{m} x_1 - \frac{2k}{m} x_2 \end{aligned}$$

Kasus pertama

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_1}{dt^2} &= -\frac{2k}{m} x_1 + \frac{k}{m} x_2 \\ \frac{d^2 x_2}{dt^2} &= \frac{k}{m} x_1 - \frac{2k}{m} x_2 \end{aligned}$$

+

$$\frac{d^2}{dt^2} (x_1 + x_2) = -\frac{2k}{m} (x_1 + x_2) + \frac{k}{m} (x_1 + x_2)$$

Note: Apabila dimisalkan $(x_1 + x_2) = x_I$, maka: $x_I = A_I \cos(\omega_I t + \phi)$
 $= (A_1 + A_2) \cos(\omega_I t + \phi)$

Substitusikan ke persamaan 1.28 akan diperoleh:

$$\frac{d^2}{dt^2} x_I = -\frac{2k}{m} x_I + \frac{k}{m} x_I = -\frac{k}{m} x_I$$

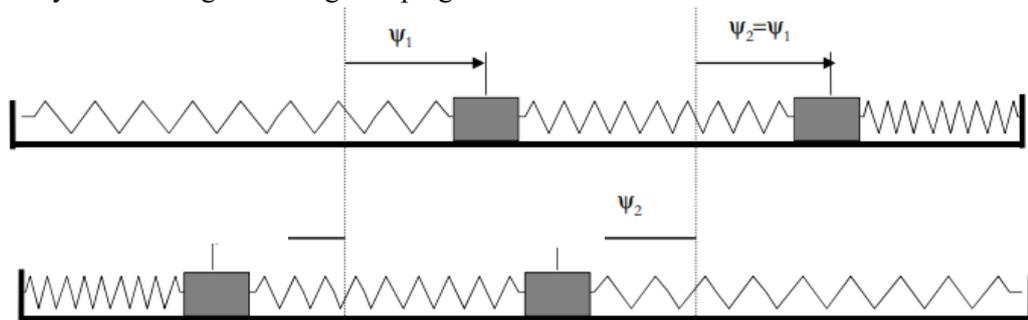
Berdasarkan persamaan $k = m \omega^2$ maka $\omega_I^2 = \frac{k}{m}$ berada dalam mode rendah. Ketika berada dalam mode rendah, kedua benda akan bergerak searah.

Note:

Solusi persamaan $x_I = A_I \cos(\omega t + \phi)$
 $= (A_1 + A_2) \cos(\omega t + \phi)$

merupakan osilasi pusat massa

Pegas penggantung hanya memiliki frekuensi sebagai penyelaras gerak osilasi, sedangkan frekuensi pegas tunggal mempunyai frekuensi yang sama dengan gerak osilasi pusat massa. Masing-masing benda memiliki perpindahan dengan besaran yang sama sehingga pusat massanya selalu bergerak mengikuti pergerakan kedua benda tersebut.



Gambar 1.11: Osilasi pusat massa

Kasus kedua

$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} = -\frac{2k}{m} x_1 + \frac{k}{m} x_2$$

$$\frac{d^2 x_2}{dt^2} = \frac{k}{m} x_1 - \frac{2k}{m} x_2$$

$$\frac{d^2}{dt^2} (x_1 - x_2) = -\frac{2k}{m} (x_1 - x_2) - \frac{k}{m} (x_1 - x_2)$$

Note: Apabila dimisalkan $(x_1 - x_2) = x_{II}$, maka: $x_{II} = A_{II} \cos(\omega_{II} t + \phi)$
 $= (A_1 - A_2) \cos(\omega_{II} t + \phi)$

Substitusikan ke persamaan 1.29 akan diperoleh:

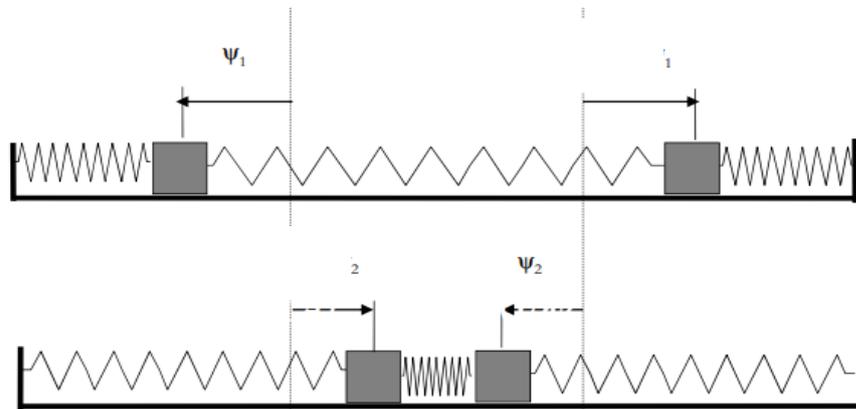
$$\frac{d^2}{dt^2} x_{II} = -\frac{2k}{m} x_{II} - \frac{k}{m} x_{II} = -\frac{3k}{m} x_{II}$$

Berdasarkan persamaan $k = m \omega^2$ maka $\omega_{II}^2 = \frac{3k}{m}$ berada dalam mode tinggi. Benda yang bergerak pada mode tinggi akan selalu berlawanan arah satu sama lain dengan besar simpangan selalu sama. Perpindahannya selalu sama besar tetapi berlawanan arah sehingga pusat massanya tidak berubah. Osilasi ini disebut osilasi relatif. Pada osilasi relatif memiliki frekuensi yang lebih besar daripada frekuensi osilasi pusat massa.

Note:

Solusi persamaan $x_{II} = A_{II} \cos(\omega_{II} t + \phi)$
 $= (A_1 - A_2) \cos(\omega_{II} t + \phi)$

merupakan osilasi relatif

**Gambar 1.12:** Osilasi Bersifat Relatif

Superposisi linier dari osilasi harmonik merupakan gerak suatu sistem, yaitu : $x = x_I + x_{II}$

Untuk menambah pengetahuan tentang sistem osilasi dua derajat kebebasan, kalian dapat memperhatikan tayang youtube pada link berikut ini:
<https://www.youtube.com/watch?v=nRqVCv8NDG8>

1.6.2 Pemaknaan Nilai-Nilai Al Islam dalam Osilasi Harmonis

...dan Sesungguhnya Kami telah mengulang-ulangi bagi manusia dalam Al Quran ini bermacam-macam perumpamaan. dan manusia adalah makhluk yang paling banyak membantah (QS Al-Kahfi: 54)

Berdasarkan tafsir ayat di atas, perumpamaan secara berulang-ulang telah meningkatkan apa yang tertulis di dalam Alquran. Getaran merupakan gerakan benda yang berulang-ulang

melalui kedudukan setimbangnya. Sesuatu yang ulang-ulang itu akan menghasilkan getaran harmonis. Dalam hal ini doa yang diulang-ulang ibarat orang mengayuh sepeda, lama kelamaan akan sampai pada tujuan. Allah menciptakan alam semesta beserta isinya yang ada di bumi dan di langis melalui proses yang berulang-ulang juga. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa mengulang-ulang sesuatu akan semakin membuat ingatan semakin tajam.

1.7 Ringkasan

- Frekuensi dari gerak periodic atau berosilasi adalah jumlah osilasi tiap detik. Dalam satuan SI, nilai tersebut diukur dalam Hertz.
 - 1 Hertz = 1 Hz = 1 osilasi per detik
- Periode adalah waktu yang diperlukan untuk satu kali osilasi. Periode dapat dihitung menggunakan persamaan:
 - $T = \frac{1}{f}$
- Perpindahan $x(t)$ partikel yang bergerak harmonic sederhana dari posisi kesetimbangan mengikuti persamaan:
 - $x(t) = x_m \cos(\omega t + \phi)$
 - dengan x_m adalah amplitudo maksimum, $(\omega t + \phi)$ adalah fase gerak, dan ϕ adalah sudut fase. Besarnya frekuensi sudut adalah:
 - $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$
- Kecepatan dan percepatan partikel GHS diperoleh dari diferensiasi perpindahan partikel sebagai fungsi waktu:
 - $v(t) = -\omega x_m \sin(\omega t + \phi)$
 - $a(t) = -\omega^2 x_m \cos(\omega t + \phi)$
- Osilasi pegas terjadi ketika sebuah partikel dengan massa m bergerak di bawah pengaruh hukum Hooke $F = -kx$ dengan:
 - $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ (*frekuensi sudut*)
 - $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ (*periode osilasi pegas*)
- Osilasi bandul pada gerak harmonic sederhana memiliki periode sebesar:
 - $T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$
- Sebuah partikel dalam gerak harmonic sederhana pada tiap waktu memiliki energi kinetic, $E_k = \frac{1}{2} mv^2$ dan energi potensial, $E_p = \frac{1}{2} kx^2$. Jika tidak ada gesekan yang terjadi, energi mekanik besarnya konstan yaitu $E = \frac{1}{2} kA^2$ meskipun E_k dan E_p mengalami perubahan.
- Energi mekanik dalam suatu sistem osilasi nyata menurun selama osilasi karena gaya eksternal seperti gaya hambat yang menghambat osilasi dan mengubah energi mekanik menjadi energi panas. Osilator nyata dan gerakannya dikatakan teredam. Perpindahan dari osilator yaitu:
 - $x(t) = x_m e^{-bt/2m} \cos(\omega' t + \phi)$
 - dengan frekuensi sudut sebesar:
 - $\omega' t = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{b^2}{4m^2}}$
 - Jika konstanta redaman kecil ($b \ll \sqrt{km}$) maka $\omega' t \approx \omega$ dimana ω adalah frekuensi sudut dari osilator tak teredam. Untuk b kecil, energi mekanik E dari osilator adalah:
 - $E = \frac{1}{2} kx_m^2 e^{-bt/2m}$
 - Jika sebuah gaya eksternal dengan frekuensi sudut ω_d bekerja pada sistem yang berosilasi dengan frekuensi sudut alami ω , maka sistem berosilasi dengan frekuensi sudut ω_d . Amplitudo kecepatan sistem sangat besar ketika:
 - $\omega_d = \omega$
- Ketika sistem berosilasi dengan dua derajat kebebasan, sistem dapat bekerja pada mode rendah dan tinggi. Pada mode rendah, kedua benda akan bergerak searah dengan mengikuti persamaan: $x = (A_1 + A_2) \cos(\omega t +$

ϕ) yang disebut dengan osilasi pusat massa. Pada mode tinggi, kedua benda berlawanan arah satu sama lain dengan besar simpangan selalu sama dengan mengikuti persamaan: $x = (A_1 - A_2) \cos(\omega_{II} t + \phi)$ yang disebut dengan osilasi relatif.

1.8 Latihan Soal

1. Seorang nelayan memiliki timbangan yang terentang 3,6 cm ketika ikan 2,4 kg tergantung darinya. Tentukan: (a) konstanta pegas dan (b) amplitudo dan frekuensi osilasinya ketika ikan ditarik lagi ke bawah sejauh 2,1 cm dan dilepaskan sehingga berosilasi naik dan turun.
2. Berapakah perioda dari sebuah pendulum sederhana yang panjangnya 47 cm ketika di (a) bumi dan (b) berada di lift yang jatuh bebas.
3. Sebuah massa 0,25 kg pada ujung pegas berosilasi 2,2 kali per detik dengan amplitudo 0,15 m. Tentukan: (a) kecepatan ketika melewati titik kesetimbangan, (b) kecepatan ketika 0,10 m dari kesetimbangan, (c) energi total system, dan (d) persamaan yang menggambarkan gerak massa itu dengan asumsi bahwa pada $t = 0$, x adalah maksimal.
4. Perhatikan kembali gambar 1.7. Balok memiliki massa 1,5 kg dan konstanta pegas 8 N/m. Gaya redaman diberikan oleh $-b(dx/dt)$, dengan $b = 230$ g/s. Balok ditarik ke bawah sepanjang 12 cm dan dilepaskan.
 - a. Hitung waktu yang diperlukan amplitudo untuk menghasilkan osilasi yang jatuh ke sepertiga dari nilai awalnya
 - b. Berapa banyak osilasi dibuat oleh balok pada saat itu?

Bab 2

Kinematika Gelombang

2.1 Fenomena Kinematika Gelombang

Kinematika gelombang membahas gelombang tanpa menyinggung sifat fisis besaran fisika yang dirambatkan serta medium perambatnya. Fenomena yang berkaitan dengan kinematika gelombang adalah layangan. Layangan dapat terjadi dengan jenis gelombang apapun dan merupakan metode yang sangat sensitive untuk membandingkan frekuensi. Contohnya, menyetem piano. Pada saat menyetem piano akan terdengar layangan yang dihasilkan antara garpu tala standar dan frekuensi dawai tertentu pada piano. Seseorang yang sedang menyetem piano akan mengetahui keselarasan nada ketika layangannya menghilang. Contoh lain adalah ketika para anggota sebuah orchestra menyetem dengan mendengarkan denyut antara alat music mereka dan frekuensi nada standar (biasanya A di atas C tengah pada 440 Hz) yang dihasilkan oleh piano. Pokok bahasan dalam kinematika gelombang meliputi persamaan diferensial gelombang, solusi persamaan gelombang, superposisi dua gelombang dan layangan, kecepatan grup dan dispersi, efek Doppler, dan Hukum Snellius.



Gambar 2.1: Menyetem piano dengan memanfaatkan layangan bunyi. (Santoso, 2012)

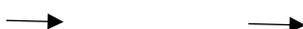
Gelombang dapat dibagi menjadi tiga yaitu gelombang mekanik, elektromagnetik, dan partikel. Gelombang mekanik memerlukan medium dalam perambatannya seperti air, udara, dan batu. Contoh gelombang mekanik adalah gelombang air, gelombang bunyi, dan gelombang seismik. Gelombang elektromagnetik tidak memerlukan medium dalam perambatannya. Contoh dari gelombang elektromagnetik adalah gelombang cahaya. Gelombang elektromagnetik akan dibahas sendiri di Bab 5. Gelombang partikel banyak digunakan dalam teknologi modern dan berkaitan dengan electron, proton, atom, dan molekul.

2.2 Persamaan Diferensial Gelombang

Persamaan diferensial gelombang dapat diturunkan berdasarkan sudut fase. Sudut fase suatu benda yang beresilasi dinyatakan dengan:

$$\phi = x + vt =$$

Keadaan setiap titik yang sama pada kurva dinyatakan oleh sudut fase yang memenuhi $\phi = \phi'$ atau konstan, sehingga berlaku:



$$\frac{d\phi}{dt} = 0 \quad dx \pm v dt = 0 \quad v = \pm \frac{dx}{dt}$$

v dapat dikatakan sebagai kecepatan sudut karena diturunkan dari sudut fase. Perubahan fungsi gelombang terhadap x dan t dapat dinyatakan dengan:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial x} &= \frac{\partial \psi}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial \phi} \\ \frac{\partial \psi}{\partial t} &= \frac{\partial \psi}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = (\pm v) \frac{\partial \psi}{\partial \phi} \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial \psi}{\partial t} = (\pm v) \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

Kedua persamaan dapat digunakan untuk menyederhanakan turunan kedua dari gelombang terhadap x dan t . Turunan kedua terhadap x adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \psi}{\partial \phi} \right) = \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{\partial \psi}{\partial \phi} \right) = \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} \rightarrow \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\pm v \frac{\partial \psi}{\partial \phi} \right) = (\pm v) \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} \right) = (\pm v) \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\pm v \frac{\partial \psi}{\partial \phi} \right) = v^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} \\ &\Rightarrow \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan 2.1 dan 2.2 diperoleh persamaan diferensial gelombang sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad \text{atau} \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - v^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = 0$$

Atau dapat pula disebut persamaan gelombang dalam bentuk direfensial

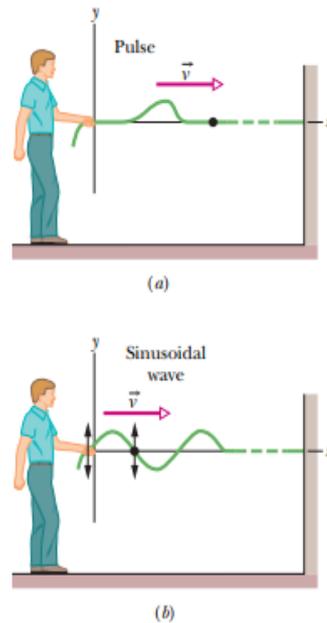
Persamaan 2.3 berlaku untuk gelombang satu dimensi yaitu $\psi(x,t)$ yang merambat pada sumbu x . Secara umum persamaan ini juga berlaku untuk gelombang tiga dimensi $\psi(r,t)$ dengan mengganti operator differensial terhadap x menjadi operator differensial ruang (tiga dimensi) atau nabla sehingga menjadi:

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0$$

Solusi dari persamaan differensial gelombang adalah fungsi gelombang. Atau sebaliknya, jika suatu fungsi merupakan fungsi gelombang maka fungsi tersebut akan memenuhi persamaan differensial gelombang. Solusi dari persamaan 2.4 adalah $\psi(x,t) = \psi_m \cos(kx - \omega t)$ atau $\psi(x,t) = \psi_m \sin(kx - \omega t)$ bergantung syarat batas dan syarat awal.

2.3 Solusi Persamaan Gelombang

Untuk memudahkan dalam mempelajari solusi persamaan gelombang, tinjau suatu gelombang mekanik, misalnya gelombang pada tali. Ketika suatu tali diregangkan kemudian diberikan usikan pada salah satu ujungnya, suatu titik yang terdapat di tali tersebut akan bergerak naik sekali dan turun ketika pulsa gelombang lewat. Gerakan titik tegak lurus terhadap arah perjalanan gelombang sehingga terbentuk gelombang transversal.



Gambar 2.2: Fungsi sinusoidal pada gelombang tali. (Halliday and Resnick, 2011)

Perhatikan gambar 2.2. Ketika gelombang berjalan dalam arah positif dari sumbu x, elemen-elemen tersebut (digambarkan dengan titik) berosilasi sejajar dengan sumbu y. Pada waktu t, perpindahan y dari elemen yang terletak di posisi x dinyatakan dengan:

$$y(x,t) = y_m \sin (\omega t - kx) \tag{2.5}$$

keterangan:

- $y(x,t)$: perpindahan
- y_m : amplitudo
- k : bilangan gelombang ($2\pi/\lambda$)
- x : jarak titik sembarang dari titik asal
- ω : frekuensi sudut ($2\pi/T$)
- t : lama titik asal telah bergetar

Secara umum, persamaan simpangan getaran di suatu titik sembarang pada tali yang berjarak x dari titik asal getaran ada dua bentuk yaitu:

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

Catatan:

Tanda negatif dalam sinus diberikan untuk gelombang berjalan yang merambat ke kanan, sedang tanda positif diberikan untuk gelombang berjalan yang merambat ke kiri

Selama gelombang merambat, partikel-partikel sepanjang tali hanya bergerak harmonik naik turun. Jika simpangan di titik tertentu (misal P) diketahui, maka kecepatan dan percepatan partikel tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$v_p = \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt} [A \sin \omega t - kx]$$

$$v_p = \omega A \cos(\omega t - kx)$$

Percepatan partikel di titik P adalah turunan pertama kecepatan di titik P terhadap waktu

$$a_p = \frac{dv_p}{dt} = \frac{d}{dt} [\omega A \cos(\omega t - kx)]$$

$$a_p = -\omega^2 A \sin(\omega t - kx) = -\omega^2 y_p$$

2.4 Superposisi Dua Gelombang dan Layangan

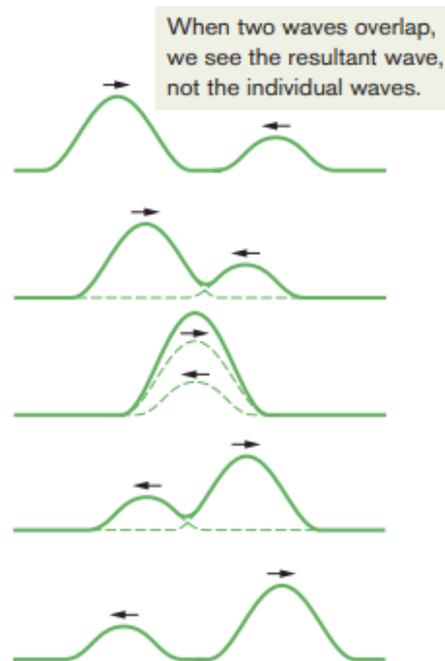
Seringkali terjadi dua atau lebih gelombang bergerak secara serentak melewati daerah yang sama. Beberapa contoh dari peristiwa ini antara lain gelombang bunyi dari banyak alat music

masuk secara serentak menyentuh gendang telinga ketika sedang mendengarkan suatu konser musik, elektron-elektron pada antenna radio dan televisi penerima dirancang bergerak dengan efek total dari gelombang-gelombang elektromagnetik dari berbagai pusat penyiaran, serta air danau atau pelabuhan akan bergolak oleh gelombang yang dihasilkan dari kapal-kapal yang bergerak.

Misalkan, dua gelombang merambat secara serentak pada sepanjang dawai yang sama, maka $y_1(x,t)$ dan $y_2(x,t)$ menjadi perpindahan yang akan dialami dawai jika tiap gelombang merambat sendiri-sendiri. Ketika gelombang berpapasan, maka perpindahan akan dijumlahkan secara aljabar:

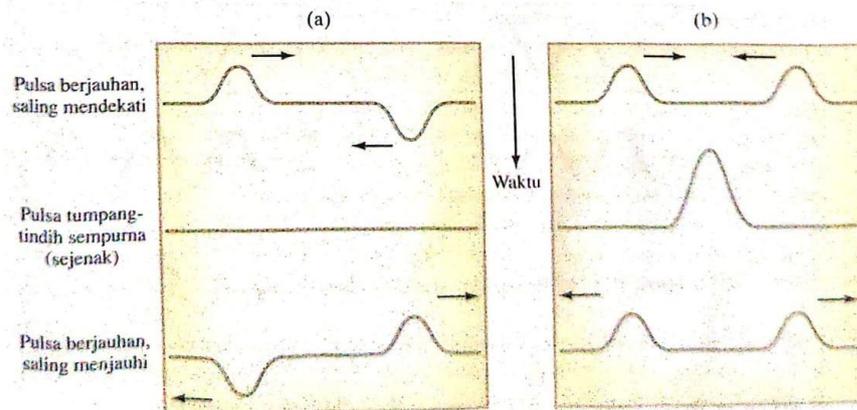
$$y'(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$$

Hal ini merupakan prinsip superposisi. Prinsip superposisi linier menyatakan ketika dua gelombang atau lebih datang secara bersamaan pada tempat yang sama sehingga mengakibatkan tumpang tindih, resultan gangguan adalah jumlah gangguan dari masing-masing gelombang.



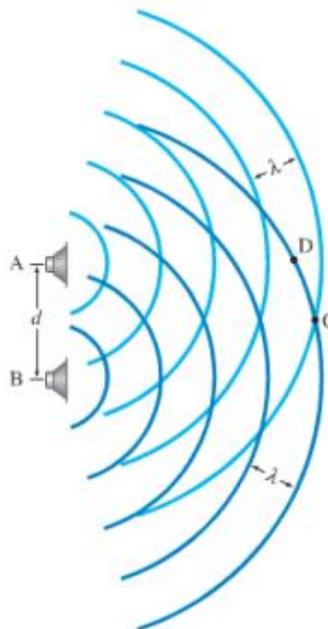
Gambar 2.3: Superposisi Gelombang. (Halliday and Resnick, 2011)

Gambar 2.3 menunjukkan suatu rangkaian gambar dari dua gelombang yang merambat pada dawai yang sama dengan arah berlawanan. Ketika kedua gelombang saling berpapasan, resultan gangguan adalah penjumlahan keduanya. Lebih lanjut, masing-masing gangguan bergerak melewati yang lain seolah-olah yang lain tidak ada. Prinsip superposisi gelombang dapat diterapkan pada dua gelombang yang memiliki panjang gelombang dan amplitudo yang sama bergerak dengan arah yang berlawanan pada dawai yang teregang. Peristiwa ini disebut dengan interferensi (Note: syarat terjadinya interferensi adalah kedua gelombang memiliki ω , f , λ , dan A sama). Pada interferensi, resultan gelombang bergantung pada kelanjutan ketika gelombang berada pada sefase antara satu dengan lainnya, yaitu berapa banyak suatu muka gelombang tergeser dari muka gelombang yang lainnya. Proses interferensi dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4: Interferensi Gelombang. (Giancoli, 2005)

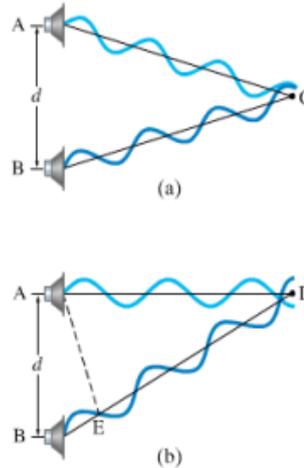
Pada gambar 2.4a, dua gelombang memiliki perpindahan yang berlawanan dan secara tepat tidak sefase sehingga puncak gelombang yang satu secara tepat berhimpit dengan lembah gelombang yang lain, maka akan bergabung kemudian saling menghilangkan di setiap tempat dan dawai tetap membentuk garis lurus disebut dengan interferensi destruktif. Pada gambar 2.4b, pada saat dua gelombang tumpang tindih dan secara tepat sefase (satu puncak dan lembah gelombang tepat berhimpit dengan puncak dan lembah gelombang lainnya) akan menghasilkan resultan perpindahan yang lebih besar dari perpindahan masing-masing gelombang yang terpisah dan hasilnya adalah interferensi konstruktif.



Gambar 2.5: Interferensi Gelombang Bunyi pada Pengeras Bunyi. (Giancoli, 2005)

Peristiwa interferensi juga terjadi pada gelombang bunyi. Interferensi pada gelombang bunyi berlangsung dalam ruang dan terjadi dalam waktu. Untuk referensi dalam ruang tinjaulah dua pengeras bunyi berukuran besar yaitu A dan B terpisah pada jarak d (Gambar 2.5). Diasumsikan dua pengeras bunyi memancarkan gelombang bunyi pada frekuensi tunggal yang sama dan sefase (artinya, ketika salah satu pengeras bunyi membentuk mampatan, demikian pula pengeras bunyi satunya). Garis melengkung mewakili puncak-puncak gelombang bunyi dari masing-masing speaker pada satu waktu (ingat, pada gelombang bunyi puncak adalah mampatan dan lembah adalah regangan). Titik C adalah telinga manusia atau detector yang

berjarak sama dari masing-masing pengeras bunyi akan mengalami bunyi yang keras karena interferensinya adalah konstruktif (dua puncak mencapai titik itu pada satu saat, dua lembah mencapai titik tersebut beberapa saat kemudian). Pada titik D terjadi interferensi destruktif yaitu puncak dari satu gelombang bertemu dengan lembah gelombang satunya, demikian sebaliknya. Ilustrasi interferensi konstruktif dan destruktif dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6: Interferensi Konstruktif Dan Destruktif pada Gelombang Bunyi. (Giancoli, 2005)

Pada Gambar 2.6a, di titik C, interferensi konstruktif terjadi karena kedua gelombang secara bersamaan memiliki puncak atau lembah ketika tiba di titik C. Pada Gambar 2.6b, untuk mencapai titik D, gelombang dari pengeras bunyi B harus menempuh jarak yang lebih besar daripada gelombang dari pengeras bunyi A. Jadi gelombang dari B tertinggal dari A. Titik E dipilih sehingga jarak ED sama dengan AD. Dapat diketahui bahwa jika jarak BE sama dengan tepat satu setengah panjang gelombang bunyinya, dua gelombang itu akan persis berbeda fasenya ketika mencapai D dan interferensi destruktif terjadi. Interferensi konstruktif terjadi ketika kedua gelombang bunyi bertemu di titik C adalah sefase atau memiliki beda lintasan yang merupakan kelipatan bulat dari panjang gelombang bunyi:

$$\Delta S = S1C - S2C = n\lambda; n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

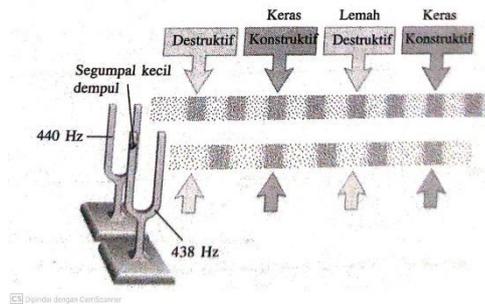
Note: $n = 0, n = 1, n = 2$, berturut-turut untuk bunyi kuat pertama, bunyi kuat kedua, dan bunyi kuat ketiga

Interferensi destruktif terjadi ketika kedua gelombang bunyi bertemu di titik D adalah berlawanan fase atau memiliki beda lintasan:

$$\Delta S = S1D - S2D = (n + \frac{1}{2}) \lambda; n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Note: $n = 0, n = 1, n = 2$, berturut-turut untuk bunyi lemah pertama, bunyi lemah kedua, dan bunyi lemah ketiga

Interferensi gelombang bunyi yang terjadi dalam waktu adalah layangan (beat). Jika dua sumber bunyi, misalnya dua garpu tala yang berdekatan frekuensinya tetapi tidak persis sama maka gelombang bunyi dari kedua sumber itu saling mengganggu. Tingkat bunyi pada posisi tertentu bergantian naik dan turun seiring waktu karena kedua gelombang kadang-kadang sefase dan kadang-kadang berbeda fase karena panjang-panjang gelombangnya berbeda. Perubahan intensitas yang teratur jaraknya disebut layangan. Layangan digunakan oleh pemusik untuk menyetel alat musik. Perhatikan gambar 2.7.



Gambar 2.7: Layangan Terjadi Ketika Dua Gelombang dengan Frekuensi yang Sedikit Berbeda Berbunyi Secara Serentak

Misalkan dua gelombang menjalar dalam suatu medium dengan kecepatan v dan amplitudo A serta pada waktu yang sama. Bila gelombang 1 mempunyai ω_1 dan gelombang 2 mempunyai ω_2 , maka persamaan simpangan gelombang-gelombang tersebut:

$$y_1 = A \sin \omega_1 t \text{ dan } y_2 = A \sin \omega_2 t$$

hasil superposisi kedua gelombang:

$$y = y_1 + y_2 = A \sin \omega_1 t + A \sin \omega_2 t = A (\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t)$$

bila frekuensi kedua gelombang y_1 dan y_2 hampir sama besar, maka dapat ditulis:

$$\omega_1 = \omega + \Delta\omega \text{ dan } \omega_2 = \omega$$

$$\omega_1 - \omega_2 = \Delta\omega$$

$$\omega_1 + \omega_2 = 2\omega + \Delta\omega \approx 2\omega$$

Substitusikan dalam persamaan $y = A (\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t)$ akan diperoleh:

$$y = 2A \cos \frac{1}{2} \Delta\omega t \sin \frac{1}{2} (2\omega) t$$

$$y = 2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \sin \omega t, \text{ dengan } \Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 \tag{2.8}$$

Persamaan 2.8 menunjukkan bahwa hasil superposisi gelombang di suatu titik juga bergetar harmonik dengan amplitudo A_p sebesar:

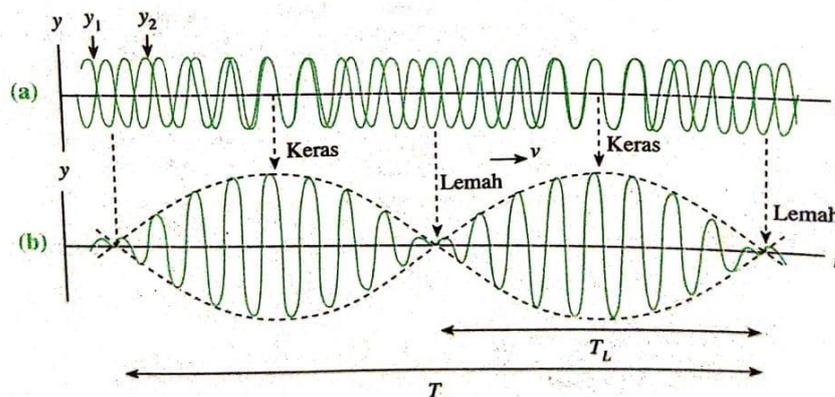
$$A_p = 2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} t = 2A \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \tag{2.9}$$

Persamaan 2.9 menunjukkan bahwa amplitudo merupakan fungsi waktu sehingga mempunyai nilai maksimum dan minimum yang berulang secara periodik dengan frekuensi sudut sebesar:

$$\Delta\omega = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2}; 2\pi f = \frac{2\pi f_1 - 2\pi f_2}{2}; f = \frac{f_1 - f_2}{2}$$

Karena:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{\frac{f_1 - f_2}{2}} = \frac{2}{f_1 - f_2}$$



Gambar 2.8: (a) Superposisi Gelombang dengan Frekuensi yang Sedikit Berbeda (b) Hasil Superposisi

Pada gambar 2.8, amplitudo hasil superposisi mempunyai nilai maksimum dan minimum yang berulang secara periodik sehingga terjadi bunyi keras dan lemah secara periodik. Peristiwa ini disebut layangan bunyi. Satu layangan didefinisikan sebagai gejala dua bunyi keras atau dua bunyi lemah yang terjadi secara berurutan.

Periode layangan yang terjadi adalah setengah periode gelombang (T), sehingga:

$$T_L = \frac{1}{2} T = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{f_1 - f_2} \right) \text{ atau } T_L = \frac{1}{f_1 - f_2}$$

Frekuensi layangan ialah banyak layangan yang terjadi dalam satu detik dan dinyatakan dengan:

$$f_L = \frac{1}{T_L} = \frac{1}{\frac{1}{f_1 - f_2}} = f_1 - f_2$$

Contoh Soal 1

Sebuah garpu tala menghasilkan nada 400 Hz yang stabil. Ketika garpu tala ini dipukul dan dipegang di dekat dawai gitar yang bergetar, dua puluh layangan dihitung dalam lima detik. Berapakah frekuensi yang mungkin dihasilkan oleh dawai gitar itu?

Jawab

Agar layangan terjadi, dawainya harus bergetar pada frekuensi yang berbeda daripada 400 Hz sebesar berapapun frekuensi layangan itu.

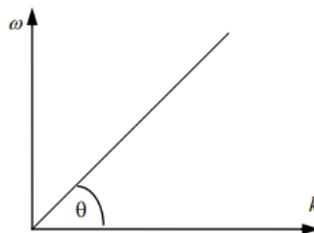
Frekuensi layangan adalah:

$$f_{\text{layangan}} = 20 \text{ getaran} / 5 \text{ detik} = 4 \text{ Hz}$$

Jadi perbedaan dari kedua gelombang adalah 4 Hz. Karena salah satu gelombangnya diketahui sebesar 400 Hz, gelombang yang lain harus sebesar 404 Hz atau 396 Hz

2.5 Kecepatan Grup dan Dispersi

Hubungan dispersi merupakan hubungan antara ω dan k . persamaan yang menghubungkan kedua besaran ini dinamakan persamaan dispersi. Berdasarkan hubungan dispersi ini dapat diketahui sifat dispersifitas suatu gelombang. Jika hubungan antara ω dan k linear, maka cepat rambat gelombangnya konstan, tidak bergantung pada panjang gelombang. Gelombang yang demikian termasuk pada gelombang yang non-dispersif. Cepat rambat gelombangnya dituliskan sebagai $v = \omega/k$. karena ω dan k linear, maka v konstan. Grafik hubungan antara frekuensi sudut ω sebagai fungsi bilangan gelombang k dapat dilihat pada gambar 2.9.



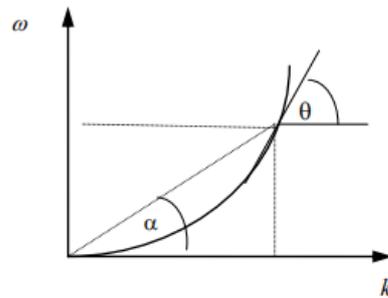
Gambar 2.9: Hubungan ω dan k untuk gelombang non dispersif

Gelombang non-dispersif mempunyai pola yang tetap dalam perambatannya. Jika gelombang ini merambat tidak akan mengalami deformasi atau perubahan bentuk (Gambar 2.10).



Gambar 2.10: Pola Gelombang Non-Dispersif Tidak Mengalami Deformasi

Sebaliknya untuk gelombang yang dispersif, hubungan antara ω dan k tidak linear, maka cepat rambat gelombangnya tidak konstan, bergantung pada panjang gelombang. Grafik hubungan antara frekuensi sudut ω sebagai fungsi bilangan gelombang k untuk gelombang dispersive (Gambar 2.11).

**Gambar 2.11:** Hubungan antara ω dengan k untuk Gelombang Dispersif

Berdasarkan gambar 2.11 dapat dituliskan kecepatan group pada k tertentu, yaitu:

$$v_g = \tan(\theta) \rightarrow v_g = \frac{d\omega}{dk}$$

dan kecepatan fasenya:

$$v = \tan(\alpha) \rightarrow v = \frac{\omega}{k}$$

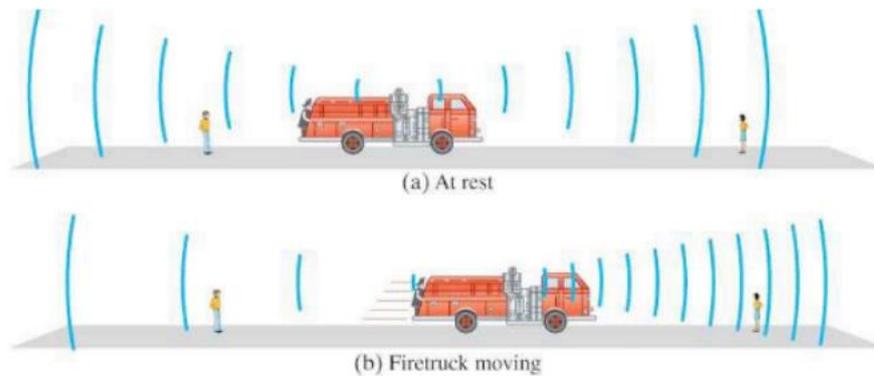
Berdasarkan persamaan 2.11 dan 2.12, diketahui bahwa untuk gelombang dispersif kecepatan fase tidak sama dengan kecepatan group. Pola gelombang dispersif mengalami perubahan bentuk atau deformasi selama perambatannya (Gambar 2.10).



Gambar 2.12: Pola Gelombang Dispersif

2.6 Efek Doppler

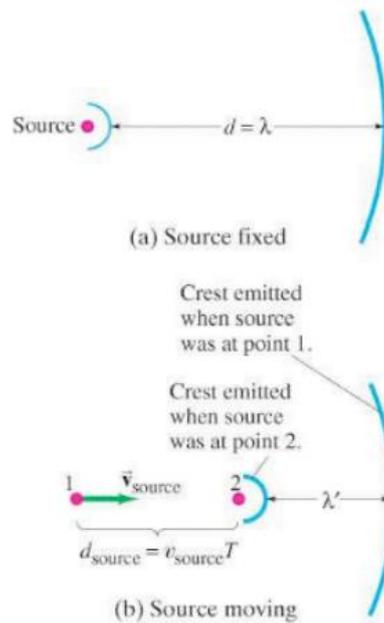
Efek Doppler terjadi ketika adanya perbedaan frekuensi yang didengar ketika sumber bunyi mendekati atau menjauhi pengamat. Ketika sumber bunyi bergerak menuju pengamat frekuensi yang didengar oleh pengamat lebih tinggi daripada ketika sumber itu tidak bergerak. Ketika sumbernya menjauh dari pengamat frekuensinya lebih rendah.



Gambar 2.13: Ilustrasi Efek Doppler: (a) mobil pemadam kebakaran diam (b) mobil pemadam kebakaran bergerak mendekati salah satu pengamat

Pada gambar 2.13a, mobil pemadam kebakaran dalam keadaan diam dan memancarkan bunyi dengan frekuensi tertentu ke segala arah. Gelombang bunyi bergerak dengan kecepatan bunyi di udara sebesar v_{snd} yang independent (tidak bergantung) terhadap kecepatan sumber atau pengamat. Ketika sumber bunyi (mobil pemadam kebakaran) bergerak, sirenenya memancarkan bunyi pada frekuensi yang sama seperti ketika tidak bergerak. Tetapi muka gelombang bunyi yang dipancarkan ke depan, di depannya, lebih berdekatan daripada ketika mobil pemadam kebakaran sedang tidak bergerak seperti pada gambar 2.13b. Karena mobil pemadam kebakaran ketika bergerak agak “mengejar” muka-muka gelombang yang dipancarkan sebelumnya dan memancarkan setiap puncak gelombang yang baru lebih dekat ke yang sebelumnya. Oleh karena itu, pengamat di trotoar di depan truk akan mendeteksi lebih banyak puncak gelombang melewatinya per detik sehingga frekuensinya terdengar lebih tinggi.

Hal berkebalikan terjadi pada pengamat yang berada di belakang mobil pemadam kebakaran. Muka-muka gelombang yang dipancarkan di belakang mobil pemadam kebakaran, lebih jauh terpisah daripada ketika mobil pemadam kebakaran tidak bergerak karena menjauhi pengamat. Setiap muka gelombang yang baru dipancarkan lebih jauh daripada yang sebelumnya dibandingkan jaraknya ketika mobil pemadam kebakaran berhenti. Oleh karena itu, puncak gelombang lebih sedikit per detik melewati pengamat di belakang mobil pemadam kebakaran yang bergerak dan frekuensi yang dirasakan lebih rendah.



Gambar 2.14: Penentuan pergeseran frekuensi dalam efek Doppler: (a) sumber bunyi diam
(b) sumber bunyi bergerak. **Note:** titik merah adalah sumber bunyi

Pergeseran frekuensi dapat dihitung dengan mempelajari gambar 2.14. Asumsi yang dibuat: udara tidak bergerak dalam sistem yang dipelajari dan pengamat berada di sebelah kanan. Sumber bunyi disimbolkan dengan titik merah. Perhatikan gambar 2.14a, sumber bunyi tidak bergerak atau diam. Dua puncak gelombang berturut-turut ditampilkan, yang kedua baru dikeluarkan dan masih di dekat sumber. Jarak antara puncak-puncak tersebut adalah λ . Jika frekuensi sumber, f , maka waktu antara pemancaran puncak-puncak gelombang adalah;

$$T = \frac{1}{f} = \frac{\lambda}{v_{snd}}$$

Perhatikan gambar 2.14b, sumber bergerak dengan kecepatan v_{sumber} ke arah pengamat. Dalam waktu T , puncak gelombang pertama telah bergerak dengan jarak $d = v_{snd}T = \lambda$, dimana v_{snd} adalah kecepatan gelombang bunyi di udara (yang besarnya sama apakah sumber bergerak atau tidak). Dalam waktu yang sama, puncak gelombang kedua bergerak dengan jarak $d_{sumber} = v_{sumber}T$. Jarak antara kedua puncak gelombang dilambangkan dengan λ' yang akan dideteksi oleh pengamat di sebelah kanan dinyatakan dengan:

$$\begin{aligned}\lambda' &= d - d_{sumber} \\ &= \lambda - v_{sumber}T \\ &= \lambda - v_{sumber} \frac{\lambda}{v_{snd}} \\ &= \lambda \left(1 - \frac{v_{sumber}}{v_{snd}} \right)\end{aligned}$$

Dengan mengurangkan λ dari kedua sisi persamaan ini, pergeseran panjang gelombang $\Delta \lambda$ adalah:

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = -\lambda \frac{v_{sumber}}{v_{snd}}$$

Frekuensi, f yang dideteksi oleh pengamat adalah:

$$f' = \frac{v_{snd}}{\lambda'} = \frac{v_{snd}}{\lambda \left(1 - \frac{v_{sumber}}{v_{snd}} \right)}$$

karena: $v_{snd}/\lambda = f$, maka:

$$f' = \frac{f}{\left(1 - \frac{v_{sumber}}{v_{snd}} \right)}$$

persamaan 2.13 berlaku ketika sumber bergerak ke arah pengamat (mendekati)

Bagaimana dengan pengamat di sebelah kiri mobil pemadam kebakaran, ketika mobil pemadam kebakaran bergerak menjauhinya?

$$\begin{aligned}\lambda' &= d + d_{\text{sumber}} \\ &= \lambda + v_{\text{sumber}}T \\ &= \lambda + v_{\text{sumber}} \frac{\lambda}{v_{\text{snd}}} \\ &= \lambda \left(1 + \frac{v_{\text{sumber}}}{v_{\text{snd}}} \right)\end{aligned}$$

Perbedaan antara panjang gelombang yang diamati dan dipancarkan akan menjadi:

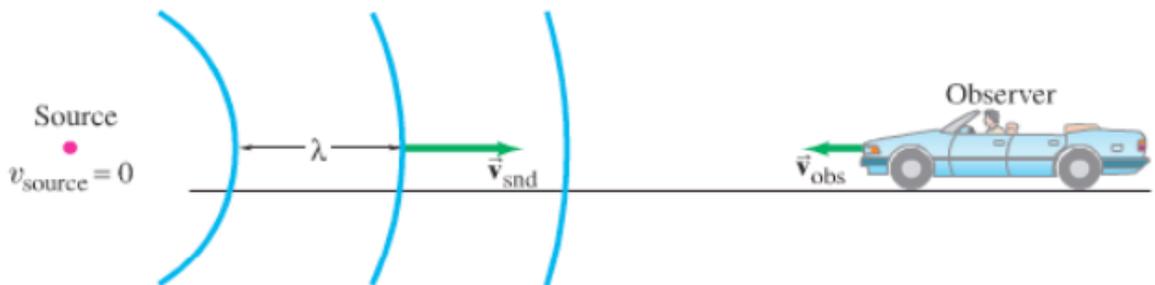
$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda \frac{v_{\text{sumber}}}{v_{\text{snd}}}$$

Frekuensi yang dideteksi oleh pengamat:

$$f' = \frac{f}{\left(1 + \frac{v_{\text{sumber}}}{v_{\text{snd}}} \right)}$$

Persamaan 2.14 berlaku ketika sumber menjauhi pengamat

Efek Doppler dapat terjadi ketika sumber tidak bergerak dan pengamatnya bergerak. Jika pengamat mendekati sumber, frekuensinya terdengar lebih tinggi daripada frekuensi sumber yang dipancarkan. Jika pengamat menjauhi sumber, frekuensinya terdengar lebih rendah. Dengan sumber tetap dan pengamat bergerak, jarak antara puncak gelombang, λ tidak berubah. Tetapi laju puncak-puncak yang berhubungan dengan pengamat akan berubah.



Gambar 2.15: Pengamat Bergerak Menuju Sumber Bunyi yang Tidak Bergerak

Berdasarkan gambar 2.15, laju gelombang relative terhadap pengamat adalah penjumlahan dari $v' = v_{\text{snd}} + v_{\text{obs}}$, dimana v_{snd} adalah kecepatan bunyi di udara dan v_{obs} adalah kecepatan pengamat. Sehingga frekuensi yang terdengar adalah:

$$= \frac{v'}{\lambda} = \frac{v_{\text{snd}} + v_{\text{obs}}}{\lambda}$$

Karena $\lambda = \frac{v_{\text{snd}}}{f}$ maka:

$$\begin{aligned}f' &= \frac{v_{\text{snd}} + v_{\text{obs}}}{v_{\text{snd}}} f \\ f' &= \left(1 + \frac{v_{\text{obs}}}{v_{\text{snd}}} \right) f\end{aligned}$$

Persamaan 2.15 berlaku ketika pengamat bergerak mendekati sumber

$$f' = \left(1 - \frac{v_{\text{obs}}}{v_{\text{snd}}} \right) f$$

Persamaan 2.16 berlaku ketika pengamat bergerak menjauhi sumber

Ketika sumber dan pengamat sama-sama bergerak, f' dapat ditentukan menggunakan 2.13, 2.14, 2.15, dan 2.16 dan ditulis dalam:

$$f' = \left(\frac{v_{\text{snd}} \pm v_{\text{obs}}}{v_{\text{snd}} \mp v_{\text{sumber}}} \right) f$$

keterangan:

v_{snd} = kecepatan bunyi dalam udara = 343 m/s²

v_{obs} = kecepatan pengamat

v_{sumber} = kecepatan sumber bunyi bergerak

f = frekuensi sumber bunyi sesungguhnya

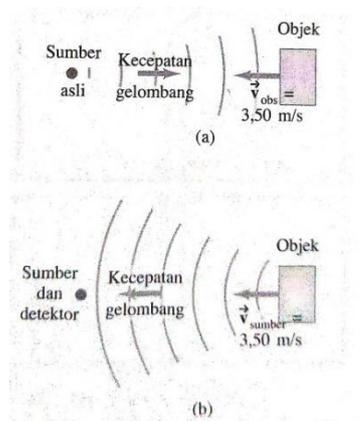
f' = frekuensi yang didengar

Note:

Hati-hati dalam penggunaan tanda. Frekuensi yang didengar akan lebih tinggi ketika pengamat dan sumber mendekati satu sama lain dan lebih rendah ketika bergerak saling menjauh. Tanda sebelah atas pada pembilang dan penyebut akan berlaku ketika sumber dan/atau pengamat bergerak ke arah satu sama lain. Dan tanda sebelah bawah akan berlaku bila saling bergerak menjauh.

Contoh Soal 2

Gelombang bunyi 5000 Hz dipancarkan oleh suatu sumber stationer. Gelombang bunyi ini memantul dari objek yang bergerak 3,5 m/s ke arah sumber. Berapakah frekuensi gelombang yang terdeteksi oleh objek bergerak itu menurut detector tidak bergerak yang berada di dekat sumber bunyi?



Pada peristiwa ini terjadi dua kali pergeseran Doppler.

Pada gambar a, objek bertindak sebagai pengamat bergerak menuju sumber dengan $v_{obs} = 3,5$ m/s sehingga frekuensi yang didengar:

$$f' = \left(1 + \frac{v_{obs}}{v_{snd}}\right) f = \left(1 + \frac{3,5}{343}\right) 5000 = 5051 \text{ Hz}$$

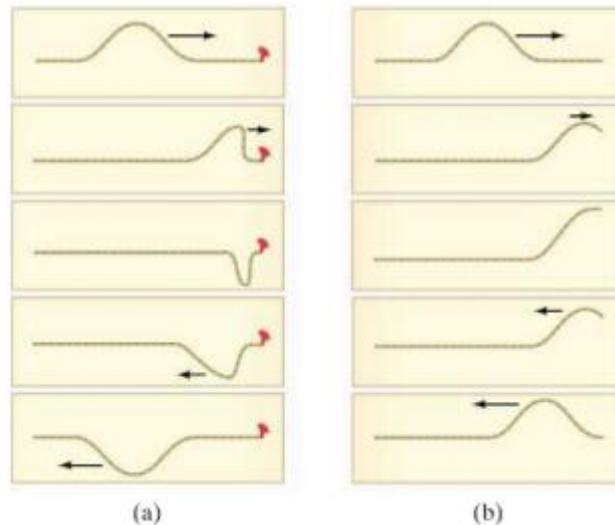
Pada gambar b, pantulan gelombang dari objek yang bergerak setara dengan objek tersebut memancarkan ulang gelombang itu pada frekuensi yang sama dan demikian bertindak secara efektif sebagai sumber yang bergerak dengan $v_{sumber} = 3,5$ m/s, maka frekuensi yang terdeteksi detector adalah:

$$f'' = \frac{f'}{\left(1 - \frac{v_{sumber}}{v_{snd}}\right)} = \frac{5051}{\left(1 - \frac{3,5}{343}\right)} = 5103 \text{ Hz}$$

2.7 Hukum Snellius tentang Pemantulan dan Transmisi Gelombang

Ketika gelombang mengenai rintangan atau sampai di ujung medium dimana gelombang tersebut berjalan, terdapat sebagian gelombang yang terpantulkan. Misalnya, gelombang air

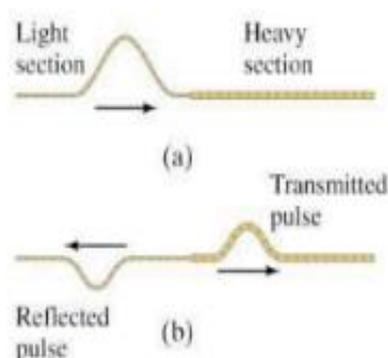
terpantul pada batu atau pinggiran kolam renang. Sebuah gelombang yang berjalan sepanjang sebuah tali akan terpantul seperti ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16: Pemantulan Gelombang yang Berjalan Sepanjang Tali. (Giancoli, 2005)

Pada Gambar 2.16a, gelombang yang dipantulkan akan berjalan kembali secara terbalik apabila ujung tali adalah tidak bergerak (terikat). Ketika ujungnya terikat atau dimatikan pada sebuah penopang, gelombang yang mencapai ujung tetap itu memberikan gaya keatas pada penopang tersebut. Penopang memberikan kekuatan yang sama tetapi berlawanan ke bawah terhadap tali (hukum ketiga Newton). Gaya kebawah pada tali yang menyebabkan gelombang terpantul terbalik. Pada Gambar 2.16b, gelombang akan berjalan kembali sama tegak jika ujungnya bebas.

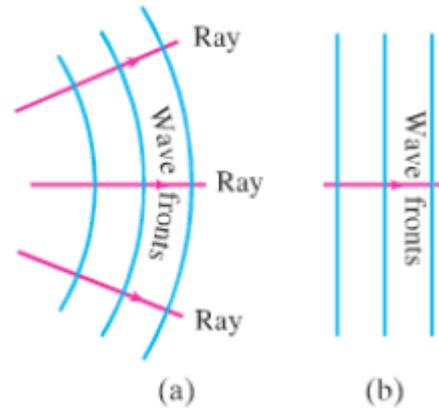
Ketika sebuah gelombang berjalan ke arah kanan sepanjang tali, akan mengalami diskontinuitas dimana tali menjadi lebih tebal dan berat sehingga sebagian dipantulkan dan sebagian ditransmisikan (Gambar 2.17).



Gambar 2.17: Transmisi Gelombang. (Giancoli, 2005)

Ketika gelombang mencapai batas antara bagian tipis dan tebal, sebagian gelombang terpantulkan dan sebagian ditransmisikan. Semakin berat bagian kedua dari tali tersebut, semakin sedikit energi yang ditransmisikan (ketika bagian kedua adalah dinding atau penopang yang kaku, sangat sedikit yang ditransmisikan dan kebanyakan akan terpantulkan). Untuk gelombang sinusoidal, frekuensi gelombang yang ditransmisikan tidak berubah di perbatasan tersebut karena titik batasnya beresilasi pada frekuensi tersebut. Jadi, jika gelombang yang ditransmisikan memiliki laju yang lebih rendah, panjang gelombangnya juga lebih kecil.

Untuk gelombang dua atau tiga dimensi seperti gelombang air perlu diperhatikan muka gelombang yang berarti semua titik di sepanjang gelombang yang membentuk puncak gelombang. Sebuah garis yang ditarik dalam arah gerakan gelombang, tegak lurus ke depan gelombang disebut pancaran atau ray (Gambar 2.18).



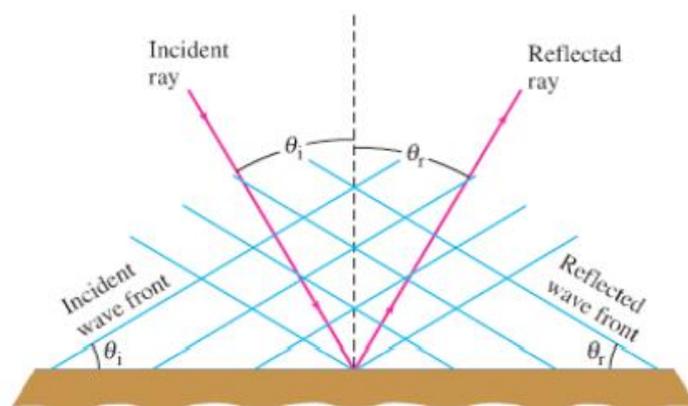
Gambar 2.18: Pancaran yang Menandakan Arah Gerak dari Gelombang Selalu Tegak Lurus Terhadap Muka Gelombang. (Giancoli, 2005)

Muka gelombang yang jauh dari sumbernya telah kehilangan hampir semua kelengkungannya dan hampir lurus seperti yang terjadi pada gelombang laut (disebut dengan gelombang bidang).

Untuk pemantulan dari gelombang bidang dua atau tiga dimensi (Gambar 2.19), sudut dari gelombang datang terhadap permukaan pantul adalah sama dengan sudut dari gelombang pantul. Pernyataan ini disebut dengan Hukum Pemantulan:

Sudut pemantulan sama dengan sudut datang

Sudut datang didefinisikan sebagai sudut (θ_i) dari pancaran datang terhadap tegak lurus permukaan pantul (atau dari muka gelombang terhadap permukaan itu). Sudut pemantulan adalah sudut (θ_r) yang berkorespondensi dari gelombang pantulannya.

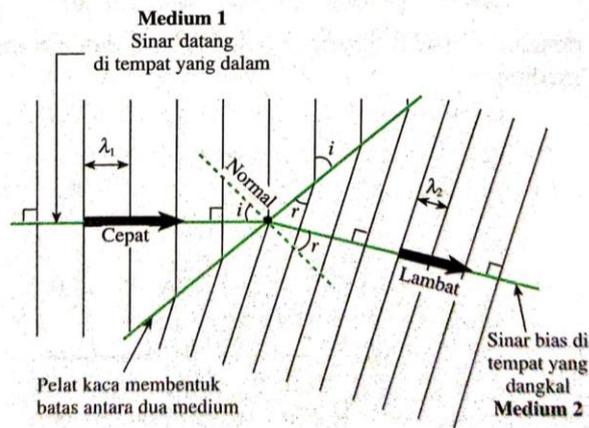


Gambar 2.19: Hukum Pemantulan. (Giancoli, 2005)

2.8 Refraksi Gelombang

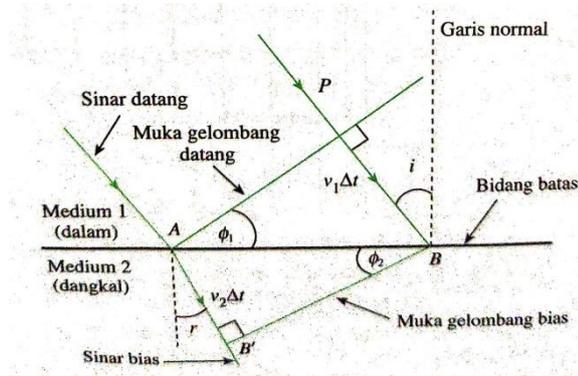
Pada umumnya, cepat rambat gelombang dalam satu medium tetap. Oleh karena frekuensi gelombang selalu tetap maka panjang gelombang juga tetap untuk gelombang yang menjalar dalam satu medium. Akan tetapi gelombang dapat saja menjalar pada dua medium yang jenisnya berbeda, misalnya dari udara ke air, maka cepat rambat cahaya akan berbeda. Cepat rambat cahaya di udara lebih besar daripada cepat rambat cahaya di dalam air. Oleh karena, λ

= v/f maka panjang gelombang cahaya di udara juga lebih besar daripada panjang gelombang cahaya di dalam air. Terlihat bahwa λ sebanding dengan v . Perubahan panjang gelombang menyebabkan pembelokan gelombang.



Gambar 2.20: Diagram Pembiasan

Berdasarkan gambar 2.20 terlihat bahwa sudut bias di tempat yang dangkal lebih kecil daripada sudut datang di tempat yang dalam ($r < i$). Sehingga: sinar datang dari tempat yang dalam ke tempat yang dangkal dibiaskan mendekati garis normal ($r < i$). Sebaliknya sinar datang dari tempat yang dangkal ke tempat yang dalam dibiaskan menjauhi garis normal ($r > i$).



Gambar 2.21: Diagram Skematik Pembiasan Gelombang

AP merupakan muka gelombang dalam medium 1 (tempat yang dalam) yang memotong bidang batas di titik A. Dalam waktu Δt , gelombang dari P menempuh jarak $v_1 \Delta t$ dan tiba di titik B pada bidang batas yang memisahkan kedua medium dengan sudut datang i . Pada waktu Δt yang sama, gelombang dari titik A menempuh jarak $v_2 \Delta t$ masuk ke dalam medium 2 (tempat yang dangkal) dan tiba di titik B'. Muka gelombang baru BB' tidak sejajar dengan muka gelombang AP semula sebab cepat rambat v_1 dan v_2 berbeda ($v_2 < v_1$). Perhatikan ΔABP siku-siku:

$$\sin \phi_1 = \frac{BP}{AB} = \frac{v_1 \Delta t}{AB} \rightarrow AB = \frac{v_1 \Delta t}{\sin \phi_1}$$

$$\phi_1 = i, \text{ sehingga } AB = \frac{v_1 \Delta t}{\sin i}$$

dengan cara yang sama, dari $\Delta AB'B$ siku-siku diperoleh:

$$\sin \phi_2 = \frac{AB'}{AB} = \frac{v_2 \Delta t}{AB} \rightarrow AB = \frac{v_2 \Delta t}{\sin \phi_2}$$

$$\phi_2 = r, \text{ maka } AB = \frac{v_2 \Delta t}{\sin r}$$

$$\frac{v_1 \Delta t}{\sin i} = \frac{v_2 \Delta t}{\sin r}$$

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$$

Persamaan umum yang berlaku untuk pembiasan gelombang adalah :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = n$$

keterangan:

i = sudut datang

r = sudut bias

n = indeks bias medium 2 relatif terhadap medium 1

Apabila indeks bias medium 2 adalah n_2 dan indeks bias medium 1 adalah n_1 , maka n dapat d dengan:

$$n = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Hukum Snellius dapat dituliskan:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

2.9 Pemaknaan Nilai-Nilai Al Islam dalam Kinematika Gelombang

"Dan diantara tanda -tanda kekuasaanNya ialah bahwa Dia mengirinkan angi pembawa berita gembira dan untuk merasakan kepadamu sebagian dari rahmatNya dan supaya kapal dapat berlayar dengan perintahNya dan supaya kamu dapat mencari karuniaNya, mudah-mudahan kamu bersyukur" (QS. Ar-Ruum: 46)

Berdasarkan tafsir ayat di atas, angin yang dimaksud adalah udara bergerak yang bertiup dengan membawa awan hitam Commulo Nimbus yaitu awan yang membawa air hujan dan angin yang bertiup menggerakkan layar kapal sehingga dapat mengarungi lautaTerhadinya hujan merupakan berkah atau kabar gembira bagi seluruh makhluk di bumi. Begitu pula kapal yang dapat berlayar di lautan, akan bermanfaat untuk alat transportasi manusia, inipun juga sebuah berita gembira. Dalam konteks fisis, angin atau udara yang bergerak merupakan gelombang. Tidak hanya gelombang bunyi tetapi juga gelombang cahaya, gelombang radio, serta gelombang elektromagnetik juga memberikan kabar gembira di seluruh dunia. Melalui gelombang cahaya kita bisa melihat indahnya pelangi, melalui gelombang bunyi kita bisa mendengarkan suara petir yang menggelegar, melalui gelombang radio kita mampu mengakses informasi, serta melalui gelombang elektromagnetik kita bisa melakukan jejaring ke seluruh penjuru jagad raya ini.

2.10 Ringkasan

- Persamaan diferensial umum yang mengatur perambatan semua jenis gelombang dapat dinyatakan dengan:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad \text{atau} \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - v^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = 0$$

- Sebuah gelombang sinus $y(x,t) = y_m \sin(\omega t - kx)$ x, memiliki bentuk matematis yaitu:

$$y(x,t) = y_m \sin(\omega t - kx)$$

- dengan y_m adalah amplitudo gelombang, k adalah bilangan sudut, ω adalah frekuensi sudut, dan $\omega t - kx$ adalah fase
- Panjang gelombang dapat ditentukan dari hubungan:

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

- Periode T dan frekuensi f dari gelombang dihubungkan dengan ω adalah:

$$\frac{\omega}{2\pi} = f = \frac{1}{T}$$

- Jika simpangan di titik tertentu (misal P) diketahui, maka kecepatan partikel tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$v_p = \omega A \cos(\omega t - kx)$$

- dan percepatan partikel di titik P dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$a_p = -\omega^2 A \sin(\omega t - kx) = -\omega^2 y_p$$

- Saat dua atau lebih gelombang merambat pada medium yang sama disebut superposisi gelombang, perpindahan dari partikel medium apa pun adalah penjumlahan dari perpindahan-perpindahan yang akan diberikan gelombang individu
- Frekuensi layangan ialah banyak layangan yang terjadi dalam satu detik dan dinyatakan dengan:

$$f_L = \frac{1}{T_L} = \frac{1}{\frac{1}{f_1 - f_2}} = f_1 - f_2$$

- Hubungan dispersi merupakan hubungan antara ω dan k . Berdasarkan hubungan tersebut dapat diketahui dispersifitas suatu gelombang. Hubungan disperse dibagi menjadi gelombang non-dispersif, yaitu ketika ω dan k adalah linier sehingga cepat rambat gelombang konstan tidak bergantung pada panjang gelombang dan gelombang yang dispersive, yaitu ketika ω dan k tidak linier maka cepat rambat gelombang tidak konstan, bergantung pada panjang gelombang
- Efek Doppler terjadi ketika adanya perbedaan frekuensi yang didengar ketika sumber bunyi mendekati atau menjauhi pengamat. Efek Doppler dapat ditentukan dengan persamaan:

$$f' = \left(\frac{v_{snd} \pm v_{obs}}{v_{snd} \mp v_{sumber}} \right) f$$

- Hukum Snellius tentang refraksi dapat dituliskan:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2.$$

2.11 Latihan Soal

1. Sebuah garpu tala dengan suatu frekuensi yang belum diketahui menghasilkan 3 layangan per detik dengan garpu baku yang berfrekuensi 384 Hz. Frekuensi layangan berkurang bila sepotong kecil lilin ditempelkan pada salah satu gigi dari garpu pertama. Berapakah frekuensi garpu ini?
2. Sebuah gelombang suara sedang berjalan di udara hangat. Ketika mencapai lapisan udara yang dingin dan padat. Jika gelombang suara itu mencapai antarmuka udara dingin tersebut pada sudut 250, berapakah refraksinya? Asumsikan bahwa temperatur udara dingin adalah -150C dan temperature udara hangat +150C. Laju suara sebagai fungsi temperatur dapat diaproksimasikan dengan $v = (331 + 0,6 T)$ m/s, dengan T dalam $^{\circ}\text{C}$
3. Sebuah kelelawar yang tidak bergerak mengirimkan gelombang bunyi ultrasonik pada 50 kHz dan menerimanya kembali dari sebuah objek yang bergerak menjauhinya pada 27,5 m/s. Berapakah frekuensi bunyi yang diterima?

Bab 3

Dinamika & Energetika Gelombang

3.1 Fenomena Dinamika Gelombang



Gambar 3.1: USG pada Pemeriksaan Janin. (Nasyiroh, 2020)

Dinamika gelombang mempelajari tentang proses perambatan yang dikaitkan dengan sumber penyebabnya. Ditinjau dari aspek dinamikanya, gelombang dibedakan menjadi gelombang mekanik dan gelombang elektromagnetik. Gelombang mekanik merambat melalui medium elastis sedangkan gelombang elektromagnetik tidak memerlukan medium dalam perambatannya. Pada bab ini, membahas tentang aspek dinamika pada gelombang mekanik. Salah satu jenis gelombang mekanik adalah gelombang bunyi yaitu suatu gelombang longitudinal yang merambat melalui udara. Gelombang bunyi dimanfaatkan dalam USG. Sonar yang mempunyai frekuensi antara 1 sampai dengan 10 MHz merupakan contoh dari penggunaan diagnostic ultrasound dalam bidang kedokteran melalui teknik pulsa dan gema. Organ atau struktur lain dalam tubuh dapat dideteksi melalui pulsa bunyi yang mempunyai frekuensi tinggi yang diarahkan ke tubuh dan pantulannya dari batas atau muka dapat terdeteksi. Tumor dan pertumbuhan abnormal lainnya atau kantong cairan dapat dibedakan. Selain itu juga dapat memeriksa perkembangan janin dan memperoleh informasi tentang berbagai organ tubuh seperti otak, jantung, hati, dan ginjal.

3.2 Gelombang dalam Medium Elastis

Gelombang mekanik merambat dalam medium elastis seperti gelombang pada pegas, gelombang pada dawai/tali teregang, dan gelombang bunyi pada zat padat, cair, dan gas. Oleh karena itu, untuk dapat menampung gelombang mekanik diperlukan medium yang bersifat elastis. Medium elastis merupakan medium yang mampu meregang (mengembang) atau memampatkan diri ketika dipengaruhi gaya luar. Ketika pengaruh gaya luar dihilangkan, medium mampu memulihkan keadaannya kembali seperti semula. Gelombang transversal dapat muncul pada dawai yang tegang, bukan pada dawai yang kendur karena dawai yang tegang mampu memulihkan dawai pada keadaan semula saat pengaruh gaya luar dihilangkan.

Laju suatu gelombang berhubungan dengan panjang gelombang dan frekuensinya ($v = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$) tetapi nilainya ditentukan oleh sifat-sifat dari medium. Jika suatu gelombang merambat melewati suatu medium seperti air, udara, baja, atau dawai teregang akan

menyebabkan partikel-partikel medium tersebut bergetar ketika gelombang melewatinya. Agar dapat terjadi maka medium harus memiliki massa (sehingga ada energi kinetik) dan elastisitas (sehingga ada energi potensial). Sehingga massa medium dan sifat-sifat elastisitas menentukan seberapa cepat gelombang dapat merambat pada medium tersebut. Medium elastis yang dibahas pada subbab ini berupa pegas, dawai, dan kolom berupa zat padat, zat cair, dan gas.

3.2.1 Gelombang pada Gas

Cepat rambat gelombang pada pegas hanya bergantung pada karakteristik pegas itu sendiri yang diwakili oleh modulus elastisitas dan rapat massa persatuan panjang pegas. Hal ini menunjukkan bahwa cepat rambat gelombang yang melalui pegas tidak bergantung pada sumber gangguan. Frekuensi sumber gangguan yang berbeda tidak akan menyebabkan perbedaan cepat rambat gelombang pada pegas yang sama. Cepat rambat gelombang pada pegas dapat ditentukan menggunakan persamaan:

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

dengan:

v = cepat rambat gelombang

K = modulus elastisitas pegas; $K = kx_0$

ρ = rapat massa persatuan panjang; $\rho = \frac{m}{x_0}$

3.2.2 Gelombang pada Dawai

Dawai dianggap bersifat lentur yaitu hanya dapat menimbulkan gaya tegangan tangensial dan tidak memiliki kekakuan untuk melawan gaya transversal. Gaya berat dawai dianggap dapat diabaikan karena cukup ringan. Dawai dianggap cukup panjang sehingga efek ujung dapat diabaikan. Selain itu panjang dawai dianggap tidak banyak berubah dan arahnya tak pernah menyimpang jauh dari arah horizontal selama proses gerak gelombang. Cepat rambat gelombang pada dawai bergantung pada tegangan dawai dan massa per satuan panjang. Semakin besar tegangan dawai, semakin nyaring bunyi dawai yang mengakibatkan cepat rambat gelombang semakin besar. Cepat rambat gelombang dalam dawai dapat dinyatakan dengan:

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

dengan:

v = cepat rambat gelombang ; m/s^2

F = tegangan dawai ; N

μ = massa per satuan panjang

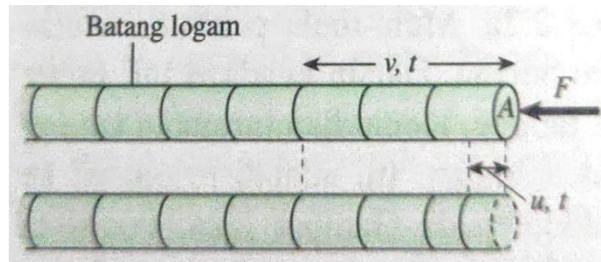
Data dawai dapat diberikan dalam massa jenis, ρ dan luas penampang A sehingga persamaan 3.2 dapat dituliskan:

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{\rho V}{L} = \frac{\rho(AL)}{L} = \rho A$$

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

Berdasarkan persamaan 3.3 diketahui bahwa cepat rambat gelombang pada dawai bergantung pada karakteristik dawai teregang yaitu tegangan dawai dan rapat massa per satuan panjang dawai.

3.2.3 Gelombang pada Kolom Zat Padat



Gambar 3.2: Proses Perambatan Gelombang pada Zat Padat

Untuk menentukan cepat rambat gelombang longitudinal pada zat padat, perhatikan Gambar 3.2. Misalkan gaya luar F diberikan pada ujung sebuah batang dengan luas penampang A sehingga ujung batang bergerak dengan kelajuan u dan menyebabkan suatu pulsa rapatan gelombang bunyi merambat sepanjang batang dengan kelajuan v . Dalam selang waktu t , pulsa menempuh jarak vt dan panjang batang logam termampatkan sebesar ut

$$\text{tegangannya} = \frac{\text{gaya}}{\text{luas}} = \frac{F}{A}$$

$$\text{regangannya} = \frac{\text{pemampatan}}{\text{panjang rapatan}} = \frac{ut}{vt} = \frac{u}{v}$$

Jika bahan logam memiliki modulus Young E , maka:

$$E = \frac{\text{tegangannya}}{\text{regangannya}} = \frac{F/A}{u/v} = \frac{Fv}{Au}$$

$$F = \frac{EAu}{v} \text{ dan } Ft = \left(\frac{EAu}{v}\right)t$$

Perubahan momentum dari massa ke massa sepanjang vt yang mengalami perubahan kecepatan dari 0 ke u merupakan perkalian gaya dengan selang waktu, akan berlaku:

$$Ft = m(v_2 - v_1)$$

$$Ft = m(u - 0) = mu$$

Massa sebuah batang sebesar m sepanjang vt adalah:

$$m = \rho V = \rho (Avt)$$

sehingga: $Ft = mu = \rho Avtu$

dari persamaan $Ft = \left(\frac{EAu}{v}\right)t$ dan $Ft = \rho Avtu$ diperoleh:

$$\left(\frac{EAu}{v}\right)t = \rho Avtu$$

$$\frac{E}{v} = \rho v$$

Berikut persamaan matematis yang menentukan cepat rambat gelombang pada zat padat ditentukan oleh:

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

dengan:

$$v = \text{cepat rambat gelombang} \quad ; \text{ m/s}^2$$

$$E = \text{modulus Young} \quad ; \text{ N/m}^2$$

$$\rho = \text{rapat jenis bahan} \quad ; \text{ kg/m}^3$$

Berdasarkan persamaan 3.4 diketahui bahwa cepat rambat gelombang pada zat padat hanya bergantung pada karakteristik zat padat yaitu modulus Young dan rapat jenis bahan.

3.2.4 Gelombang pada Kolom Zat Cair

Seperti halnya batang logam, zat cair bersifat elastis sehingga hubungan antara gaya dengan perubahan volume dapat dinyatakan melalui hukum Hooke seperti pada batang logam. Persamaan matematis untuk cepat rambat gelombang longitudinal yang merambat pada medium zat cair:

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

dengan:

$$\begin{aligned} v &= \text{cepat rambat gelombang} && ; \text{ m/s} \\ B &= \text{modulus Bulk} && ; \text{ N/m}^2 \\ \rho &= \text{rapat jenis zat cair} && ; \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan 3.5 diketahui bahwa cepat rambat gelombang pada zat cair hanya bergantung pada karakteristik zat cair yaitu modulus Bulk dan rapat jenis zat cair.

3.2.5 Gelombang pada Kolom Zat Gas

Perambatan gelombang bunyi di udara dapat dibahas dengan meninjau perambatan gelombang longitudinal pada kolom udara atau gas. Ditinjau kolom gas yang memiliki luas penampang A , dengan rapat massa persatuan volume ρ , dan modulus elastisitas Bulk B . Laplace berasumsi bahwa proses perambatan gelombang pada gas berlangsung secara adiabatik dengan entropi sistem tak berubah. Dalam hal ini maka nilai pV^γ adalah konstan, dengan $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ yang merupakan tetapan perbandingan antara panas jenis gas pada tekanan tetap dan panas jenis gas pada volume tetap ($c_p > c_v$ sehingga $\gamma > 1$).

Untuk proses yang berlangsung secara adiabatik dapat dituliskan $pV^\gamma = \text{konstan}$ sehingga differensiasinya menghasilkan $dpV^\gamma + p\gamma V^{\gamma-1} dV = 0$ yang dapat ditulis dalam bentuk:

$$\frac{dp}{dV} V = -\gamma p$$

Dengan mensubstitusi ke persamaan:

$$B = -V \frac{dp}{dV}$$

Akan diperoleh: $B = \gamma p$

Cepat rambat gelombang longitudinal pada gas dapat ditentukan melalui persamaan:

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

Cepat rambat gelombang pada gas yang dipengaruhi oleh temperatur T dapat diperoleh memanfaatkan hukum Gay-Lussac. Untuk fluida berupa gas yang renggang/ encer berlaku hukum Lussac:

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

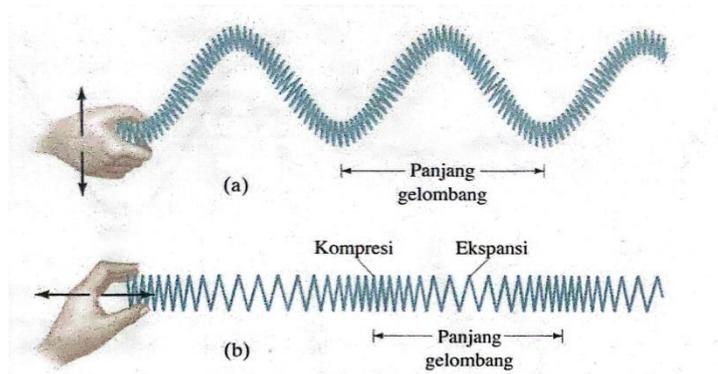
dengan R adalah tetapan umum gas, T adalah temperatur, dan M adalah massa molekul gas. Melalui substitusi persamaan ini ke persamaan 3.6 akan diperoleh cepat rambat gelombang pada gas sebagai fungsi temperatur yaitu:

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

Berdasarkan seluruh pembahasan diatas, dapat diketahui bahwa cepat rambat gelombang melewati suatu medium dapat dinyatakan secara umum sebagai akar dari perbandingan modulus elastisitas terhadap rapat massa medium. Untuk perambatan gelombang pada medium gas, besaran modulus elastisitas merupakan tegangan dawai.

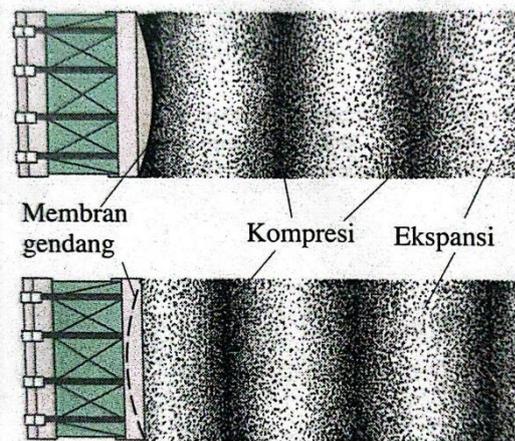
3.3 Gelombang Bunyi di Udara

Gelombang bunyi merupakan gelombang longitudinal yang getaran partikel medium adalah sepanjang arah gerak gelombang. Gelombang longitudinal dapat segera terbentuk pada pegas atau slinky yang dibentangkan dengan cara bergantian mengkompresikan dan mengekspansi salah satu ujungnya (Gambar 3.3). Kompresi dan ekspansi sesuai dengan puncak dan lembah pada gelombang transversal.



Gambar 3.3: Perbedaan Gelombang Transversal dan Longitudinal. (Giancoli, 2005)

Contoh dari gelombang longitudinal adalah gelombang bunyi di udara. Tinjau sebuah drumhead yang bergetar, secara bergantian mengkompresikan dan mengekspansi udara yang berkontak dengannya menghasilkan gelombang longitudinal yang bergerak menyebar di udara (Gambar 3.4).



Gambar 3.4: . Produksi Gelombang Suara yang Bersifat Longitudinal. (Giancoli, 2005)

Setiap bagian dari medium dimana gelombang longitudinal lewat akan beresilasi dalam jarak yang sangat kecil sedangkan gelombang longitudinal dapat melakukan perjalanan dengan jarak yang jauh. Panjang gelombang adalah jarak antara kompresi berurutan atau antara ekspansi berurutan. Frekuensi adalah jumlah kompresi yang melewati suatu titik tertentu per detik. Cepat rambat adalah kecepatan dimana masing-masing kompresi tampak bergerak ($v = \lambda f$). Contoh lain dari gelombang bunyi adalah ketika dua batu saling dipukulkan di bawah air dapat didengar oleh perenang dibawah permukaan air karena getaran dibawa oleh air ke telinga. Ketika menempatkan telinga ke tanah, dapat mendengar kereta atau truk yang mendekat. Walaupun telinga tidak menempel ke tanah tetapi tanah mentransmisikan gelombang longitudinal sehingga menyebabkan telinga luar dan udara di dalamnya bergetar.

Pada medium yang berbeda, maka cepat rambat gelombang bunyi juga akan berbeda. Pada suhu standar dan tekanan 1 atm, cepat rambat gelombang bunyi adalah 331 m/s. Tabel 3.1 menyajikan jenis medium dan cepat rambat gelombang bunyi. Temperatur cukup memengaruhi nilai cepat rambat gelombang bunyi, khususnya gas. Misalnya, pada temperatur suhu kamar untuk udara, akan berlaku peningkatan kecepatan sebesar 0,6 m/s tiap derajat Celcius. Hal ini dapat dinyatakan secara matematis, sebagai berikut:

$$v \approx (331 + 0,6 T) \text{ m/s}$$

dengan T adalah temperatur dalam °C

Tabel 1.1: Cepat Rambat Gelombang Bunyi dalam Medium yang Berbeda

No	Medium	Cepat rambat (m/s)
1	Udara (20°C)	343
2	Udara (0°C)	331
3	Helium	1005
4	Hidrogen	1300
5	Air (0°C)	1402
6	Air (20°C)	1482
7	Air laut	1560
8	Besi dan baja	≈ 5000
9	Kaca	≈ 4500
10	Aluminium	≈ 5100
11	Kayu keras	≈ 4000
12	Beton	≈ 3000
13	Baja	≈ 5941
14	Granit	≈ 6000

Titi nada dan kenyaringan (desah) merupakan 2 jenis pengelompokkan bunyi yang terdengar jelas bagi manusia. Kenyaringan atau desah merupakan intensitas sedangkan titi nada merupakan tinggi/rendahnya intensitas bunyi seperti bunyi biola, bass drum, dan sebagainya. Intensitas suatu gelombang bunyi pada suatu permukaan adalah rerata laju energi tiap satuan luas yang berpindah mengikuti gelombang melewati atau ke permukaan. Interval intensitas bunyi yang dapat didengar manusia antara 10^{-12} sampai 1 W/m^2 . Intensitas dapat ditentukan melalui persamaan:

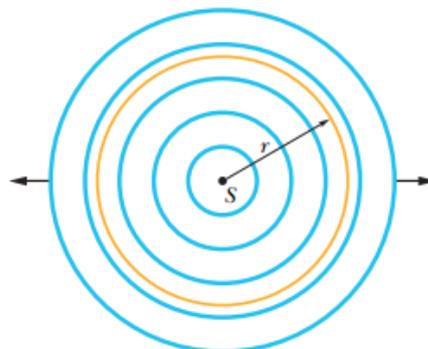
$$I = \frac{P}{A}$$

Di mana:

I = Intensitas bunyi dengan satuan W/m^2

P = daya dengan satuan W

A = luas permukaan dengan satuan m^2



Gambar 3.5: Sebuah Sumber Titik S Memancarkan Gelombang Bunyi dengan Seragam ke Semua Arah. (Halliday and Resnick, 2011)

Intensitas bervariasi terhadap jarak. Dengan mengasumsikan bahwa sumber bunyi adalah suatu sumber titik yang memancarkan bunyi secara isotropis yaitu dengan intensitas yang sama ke semua arah. Muka gelombang menyebar dari suatu sumber titik isotropis S seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5. Asumsi

berikutnya adalah energi mekanik gelombang bunyi adalah kekal ketika dipancarkan dari sumber tersebut. Asumsikan pula, bola khayal dengan jejari r berpusat pada sumber. Semua energi dipancarkan oleh sumber harus melewati permukaan bola. Oleh karena itu, laju energi dipindahkan melewati permukaan oleh gelombang bunyi harus sama dengan laju energi dipancarkan oleh sumber. Sehingga intensitas pada bola diperoleh melalui:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

dengan: $4\pi r^2$ adalah luas permukaan bola

Dari persamaan 3.9 diketahui bahwa intensitas bunyi dari suatu sumber titik isotropis menurun dengan kuadrat jarak r dari sumber.

Tingkat intensitas bunyi ditentukan pada skala logaritmik karena rentang intensitas yang dapat didengar manusia adalah 10^{12} . Pertimbangkan hubungan:

$$y = \log x$$

dengan x dan y adalah variabel-variabel. Sifat dari persamaan tersebut adalah, jika mengalikan x dengan 10, maka y meningkat sebesar 1. Dapat dituliskan:

$$y' = \log(10x) = \log 10 + \log x = 1 + y$$

dengan cara yang sama, jika mengalikan x dengan 10^{12} , y meningkat sebesar 12. Sehingga tingkat bunyi dapat ditentukan melalui:

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

dengan:

β = tingkat bunyi dengan satuan dB (decibel)

I = intensitas bunyi dengan satuan W/m^2

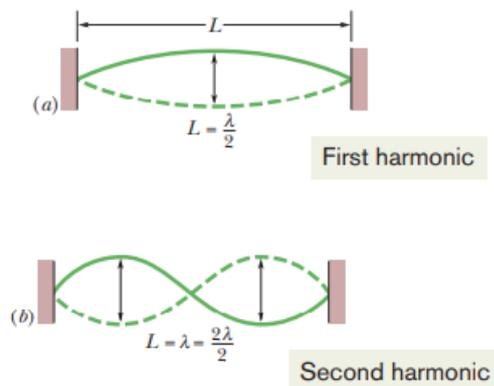
I_0 = intensitas acuan standar dengan satuan 10^{-12} W/m^2

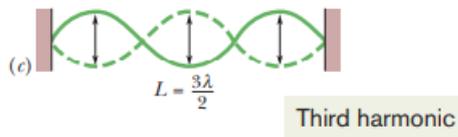
3.4 Sumber-sumber Bunyi

Sumber bunyi adalah objek yang bergetar. Pada subbab ini, sumber bunyi yang dibahas adalah pada alat musik yaitu alat musik berdawai dan alat musik tiup.

3.4.1 Alat Musik Berdawai

Dasar untuk semua alat musik berdawai adalah gelombang stationer. Titinadanya ditentukan oleh frekuensi resonansi terendah yaitu frekuensi fundamental atau harmonic pertama yang berkaitan dengan simpul-simpul yang terjadi hanya dibagian ujung. Dawai yang bergetar ke atas dan ke bawah secara keseluruhan berkaitan dengan setengah panjang gelombang seperti pada Gambar 3.6. Gelombang tegak muncul karena gelombang merambat sepanjang dawai dipantulkan kembali ke dawai pada tiap ujungnya.





Gambar 3.6: Sebuah Dawai Diregangkan antara Dua Jepitan, Dibuat Bergetar dalam Model Gelombang Tegak. (Halliday and Resnick, 2011)

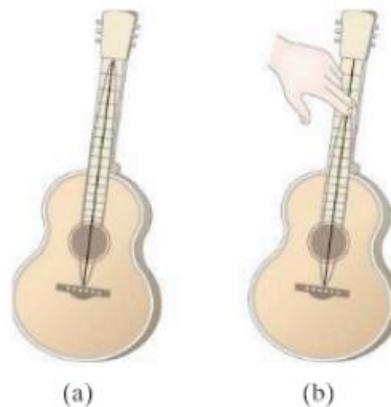
L merupakan jarak antara dua jepitan dan ujung dawai terikat serta tidak dapat bergetar sehingga membentuk simpul. Pada Gambar 3.6a, terbentuk satu antsimpul yang berada di tengah dawai. Pada dawai sepanjang L terbentuk setengah panjang gelombang. Untuk pola ini, $\frac{1}{2} \lambda = L$ atau $\lambda = 2L$. Pada Gambar 3.6b, memiliki tiga simpul dan dua antsimpul dan dikatakan menjadi model dua putaran (*loop*). Untuk pola ini, $\lambda = L$. Pada Gambar 3.6c, memiliki empat simpul, tiga antsimpul, dan tiga loop. Untuk pola ini, $\lambda = \frac{2}{3} L$. Untuk mendapatkan nilai λ pada tingkat selanjutnya dapat mengikuti persamaan:

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

Frekuensi yang berkaitan dengan panjang gelombang tersebut adalah:

$$f = \frac{v}{\lambda} = n \frac{v}{2L} \quad ; n = 1, 2, 3, \dots$$

Frekuensi resonan adalah kelipatan bilangan bulat dari frekuensi resonan terendah f_1 yang berkaitan dengan $n = 1$. Mode osilasi dengan frekuensi terendah tersebut f_1 adalah frekuensi fundamental atau harmoni pertama. Harmoni kedua ketika $n = 2$, harmoni ketiga ketika $n = 3$, dst. Frekuensi-frekuensi yang terasosiasi dengan mode ini disebut f_1, f_2, f_3 , dst. Frekuensi tersebut dinamakan **deret harmoni** dan n dinamakan **bilangan harmoni** dari harmoni ke- n .



Gambar 3.7: Panjang dari Dawai yang Tidak ditekan dan ditekan. (Giancoli, 2005)

Ketika jari ditekankan pada dawai gitar atau biola, panjang efektif dawai yang bergetar itu diperpendek. Jadi frekuensi fundamentalnya dan titinadanya lebih tinggi karena panjang gelombang fundamentalnya lebih pendek (Gambar 3.7). Dawai-dawai pada gitar atau biola semua sama panjang. Mereka memperdengarkan nada yang berbeda karena masing-masing dawai memiliki massa yang berbeda persatuan panjang, $\mu = m/L$ yang mempengaruhi kecepatan pada dawai. Cepat rambat pada dawai dapat ditentukan menggunakan persamaan:

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

dengan:

v = cepat rambat pada dawai ; m/s

F = gaya tegang dawai ; N

μ = massa persatuan panjang

3.4.2 Alat Musik Tiup

Alat-alat musik seperti alat musik tiup kayu, alat musik tiup logam, dan organ pipa menghasilkan bunyi dari getaran gelombang stasioner pada kolom udara di dalam tabung/pipa. Ketika gelombang bunyi merambat melewati udara di dalam pipa, mereka dipantulkan di tiap ujung dan merambat kembali melewati pipa. Pemantulan terjadi bahkan jika salah satu ujungnya terbuka tetapi pemantulan tidak seutuh ketika ujungnya tertutup. Jika panjang gelombang dari gelombang bunyi sesuai dengan panjang pipa, superposisi gelombang merambat dalam arah yang berlawanan sepanjang pipa menghasilkan suatu model gelombang tegak. Panjang gelombang yang diperlukan gelombang bunyi untuk kesesuaian tersebut berkaitan dengan frekuensi resonan pipa.

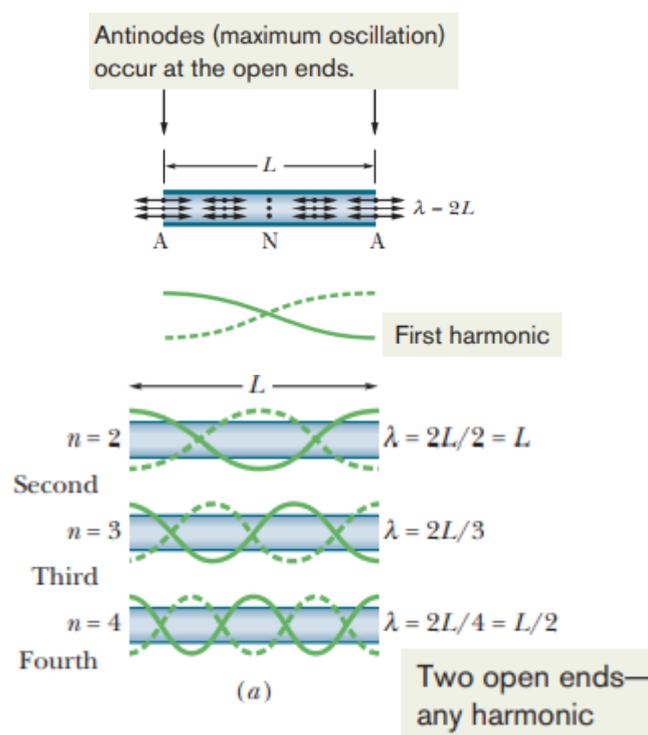
Ujung pipa yang tertutup seperti ujung terikat pada dawai dimana harus ada satu simpul dan ujung terbuka pada pipa seperti ujung dawai yang diikatkan pada cincin yang bebas bergerak dimana harus ada satu antisimpul disana. Model gelombang tegak pada pipa terbuka (dua ujung terbuka) dapat dilihat pada Gambar 3.8.

Terdapat sebuah anti simpul di setiap ujung terbuka dan sebuah simpul di titik tengah pipa. Pada harmoni pertama, $L = \frac{1}{2} \lambda$ sehingga $\lambda = 2L$. Harmoni kedua memerlukan $\lambda = L$, harmoni ketiga memerlukan $\lambda = 2L/3$, dst. Untuk tingkat harmoni selanjutnya, panjang gelombang dapat ditentukan menggunakan persamaan:

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

dengan n disebut bilangan harmoni. Frekuensi resonan untuk pipa dengan kedua ujungnya a ditentukan dengan persamaan:

$$f = \frac{v}{\lambda} = n \frac{v}{2L} \quad ; n = 1, 2, 3, \dots$$



Gambar 3.8: Model Gelombang Tegak Pada Pipa Terbuka. (Halliday and Resnick, 2011)

Gambar 3.9 menunjukkan model gelombang bunyi tegak pada pipa dengan hanya satu ujungnya terbuka. Di setiap ujung tertutup ada satu simpul. Model paling sederhana memerlukan gelombang bunyi dengan panjang gelombang yang diberikan oleh $L = \frac{1}{4} \lambda$ sehingga $\lambda = 4L$. Model selanjutnya memerlukan panjang

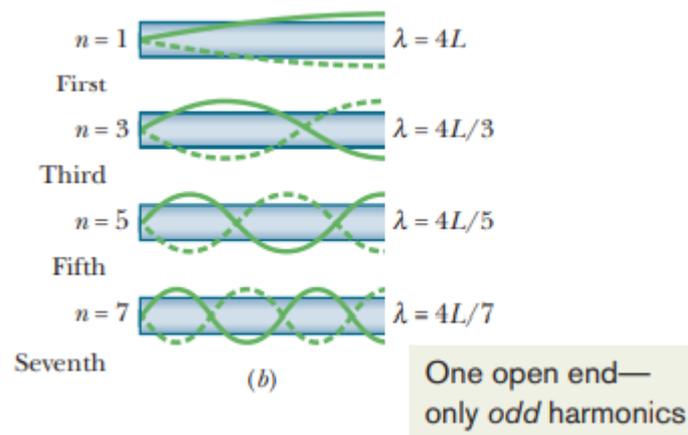
gelombang yang diberikan oleh $L = \frac{3}{4} \lambda$ sehingga $\lambda = \frac{4}{3} L$, dst. Panjang gelombang pada pipa ujung tertutup (salah satu ujung terbuka) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\lambda = \frac{4L}{n} \quad ; n = 1, 3, 5, \dots$$

dengan n harus bilangan ganjil

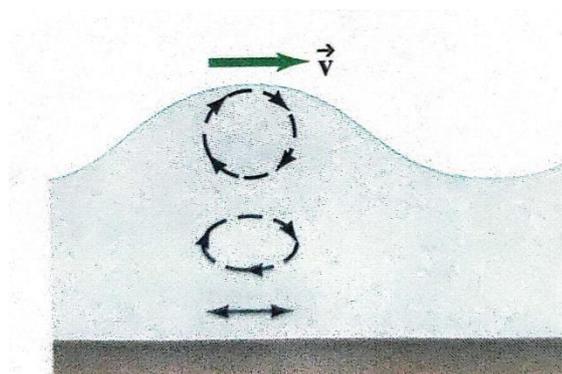
Frekuensi resonan dapat ditentukan dengan persamaan:

$$f = \frac{v}{\lambda} = n \frac{v}{4L} \quad ; n = 1, 3, 5, \dots$$



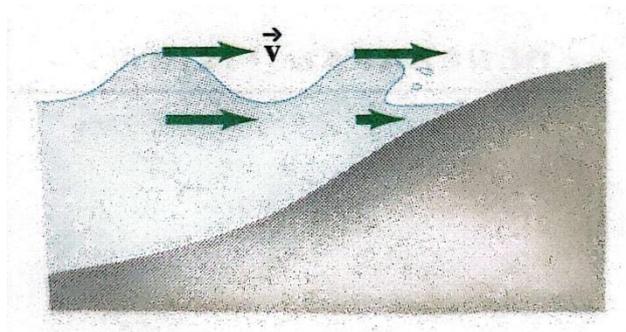
Gambar 3.9: Model gelombang tegak pada pipa tertutup (salah satu ujung terbuka). (Halliday and Resnick, 2011)

3.5 Gelombang Permukaan Air



Gambar 3.10: Gelombang Air Dangkal Adalah Contoh Gelombang Permukaan. (Giancoli, 2005)

Gelombang transversal dan longitudinal dapat dihasilkan ketika gempa terjadi. Gelombang transversal yang berjalan melalui Bumi disebut gelombang S (shear atau geser) dan gelombang longitudinal disebut gelombang P (pressure atau tekanan). Gelombang transversal dan longitudinal dapat melakukan perjalanan melalui benda padat karena atom atau molekulnya dapat bergetar di sekitar posisi relative tetap mereka ke segala arah. Tetapi hanya gelombang longitudinal yang dapat merambat melalui cairan karena setiap gerakan longitudinal tidak akan mengalami gaya pemulih karena cairan bersifat mudah dideformasi.



Gambar 3.11: Bagaimana Gelombang Air Memecah. (Giancoli, 2005)

Terdapat pula gelombang permukaan yang berjalan di sepanjang batas antara dua bahan. Sebuah gelombang di air merupakan gelombang permukaan yang bergerak pada batas antara air dan udara. Gerakan setiap partikel air di permukaan adalah melingkar atau elips (Gambar 3.10) sehingga merupakan kombinasi gerakan horizontal dan vertikal. Dibawah permukaan, juga terdapat gerakan horizontal ditambah vertikal. Di bagian bawah, gerakannya hanya horizontal. Ketika gelombang mendekati pantai, air terseret di bagian bawah dan melambat. Sementara puncaknya bergerak maju pada kecepatan yang lebih tinggi dan “tumpah” melampaui tepi atas (Gambar 3.11).

3.6 Energi dan Momentum Gelombang

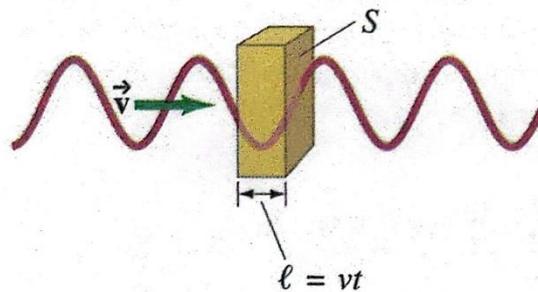
Gelombang membawa energi dari satu tempat ke tempat lain. Seiring gelombang melakukan perjalanan melalui medium, energinya dipindahkan sebagai energi getaran dari partikel ke partikel dalam medium tersebut. Untuk gelombang sinusoidal berfrekuensi f , partikel bergerak dalam GHS seiring gelombangnya berlalu sehingga setiap partikel memiliki energi $E = \frac{1}{2} kA^2$ dengan A adalah amplitudo. Dari persamaan tersebut diketahui bahwa energi yang diangkut oleh gelombang sebanding dengan kuadrat amplitudonya.

Melalui persamaan $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ dapat dituliskan k dalam konteks frekuensi menjadi: $k = 4\pi^2 mf^2$, dimana m adalah massa partikel atau volume kecil dari medium. Maka:

$$E = \frac{1}{2} kA^2 = 2\pi^2 mf^2 A^2 \tag{3.18}$$

Massa $m = \rho V$, dimana ρ adalah densitas medium dan V adalah volume dari sepotong kecil medium seperti ditunjukkan pada Gambar 3.12. Volume $V = Sl$, dimana S adalah luas permukaan melintang melalui mana gelombang berjalan. l sebagai jarak gelombang berjalan selama waktu t sebagai $l = vt$, dimana v adalah laju gelombang. Sehingga dapat dituliskan $m = \rho V = \rho Sl = \rho Svt$. Persamaan 3.18 dapat ditulis menjadi:

$$E = 2\pi^2 \rho Svtf^2 A^2 \tag{3.19}$$



Gambar 3.12. Menghitung Energi yang Dibawa oleh Sebuah Gelombang yang Berjalan dengan Kecepatan v . (Giancoli, 2005)

3.7 Pemaknaan Nilai-Nilai Al Islam dalam Dinamika dan Energetika Gelombang

... mereka tidak menunggu melainkan satu teriakan saja yang akan membinasakan mereka ketika mereka sedang bertengkar (QS. Yaasin: 49)

... dan ditiuplah sangkakala maka tiba-tiba mereka keluar dengan segera dari kuburnya (menuju) kepada Tuhan mereka (QS. Yaasin: 51)

Berdasarkan QS. Yaasin ayat 49, satu teriakan itu adalah suara atau gelombang bunyi yang dapat membuat manusia binasa. Tiupan sangkakala oleh malaikat Israfil yang pertama kalinya mampu menghancurkan bumi, membuat porak-poranda karena gelombangnya bersifat destruktif. Gelombang bunyi yang maha dahsyat itu akan membinasakan makhluk-makhluk di atas nya. Berdasarkan QS. Yaasiin ayat 51, bahwa tiupan sangkakala yang kedua ini dapat membangkitkan manusia yang ada di dalam kuburnya. Dalam Al Hadist disebutkan bahwa jarak tiupan sangkakala adalah 40, apakah 40 tahun, 40 bulan, 40 hari, 40 jam, 40 menit, atau 40 detik, Wallahu a'lam.

Berdasarkan kedua ayat, dapat dinyatakan terdapat sebuah peristiwa resonansi. Peristiwa ikut bergetarnya suatu benda ketika benda lain bergetar disebut resonansi. Adanya frekuensi yang sama dengan sumber getarnya merupakan syarat terjadinya resonansi. Hancurnya bumi seisinyansaot malaikat Israfil meniup sangkakala merupakan contoh peristiwa resonansi. Orang-orang di dalam kubur akan bangkit disebabkan karena frekuensi yang dihasilkan sama dengan frekuensi sumber getar.

Beberapa alat musik yang memiliki kolom udara yang memanfaatkan prinsip resonansi pada gelombang bunyi, contohnya seruling, gitar, biola, dan sebagainya. Bunyi yang dihasilkan akan jauh lebi keras karena udara dalam kolom udara pada alat musik tersebut bergetar. Prinsip resonansi yang diterapkan dalam alat musik akan menguntungkan, sebaliknya ada beberapa persoalan yang muncul akibat adanya resonansi:

1. Jembatan gantung yang roboh di Selat Tacoma (resonansi merusak bangunan).
2. Gelas akan pecah apabila dekat dengan alat musik atau sound yang keras (resonansi merusak benda).

3.8 Ringkasan

- Gelombang mekanik merupakan gelombang yang memerlukan medium dalam perambatannya. Cepat rambat gelombang dalam medium ditentukan oleh massa medium dan sifat-sifat elastisitas
- Cepat rambat gelombang pada pegas dapat ditentukan menggunakan persamaan:

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

- Cepat rambat gelombang dalam dawai dapat dinyatakan dengan:

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

- Cepat rambat gelombang pada zat padat dapat ditentukan menggunakan persamaan:

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

- Cepat rambat gelombang longitudinal pada zat cair dapat ditentukan menggunakan persamaan:

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

- Cepat rambat gelombang pada gas sebagai fungsi temperatur yaitu:

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

- Intensitas suatu gelombang bunyi pada suatu permukaan adalah laju rata-rata energi per satuan luas yang dipindahkan oleh gelombang melewati atau ke permukaan. Intensitas dapat ditentukan melalui persamaan:

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

- Tingkat bunyi dispesifikasikan pada skala logaritmik dan ditentukan dengan persamaan:

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

- Frekuensi pada alat musik berdawai dapat ditentukan melalui persamaan:

$$f = \frac{v}{\lambda} = n \frac{v}{2L} \quad ; n = 1, 2, 3, \dots$$

- Model gelombang tegak pada alat musik tiup dapat dibedakan menjadi pipa terbuka dan pipa tertutup (salah satu ujungnya terbuka)
- Gelombang membawa energi dari satu tempat ke tempat lain tanpa membawa materi. Besarnya energi gelombang dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$E = \frac{1}{2} kA^2 = 2\pi^2 m f^2 A^2$$

3.9 Latihan Soal

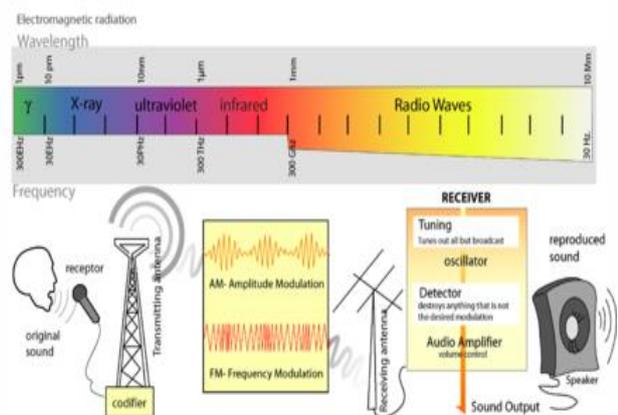
1. Sebuah dawai yang teregang memiliki massa per satuan panjang sebesar 5 g/cm dan tegangan sebesar 10 N. Sebuah gelombang sinusoidal pada dawai ini memiliki amplitudo sebesar 0,12 mm dan frekuensi sebesar 100 Hz dan merambat pada arah sumbu x negative. Jika persamaan gelombang itu berbentuk $y(x,t) = y_m \sin(kx \pm \omega t)$. Tentukan:
 - a. y_m
 - b. k
 - c. ω
 - d. apakah pilihan yang benar untuk tanda positif/negatif di depan ω ?
2. Berapakah modulus Bulk oksigen jika 32 g oksigen mengisi ruang sebesar 22 L dan laju bunyi di dalam oksigen adalah 317 m/s?
3. Sebuah sumber memancarkan gelombang-gelombang bunyi secara isotropik. Intensitas gelombang-gelombang tersebut pada jarak 2,5 m dari sumber adalah $1,91 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$. Dengan mengasumsikan bahwa gelombang-gelombang itu tidak mengalami kehilangan energi, tentukan daya sumber
4. Laju gelombang pada dawai adalah 97 m/s. Jika frekuensi gelombang stationernya adalah 75 Hz, seberapa jauh dua simpul yang berurutan?
5. Sebuah pipa organa A, yang terbuka kedua ujungnya memiliki frekuensi dasar 300 Hz. Gelombang harmonik ketiga dari pipa organa B, yang terbuka salah satu ujungnya saja memiliki frekuensi yang sama dengan harmonik kedua pipa organa A. Berapakah panjang pipa A dan B?
6. Dua gelombang gempa yang frekuensinya sama bergerak menyusuri bagian yang sama dari Bumi, tetapi yang satu membawa energi 5 kali lebih besar. Berapa rasio amplitudo dari kedua gelombang tersebut?

Bab 4

Modulasi Gelombang

4.1 Fenomena Modulasi Gelombang

Pernahkah Anda membayangkan perjalanan gelombang? Dengan memperhatikan gambar di samping tentu akan dapat disimak rumitnya perjalanan gelombang radio sampai bisa didengar oleh pemirsanya. Nah, mari kita perdalam lebih lanjut mengenai apa itu modulasi gelombang.



Gambar 4.1: Perjalanan Gelombang Radio (Wikipedia, 2021)

Perubahan gelombang secara periodik yang menjadi sinyal sehingga mampu membawa informasi dinamakan modulasi. Pada prinsipnya, modulasi akan terjadi jika informasi dapat dimasukkan ke dalam suatu gelombang pembawa berupa gelombang sinusoidal dengan frekuensi tinggi. Pada kajian modulasi gelombang ini akan terbagi menjadi:

4.2 Representasi Gelombang dengan Deret Fourier

Suatu deret yang mengandung sinus dan cosinus untuk merepresentasikan fungsi periodik secara umum dinamakan deret Fourier. Deret ini umumnya digunakan untuk membantu menyelesaikan persamaan diferensial, yaitu persamaan diferensial biasa maupun parsial. Dalam kajian ini, deret Fourier akan digunakan untuk menyelesaikan persamaan gelombang satu dimensi. Newman, Dirichlet, dan Robin merupakan bentuk persamaan diferensial yang mempunyai 3 kondisi.

Sebuah fungsi periodik terhadap ialah jumlah tidak terhingga dari gelombang sinusoidal, yang dapat dinyatakan $x_p(t)$, dan periode awal T_0 :

Fungsi periodik dapat dirumuskan secara matematis: $x_p(t) = x_p(t + T_0)$
 4.1)

Persamaan Deret Fourier nya dapat dinyatakan:

$$x_p(t) : \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \tag{4.2}$$

a_n, b_n : koefisien Fourier

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x_p(t) dt$$

(4.3)

$$a_n = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x_p(t) \cos n \omega_0 t dt$$

di mana nilai $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

$$b_n = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x_p(t) \sin n \omega_0 t dt$$

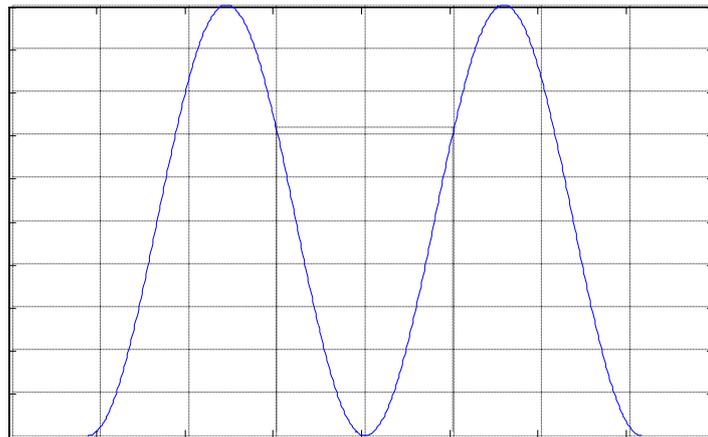
di mana nilai $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

4.2.1 Sifat-Sifat Simetri

1. Fungsi Genap

Fungsi genap dapat dinyatakan sebagai $f(t)$ yang memenuhi:

$$f(t) = f(-t) \text{ untuk masing-masing } t \tag{4.6}$$



Gambar 4.2: Fungsi Genap. (Wikipedia, 2002)

$$\int_{-a}^a f(t) dt = 2 \int_0^a f(t) dt$$

contoh:

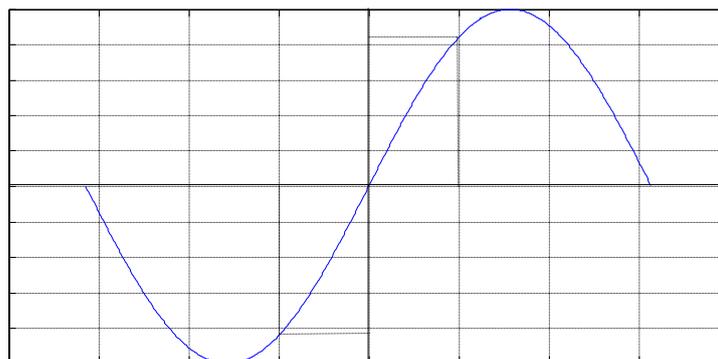
$$f(t) = \cos t$$

$$f(t) = t^2 \tag{4.7}$$

2. Fungsi Ganjil

Fungsi ganjil dapat dinyatakan sebagai $f(t)$ yang memenuhi:

$$f(t) = -f(-t) \tag{4.8}$$



Gambar 4.3: Fungsi Ganjil. (Wikipedia, 2002)

$$\int_{-a}^a f(t) dt = 0$$

contoh:

$$\sim f(t) = \sin t$$

$$\sim f(t) = t$$

3. Perkalian Antar Fungsi

Perkalian antar fungsi genap menghasilkan fungsi genap.

Perkalian antar fungsi ganjil menghasilkan fungsi genap.

Perkalian fungsi genap dikalikan dan fungsi ganjil menghasilkan fungsi ganjil.

4. Aplikasi Deret Faurier pada Sifat Simetri

Misal :

$$f(t) = x_p(t) \cos n \omega_0 t$$

$$g(t) = x_p(t) \sin n \omega_0 t$$

- a. Fungsi genap yang dinyatakan sebagai $x_p(t)$, maka: $f(t)$ merupakan perkalian antar fungsi genap yang menghasilkan fungsi genap:

$$\int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt = 2 \int_0^{T/2} f(t) dt$$

$g(t)$ merupakan perkalian fungsi genap dan fungsi ganjil yang menghasilkan fungsi ganjil:

$$\int_{-T/2}^{T/2} g(t) dt = 0$$

Perkalian persamaan ... dengan persamaan 4.5:

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} x_p(t) \cos n \omega_0 t dt \quad ; n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots \quad (4.10)$$

$$b_n = 0 \quad ; n = 1, 2, \dots$$

- b. Fungsi ganjil yang dinyatakan sebagai $x_p(t)$, maka $f(t)$ merupakan perkalian fungsi ganjil dan fungsi genap menghasilkan fungsi ganjil:

$$\int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt = 0$$

$g(t)$ merupakan perkalian fungsi ganjil dengan fungsi ganjil yang menghasilkan fungsi genap:

$$\int_{-T/2}^{T/2} g(t) dt = 2 \int_0^{T/2} g(t) dt$$

Perkalian persamaan 4.4 dan 4.5 menghasilkan:

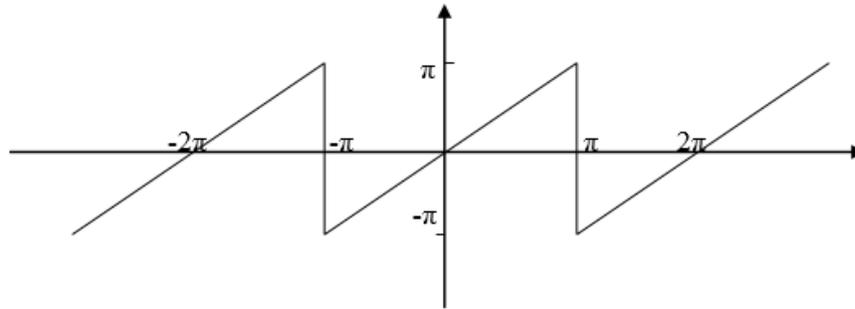
$$a_n = 0 \quad ; n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots \quad (4.12)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} x_p(t) \sin n \omega_0 t dt \quad ; n = 1, 2, \dots \quad (4.13)$$

5. Simetri dari Setengah Gelombang

Simetri setengah gelombang akan dipenuhi apabila dalam fungsi berlaku:

$$f(t + T/2) = -f(t) \text{ untuk masing-masing } t \tag{4.14}$$



Gambar 4.4: Fungsi Simetri dari Setengah Gelombang. (Wikipedia, 2002)

Berdasarkan keadaan ini, persamaan 4.4 dan 4.5 menghasilkan:

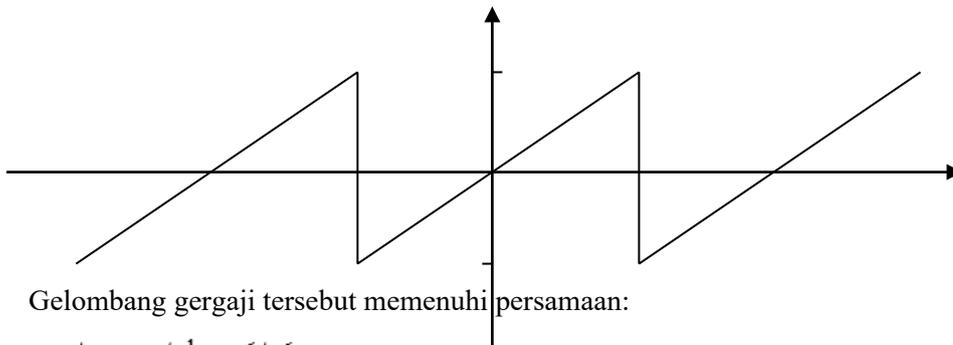
$$a_n = 0 ; \text{ untuk } n = 2, 4, 6, 8, \dots$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} x_p(t) \cos n \omega_0 t dt \quad \text{untuk } n = 1, 3, 5, 7, \dots \tag{4.15}$$

$$b_n = 0, \text{ untuk } n = 2, 4, 6, 8, \dots$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} x_p(t) \sin n \omega_0 t dt \quad \text{untuk } n = 1, 3, 5, 7, \dots \tag{6}$$

Contoh Soal



Gelombang gergaji tersebut memenuhi persamaan:

$$f(t) = t \quad \text{untuk } -\pi < t < \pi$$

$$f(t+2\pi) = f(t)$$

f(t) adalah fungsi ganjil, akan berlaku:

$$a_n = 0 ; n = 0, 1, 2, \dots$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} x_p(t) \sin n \omega_0 t dt ; n = 1, 2, 3, \dots$$

$$T = 2\pi \quad \text{à } \omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2\pi} = 1$$

$$b_n = \frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi/2} t \sin n t dt$$

$$\int t \sin bt dt = \frac{1}{b^2} \sin bt - \frac{t}{b} \cos bt + c$$

$$\cos(-bt) = \cos(bt)$$

Sehingga diperoleh:

$$b_n = \frac{\cos n\pi}{n}$$

berlaku untuk n genap:

$$\cos n\pi = 1 \quad \rightarrow \quad b_n = -\frac{1}{n}$$

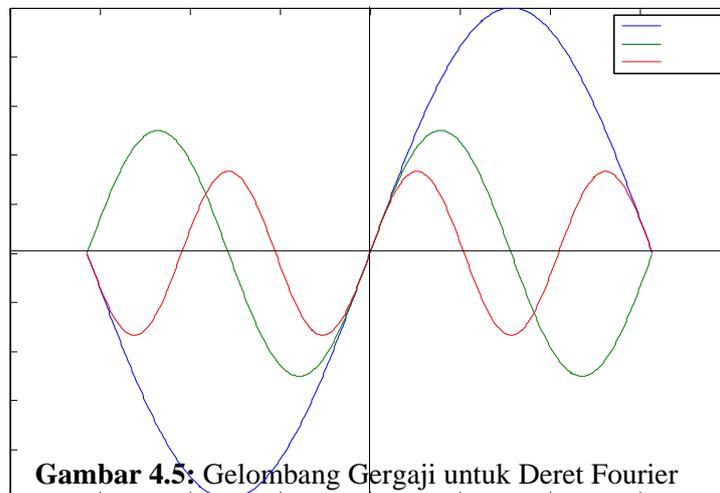
~ untuk n ganjil:

$$\cos n\pi = -1 \quad \rightarrow \quad b_n = \frac{1}{n}$$

dapat diperoleh persamaan :

$$f(t) = a_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t)$$

$$= 2 \left(\frac{\sin t}{1} - \frac{\sin 2t}{2} + \frac{\sin 3t}{3} - \dots \right)$$



Gambar 4.5: Gelombang Gergaji untuk Deret Fourier

4.2.2 Deret Faourier Eksponensial

Harmonisasi dari frekuensi dasar dari sinyal merupakan deret Fourier eksponensial jenis kompleks yang mengandung seluruh komponen frekuensi yang menggambarkan respon frekuensi.

Persamaan Euleur sebagai berikut:

$$\cos n \omega_0 t = \frac{1}{2} (e^{jn\omega_0 t} + e^{-jn\omega_0 t})$$

$$\sin n \omega_0 t = \frac{1}{2j} (e^{jn\omega_0 t} - e^{-jn\omega_0 t})$$

(4.17)

Substitusi persamaan Euleur ke dalam persamaan (4.2) menghasilkan:

$$\begin{aligned}
 x_p(t) &= a_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \\
 &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n - jb_n)e^{jn\omega_0 t} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n + jb_n)e^{-jn\omega_0 t}
 \end{aligned}$$

\uparrow \uparrow
 pasangan konjugasi kompleks

dimana:

$$\sum_{n=1}^{\infty} (a_n + jb_n)e^{-jn\omega_0 t} = \sum_{n=-\infty}^{-1} (a_n - jb_n)e^{jn\omega_0 t}$$

Misal, c_n , merupakan koefisien nilai kompleks yang mempunyai hubungan:

$$c_n = \begin{cases} a_n - jb_n & \text{untuk } n > 0 \\ a_0 & \text{untuk } n = 0 \\ a_n + jb_n & \text{untuk } n < 0 \end{cases} \quad (4.20)$$

Persamaan 4.18 akan diubah menjadi Deret Fourier Eksponensial Kompleks, sebagai berikut:

$$x_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0 t} \quad (4.21)$$

dimana:

$$c_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x_p(t) e^{-jn\omega_0 t} dt; \quad n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (4.22)$$

Komponen frekuensi negatif dan fungsi dasar nilai kompleks $e^{jn\omega_0 t}$ yang merupakan gambaran matematis secara utuh sinyal periodik dan tidak memiliki arti secara fisis. Jika c_n merupakan bilangan kompleks, maka dinyatakan persamaan matematis secara umum:

$$c_n = |c_n| e^{j(\arg c_n)} \quad (4.23)$$

di mana, akan berlaku

- (i) $|c_n|$ komponen amplitudo harmonik ke n dari sinyal $x_p(t)$. Spektrum amplitudo diskrit merupakan hasil perkalian plot terhadap frekuensi.
- (ii) $\arg(c_n)$: sudut fasa yang terbentuk dari c_n . Plot c_n terhadap frekuensi yang menghasilkan spektrum fasa diskrit.

Fungsi periodik dengan nilai nyata dinyatakan sebagai $x_p(t)$, berdasar persamaan (4.22) akan

diperoleh: $c_{-n} = c_n^*$ yaitu konjugasi daribilangan kompleks c_n

$$\begin{aligned} |c_{-n}| &= |c_n| && \text{dikatakan simetri, fungsi genap dari } n \\ \arg(c_{-n}) &= -\arg(c_n) && \text{akan asimetri, fungsi ganjil dari } n \end{aligned} \quad (4.25)$$

4.3 Gelombang Pembawa dan Gelombang Modulasi

Untuk mengirimkan informasi dengan jarak yang jauh melalui udara berupa gelombang sinusoidal disebut sebagai gelombang pembawa atau carrier wave. Mempunyai nilai frekuensi yang lebih dari pada sinyal pembawa yang mengirim informasi merupakan gelombang pembawa atau disebut gelombang radio. Pada saat mengirimkan isyarat melalui pemancar, gelombang radio lewat udara atau bahan tertentu, sehingga isyarat dapat diterima pesawat penerima.

Modulasi amplitudo (AM) dan modulasi frekuensi (FM) merupakan jenis modulasi pengiriman isyarat radio siaran. Gelombang pembawa mempunyai peran penting dalam siaran pada FM maupun AM. Ragam Single-Sideband Modulation (SSB) merupakan pengiriman isyarat berbentuk gambar dengan menggunakan Vestigial-Sideband Modulation (VSB). Handy talky merupakan salah satu contoh komunikasi gelombang radio melalui modulasi SSB.

Terjadinya pembangkitan frekuensi harmonik yang melebar disebabkan karena adanya gelombang pembawa yang dimodulasikan oleh pemancar. Arti makna melebar ialah memiliki banyak sumbu frekuensi. Untuk menghemat lebar-pita atau bandwidth, maka pada modulasi SSB dan VSB berlaku frekuensi gelombang pembawa dan frekuensi harmonik sebagian besar ditekan atau ditapis. Supaya tidak terjadi frekuensi bocor atau terperangkap ke dalam peralatan elektronik yang lainnya, maka frekuensi harmonik harus dihilangkan.

Suara Surabaya yang mempunyai frekuensi 100.00 FM, sebenarnya merupakan frekuensi dari gelombang pembawa yang dipakai. Adanya perizinan resmi dari instansi telekomunikasi, merupakan bentuk legalitas karena gelombang pembawa radio tidak asal sembarangan digunakan, pihak berwenang misalnya Direktorat Jenderal Pos dan Telekomunikasi Indonesia.

Seiring perkembangan zaman dan kecanggihan teknologi, gelombang pembawa radio tidak lagi terlihat karena penggunaan metode spektrum yang tersebar dan pita ultra yang lebar serta COFDM. Beberapa teknologi terakhir digunakan dalam pengiriman siaran televisi dengan menggunakan HDTV.

4.3.1 Modulasi Amplitudo dan Modulasi Frekuensi

Proses pengiriman informasi yang mana sinyal pembawa berubah terhadap sinyal pemodulasi atau sinyal informasi disebut modulasi. Sinyal video, sinyal audio, atau sinyal yang lainnya merupakan bentuk dari sinyal informasi.

Modulator merupakan alat yang digunakan dalam proses modulasi. Proses yang mengirimkan data pada gelombang pembawa menuju pesan atau sinyal informasi supaya dapat dikirimkan kepada penerima lewat media seperti kabel/ udara, di mana gelombangnya berbentuk sinusoidal dinamakan modulator. Perubahan gelombang pesan baseband menjadi gelombang passband merupakan peran modulasi gelombang sinusoidal. Demodulator merupakan penerjemah atau pembaca hasil modulasi. Untuk membaca data dari sinyal pengirim atau mendapatkan kembali data merupakan fungsi dari demodulator, yang merupakan kebalikan dari fungsi modulator. Sinyal pesan sebaiknya dipisah dari sinyal pembawa dengan frekuensi

tinggi merupakan prinsip dari demodulasi. Perangkat yang menggunakan fungsi modulator dan demodulator dinamakan modem yaitu modulator demodulator.

Modulasi berdasarkan parameter sinyal yang diubah dikelompokkan menjadi 3 jenis, yaitu:

1. Modulasi Amplitudo

Modulasi amplitudo atau Amplitude Modulation (disingkat AM). Prinsip dari modulasi amplitudo ini ialah sinyal informasi atau sinyal pemodulasi mampu mengubah amplitudo sinyal pembawa, sehingga besar sinyal amplitudo pemodulasi sebanding dengan amplitudo sinyal pembawa.

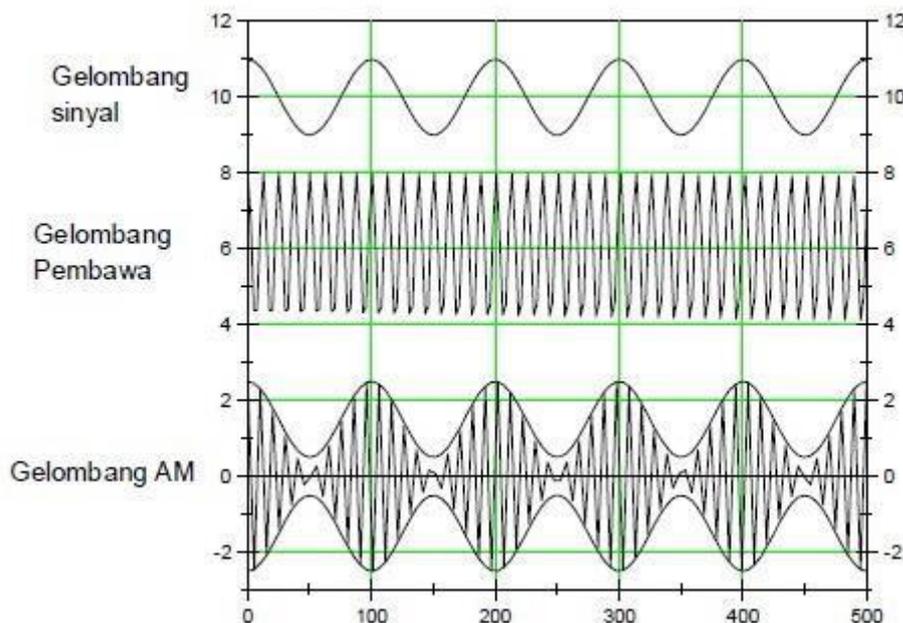
2. Modulasi Frekuensi

Modulasi frekuensi atau Frequency Modulation (disingkat FM). Prinsip modulasi frekuensi, sinyal informasi atau sinyal pemodulasi mengubah frekuensi sinyal pembawa, sehingga besar frekuensi dari sinyal pembawa sebanding amplitudo dari sinyal pemodulasi.

3. Modulasi Fasa

Modulasi fasa atau Phase Modulation (disingkat PM). Prinsip dari modulasi fasa ini ialah sinyal informasi atau sinyal pemodulasi mampu mengubah fasa sinyal pembawa, sehingga besar fasa dari sinyal pembawa sebanding amplitudo dari sinyal pemodulasi.

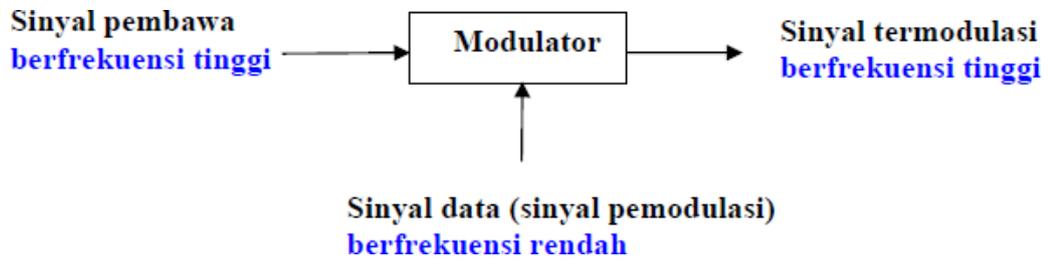
Pengiriman sinyal informasi kepada sinyal pembawa, di mana perubahan amplitudo sinyal informasi diikuti oleh amplitudo sinyal pembawa yang dinyatakan sebagai modulasi amplitudo. Memiliki jarak transmisi lebih jauh merupakan kelebihan AM dibanding dengan FM, tetapi AM lebih sering bising (noise) dibanding FM. Itulah yang menyebabkan banyak stasiun radio FM karena suara yang dihasilkan lebih jernih yang melalui transmisi.



Gambar 4.6: Modulasi AM. (Aureliya, 2017)

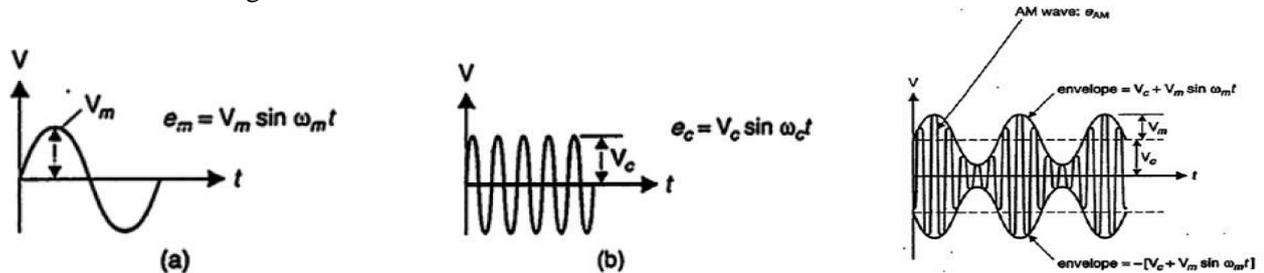
Berdasarkan ilustrasi gambar 4.6, nilai amplitudo dari sinyal pembawa yang diubah sebanding nilai amplitudo dari sinyal pemodulasi, hal ini berlaku pada modulasi amplitudo. Frekuensi sinyal pemodulasi umumnya lebih rendah dari pada frekuensi sinyal pembawa. Rentang frekuensi audio antara 20 Hz sampai dengan 20kHz merupakan frekuensi sinyal pemodulasi. Rentang frekuensi tengah antara 300kHz sampai dengan 3 MHz merupakan frekuensi sinyal

pembawa yang berupa sinyal radio. Berikut akan diilustrasikan modulasi dengan sinyal sinusoidal:



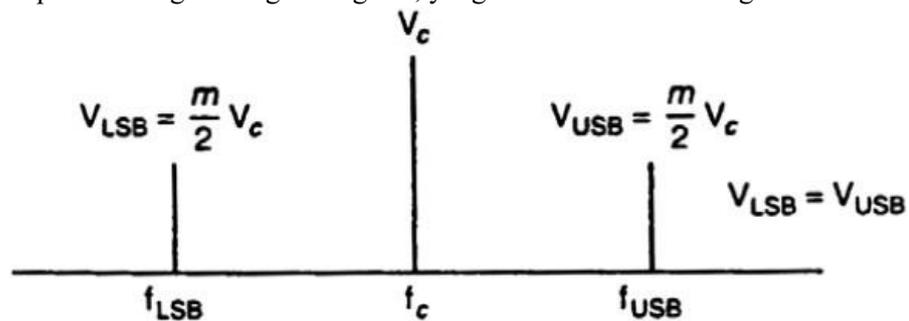
Gambar 4.7: Ilustrasi Modulasi Sumber: evalidat.in

Sinyal informasi atau pemodulasi, sinyal pembawa, dan sinyal yang dapat dimodulasi dapat dilihat dari ilustrasi gambar 4.8, berikut:



Gambar 4.8: (a) Sinyal pemodulasi (informasi) (b) Sinyal pembawa (c) Sinyal termodulasi dari AM

Spektrum frekuensi dari gelombang yang dapat dimodulasi AM yang dihasilkan oleh penganalisa spektrum dapat diilustrasikan pada gambar 4.9. Harga mutlak menyatakan harga dari amplitudo pada masing-masing bidang sisi, yang diilustrasikan sesuai gambar 4.9:

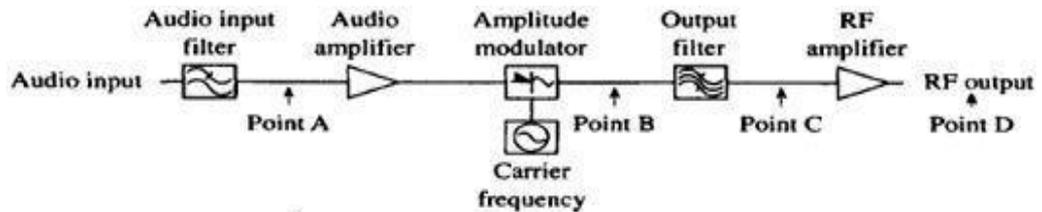


Gambar 4.9: Spektrum Frekuensi Sinyal Termodulasi AM . (Gunawan, 2019)

Berikut merupakan pembagian dari modulasi amplitudo:

1. Modulasi amplitudo yang spektrum frekuensinya AM yang terpancar yang meliputi frekuensi LSB (*Lower Sideband*) atau frekuensi USB (*Upper Sideband*) saja dinamakan AM SSB (*Single Sideband*).
2. Modulasi amplitudo yang spektrum frekuensinya terpancar semuanya yaitu frekuensi USB dan LSB, sehingga *bandwidth* dari sinyal modulasinya sebanyak dua kalinya sinyal informasi yang dinamakan AM DSBFC (*Double Sideband Full Carrier*).
3. Modulasi amplitudo yang spektrum frekuensi pembawanya ditekan sampai menuju angka nol dinamakan AM DSBSC (*Double Sideband Suppressed Carrier*).
4. Modulasi amplitudo yang digunakan di industri pertelevisian komersial melalui transmisi dan penerimaan sinyal video, berlaku komponen LSB yang ditransmisikan dengan komponen USB dan komponen pembawanya yang dinamakan AM VSB (*Vestigial Sideband*).

Berdasarkan pengelompokan modulasi amplitudo, hal yang paling mendominasi adalah *sideband*. Pada setiap proses modulasi terdapat komponen yang selalu ada yaitu *sideband*. Misalnya *sideband* LSB atau USB saja yang ditransmisikan oleh AM SSB. Transmisi *sideband* terjadi di semua sistem. Proses yang terjadi pada transmisi *sideband* dapat diilustrasikan sebagai berikut:



Gambar 4.10: Proses Transmisi di Sideband. (Gunawan, 2019)

Berdasarkan gambar 4.10, tampak pertama *audio input* memasuki *audio input filter*. Pada *audio input filter* terjadi pemfilteran sebuah sinyal masukan yang diperoleh sinyal yang frekuensinya di bawah 3.400 Hz, selanjutnya sinyal memasuki *audio amplifier* supaya sinyal amplitudo menjadi kuat, sinyal memasuki amplitudo modulator, dengan demikian terjadilah suatu proses modulasi yaitu pengiriman sinyal informasi menuju sinyal pembawa. Sinyal yang dapat dimodulasi memasuki *oufit filter*, yang akan *difilter* untuk memperoleh sinyal AM yang satu *sideband*, yaitu LSB atau USB.

4.4 Pemaknaan Nilai-Nilai Al Islam dalam Modulasi Gelombang

Maka Kami menundukkan angin kepadanya untuk berhembus dengan lembut, di mana pun ia diarahkan. (QS. Shad: 36)

Berdasarkan QS. Shad ayat 36, sinyal gelombang elektromagnetik akan digunakan dengan berbagai cara yang sama, dalam sebuah sistem radar. Gelombang mikro yang memancarkan frekuensi ke suatu objek selanjutnya akan dipantulkan kembali oleh sinyal yang dibawanya. Hal ini terjadi pada gelombang radio yang meliputi gelombang AM dan FM, di mana banyak dimanfaatkan untuk kepentingan manusia khususnya untuk telekomunikasi.

4.5 Ringkasan

- Proses yang menjadikan sinyal mampu membawa informasi melalui perubahan gelombang secara periodik disebut modulasi gelombang.
- Representasi gelombang melalui deret Fourier:

$$x_p(t) = a_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t)$$
- Gelombang pembawa atau gelombang radio mempunyai frekuensi lebih tinggi dari pada sinyal modulator sebagai pembawa informasi modulasi yang dikirim.
- Modulasi amplitudo (AM), nilai amplitudo dari sinyal pembawa sebanding nilai amplitudo dari sinyal pemodulasi.
- Modulasi frekuensi (FM), nilai frekuensi dari sinyal pembawa sebanding nilai amplitudo dari sinyal pemodulasi.
- Modulasi Fasa, nilai fasa dari sinyal pembawa sebanding nilai amplitudo dari sinyal pemodulasi

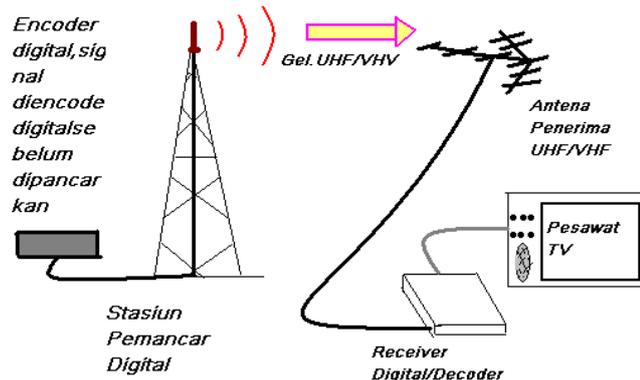
4.6 Latihan Soal

1. Modulasi sinyal audio dari frekuensi maksimum 4 KHz yang dimanfaatkan untuk memodulasi FM dari sinyal pembawa 15 MHz, apabila sinyal pembawa memiliki amplitudo maksimum sebesar 10 Volt dan indeks modulasi sebesar 4, selesaikan persoalan:
 - a. Hitunglah amplitudo dari bidang sisi sinyal dan komponen dari sinyal pembawa yang membentuk modulasi FM!
 - b. Lukislah bentuk spektrum dari frekuensi sinyal yang termodulasi FM!
 - c. Hitunglah lebar dari bidang sisi untuk melakukan transmisi dari sinyal FM!
2. Bandwidth 100 kHz membentang 200-300 kHz. Hitunglah frekuensi pembawa dan rata-rata bit apabila melakukan modulasi data yang menggunakan modulasi ASK dengan nilai $d=1$? memodulasi data dengan menggunakan Modulasi ASK dengan nilai $d=1$?
3. Modulator jenis AM DSBFC yang mempunyai frekuensi pembawa sebesar 100 KHz dan frekuensi sinyal pemodulasi maximum sebesar 5 KHz. Selesaikan persoalan:
 - a. Batas frekuensi dari *upper* dan *lower side band*.
 - b. *Bandwidth*.
 - c. *Upper* dan *lower side* dari frekuensi yang diperoleh saat sinyal pemodulasi yaitu single frekuensi sebesar 3 kHz.
 - d. Lukislah *output* dari spektrum frekuensi.

Bab 5

Gelombang Elektromagnetik

5.1 Fenomena Gelombang Elektromagnetik



Gambar 5.1. Perjalanan Gelombang Elektromagnetik pada Televisi. (Bagus, 2019)

Seperti halnya perjalanan gelombang pada radio, perjalanan gelombang pada televisi juga mempunyai kemiripan. Keduanya merupakan contoh aplikasi gelombang elektromagnetik yang ada di sekitar kita. Selain itu apa saja aplikasi gelombang elektromagnetik yang lainnya? Untuk itu mari kita pelajari konsep gelombang elektromagnetik terlebih dahulu.

5.2 Persamaan Maxwell dalam Listrik Magnet

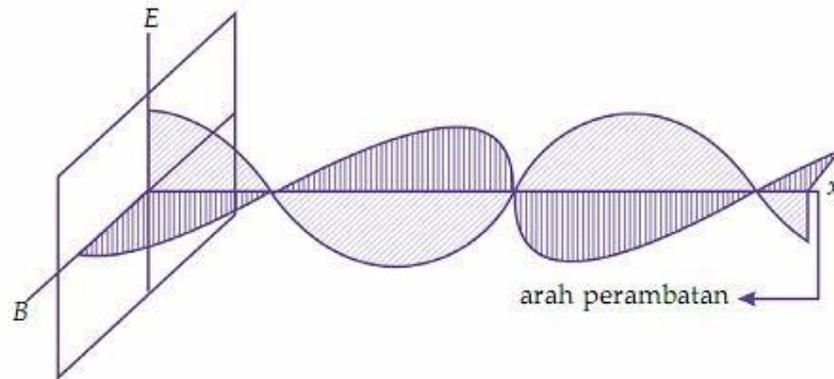
James Clerk Maxwell (1831-1879) pertama kali yang mengemukakan teori gelombang elektromagnetik. Ada 3 aturan dasar dalam listrik magnet yang dihipotesiskan oleh Maxwell, yaitu:

1. Besarnya medan listrik di sekitar dipengaruhi oleh muatan medan listrik di mana mengikuti hukum Coulumb.
2. Besarnya medan magnet di sekitar dipengaruhi oleh arus listrik atau muatan listrik yang nilai dan arahnya mengikuti hukum Bio-Savart yang dikenal dengan nama hukum Ampere.
3. GGL Induksi yang ditimbulkan oleh perubahan medan magnetik akan menghasilkan medan listrik yang mengikuti hukum induksi Faraday.

Maxwell mengemukakan hipotesis: "Karena perubahan medan magnet dapat menimbulkan medan listrik, maka perubahan medan listrik pun akan dapat menimbulkan perubahan medan magnet". Terjadinya gelombang elektromagnetik dijelaskan dalam hipotesis Maxwell ini.

Maxwell mengemukakan bahwa saat terjadi perubahan dari medan listrik yang disimbolkan E , maka akan terjadi pula perubahan dari medan magnet yang disimbolkan B . Perubahan dari medan listrik dan seterusnya disebabkan karena adanya perubahan dari medan magnet. Menurut Maxwell, perubahan medan listrik dan magnet akan memperoleh gelombang medan listrik dan medan magnet yang dapat merambat pada ruang hampa udara. Adanya gelombang medan listrik dan gelombang medan magnet ini yang umumnya dinyatakan sebagai gelombang elektromagnetik.

Gelombang elektromagnetik merupakan gelombang transversal yang nilai besarnya tegak lurus dengan arah rambatnya, yang dapat diilustrasikan sesuai gambar 5.2.



Gambar 5.2: Rambatan gelombang elektromagnetik. (Wikipedia, 2019)

Kecepatan dari gelombang elektromagnetik Maxwell sesuai dengan persamaan matematis berikut:

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

Di mana:

c = kecepatan dari rambatan gelombang elektromagnetik di ruang hampa udara (m/s)

μ_0 = koefisien permeabilitas di ruang hampa udara $4 \pi \times 10^{-7} \text{ N s}^2/\text{C}^2$

ϵ_0 = koefisien permitivitas di ruang hampa udara $8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$

Berdasarkan persamaan matematis tersebut, kecepatan rambatan gelombang elektromagnetik dipengaruhi oleh permitivitas listrik dan permeabilitas magnetik dalam suatu medium. Dengan demikian dapat dinyatakan persamaan matematis kecepatan rambatan dalam suatu medium, sebagai berikut:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}$$

c = kecepatan rambatan dalam suatu medium (m/s)

ϵ = permitivitas suatu medium (Ns^2/C^2)

$2,8 \times 10^8 \text{ m/s}$

μ = permeabilitas suatu medium (C^2/Nm^2)

Contoh Soal 1

Kecepatan rambatan suatu gelombang elektromagnetik sebesar $2,8 \times 10^8 \text{ m/s}$ Hitunglah permeabilitas dari suatu medium, apabila permitivitas medium sebesar $12,76 \times 10^{-7} \text{ wb/Am}$ Diketah

ui:

$c =$

$2,8 \times 10^8 \text{ m/}$

s

$\epsilon = 12,76 \times 10^{-7} \text{ wb/Am}$

Ditanya: μ ...

Jawab:

Berlaku Persamaan Maxwell:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}$$

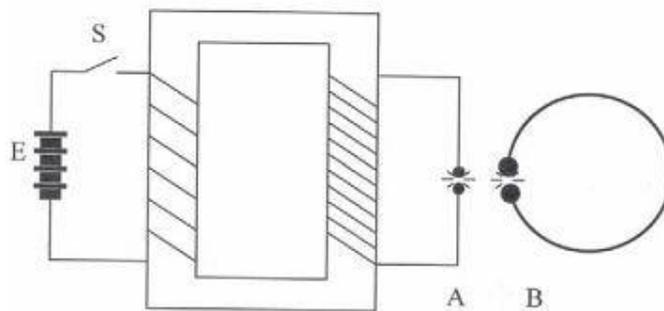
$$\mu = \frac{1}{c^2 \epsilon} = \frac{1}{(2,8 \times 10^8)^2 (12,76 \times 10^{-7})}$$

$$\mu = 2,7 \times 10^{-3} \text{ wb/Am}$$

Jadi, nilai permeabilitas gelombang elektromagnetik sebesar $2,76 \times 10^{-3} \text{ wb/Am}$

5.3 Gelombang Elektromagnetik dalam Suatu Medium

Hipotesa teori gelombang elektromagnetik Maxwell belum dapat dibuktikan sampai Maxwell meninggal dunia. Untuk menguji hipotesa Maxwell, Heinrich Hertz pada tahun 1887 menggunakan kumparan Ruhmkorf sesuai ilustrasi gambar 5.3, berikut:



Gambar 5.3: Kumparan Ruhmkorf sebagai pembangkit dan detektor gelombang elektromagnetik

Pada saat sakelar S ditutup, maka tegangan pada kedua elektroda bola besi di bagian A diinduksikan melalui pulsa pada kumparan Rumkorf, sehingga muncul percikan api yang mengindikasikan adanya pelepasan muatan. Percikan api berturut-turut dari elektrode bola bagian A ke B. Pengiriman energi terjadi melalui gelombang elektromagnetik dari titik A atau loop si pengirim ke titik B atau loop si penerima. Selanjutnya, eksperimen Hertz telah mampu membuktikan hipotesa Maxwell bahwa kecepatan rambatan gelombang elektromagnetik sebesar $3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

Berdasarkan hasil eksperimen, gelombang elektromagnetik mempunyai sifat-sifat sebagai berikut:

1. Gelombang transversal di mana rambatan getaran dari medan listrik dan medan magnet tegak lurus terhadap arah rambatnya.
2. Tidak memiliki muatan listrik, sehingga medan listrik atau medan magnet tidak memengaruhi dan tidak membelokkannya.
3. Tidak memiliki massa dan medan gravitasi tidak memengaruhinya.
4. Rambatan gelombang pada lintasan yang membentuk garis yang lurus.
5. Merambat pada ruang yang hampa udara.
6. Mengalami proses pemantulan (refraksi), pembiasan (defraksi), perpaduan (interferensi), penguraian (difraksi), dan pengutuban (polarisasi).
7. Kecepatan rambatan pada ruang yang hampa udara sebesar $3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

5.4 Pemantulan dan Pembiasan Gelombang Elektromagnetik

Gelombang elektromagnetik mempunyai jenis yang beragam, perbedaannya terletak pada frekuensi dan panjang gelombang yang dimiliki. Hubungan antara kecepatan rambatan gelombang, panjang gelombang, dan frekuensi gelombang yang secara matematis dinvatakan:

$$c = \lambda \times f$$

di mana:

c = kecepatan rambatan gelombang (m/s).

λ = panjang gelombang (m).

f = frekuensi gelombang (Hz).

Contoh Soal 2

Kecepatan rambatan gelombang elektromagnetik di ruang hampa udara sebesar 3×10^8 m/s

Hitunglah frekuensi gelombang, apabila panjang gelombang sebesar 30 m!

Diketahui:

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\lambda = 30 \text{ m}$$

Ditanyakan: $f = \dots ?$

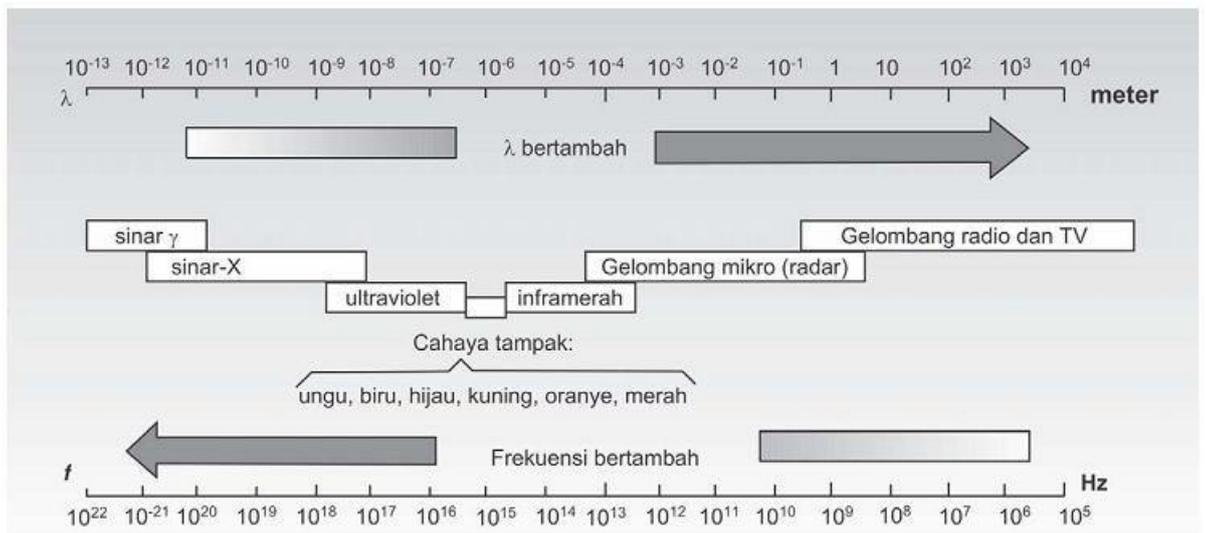
Jawab:

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

$$f = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{30 \text{ m}} = 10^7 \text{ Hertz}$$

Jadi, frekuensi gelombang elektromagnetik sebesar 10^7 Hertz.

Spektrum gelombang elektromagnetik ialah penyusunan secara berurutan yang menyatakan perbedaan antara jarak panjang gelombang dengan frekuensi gelombang.



Gambar 5.4: Spektrum Dari Gelombang Elektromagnetik (Fisikazone.com, 2019)

Apabila diurutkan dari panjang gelombang paling pendek sampai dengan paling panjang dari spektrum gelombang elektromagnetik dinyatakan sebagai berikut:

1. Sinar Gamma (disimbolkan γ)
 - a. Mempunyai frekuensi 10^{20} Hz s.d 10^{25} Hz.
 - b. Berasal dari hasil reaksi dalam inti atom yang tidak stabil.
 - c. Daya tembusnya paling kuat dibandingkan gelombang elektromagnetik yang lainnya.
 - d. Mampu menembus plat besi yang mempunyai ketebalan beberapa cm.
 - e. Timbal (Pb) merupakan penyerap terbaik sinar Gamma.
 - f. Manfaat sinar Gamma di bidang kesehatan, seperti mengobati penderita tumor atau kanker, dengan sumber radiasi Cobalt-60 (ditulis Co-60). Detektor sinar Gamma di antaranya Geiger-

Muller dan sintilasi NaI-Tl.

2. Sinar X (dikenal dengan nama sinar Rontgen)
 - a. Penemu sinar X ialah Wilhem Conrad Rontgen tahun 1895, selanjutnya disebut sinar Rontgen.
 - b. Mempunyai frekuensi 10^{16} Hz s.d 10^{20} Hz.
 - c. Berasal dari hasil transisi elektron-elektron di kulit dalam atom.
 - d. Daya tembusnya terbesar yang kedua setelah sinar Gamma.
 - e. Mampu menembus daging manusia.
 - f. Manfaat sinar-X di bidang kesehatan, seperti pengecekan pasien patah tulang, pengecekan barang-barang penumpang pesawat terbang, pengecekan barang-barang (peti kemas) yang akan dikirim dengan kapal laut di pelabuhan.
3. Sinar Ultra Violet (UV atau Ultra Ungu)
 - a. Mempunyai frekuensi 10^{15} Hz s.d 10^{16} Hz.
 - b. Berasal dari hasil transisi elektron-elektron di kulit atom atau molekul.
 - c. Dapat dideteksi menggunakan plat film yang peka terhadap gelombang UV, sebaliknya tidak dapat dilihat secara kasat mata.
 - d. Sumber radiasi alamiah dari sinar UV ialah matahari. Apabila mengenai kulit manusia berdampak tidak baik. Adanya lapisan ozon di atmosfer mampu menyerap sinar UV, sehingga manusia yang ada di bumi terlindung dari sinar UV.
 - e. Manfaat sinar UV digunakan di laboratorium spektroskopi, seperti untuk mengetahui kandungan unsur dalam suatu bahan.
4. Sinar Tampak (sering disebut Cahaya Tampak)
 - a. Cahaya tampak merupakan nama lain dari sinar tampak.
 - b. Mempunyai frekuensi $4,3 \times 10^{14}$ Hz s.d 7×10^{14} Hz.
 - c. Cahaya tampak yang alamiah ialah matahari. Warna merah, jingga/ oranye, kuning, hijau, biru, dan ungu merupakan deretan cahaya tampak yang dapat memantulkan cahaya benda yang kita lihat, sehingga mata kita mampu mengidentifikasi benda yang terlihat tadi.
 - d. Manfaat cahaya tampak ialah melihat indahnya alam, melihat objek dengan kamera, melihat tayangan televisi, dan sebagainya. Selain itu, cahaya tampak banyak digunakan di bidang spektroskopi untuk mengidentifikasi unsur dalam suatu bahan.
5. Sinar Infra Merah (*Infra Red*)
 - a. Berasal dari hasil transisi rotasi pada molekul yang mengalami vibrasi.
 - b. Mempunyai frekuensi di bawah $4,3 \times 10^{14}$ Hz s.d 3 GHz.
 - c. Tidak dapat dilihat secara kasat mata, namun dapat dideteksi dengan menggunakan plat film tertentu yang memiliki kepekaan dengan gelombang infra merah.
 - d. Manfaat sinar infra merah, seperti pesawat udara yang dapat terbang tinggi, satelit yang mampu memotret permukaan bumi, dalam bidang spektroskopi digunakan untuk mengetahui kandungan unsur suatu bahan.
6. Gelombang Radar (Gelombang Mikro atau *microwave*)
 - a. Mempunyai frekuensi pada jangkauan 3 GHz.
 - b. Manfaat gelombang mikro dalam kehidupan sehari-hari, misalnya alat komunikasi, radar (*radio detection ranging*), dan memasak (*microwave*). Gelombang radar di bidang transportasi digunakan untuk membantu memantau lalu lintas pesawat udara di bandara. Dalam bidang pertahanan, gelombang radar digunakan sebagai pelengkap pesawat tempur untuk mendeteksi keberadaan pesawat dari musuh.
7. Gelombang Televisi
 - a. Mempunyai frekuensi lebih tinggi dari pada gelombang radio.
 - b. Tidak dapat dipantulkan oleh lapisan atmosfer bumi dikarenakan gelombang televisi merambat lurus.

- c. Manfaat gelombang televisi, digunakan dalam bidang komunikasi dan siaran.
8. Gelombang Radio
- a. Pemancaran gelombang melalui antena pemancar ke antena penerima.
 - b. Tinggi rendahnya antena menunjukkan luas daerah cakupan dan panjang gelombang yang dihasilkan.
 - c. Gelombang radio tidak dapat secara langsung didengar, tetapi energi gelombang ini harus diubah menjadi energi bunyi oleh pesawat radio sebagai penerima.
Manfaat gelombang radio digunakan untuk pesawat telepon, telepon genggam, dan sebagainya.

5.5 Perpaduan Gelombang Elektromagnetik

Gelombang elektromagnetik membawa energi dalam bentuk medan listrik dan medan magnet. Kita tinjau suatu gelombang elektromagnetik yang menjalar ke arah sumbu x, maka medan listrik dan medan magnet sesaatnya dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$E = E_m \sin(kx - \omega t) \quad B = B_m \sin(kx - \omega t) \quad (5.4)$$

dengan:

E_m = amplitudo medan listrik,

B_m = amplitudo medan magnet,

k = tetapan angka gelombang ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$),

ω = frekuensi sudut, $\omega = 2\pi f$

Maxwell berhasil menemukan hubungan antara amplitudo medan listrik dan amplitudo medan magnet yaitu:

$$E = c B \quad (5.5)$$

dengan:

c = laju perambatan gelombang elektromagnetik di ruang hampa. (3×10^8 m/s).

Suatu gelombang elektromagnetik mempunyai medan listrik dan medan magnet, sehingga gelombang elektromagnetik ini juga membawa tenaga atau rapat energi (besar energi per satuan volume).

Rapat energi listrik dinyatakan sebagai berikut :

$$u_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (5.6)$$

u_e = rapat energi listrik (J/m^3 atau Jm^{-3})

ϵ_0 = permitivitas listrik ($8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$)

E = kuat medan

5.6 Pemaknaan Nilai-Nilai Al Islam dalam Gelombang Elektromagnetik

Dan sungguh, telah kami berikan kepada Daud karunia dari Kami. (Kami berfirman), “ wahai gunung-gunung dan burung-burung ! Bertasbihlah berulang-ulang bersama Daud, dan Kami telah melunakkan besi untuknya”. (QS. Saba :10)

Kami memberikan pemahaman kepada Sulaiman (tentang hukum-hukum yang lebih tepat). Dan kepada masing-masing kami berikan hikmah dan ilmu, dan Kami tundukan gunung-gunung dan burung-burung, semua bertasbih bersama Daud. Dan Kamilah yang melakukannya. (QS. Al-Anbiya: 79)

Maka Kami menundukkan angin kepadanya untuk berhembus dengan lembut, di mana pun ia diarahkan. (QS. Shad: 36)

Ayat-ayat di atas merujuk pada sifat-sifat mulia diberikan pada Nabi Daud as dan Sulaiman as. Mereka dianugerahi ilmu oleh Allah swt. Ilmu ini juga menjadi acuan untuk teknologi radar masa kini, yang bekerja dengan pantulan gelombang elektromagnetik.

Kata ” أُوْبِي ” dalam ayat QS. Saba ayat 10 ‘, diterjemahkan “kembali atau pengulangan suara,” mengingatkan gema berbasis teknologi radar.

Radar merupakan perangkat yang digunakan untuk menentukan lokasi, kecepatan dan arah benda bergerak atau diam, dan bekerja dengan merefleksikan gelombang mikro. Prinsip operasi dari radar beruang mirip dengan pantulan suara. Misalnya, seseorang berteriak di lembah atau gua, mendengar suaranya sendiri yang dipantulkan kembali kepadanya. Jika kita tahu bagaimana cepatnya perjalanan suara melalui udara, kita dapat menghitung jarak dan arah umum dari objek yang memantul.

5.7 Ringkasan

- Gelombang elektromagnetik adalah perubahan medan listrik dan perubahan medan magnetik ini menghasilkan gelombang medan listrik dan gelombang medan magnetik yang dapat merambat di ruang hampa.
- Arah getar dan arah rambat gelombang medan listrik dan medan magnetik saling tegak lurus (dapat dilihat pada Gambar berikut) sehingga gelombang elektromagnetik termasuk gelombang transversal.
- Gelombang elektromagnetik mempunyai jenis yang beragam, perbedaannya terletak pada frekuensi dan panjang gelombangnya.
- Spektrum gelombang elektromagnetik diurutkan mulai panjang gelombang paling pendek sampai paling panjang yaitu sinar Gamma, sinar X, sinar ultra violet, cahaya tampak, sinar infra merah, gelombang mikro, gelombang televisi, dan gelombang radio.
- Suatu gelombang elektromagnetik mempunyai medan listrik dan medan magnet, sehingga gelombang elektromagnetik ini juga membawa tenaga atau rapat energi (besar energi per satuan volume).

5.8 Latihan Soal

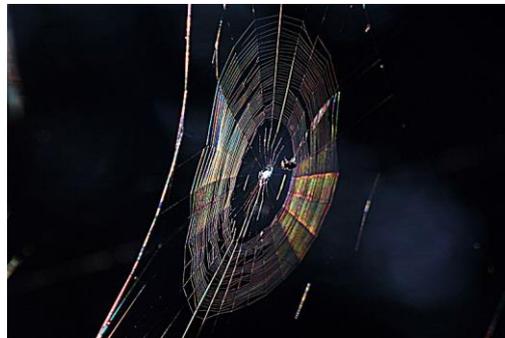
1. Gelombang elektromagnetik dalam suatu medium memiliki kelajuan $2,8 \times 10^8$ m/s. Jika permitivitas medium $12,76 \times 10^{-7}$ Wb/Am, tentukanlah permeabilitas medium tersebut!
2. Tentukan besarnya energi yang terkandung dalam suatu sinar dengan panjang gelombang 132 nm!
3. Sebuah radar mendeteksi sebuah benda. Jika sinyal yang dipancarkan dan kembali lagi ditangkap oleh radar membutuhkan waktu 0,2 sekon, tentukan jarak benda tersebut ke radar!

Bab 6

Optika Fisis

6.1 Fenomena Optika Fisis

Pernahkah melihat jaring laba-laba? Jerat cahaya dari jaring laba-laba ini bukanlah suatu kebetulan, melainkan untuk menarik mangsa untuk mendekat. Jaring laba-laba umumnya kuat dan lengket, yang lebih tinggi dari kekuatan baja. Hasil penelitian menunjukkan beberapa serangga seperti lalat, lebah, nyamuk terjerat di jaring laba-laba tersebut. Kemampuan mangsa yang dapat melihat sinar UV, dimanfaatkan oleh laba-laba.



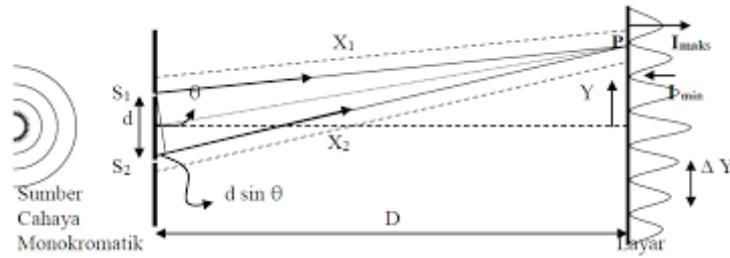
Gambar 6.1: Jaring-jaring Laba-laba. (Wikipedia, 2007)

Perpaduan superposisi dua atau lebih gelombang dalam sebuah ruang di satu titik yang sama dinamakan interferensi. Untuk memperoleh amplitudo yang bergantung pada perbedaan fasenya, maka dua gelombang mempunyai frekuensi dan panjang gelombang yang sama. Interferometer optik ialah alat yang digunakan untuk menghasilkan interferensi dan pola dari panjang lintasan yang berbeda. Interferometer pembagi muka gelombang dan interferometer pembelah amplitudo merupakan pengelompokan interferometer optik.

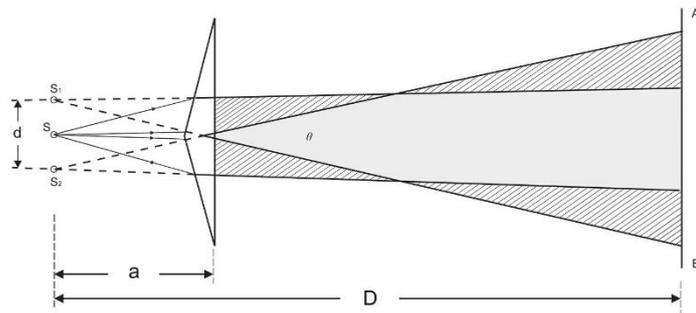
6.2 Interferometer

6.2.1 Interferometer Pembelah Muka Gelombang

Kedua berkas dari gelombang yang saling berinterferensi dari sumber gelombang yang mempunyai posisi awal tanpa mengurangi tingkat intensitas yang umumnya dikenal dengan berkas cahaya yang terbagi menjadi 2 secara geometrisnya merupakan prinsip kerja interferometer pembelah muka gelombang. Peristiwa ini menunjukkan bahwa bagian bawah merupakan berkas cahaya yang berinterferensi, sedangkan bagian atas merupakan berkas cahaya uji. Hal ini senada dengan dua buah gelombang yang serupa yang berasal dari sumber yang sama yang mempunyai intensitas tetap. Interferometer Young yang mempunyai 2 celah, interferometer Young yang mempunyai banyak celah, dan interferometer biprisma Fresnel merupakan contoh interferometer pembelah muka gelombang.



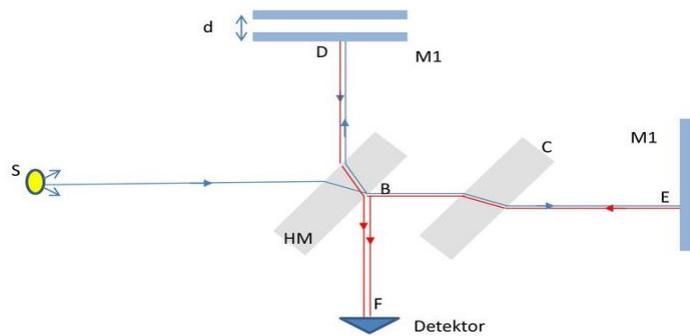
Gambar 6.2: Interferometer Young



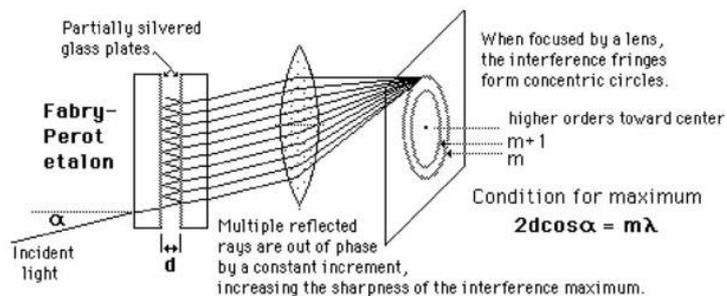
Gambar 6.3: Interferometer Biprisma Fresnel

6.2.2 Interferometer Pembelah Muka Amplitudo

Kedua berkas dari gelombang yang saling berinterferensi yang didapatkan dari membagi intensitas gelombang awal atau cahaya yang terbagi menjadi dua berkas yang sama namun amplitudo yang berbeda merupakan prinsip kerja interferometer pembelah muka amplitudo. Hal ini senada dengan dua gelombang yang sama dengan membagi intensitas awal, yaitu plat pemantul yang sebagian. Interferometer Fabry Perot dan interferometer Michelson merupakan contoh interferometer pembelah muka amplitudo.



Gambar 6.4: Interferometer Michelson



Gambar 6.5: Interferometer Fabry Perot

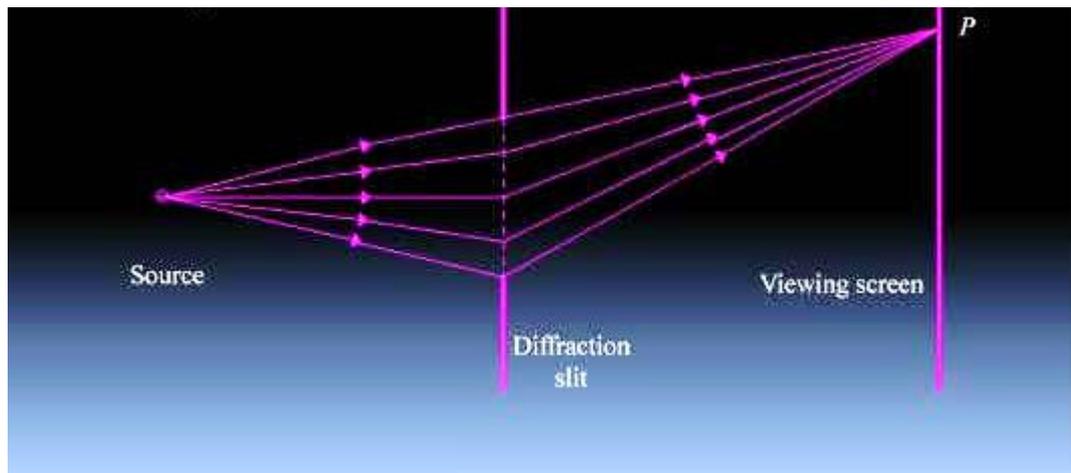
6.3 Difraksi Fresnel

Gelombang dipancarkan dari sumber melalui celah terbatas yang pada saat merambat akan menyebar dinamakan difraksi. Pada gelombang bola dari prinsip Huygens, berlaku tiap titik pada muka gelombang cahaya dinyatakan sebagai sumber sekunder, di mana gelombang ini dapat merambat keluar berdasarkan karakteristik gelombang. Untuk menghasilkan gelombang berjalan, maka gelombang dipancarkan oleh semua titik pada muka gelombang akan saling mengganggu. Prinsip dari Huygens berlaku juga untuk gelombang elektromagnetik.

Gelombang datang akan didifraksikan oleh penghalang di mana terjadinya titik pengamatan dan sumber gelombang dekat dengan lubang dinamakan difraksi Fresnel. Teori difraksi optik mengatakan Fresnel merupakan bilangan F yaitu besaran yang tidak memiliki satuan. Bilangan Fresnel dapat dirumuskan secara matematis sebagai berikut:

$$F = \frac{a^2}{L\lambda}$$

Di mana F ialah bilangan Fresnel dengan tidak ada bilangan, λ ialah sebuah panjang gelombang (m), a ialah ukuran yang mempunyai karakteristik (misalnya diameter, jari-jari, panjang, lebar, tinggi, dan sebagainya) dari sebuah penghalang dan L merupakan jarak yang dari sumber menuju layar. Pembahasan difraksi Fresnel meliputi lubang bulat, celah persegi, penghalang yang mempunyai bentuk seperti piringan, dan penghalang lancip atau tajam.



Gambar 6.6: Difraksi Fresnel Sumber: wikipedia

1. Difraksi Lubang Bulat Fresnel

Permukaan gelombang atau lebih dikenal dengan muka gelombang, dapat dikelompokkan menjadi elemen-elemen yang permukaannya menyerupai cincin berpusat di titik Q , sesuai prinsip Huygens. Permukaan gelombang atau muka gelombang merupakan proyeksi titik P pada bidang S . Supersosisi gelombang yang datang dari setiap cincin dinyatakan gelombang di P .

Zona Fresnel dinyatakan dengan elemen permukaan, dilakukan dengan membuat garis yang melalui r_0 , r_1 , r_2 , dan seterusnya, yang mempunyai beda sebesar $\frac{1}{2} \pi$, dapat dinyatakan secara matematis sebagai berikut:

$$\pi = r_1 - r_0$$

$$\pi = r_2 - r_1, \text{ dan seterusnya}$$

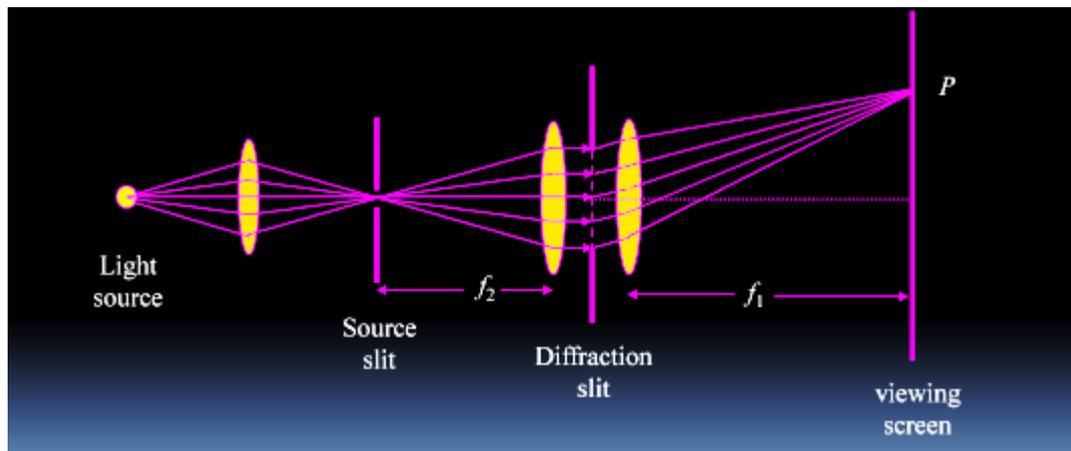
2. Difraksi Piringan Fresnel

Lubang yang mempunyai jari-jari sebesar a selanjutnya diganti dengan piringan, yang kemungkinan ada daerah Fresnel yang ditutupi piringan, dampaknya titik pengamatan pengiriman berkas cahaya yang akan dimulai dari daerah yang tidak ditutupi piringan. Pola-

pola yang dihasilkan oleh difraksi oleh lubang akan serupa dengan pola-pola yang dihasilkan difraksi yang sedang terjadi, namun pusat bayangan geometris yang berada di bagian tengah selalu ada di titik terang, hal ini dikarenakan titik tersebut memperoleh cahaya dari daerah Fresnel yang tidak ditutupi oleh piringan.

6.4 Difraksi Fraunhofer

Letak sumber cahaya dan layar sangat jauh dari celah. Berkas yang masuk dan keluar dari dan ke celah harus sejajar. Difraksi Fraunhofer meliputi difraksi celah tunggal, difraksi lubang bulat, dan difraksi dua celah sempit dengan kisi yang banyak.

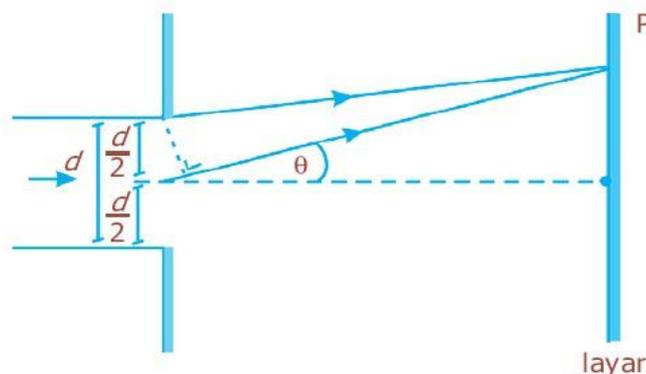


Gambar 6.7.: Difraksi Faunhofer. (Wikipedia, 2018)

Namun, jika sebuah difraksi Fresnel ditempatkan lensa cembung pada sinar yang masuk dan sinar yang keluar dari celah maka sinar akan dianggap sejajar dan disebut sebagai difraksi Faunhofer.

1. Difraksi Fraunhofer Celah Tunggal

Salah satu jenis difraksi Fraunhofer, yaitu difraksi dengan sumber cahaya dan layar penerima berada pada jarak yang tak terhingga dari benda penyebab difraksi, sehingga muka gelombang tidak lagi diperlakukan sebagai bidang sferis, melainkan sebagai bidang datar. Dengan kata lain, difraksi ini melibatkan berkas cahaya yang sejajar.



Gambar 6.8.: Difraksi celah tunggal. (Wikipedia, 2018)

Pada Gambar 6.4 menunjukkan gelombang cahaya dengan panjang gelombang λ didifraksikan oleh celah sempit dengan lebar d . Pola gelap dan pola terang terbentuk ketika gelombang cahaya tersebut mengalami interferensi.

Beda lintasan ke titik P adalah $(d/2) \sin\theta$, dengan θ adalah sudut antara garis tegak lurus terhadap celah dan garis dari pusat celah ke P. Apabila beda lintasan yang terjadi adalah $1/2 \lambda$

maka kedua cahaya (Gambar 6.4) akan saling memperlemah dan menyebabkan terjadinya interferensi minimum sehingga pada layar terbentuk pola gelap.

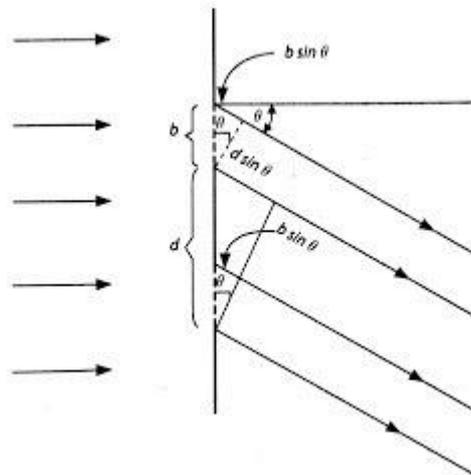
Jadi, pola gelap (difraksi minimum) terjadi jika :

$$d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda ; n = 1, 2, 3 \dots \dots \dots (1)$$

Sementara itu, pola terang (difraksi maksimum) terjadi jika :

$$d \cdot \sin \theta = (n - 1/2) \lambda ; n = 1, 2, 3 \dots \dots \dots (2)$$

2. Difraksi Celah Ganda



Gambar 6.9: Difraksi Celah Ganda. (Wikipedia, 2018)

Kedua celah ini sejajar, identik dan sama-sama berjarak d. Masing-masing celah ini akan menghasilkan pola difraksi, karena itu intensitas pola diperkuat. Gelombang dari kedua celah ini nantinya akan berinterferensi juga. jadi di sini terjadi gabungan antara difraksi celah dengan interferensi dari kedua buah celah. Interferensi masuk dalam pola difraksi sehingga pada suatu tempat terdapat pola interferensi maksimum yang tidak terlihat disebut orde yang hilang.

3. Kisi Difraksi atau Difraksi Celah Majemuk Fraunhofer

Pola interferensi celah ganda young berbentuk garis adalah kurang tajam (terlalu menyebar) sehingga pengukuran panjang gelombang yang diperoleh menjadi kurang teliti. Agar pola interferensi yang dihasilkan pada layar lebih tajam maka digunakan peralatan yang serupa dengan celah ganda young, yang mengandung celah celah paralel yang ukurannya sama dan berjumlah sangat banyak. Peralatan seperti itu disebut kisi. Sebuah kisi sendiri dapat terdiri dari ribuan garis per cm, misalnya sebuah kisi terdiri dari 10.000 garis / cm, maka kisi ini dikatakan memiliki lebar celah d, sehingga $d = \frac{1}{10000}$ cm. jadi, jika N menyatakan banyak garis atau goresan per satuan panjang (misalnya dalam cm) maka lebar celah d adalah kebalikan dari N. secara matematis dapat dinyatakan sebagai :

$$d = \frac{1}{N}$$

di mana :

d = lebar celah

N = banyak garis (goresan) tiap satuan panjang

Dalam kasus kisi difraksi, yang kita amati adalah pola garis – garis terang yang terdapat pada layar. Rumus yang digunakan pada kisi sama saja dengan rumus interferensi pada celah ganda, yaitu kisi mencapai maksimum jika beda lintasan ($d \sin \theta$) sama dengan kelipatan genap ($2n$) dari setengah panjang gelombang. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut :

$$d \sin \theta = (2n) \frac{1}{2} \lambda$$

dimana :

$d \sin \theta$ = beda lintasan

θ = sudut bias (simpang = deviasi) maksimum orde ke-n

d = lebar celah

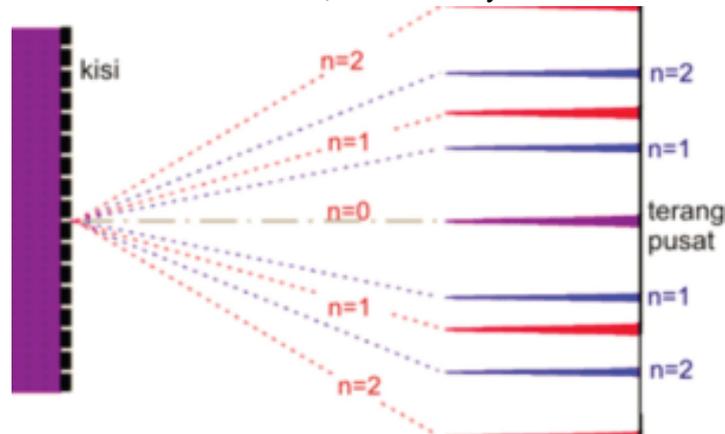
λ = panjang gelombang cahaya

n = orde atau nomor terang (n = bilangan cacah 0,1,2,3, ...)

Untuk $n = 0$, disebut maksimum orde ke nol (terang pusat)

Untuk $n = 1$ disebut maksimum orde ke Satu

Untuk $n = 2$ disebut maksimum orde kedua, dan seterusnya.



Gambar 6.10: Kisi difraksi. (Wikipedia, 2018)

Jika sinar putih (sinar polikromatik) didatangkan pada kisi maka akan terjadi penguraian warna oleh kisi akibat panjang gelombang tiap – tiap komponen warna tidak sama. Spectrum orde ke nol terjadi garis paling terang berwarna putih. Ini terjadi karena semua warna akan bertumpuk pada pusat pola interferensi (terang pusat) akibat dari setiap warna menempuh lintasan yang sama untuk tiba di titik ini. Dengan demikian, semua warna akan mengalami interferensi maksimum (konstruktif) pada titik ini, dan sebagai akibatnya dihasilkan garis paling terang berwarna putih. Spectrum orde pertama akan terdiri atas enam garis, demikian juga dengan spectrum orde lainnya.

Sekarang pertanyaanya, bagaimana cara agar kita dapat memisahkan garis – garis spectrum tersebut lebih jelas? Untuk menjawab pertanyaan ini, kita tinjau persamaan $d \sin \theta = (2n) \frac{1}{2} \lambda$ atau $\sin \theta = \frac{n\lambda}{d}$. Untuk memisahkan garis – garis spectrum lebih jelas, berarti sudut θ harus besar atau $\sin \theta$ besar, sedangkan n dan λ tetap, maka satu – satunya caranya untuk memperbesar sudut θ dengan membuat d sekecil mungkin (sebab $\sin \theta$ berbanding terbalik dengan d). dengan melakukan ini kita dapat memisahkan garis – garis spectrum dengan teliti. Untuk cahaya dengan panjang gelombang tertentu, orde garis yang diamati pada layar terbatas. Orde maksimum yang dapat diamati pada layar diperoleh bila $\sin \theta$ terbesar, yaitu 1. Dengan demikian, orde maksimum yang dihasilkan oleh kisi *difraksi* adalah :

$$d \sin \theta = (2n) \frac{1}{2} \lambda$$

$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{d}$$

Maksimum $\sin \theta = 1$

$$\frac{n\lambda}{d} = 1$$

$$n = \frac{d}{\lambda}$$

karena n bilangan cacah maka harga n bulat terbesar dicapai bila $n \leq \frac{d}{\lambda}$. Misalkan diperoleh $\frac{d}{\lambda} = 4,1$ atau 4,8, maka orde maksimum adalah 4 (bukan 5) karena $n \leq \frac{d}{\lambda}$.

Untuk letak garis terang dari terang pusat p_n pada kasus kisi *difraksi* dapat juga kita tentukan dengan pendekatan $\sin \theta \approx \tan \theta$ untuk θ kecil. Seperti pada kasus celah ganda young. Dengan demikian rumus letak garis terang ke $-n$ dari terang pusat pada kisi *difraksi* dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\begin{aligned} d \sin \theta &= (2n) \frac{\lambda}{2} \\ d (\tan \theta) &= n \lambda \\ d \left(\frac{p_n}{l} \right) &= n \lambda \\ p_n &= \frac{n \lambda \cdot l}{d} \end{aligned}$$

di mana :

p_n = letak garis terang ke $-n$ dari terang pusat

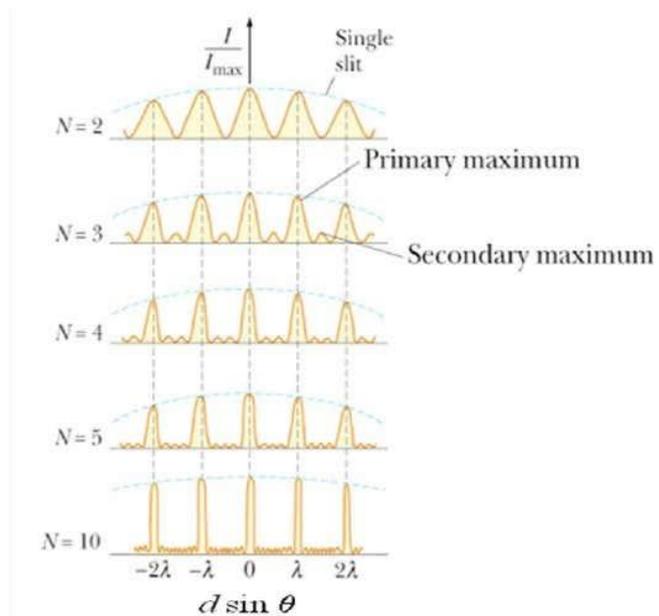
λ = panjang gelombang cahaya

l = jarak celah ke layar

d = lebar celah

n = orde atau nomor terang (n = bilangan cacah 1,2,3, ...)

Pengaruh memperbesar jumlah celah



Gambar 6.11: Diagram pola interferensi. (Suroso, 2018)

Diagram menunjukkan pola interferensi yang dibungkus oleh pita interferensi pusat untuk setiap kasus. Jarak celah sama untuk 5 kasus tersebut. Hal yang penting adalah:

- Posisi angular dari maksimum utama (*primary maxima*) untuk N yang berbeda adalah sama.
- Jumlah maksimum sekunder antara dua maksimum primer meningkat dengan N dan sama dengan $N-2$.
- Intensitas maksimum sekunder melemah dibandingkan maksimum primer.
- Lebar maksimum primer berkurang dengan naiknya N .

6.5 Pemaknaan Nilai-Nilai Al Islam dalam Optika Fisis

6.5.1 Pemaknaan Cahaya

QS An Nur: 35

Allah (pemberi) cahaya (kepada) langit dan bumi. Perumpamaan cahaya-Nya, seperti sebuah lubang yang tidak tembus, yang di dalamnya ada pelita besar. Pelita itu di dalam tabung kaca (dan) tabung kaca itu bagaikan bintang yang berkilauan, yang dinyalakan dengan minyak dari pohon yang diberkahi, (yaitu) pohon zaitun yang tumbuh tidak di timur dan tidak pula di barat, yang minyaknya (saja) hampir-hampir menerangi, walaupun tidak disentuh api. Cahaya di atas cahaya (berlapis-lapis), Allah memberi petunjuk kepada cahaya-Nya bagi orang yang Dia kehendaki, dan Allah membuat perumpamaan-perumpamaan bagi manusia. Dan Allah Maha Mengetahui segala sesuatu.

QS Al Insiyiq: 16

Tuhan Mahakuasa di alam semesta. Maka Aku bersumpah demi cahaya merah pada waktu senja, saat matahari akan terbenam dan cahayanya yang tampak kemerahan masih pendar ke sebagian penjuru langit.

QS Al An'am: 1

Segala puji bagi Allah yang telah menciptakan langit dan bumi, dan menjadikan gelap dan terang, namun demikian orang-orang kafir masih mempersekutukan Tuhan mereka dengan sesuatu.

QS Al An'am:122

Dan apakah orang yang sudah mati lalu Kami hidupkan dan Kami beri dia cahaya yang membuatnya dapat berjalan di tengah-tengah orang banyak, sama dengan orang yang berada dalam kegelapan, sehingga dia tidak dapat keluar dari sana?.

6.5.2 Pemaknaan Pemantulan

QS Nuh:16

Dan di sana Dia menciptakan bulan yang bercahaya dan menjadikan matahari sebagai pelita (yang cemerlang)? Dan di sana di langit yang indah itu Dia menciptakan bulan yang bercahaya dan menjadikan matahari sebagai pelita yang cemerlang?

QS An Naba: 13

Dan bukankah Kami juga telah menjadikan matahari dengan sinarnya yang kuat sebagai pelita yang terang-benderang? Cahayanya yang terang, panasnya yang menyebar, dan bergesernya posisi matahari di langit dari musim ke musim membawa manfaat sangat banyak bagi kehidupan manusia.

QS Al Furqon: 61

Mahasuci Allah yang menjadikan di langit gugusan bintang-bintang dan Dia juga menjadikan padanya matahari dan bulan yang bersinar.

QS Yunus: 5

Dialah yang menjadikan matahari bersinar dan bulan bercahaya, dan Dialah yang menetapkan tempat-tempat orbitnya, agar kamu mengetahui bilangan tahun, dan perhitungan (waktu).

QS Al Kahf: 17

Dan engkau akan melihat matahari ketika terbit, condong dari gua mereka ke sebelah kanan, dan apabila matahari itu terbenam, menjauhi mereka ke sebelah kiri sedang mereka berada dalam tempat yang luas di dalam (gua) itu. Itulah sebagian dari tanda-tanda (kebesaran) Allah.

6.5.3 Pembiasan

QS An Nur: 39

Dan orang-orang yang kafir, amal perbuatan mereka seperti fatamorgana di tanah yang datar, yang disangka air oleh orang-orang yang dahaga, tetapi apabila (air) itu didatangi tidak ada apa pun.

6.5.4 Pemaknaan Indeks Bias

QS Al Qomar: 49

Sungguh, Kami menciptakan segala sesuatu menurut ukuran. Apa yang terjadi pada semua makhluk sudah ditetapkan oleh Allah. Sungguh, Kami menciptakan segala sesuatu menurut ukuran, yaitu suatu sistem dan ketentuan yang telah ditetapkan.

QS Maryam: 94

Dia (Allah) benar-benar telah menentukan jumlah mereka dan menghitung mereka dengan hitungan yang teliti. Semua manusia akan kembali pada Allah dan Dia benar-benar telah mengetahui mereka dengan rinci, bagaimana kepribadian, kejiwaan, perbuatan dan perkataan mereka secara lahir maupun batin.

QS Al Furqon: 2

Yang memiliki kerajaan langit dan bumi, tidak mempunyai anak, tidak ada sekutu bagi-Nya dalam kekuasaan(-Nya), dan Dia menciptakan segala sesuatu, lalu menetapkan ukuran-ukurannya dengan tepat.

6.5.5 Pemaknaan Bayangan

QS An Nahl: 48

Dan apakah mereka tidak memperhatikan suatu benda yang diciptakan Allah, bayang-bayangnya berbolak-balik ke kanan dan ke kiri, dalam keadaan sujud kepada Allah, dan mereka (bersikap) rendah hati.

QS Al Furqon: 65

Sifat berikutnya adalah takut akan siksaan api neraka. Dan orang-orang yang berkata, “Ya Tuhan kami, jauhkanlah azab Jahanam yang sangat pedih itu dari kami, kami sangat takut, karena sesungguhnya azabnya itu membuat kebinasaan yang kekal. ... Sungguh, Jahanam itu seburuk-buruk tempat menetap dan tempat kediaman.”

QS Al Furqon: 46

kemudian Kami menariknya (bayang-bayang itu) kepada Kami sedikit demi sedikit. ... Kemudian Kami menariknya bayang-bayang itu, kepada Kami sesuai dengan kebijakan Kami, sedikit demi sedikit, tidak sekaligus sesuai dengan kecepatan gerakan matahari yang demikian cermat dan terukur.

QS Ar-Rad: 15

Dan semua sujud kepada Allah baik yang di langit maupun yang di bumi, baik dengan kemauan sendiri maupun terpaksa (dan sujud pula) bayang-bayang mereka, pada waktu pagi dan petang hari.

Allah SWT adalah sumber segala cahaya di langit dan di bumi. Dialah yang menerangi keduanya faktor cahaya yang bersifat materiil yang dapat kita lihat dan berjalan di bawah cahayanya. Cahayanya juga ada yang bersifat maknawi seperti cahaya kebenaran, keadilan, pengetahuan, keutamaan, petunjuk dan keimanan. Dia juga menerangi langit dan bumi actor bukti-bukti yang terkandung di dalam alam raya ini dan segala sesuatu yang menunjukkan wujud Allah serta mengajak untuk beriman kepada-Nya. Kejelasan cahaya-Nya yang agung dan bukti-buktinya yang mengagumkan adalah seperti cahaya sebuah lampu yang sangat terang. Lampu itu diletakkan di sebuah celah dinding rumah yang dapat membantu mengumpulkan cahaya dan memantulkannya. Lampu itu berada dalam kaca yang bening dan bersinar seperti matahari, mengkilap seperti mutiara. Bahan bakar lampu itu diambil dari minyak pohon yang banyak berkahnya, berada di tempat dan tanah yang baik, yaitu pohon zaitun. Pohon itu ditanam di tengah-tengah antara timur dan barat yang membuatnya selalu mendapat sinar matahari sepanjang hari, pagi dan sore. Pohon itu bahkan berada di puncak gunung atau di tanah kosong yang yang mendapatkan sinar matahari dalam sehari penuh. Karena teramat jernih, minyak pohon itu seakan menyala, meskipun lampu tersebut tidak disentuh api. Semua tersebut menambah sinar dan cahaya lampu menjadi berlipat ganda. Demikianlah bukti-bukti materi dan maknawi yang terpancar di alam raya ini menjadi tanda-tanda yang jelas yang menghapus keraguan akan wujud Allah SWT dan kewajiban beriman kepada-Nya serta risalah-risalah-Nya. Melalui itu semua, Allah SWT merestui siapa saja yang dikehendaki untuk beriman jika dia mau menggunakan cahaya akalunya. Allah memaparkan contoh-contoh yang bersifat materiil agar persoalan-persoalan yang bersifat rasional mudah ditangkap. Allah SWT Maha luas pengetahuan-Nya. Dia mengetahui siapa saja yang memperhatikan ayat-ayat-Nya dan siapa yang enggan dan sombong. Dia akan memberi balasan kepada mereka atas itu semua.

6.5 Ringkasan

- Interferensi adalah penggabungan melalui superposisi dua gelombang atau lebih yang bertemu di titik yang sama dalam sebuah ruang tertentu.
- Alat yang digunakan untuk menghasilkan interferensi dan pola-pola yang dihasilkan dari perbedaan panjang lintasan disebut interferometer optik.
- Interferometer optik dibedakan menjadi 2, yaitu interferometer pembagi muka gelombang dan interferometer pembuluh amplitudo.
- Prinsip kerja inferometer pembagi muka gelombang, kedua berkas gelombang yang berinterferensi diperoleh dari sumber gelombang semula tanpa mengurangi intensitasnya atau istilah lainnya cahaya yang terbagi menjadi dua menurut kedudukan geometrisnya, contohnya bagian atas berkas sebagai berkas uji dan bagian bawah sebagai berkas interreferensi.
- Prinsip kerja interferometer pembelah amplitudo, kedua gelombang yang berinterferensi diperoleh dengan membagi intensita gelombang semula, atau cahaya yang terbagi menjadi dua berkas yang sama bentuknya tetapi dengan amplitudo yang berbeda.
- Difraksi adalah kecenderungan gelombang yang dipancarkan dari sumber melewati celah yang terbatas untuk menyebar ketika merambat.
- Difraksi Fresnel terjadi bila sumber gelombang dan titik pengamatan yang berada dekat dengan lubang atau penghalang yang akan mendifraksikan gelombang datang.
- Difraksi Fraunhofer, yaitu difraksi dengan sumber cahaya dan layar penerima berada pada jarak yang tak terhingga dari benda penyebab difraksi, sehingga muka gelombang tidak lagi diperlakukan sebagai bidang sferis, melainkan sebagai bidang datar.

6.7 Latihan Soal

1. Celah tunggal yang lebarnya 0,1 mm disinari berkas cahaya dengan panjang gelombang 4.000. Apabila pola difraksi ditangkap pada layar yang jaraknya 20 cm dari celah, tentukan jarak antara garis gelap ketiga dan garis pusat terang!
2. Seberkas cahaya monokromatik jatuh tegak lurus pada kisi difraksi yang memiliki 5000 garis tiap cm. Jika spectrum garis terang orde kedua yang dihasilkan membentuk sudut bias 30°, tentukanlah panjang gelombang cahaya yang digunakan !
3. Seberkas sinar monokromatik dengan panjang gelombang 5×10^{-7} m diarahkan tegak lurus pada kisi difraksi yang memiliki 50 garis /cm. Sebuah layar diletakkan pada jarak 2 m di belakang kisi, hitunglah jarak garis terang ke – 3 dari garis terang pusat !
4. Sebuah sumber cahaya monokromatik dengan panjang gelombang 600 nm dilewatkan pada celah ganda sehingga menghasilkan pola interferensi pada layar yang berada 2 meter dari celah. Apabila sumber cahaya diganti dengan sumber cahaya lain dengan panjang gelombang 450 nm, hitunglah jarak garis gelap ke -1 dari garis terang pusat !

Pustaka

- Aureliya (2017) *Pengetian, Tujuan, Fungsi, dan Macam-macam Modulasi*, *Welcome to Aureliadev's Blog*. Available at: <https://aureliadev.wordpress.com/2017/02/03/blog-post-title/>.
- Bagus (2019) *Materi Televisi dan Gelombang Televisi*, *blogspot.com*. Available at: <https://pazzarattan.blogspot.com/2016/02/materi-televisi-dan-gelombang-televisi.html>.
- Cesilia, C. (2019) *Jalur Kereta Api Ini Punya Pemandangan Luar Biasa Indah*, *WIN*. Available at: <https://www.winnetnews.com/post/5-jalur-kereta-api-ini-punya-pemandangan-luar-biasa-indah>.
- Fisikazone.com (2019) *Spektrum Gelombang Elektromagnetik*, *Fisikazone.com*. Available at: <https://fisikazone.com/gelombang-elektromagnetik/spektrum-gelombang-elektromagnetik/>.
- Giancoli, D. (2005) *PHYSICS: Principles with Application*. 6th ed. Pearson Education, Inc.
- Gunawan, G. (2019) *Modulasi Amplitudo*, *slides.com*. Available at: <https://slideplayer.info/slide/12846678/>.
- Halliday and Resnick, W. (2011) *Fundamentals of Physics*. 9th edn. John Wiley & Sons, Inc.
- Nasyiroh, S. P. (2020) *Importance of USG During Pregnancy*, *Rumah Sakit Hermina*. Available at: <https://herminahospitals.com/en/articles/pentingnya-usg-saat-hamil>.
- Santoso, Y. (2012) *Rudy, Penyelaras Dawai Piano*, *Beritagar*. Available at: <https://beritagar.id/artikel-amp/berita/rudy-penyelaras-dawai-piano>.
- Shih, J. ., Thomson, D. . and Ntotsios, E. (2018) *Analysis of Resonance Effect for Railway Track on a Layered Ground*. UK: University of Southampton.
- Suroso, A. (2018) *Interferensi Cahaya*, *Docplayer.info*. Available at: <https://docplayer.info/49735102-Interferensi-cahaya-agus-suroso-fisika-teoretik-energi-tinggi-dan-instrumentasi-institut-teknologi-bandung.html>.
- Wikipedia (2002) *Fungsi Ganjil dan Genap*, *wikipedia*. Available at: https://id.wikipedia.org/wiki/Fungsi_ganjil_dan_genap.
- Wikipedia (2007) *Spider web*, *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Spider_web.
- Wikipedia (2018) *Difraksi*, *Wikipedia*. Available at: <https://id.wikipedia.org/wiki/Difraksi>.
- Wikipedia (2019) *Persamaan gelombang elektromagnetik*, *Wikipedia*. Available at: https://id.wikipedia.org/wiki/Persamaan_gelombang_elektromagnetik.
- Wikipedia (2021) *Gelombang Radio*, *Wikipedia*. Available at: <https://id.wikipedia.org/wiki/Radio>.

Biodata Penulis:



Dr. Septi Budi Sartika, S.Pd., M.Pd. lahir di Ponorogo, 9 September 1985. Lulus Sarjana Pendidikan Fisika Universitas Negeri Surabaya tahun 2008, melanjutkan studi S2 di Prodi Pendidikan Sains Program Pascasarjana Universitas Negeri Surabaya lulus tahun 2010. Lulus program Doktor di prodi Pendidikan Sains Program Pascasarjana Universitas Negeri Surabaya tahun 2019. Karir pengajaran dimulai tahun 2010 di Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. Penulis terlibat dalam penelitian dan pengabdian kepada masyarakat baik didanai oleh Ristekdikti maupun dana mandiri tentang keterampilan berpikir tingkat tinggi dan keterampilan Abad-21.



Ria Wulandari, S.Pd., M.Pd. dilahirkan di Kediri, 16 April 1985. Pendidikan dasar ditempuhnya di Sekolah Dasar Negeri di daerah kelahirannya. Pendidikan menengah ditempuhnya di SMA Negeri 1 Kediri. Pendidikan S1 di Prodi Pendidikan Fisika diselesaikan di Universitas Negeri Malang pada tahun 2007. Gelar Magister Pendidikan Sains diperolehnya di Universitas Negeri Surabaya pada tahun 2010. Sejak tahun 2013 sampai sekarang, menjadi dosen tetap di prodi Pendidikan IPA Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. Saat ini penulis sedang menyelesaikan studi doktoral di Universitas Negeri Yogyakarta.

ISBN 978-623-6292-27-3 (PDF)



9 786236 292273