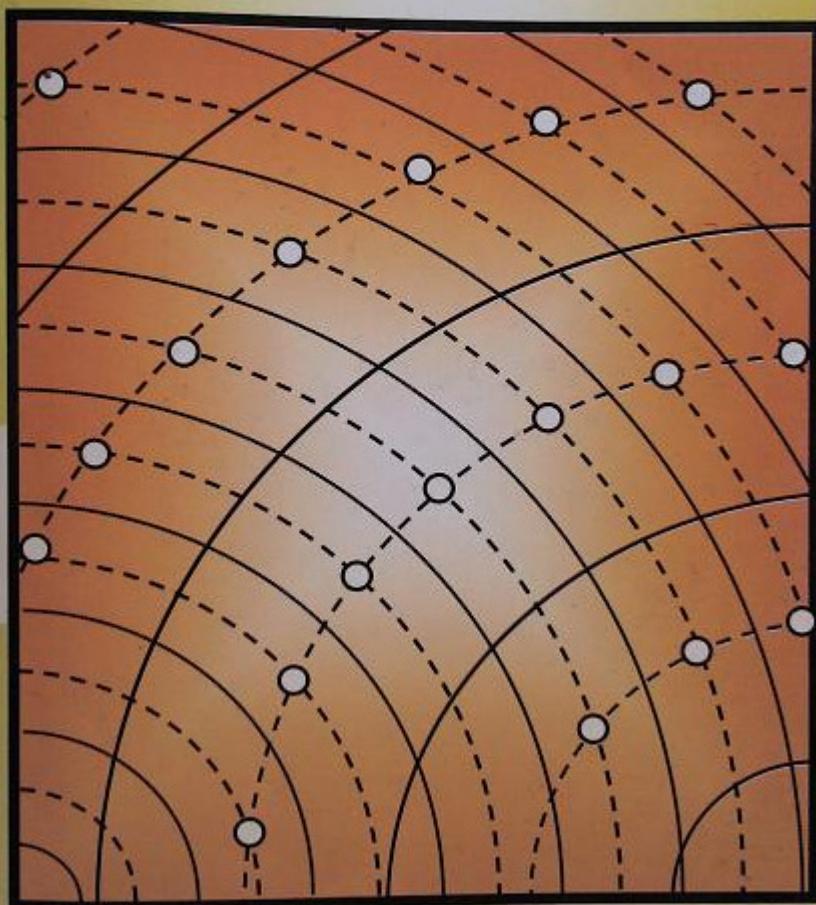


# FISIKA TERAPAN

K. Satrijo Utomo, S.T., M.T.



UNNES Press

# **FISIKA TERAPAN**

K. Satrijo Utomo, S.T., M.T.

**UNNES PRESS**

Hak Cipta © pada Penulis dan dilindungi Undang-Undang Penerbitan  
Hak Penerbitan pada UNNES PRESS Dicetak oleh UNNES Press  
Jl. Kelud Raya No.2 Semarang 50232 Telp/Fax. (024) 8415032

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh buku ini dalam bentuk  
apapun tanpa izin dari penerbit.

## FISIKA TERAPAN

K. Satrijo Utomo, S.T., M.T.

Desain cover : Harjono  
Setting : Moh Tamrin

621 Fisika Terapan/Satrijo Utomo; -Cet.1- -illus,- Semarang:  
SAT Unnes Press, 2015  
F xii + 295 hal, 23,5 cm

1. Fisika Terapan  
1. Satrijo Utomo;

II. Judul

ISBN 978 602 285 050 2

## **KATA HANTAR**

Sejalan dengan dibukanya satu di antara program studi baru di Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang yaitu Program Studi Sarjana Strata-1 Teknik Sipil (Prodi S-1 TS JTS FT UNNES), buku yang telah berhasil disusun ini diharapkan dapat memenuhi kebutuhan mahasiswa akan materi kuliah fisika pada program studi tersebut. Kandungan buku ini diharapkan dapat dikuasai mahasiswa setelah mengikuti 16 tatap muka kuliah dengan bobot 3 (tiga) SKS.

Jantung dari buku ini adalah hukum-hukum dan teori-teori fisika yang mendasari berbagai analisis di bidang teknik, khususnya teknik sipil, antara lain: hukum Newton, Pascal, Archimedes, Hooke, Bernoulli, Coulomb, kekekalan energi, termodinamika, Doppler, momentum linier dan Snellius. Melalui tulisan ini ditekankan pula secara khusus untuk mengubah pemakaian besaran vektor daripada besaran skalar dalam konsteks kajian kerja, daya, dan energi.

Kandungan buku ini diharapkan dapat bermanfaat baik untuk civitas akademika maupun praktisi ahli. Bagi mahasiswa, perlu ditekankan bahwa mahasiswa tetap perlu aktif memanfaatkan waktu untuk mengikuti kuliah, mencermati permasalahan di lapangan yang berkaitan dengan kandungan buku ini, merujuk pustaka-pustaka terkait, dan berlatih menyelesaikan soal-soal maupun pekerjaan-pekerjaan rumah.

Semarang, Desember 2014

K. Satrijo Utomo, S.T., M.T.

# Daftar Isi

Kata Hantar .....	iii
Daftar Isi .....	iv
Daftar Simbol .....	vii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	
1.1 Benda dan Fenomena .....	1
1.2 Fisika, Cabang Fisika, dan Fisika Terapan .....	9
1.3 Pengukuran, Besaran, Satuan, Simbol, dan Dimensi .....	21
1.4 Vektor dan Skalar .....	29
1.5 Konversi Satuan .....	30
1.6 Analisis Dimensi .....	31
1.7 Sistem .....	37
1.8 Soal-soal .....	39
<b>BAB 2 KINEMATIKA</b>	
2.1 Pusat Massa .....	43
2.2 Gerak, Kecepatan, dan Percepatan .....	44
2.3 Gerak Partikel 1-Dimensi .....	53
2.4 Gerak Partikel 2-Dimensi .....	60
2.5 Gerak Partikel 3-Dimensi .....	74
2.6 Gerak Relatif .....	75
2.7 Soal-soal .....	76
<b>BAB 3 KINETIKA</b>	
3.1 Hukum Gravitasi Universal Newton .....	77
3.2 Hukum I Newton: Gerak dan Gaya Gravitasi .....	80
3.3 Hukum II Newton: Gaya Gerak dan Gaya Inersia .....	82
3.4 Hukum III Newton: Gaya Aksi dan Gaya Reaksi .....	85
3.5 Klasifikasi Gaya Berdasar Lokasi Pembangkit Gaya .....	86
3.6 Klasifikasi Gaya Berdasar Posisi Garis Kerja Gaya terhadap Sumbu Partikel .....	87
3.7 Klasifikasi Gaya Berdasar Banyak Gaya .....	88
3.8 Gaya Normal .....	94
3.9 Gaya Tekan, Tekanan, dan Susutan .....	94
3.10 Gaya Tarik, Tegangan Tarik, dan Regangan .....	97
3.11 Gaya Geser dan Tegangan Geser .....	98

3.12 Gaya Gesek .....	99
3.13 Gaya Sentripetal dan Gaya Sentrifugal .....	101
3.14 Gaya Pegas .....	104
3.15 Gaya Kejut .....	105
3.16 Momen .....	105
3.17 Momen Kopel .....	107
3.18 Keuntungan Mekanis .....	108
3.19 Soal-soal .....	109

#### **BAB 4 KERJA, DAYA, DAN ENERGI**

4.1 Kerja .....	112
4.2 Daya .....	116
4.3 Energi/ Tenaga .....	118
4.4 Soal-soal .....	123

#### **BAB 5 MOMENTUM DAN IMPULS**

5.1 Sistem Partikel .....	126
5.2 Hukum II Newton untuk Sistem Partikel .....	127
5.3 Teori Energi-Kerja pada Sistem Partikel .....	128
5.4 Momentum Linier .....	128
5.5 Impuls .....	130
5.6 Tumbukan .....	133
5.7 Soal-soal .....	139

#### **BAB 6 TERMODINAMIKA**

6.1 Suhu/ Temperatur .....	142
6.2 <i>Heat</i> .....	143
6.3 Suplai <i>Heat</i> pada Tekanan atau Volume Konstan .....	149
6.4 Transpor <i>Heat</i> .....	150
6.5 Absorpsi <i>Heat</i> .....	152
6.6 Ekspansi Thermal .....	153
6.7 Kondensasi .....	156
6.8 Kerja yang Disebabkan Perubahan Volume .....	157
6.9 Hukum Termodinamika 0 (Ke-0) .....	158
6.10 Hukum Termodinamika I .....	158
6.11 Teori Kinetik Gas .....	158
6.12 Soal-soal .....	162

<b>BAB 7 STABILITAS BENDA KAKU</b>	
7.1 Benda Kaku .....	164
7.2 Perlawanan Benda Kaku terhadap Gerak .....	169
7.3 Karakteristik Zat Padat .....	174
7.4 Keseimbangan Statis .....	174
7.5 Soal-soal .....	180
<b>BAB 8 ZAT ALIR</b>	
8.1 Karakteristik Fisik Khas Zat Alir .....	182
8.2 Statika Zat Alir .....	186
8.3 Dinamika Zat Alir .....	192
8.4 Soal-soal .....	196
<b>BAB 9 GELOMBANG</b>	
9.1 Klasifikasi Gelombang .....	200
9.2 Gelombang Mekanik .....	202
9.3 Gelombang Elektromagnetik .....	209
9.4 Beberapa Istilah Penting pada Gelombang .....	216
9.5 Fenomena-fenomena pada Gelombang .....	223
9.6 Batas-batas Daerah Gelombang .....	236
9.7 Dampak-dampak Gelombang .....	238
9.8 Soal-soal .....	242
<b>BAB 10 OPTIK</b>	
10.1 Cahaya, warna, dan pengelihatan .....	249
10.2 Peralatan optik .....	263
10.3 Konvergensi .....	265
10.4 Cermin .....	266
10.5 Lensa .....	272
10.6 Soal-soal .....	281
Daftar Pustaka .....	284
Indeks .....	286
Glosarium .....	292

# Daftar Simbol

$\alpha$	percepatan sudut, koefisien ekspansi panjang
$\beta$	koefisien ekspansi volume
$l$	panjang
$\emptyset$	sudut phase
$\gamma$	berat jenis, berat unit
$\eta_E$	efisiensi energi
$\lambda$	panjang gelombang
$O$	laju radiasi
$\mu_D$	koefisien gesekan dinamik
$\mu_S$	koefisien gesekan statis
$\rho$	rapat massa
$\vec{\sigma}$	tekanan, tegangan permukaan
$\vec{\tau}$	tegangan gesek
$\nu$	kekentalan dinamik, derajat kebebasan
$\vec{\omega}$	kecepatan sudut
$\vec{a}$	percepatan
$\vec{a}_T$	percepatan tangensial
$\vec{F}$	gaya
$\vec{p}, p$	momentum linier
$\vec{N}$	gaya normal benda
$\vec{v}_{CM}$	kecepatan linier pusat massa sistem partikel
$\vec{v}_T$	kecepatan tangensial
$\vec{v}_T$	kecepatan tangensial
$\vec{W}$	berat benda
$a_{CM}$	percepatan linier pusat massa benda
$A$	amplitudo, luas
$c$	kapasitas kalor
$c_m$	kapasitas kalor molar
$C$	kecepatan penyaluran, cepat rambat
$C_P$	kapasitas kalor molar pada tekanan konstan
$C_V$	kapasitas kalor molar pada volume konstan
$d$	perpindahan
$E$	kompresibilitas/ kemampuan, entropi
$\vec{E}_k$	energi kinetik
$\vec{E}$	energi mekanis

$F_f$	gaya gesekan
$\vec{E}_p$	energi potensial
$\vec{E}_{pf}$	energi gesekan
$f$	frekuensi
$\vec{g}$	percepatan gravitasi bumi
$h$	kedalaman, kapilaritas, kalor jenis
$k$	konduktivitas zat
$m$	massa
$p$	tekanan hidraulis
$F_{ext}$	gaya luar/ eksternal
$F_{int}$	gaya dalam/ internal
$F_x$	gaya terhadap sumbu- $x$
$F_y$	gaya terhadap sumbu- $y$
$F_z$	gaya terhadap sumbu- $z$
$F_B$	gaya apung
$F_D$	gaya gesekan dinamik
$F_H$	gaya horisontal
$F_S$	gaya gesekan statis
$M_x$	momen terhadap sumbu- $x$
$M_y$	momen terhadap sumbu- $y$
$M_z$	momen terhadap sumbu- $z$
$q$	gaya/ beban terbagi merata
$Q$	kalor/ panas
$R$	konstanta gas universal
$t$	waktu
$T$	suhu, periode
$\vec{u}$	gerak
$\vec{v}$	kecepatan
$V$	volume
$x$	perpindahan
$x(t_1)$	simpangan
$z_0$	posisi awal benda

# BAB 1

## PENDAHULUAN

Alam semesta diciptakan oleh Tuhan dengan keanekaragaman benda dan fenomena, baik yang bersifat umum maupun unik (khas). Di antara keanekaragaman benda dan fenomena di alam semesta adalah bumi sebagai suatu benda dengan berbagai **benda (zat/ materi)** dan **fenomena (gejala/ kejadian/ peristiwa/ proses)** yang dialami oleh bumi maupun benda-benda tersebut di bumi, baik di dalam, pada permukaan, maupun di sekeliling bumi.

### 1.1 BENDA DAN FENOMENA

Benda-benda dan fenomena-fenomena yang dialami oleh benda-benda di bumi secara umum dapat diklasifikasikan dalam dua kelas berdasar pada **asal mula benda atau fenomena bersangkutan**. Berdasar klasifikasi ini dikenal istilah benda alami dan benda buatan, demikian pula dikenal istilah fenomena alam dan fenomena buatan.

**Benda alami** adalah benda yang tersedia secara alami di alam. Benda alami merupakan benda yang paling mudah dijumpai di bumi, karena jumlahnya jauh lebih banyak daripada benda buatan. Beberapa di antara benda-benda alami dapat dimanfaatkan secara langsung oleh manusia, antara lain adalah batuan dan pepohonan untuk keindahan, peneduh, dan penyejuk ruangan. Beberapa benda alami lainnya dapat dimanfaatkan setelah diolah terlebih dahulu, antara lain adalah batuan dan kayu untuk bahan lantai atau pelapis dinding bangunan.

**Benda buatan** adalah benda yang dibuat oleh manusia melalui proses tertentu untuk memenuhi keperluan tertentu manusia. Benda-benda buatan tidak dicipta manusia secara bersamaan, tetapi bertahap sesuai dengan perkembangan kebutuhan dan kemampuan manusia dalam menciptakannya. Banyak di antara benda buatan merupakan bentuk **tiruan benda alami**. Benda tiruan tersebut digunakan untuk menggantikan benda alami yang jumlahnya makin menipis untuk dimanfaatkan. Sebagai contoh adalah ubin batu marmer untuk pelapis lantai dan dinding. Namun demikian, banyak pula di antara benda buatan tidak dibuat untuk meniru benda alami. Benda buatan dalam kelompok ini umumnya berupa **bahan baku untuk benda buatan lainnya** atau berupa alat.

**Alat** atau sering pula disebut **pesawat** adalah suatu unit benda tertentu yang dibuat dan dimanfaatkan untuk mempermudah manusia dalam melakukan aktivitas tertentu. Dalam konteks tersebut alat atau pesawat sering disebut juga sebagai **alat bantu**. Sebagai misal adalah kendaraan untuk menudahkan dalam pemindahan manusia atau barang, jalan raya untuk memudahkan lalu lintas kendaraan dan komputer untuk melakukan perhitungan rumit. Selain untuk keperluan itu, beberapa di antara pesawat dibuat manusia untuk melakukan aktivitas tertentu yang tidak dapat dilakukan tanpa menggunakan pesawat bersangkutan. Contohnya adalah mikroskop untuk melihat benda-benda yang berukuran sangat kecil dan spektroskop untuk melihat spektrum yang dihasilkan oleh cahaya.

Obyek kajian dalam fisika dapat berupa fenomena, di samping benda-benda yang berkaitan dengan fenomena tersebut. Di antara fenomena yang penting dikaji adalah **fenomena alam** yaitu suatu proses yang terjadi secara alami di alam. Gempa akibat pergeseran kulit bumi, *tsunami* akibat pergerakan sejenis di perairan, dan banjir akibat hujan deras dalam durasi lama merupakan contoh-contoh

fenomena-fenomena alam yang masih terjadi di Indonesia maupun di beberapa negara lain. Sementara itu, jika dicermati, fenomena-fenomena gempa bumi, *tsunami*, dan banjir di Indonesia tidak sama persis atau memiliki perbedaan karakteristik dan proses dibandingkan dengan gempa bumi, *tsunami*, dan banjir di negara-negara lain. Uniknya, baik gempa bumi, *tsunami*, dan banjir sangat jarang terjadi di Negara Mongolia.

Pengetahuan mengenai asal usul, sebab, dan dampak dari fenomena-fenomena alami di alam semesta dapat diketahui oleh manusia tidak secara bersamaan, tetapi secara bertahap sejalan dengan perkembangan tingkat kesadaran dan pemahaman manusia.

Selain fenomena-fenomena yang terjadi secara alami, terdapat pula fenomena-fenomena buatan manusia. **Fenomena buatan** merupakan proses yang disusun oleh manusia untuk menghasilkan suatu produk atau alat tertentu yang dibutuhkan oleh manusia. Sebagai contoh fenomena buatan adalah transportasi darat dengan perkerasan jalan raya dan jembatan untuk memudahkan pemindahan manusia dan barang. Penyulingan/ destilasi untuk memisahkan minyak bumi menjadi berbagai jenis bahan bakar, minyak pelumas, dan aspal. Beberapa di antara fenomena buatan dibuat juga untuk meniru fenomena alam yang bermanfaat bagi manusia. Misalnya adalah fenomena hujan buatan.

Sebagaimana penciptaan benda-benda buatan yang telah ada, fenomena-fenomena buatan dicipta oleh manusia tidak secara bersamaan, melainkan secara bertahap sesuai dengan perkembangan **kebutuhan** dan **kemampuan** manusia dalam menciptakannya.

### 1.1.1. Karakteristik Benda

Perubahan suhu atau temperatur (*temperatur*), tekanan, dan tegangan (*pressure or tension*) merupakan parameter-parameter zat yang dapat menyebabkan terjadinya perubahan bentuk, fasa, dan

## *Pendahuluan*

kepadatan zat. Perubahan tersebut terimplementasi pula pada terjadinya perubahan nilai-nilai parameter karakteristik zat seperti sifat kohesi, adhesi, rapat massa, berat unit, permeabilitas, dan parameter lainnya.

Berbagai perubahan tersebut dapat berpengaruh negatif terhadap stabilitas zat, memicu reduksi fungsi maupun keruntuhan struktural sehingga perlu diantisipasi dan diatasi. Sebagai misal, pada zat padat, pengaruh negatif pemanasan cahaya matahari pada penutup atap bangunan perlu diantisipasi karena dapat merubah bentuk, warna, dan mereduksi fungsi penutup atap. Pada zat cair, pengaruh negatif pemanasan air pada waduk perlu diantisipasi karena dapat mereduksi volume air dan ketersediaan air pada waduk. Adapun pada gas, pengaruh negatif pemanasan gas dalam ban kendaraan atau tangki perlu diantisipasi karena dapat meningkatkan tekanan dan memicu kebocoran maupun ledakan.

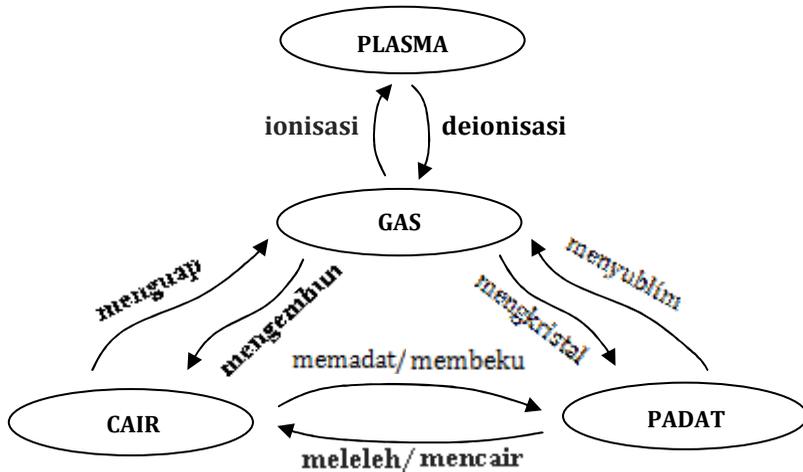
Pada sub bab ini secara detil dijabarkan perubahan bentuk dan fasa zat oleh pengaruh perubahan suhu zat. Sedangkan mengenai perubahan bentuk dan kepadatan zat oleh tekanan dan tegangan akan dibahas lebih lanjut pada bab selanjutnya, yaitu dalam kajian stabilitas zat padat.

Benda-benda di alam semesta dapat juga diklasifikasikan berdasar pada fasa zat, di samping berdasar pada asal mulanya, sebagaimana diuraikan dalam sub bab terdahulu. Berdasar pada bentuknya, dikenal empat jenis benda yaitu:

- 1) padat,
- 2) cair,
- 3) gas, dan
- 4) plasma.

Masing-masing bentuk benda tersebut memiliki karakteristik (*properties*) yang membedakan antara satu jenis benda dengan jenis benda lainnya. Di samping itu, benda dapat berubah bentuk atau fasa

akibat perubahan suhu yang dikandung dalam benda. Karakteristik atau sifat-sifat khas pada masing-masing jenis benda tersebut diuraikan sebagai berikut, lihat visualisasi Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Perubahan Bentuk Benda

**Benda padat** (*solid*) adalah jenis benda yang memiliki volume dan bentuk tertentu. Hal itu karena benda padat memiliki susunan molekul paling padat daripada jenis benda lainnya dan gaya tarik menarik antar molekul benda padat paling kuat di antara jenis benda. Benda padat tidak mudah dimampatkan, sehingga bentuk dan volume benda padat tidak mudah berubah. Benda padat tidak berubah bentuk bila disentuh dengan jari. Setiap benda padat memiliki energi panas tertentu karena getaran atom dalam molekul benda padat. Getaran atom benda padat tersebut relatif halus dan cepat sehingga tidak dapat diamati dengan panca indera tanpa alat bantu. Benda padat dapat bergerak dari satu tempat ke tempat lainnya dengan cara menggeser atau pun menggelinding.

**Zat cair** (*liquid*) adalah benda yang memiliki volume tertentu tetapi bentuknya mudah berubah karena molekulnya mudah bergerak. Gerak benda cair disebut mengalir. Benda cair mudah bergerak karena gaya tarik menarik antar molekul benda cair lemah, sehingga ikatan antar molekul benda cair juga lemah. Karena mudah bergerak, maka bentuk benda cair menyesuaikan wadahnya. Benda cair bergerak mengelilingi jari bila disentuh dengan jari. Benda cair termasuk tidak mudah dimampatkan. Permukaan benda cair akan memberikan tegangan permukaan. Setiap benda cair memiliki kekentalan, permeabilitas, dan kapilaritas.

**Gas** (*gas*) adalah jenis benda yang mudah berubah volume maupun bentuknya. Gas mudah bergerak karena gaya tarik menarik antar molekul gas sangat lemah, sehingga antar molekul gas tidak membentuk ikatan. Gas mudah dimampatkan. Jika ditempatkan dalam wadah, gas akan berubah bentuk sesuai dengan bentuk wadah ketika menerima tekanan dari luar wadah. Sedangkan jika tidak ditempatkan dalam wadah, maka molekul gas bergerak bebas ketika menerima tekanan. Dalam suatu ruangan, molekul-molekul gas akan menempati ruangan secara merata.

**Plasma** (*plasma*) adalah bentuk gas yang mengandung muatan ion positif akibat pelepasan/ emisi (*emission*) elektron bermuatan negatif dari molekul-molekul zat padat. Sebagai contoh, ionisasi pada proses foto elektrik dan kabel transmisi listrik tegangan tinggi. Menurut T. A. Einstein, plasma banyak tersedia secara alami di alam dan merupakan jenis bentuk benda paling umum di alam.

### **1.1.2. Perubahan Bentuk Benda**

Benda atau umum pula disebut zat dapat mengalami perubahan bentuk/ fasa akibat **perubahan suhu benda**. Suhu benda dapat mengalami kenaikan akibat proses pemanasan. Sebaliknya, suhu benda mengalami penurunan akibat proses pendinginan/

kondensasi. Kedua proses tersebut disebut dengan proses thermal/thermis, jika terjadi secara alami. Lihat visualisasi Gambar 1.1, perubahan bentuk benda dapat terjadi dalam 8 fenomena yaitu:

- (1) **memadat/ membeku** yaitu perubahan bentuk benda dari benda cair ke benda padat jika suhu benda turun ke bawah titik beku,
- (2) **meleleh/ mencair** yaitu perubahan bentuk benda dari benda padat menjadi benda cair jika suhu benda naik melebihi titik leleh,
- (3) **menguap** yaitu perubahan bentuk benda dari benda cair ke gas jika suhu benda naik melebihi titik uap, dan
- (4) **mengembun** yaitu perubahan bentuk benda dari gas menjadi benda cair apabila suhu benda turun ke bawah titik embun,
- (5) **menyublim** yaitu perubahan bentuk benda dari benda padat menjadi gas jika suhu benda naik melebihi titik sublimasi,
- (6) **mengkristal** yaitu perubahan bentuk benda dari gas ke benda padat jika suhu benda turun di bawah titik beku,
- (7) **ionisasi** yaitu perubahan bentuk benda dari gas menjadi gas bermuatan ion jika suhu benda naik sehingga elektron molekul gas terlepas, dan
- (8) deionisasi yaitu perubahan bentuk benda dari gas bermuatan ion ke gas jika suhu benda turun sehingga elektron molekul gas bergabung dengan gas bermuatan ion positif.

Perubahan bentuk benda tersebut uniknya tidak tampak pada air raksa (Hg, *hydrargerum*). Air raksa merupakan satu jenis logam (zat padat) yang hampir seluruh fasenya berwujud cairan karena memiliki sifat khas berupa titik leleh sangat rendah dan titik uap

## Pendahuluan

sangat tinggi. Oleh karena itu, air raksa sangat mudah meleleh/mencair daripada membeku dan sangat sulit menguap. Dalam rentang beda suhu antara kondisi meleleh dan menguap tersebut, air raksa tetap mengalami peningkatan volume apabila suhunya meningkat. Demikian pula sebaliknya, air raksa juga mengalami penyusutan volume apabila suhunya menurun.

Sejak ditemukan, air raksa telah dapat dimanfaatkan antara lain untuk penera/ pengukur suhu dan tekanan, di samping digunakan untuk pelarut emas ( $\text{Au}$ , *Aurum*). Sensitivitas perubahan volume terhadap perubahan suhu pada air raksa memungkinkan air raksa sangat efektif digunakan sebagai materi pengukur suhu. Alat pengukur suhu yang menggunakan air raksa dan tabung skala umum disebut **termometer**. Selain itu, karena perubahan tekanan umumnya berkaitan erat dengan perubahan suhu pada suatu zat, maka air raksa juga efektif digunakan sebagai materi pengukur tekanan. Alat pengukur tekanan yang menggunakan air raksa dan tabung skala disebut **barometer**.

Untuk keperluan peneraan tekanan, digunakan kolom air raksa dengan besaran standar sebagai berikut.

$$1 \text{ cm Hg} = \text{tekanan dari suatu kolom Hg atau air raksa } (p_{\text{Hg}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}) \text{ setinggi } 1 \text{ cm} = 1333 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mm Hg} = 0,1 \text{ cm Hg} = 1 \text{ torr} = 133,3 \text{ Pa}$$

$$1 \mu\text{m Hg} = 10^{-3} \text{ torr}$$

$$1 \text{ atm (atmosfer)} = 760 \text{ torr} = 760 \text{ mm Hg} = 1,013256 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Pa} = \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$$

Untuk keperluan penerbangan. Agar kemampuan pesawat terbang di berbagai tempat dan waktu dapat diperbandingkan, besar tekanan atmosfer ditetapkan oleh ICAO (*International Civil Aviation Organization*) berdasar nilai-nilai parameter permukaan air laut sebagai berikut:  $p_0 = 10\,332 \text{ kg(f)/m}^2$ ;  $t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\rho_0 = 1\,226 \text{ kg(f)/m}^3$ ;  $\rho_0 = 0\,125 \text{ msl/m}^3$ ; dan  $R = 29\,27 \text{ m.kg(f)/(m)}^\circ\text{C}$ .

## 1.2 FISIKA, CABANG FISIKA, DAN FISIKA TERAPAN

Upaya manusia dalam menjadikan alam semesta ini makin beraneka ragam sangat erat hubungannya dengan disiplin ilmu (bidang ilmu) fisika dan teknik, di mana hukum-hukum dan teori-teori fisika diterapkan. Untuk memperoleh pengetahuan dasar/fundamen yang memadai guna memudahkan dalam mengkaji materi-materi pada kedua disiplin ilmu tersebut, maka pada bab pendahuluan ini perlu diuraikan cukup detil pengertian kedua istilah tersebut.

### 1.2.1. Fisika dan Teknologi

Bidang **ilmu teknik** (*technology*) atau **teknologi/rekayasa** (*engineering*) merupakan suatu bidang ilmu yang mencakup berbagai cara untuk memudahkan manusia dalam melakukan proses-proses tertentu. Pada beberapa referensi, bidang ilmu teknik dibedakan dengan bidang teknologi dengan alasan bahwa bidang ilmu teknik memfokuskan kajian pada aspek **ilmu murni** (*pure science*), sedang bidang teknologi/ rekayasa memfokuskan kajian pada aspek **ilmu terapan** (*applied or practical science*). Pada buku ini, kedua istilah tidak dibedakan, baik ilmu teknik atau teknologi.

Sebagai induk dari ilmu teknik atau teknologi/ rekayasa, ilmu alam merupakan bagian/cabang dari ilmu-ilmu alam (*natural science*), disebut **ilmu pengetahuan alam** (IPA). IPA terdiri dari **ilmu**

**alam** (*physical science*) dan **ilmu hayat** (*biological science*). Ilmu alam mencakup kajian terhadap benda-benda mati di alam semesta, sedangkan ilmu hayat mencakup kajian benda-benda hidup di alam semesta. Dengan demikian, semua benda-benda di alam semesta yang telah diketahui oleh manusia, sebagian dapat dikelompokkan sebagai benda-benda hidup, dan sebagian lainnya sebagai benda-benda mati.

Sejalan dengan perkembangan pikiran manusia, dalam melakukan kajian terhadap benda-benda di alam semesta, ilmu alam dan ilmu hayat lebih lanjut memilah diri dalam beberapa bidang kajian menjadi cabang-cabang ilmu yang lebih spesifik yaitu:

- 1 **fisika memfokuskan kajian pada massa dan energi dalam benda-benda/ zat-zat mati,**
- 1 **kimia** memfokuskan kajian pada substansi benda-benda di alam,
- 1 **astronomi** memfokuskan kajian pada benda-benda langit, dan
- 1 **ilmu bumi** memfokuskan kajian pada bumi.

Ilmu hayat juga memilah diri menjadi berbagai cabang ilmu antara lain biofisika, biokimia, zoologi, botani, dan mikrobiologi.

Benda-benda hidup sesungguhnya dikaji pula dalam fisika, yang melingkupi kajian terhadap benda-benda mati, sejauh benda-benda hidup tersebut mengandung massa dan energi. Dalam konteks ini, benda-benda hidup tersebut ditinjau dari aspek-aspek benda mati yang melekat padanya. Misalnya, manusia dan pohon di dalam ruangan yang diketahui termasuk benda-benda hidup ditinjau dalam fisika dari aspek massa dan beratnya yang membebani meja, kursi, atau pun lantai ruangan di mana manusia dan pohon tersebut berada. Massa manusia dan pohon tersebut lebih lanjut menyimpan energi, antara lain: energi potensial yang besarnya relatif terhadap posisi referensi yang dipilih, energi kinetik apabila bergerak, dan energi panas baik pada keadaan diam dan bergerak.

Ketertarikan dan upaya manusia untuk mempelajari fisika secara mendalam berkaitan sangat erat dengan massa dan energi yang dikandung dalam benda-benda mati di alam semesta. Terdapat dua alasan mendasar mengapa manusia melakukan hal tersebut.

Alasan pertama adalah untuk dapat **pemanfaatan massa dan energi** dalam benda bersangkutan. Air sebagai misal dapat dimanfaatkan manusia untuk menopang kehidupan dalam berbagai bentuk aktivitas, antara lain: menjaga metabolisme, kebersihan, dan kebugaran tubuh, di samping dapat juga dimanfaatkan untuk mengairi persawahan dan perkebunan guna menjaga ketersediaan bahan pangan dan sandang. Contoh lainnya adalah elektron yang terkandung pada benda dapat dialirkan guna membangkitkan energi listrik untuk penerangan, memasak, dan membangkitkan pompa untuk menaikkan air ke elevasi yang lebih tinggi. Berbagai upaya dalam pemanfaatan jenis-jenis benda-benda di alam semesta dalam dasa warsa terakhir ini banyak dikaitkan dengan keuntungan materi (komersial).

Alasan berikutnya adalah untuk **mengendalikan/ mengontrol massa dan energi** dalam benda bersangkutan atau energi yang dihasilkan oleh benda bersangkutan yang berpotensi menimbulkan dampak negatif atau pun berbahaya. Pengendalian dapat dilakukan dengan upaya meredam (*handle*) atau dapat pula dengan mengalihkan (*dilvert*) energi yang tidak bermanfaat tersebut. Peredaman dapat dilakukan jika seluruh energi yang dikandung atau dihasilkan oleh masa benda dapat ditanggulangi. Sedangkan pengalihan dapat dilakukan pada sebagian maupun seluruh energi dikandung atau dihasilkan oleh masa benda, sehingga hanya sebagian saja dari energi yang dikandung atau dihasilkan oleh masa benda perlu untuk ditanggulangi. Satu di antara upaya pengendalian adalah pengendalian banjir yang ditempuh dengan pengendalian energi yang dikandung atau dihasilkan oleh massa air bah.

Sedangkan pembangkitan listrik dengan energi nuklir merupakan suatu bagian dari upaya pemanfaatan dan sekaligus pengendalian energi yang dikandung atau dihasilkan oleh massa uranium dan proton yang mengalami reaksi fusi.

Sebagai suatu disiplin ilmu, fisika berkaitan erat dan merupakan bagian dari ilmu pengetahuan, oleh karena itu beberapa pokok tentang ilmu pengetahuan perlu pula ditinjau dalam bagian ini. Menurut Suriasumantri (2001), semua hasil yang telah diperoleh manusia dalam berupaya mempelajari diri dan lingkungannya disebut dengan **pengetahuan** (*knowledge*), yaitu segenap apa yang telah diketahui manusia tentang suatu objek tertentu.

**Ilmu/ sains** (*science*) adalah kumpulan pengetahuan yang disusun secara konsisten dan kebenarannya telah teruji secara empiris. Ilmu merupakan bagian dari pengetahuan, di samping pengetahuan lainnya seperti humaniora (seni, filsafat, agama, bahasa, dan sejarah) dan matematika. Pengetahuan mempunyai ciri "**tentang apa** (*ontologi*), **bagaimana** (*epistemologi*), dan **untuk apa** (*aksiologi*)". Oleh karena itu, sebagai bagian dari pengetahuan, ilmu memiliki pula ciri spesifik tersebut, yaitu "tentang apa, bagaimana, dan untuk apa".

Pada konteks untuk apa ilmu dipakai, terdapat 2 kecenderungan yang saling berlawanan, sebagaimana kecenderungan pada diri manusia. Di satu sisi, ilmu dapat dipakai untuk menjadikan alam semesta makin aman, nyaman, dan asri. Sebaliknya, di sisi lainnya, ilmu dapat dipakai untuk menjadikan alam semesta rusak dan hancur. Kecenderungan itu dikendalikan dengan sanksi agama, moral, dan hukum.

Ilmu-ilmu sosial atau lebih dikenal dengan istilah ilmu pengetahuan sosial (IPS) berkembang agak lambat daripada **ilmu-ilmu alam** (IPA). Cabang-cabang ilmu-ilmu sosial yakni antropologi, psikologi, ekonomi, sosiologi, dan ilmu politik. Dalam

antropologi dipelajari manusia dalam perspektif waktu dan tempat. Dalam psikologi dipelajari proses mental dan kelakuan manusia. Dalam ekonomi dipelajari manusia dalam memenuhi kebutuhan kehidupannya lewat proses pertukaran. Sedangkan dalam sosiologi dipelajari struktur organisasi sosial manusia. Adapun dalam ilmu politik dipelajari sistem dan proses dalam kehidupan manusia berpemerintah dan bernegara.

Perkembangan IPS menjadi cabang-cabang ilmu yang lebih spesifik tidak dikaji lebih detil (lebih lanjut) dalam buku ini, mengingat pokok-pokok materi tersebut berada di luar batasan tujuan penulisan buku ini. Namun demikian, ilmu sosial secara umum penting pula dipelajari oleh ahli-ahli ilmu alam untuk dapat menerapkan ilmu alam secara relatif lebih mudah, efektif, dan efisien di tengah masyarakat, yang notabene masyarakat dalam suatu negara selalu memiliki tatanan budaya, kondisi psikologis, dan sosiologis tertentu.

Selaras dengan uraian dalam alenia-alenia terdahulu, **fisika** (*physics*) yang diambil dari Bahasa Yunani untuk “alam”, oleh sebagian ahli fisika didefinisikan sebagai ilmu yang mengkaji komponen-komponen dan sifat-sifat fisik benda-benda di alam, fenomena-fenomena yang dialaminya, dan hukum-hukum yang dipatuhinya, serta cara menyajikannya secara sistematis agar dapat dikenali secara kuantitatif. Sedangkan oleh sebagian ahli fisika lainnya, fisika didefinisikan sebagai ilmu yang mempelajari benda-benda mati di alam semesta. Sementara itu pula, oleh sebagian ahli fisika lainnya, fisika didefinisikan sebagai ilmu yang mengkaji massa dan energi benda-benda di alam semesta.

Menurut Anda, di antara definisi tersebut, mana paling tepat? Atau Anda memiliki definisi sendiri untuk fisika?

### 1.2.2. Cabang-cabang Fisika

Sejalan dengan perkembangan fisika, dikenal beberapa cabang fisika guna memperdalam bagian tertentu dari fisika. Mengacu Young, H.D. dan Freedman, R. A. (2000), serta Halliday et al (2002), cabang-cabang fisika meliputi:

1. **mekanika** (*mechanics*),
2. **gelombang** (*waves*),
3. **thermodinamika** (*thermodinamics*),
4. **listrik dan magnet** (*electromagnetics*), dan
5. **optik** (*optics*),
6. **fisika atom/ inti** (*modern physics*).

Klasifikasi tersebut dipakai oleh **para ahli fisika klasik**. Sedangkan klasifikasi lain, dipakai oleh **ahli-ahli fisika modern**, sejak penemuan teori relativitas oleh Thomas A. Einstein dan radio aktifitas oleh Keluarga Currie pada abad ke-20 (Serway et al, 2004), meliputi:

1. **mekanika**,
2. **gelombang** (*waves*),
3. **interaksi dan medan** (*magnetics*),
4. **fisika quantum** (*quantum physics*), dan
5. **fisika statistik** (*statistical physics*).

### 1.2.3. Metode dalam Mempelajari Fisika

Berdasar pada metode pendekatan dalam mempelajarinya, fisika dibagi menjadi 3 (tiga) grup yang saling memperkuat satu dengan lainnya.

Pertama, **metode teoritis** dengan ciri khas ilmiah deduktif, analitis, dan idealis dalam grup fisika teoritis (*theoretical physics*), yang mengembangkan fisika dengan keleluasaan, kebebasan, dan ketajaman berfikir. Grup ini merupakan ujung tombak dalam pengembangan fisika.

Kedua, **metode eksperimen** (*experimental physics*), yang mengembangkan fisika dengan upaya menguji kebenaran hasil-hasil fisika teoritis yang dapat direalisasikan. Sebaliknya, hasil-hasil eksperimen merupakan bahan kajian dalam fisika teoritis untuk mengembangkan teori-teori baru dalam fisika.

Ketiga, **metode terapan** dengan ciri khas bersifat ilmiah praktis dalam grup fisika terpakai atau fisika terapan (*applied or practical physics*), yang mengembangkan fisika dengan mencari kemungkinan pemanfaatan/ penerapan suatu produk/ proses hasil fisika teori yang telah teruji kebenarannya untuk kesejahteraan manusia. Hasil-hasil fisika terapan dapat juga dipakai sebagai bahan kajian bagi ahli-ahli fisika teoritis maupun eksperimen karena harus teruji berdasar pada teori (yang telah ada) dan eksperimen.

Dua tahap pengujian yang pertama disebutkan, yaitu gabungan antara metode teoritis dan eksperimen, telah dikenal dengan istilah **metode ilmiah** (*scientific method*). Metode ilmiah tersebut dikemukakan sejak abad ke-17 dengan menekankan penggunaan **cara induksi** dalam penarikan simpulan (*inductive inference*) pada masalah-masalah fisika. Bilamana dicermati, sejak mula metode ilmiah digunakan, penekanan penggunaan cara induksi tersebut identik dengan penekanan penggunaan metode eksperimen.

Sebelum suatu produk atau proses diterapkan maupun dimanfaatkan di tengah masyarakat, produk atau proses tersebut harus telah diuji dan diterima secara ilmiah. Dalam konteks ini, yang dimaksud produk atau proses tidak hanya berupa barang atau prosedur pembuatannya, tetapi mencakup pula hipotesa, teori, hukum, dan ilmu yang berkaitan dengan produk atau proses bersangkutan.

**Hipotesa** (*hypothesis*) merupakan suatu dugaan yang belum diyakini kebenarannya karena belum terbukti dan akan dibuktikan,

dapat juga diartikan sebagai simpulan sementara yang perlu diuji kebenarannya. Hipotesa dapat dinyatakan dalam bentuk kalimat implikasi, yang selanjutnya dibuktikan dengan kalimat positif jika bukti hasil uji didapat.

**Teori** (*theory*) merupakan suatu pengetahuan ilmiah yang berisi penjelasan mengenai suatu pokok dan ilmu tertentu. Selain itu, teori dapat juga diartikan sebagai kebenaran yang telah teruji. Di samping itu, teori dapat juga dimaknai sebagai suatu hipotesa yang diyakini selalu (konsisten) benar pada semua peristiwa.

**Hukum** (*law*) adalah teori yang telah dibakukan dan menyatakan kaitan antara besaran-besaran secara matematis untuk menyajikan peristiwa alam, misalnya Hukum II Newton dengan persamaan  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ . Hukum pada hakikatnya merupakan suatu pernyataan yang menyatakan hubungan antara dua variabel atau lebih dalam kaitan sebab akibat.

Adapun **ilmu**, sebagaimana telah diuraikan pada sub bab terdahulu, merupakan kumpulan pengetahuan yang membidangi dan berkaitan dengan produk atau proses.

Beberapa istilah berikut penting pula diuraikan karena berkaitan erat dengan eksperimen untuk melakukan pengujian dan pengkajian terhadap suatu produk maupun proses untuk dapat diterima secara ilmiah.

**Asumsi** (*assumption*) adalah pernyataan syarat yang kebenarannya tidak perlu diuji. Berlainan dengan hipotesa yang berupa pernyataan singkat dan menjadi pokok pengujian, asumsi merupakan pernyataan yang didasarkan argumentasi ilmiah yang kebenarannya secara empiris dapat diterima, meskipun tidak harus diuji. Asumsi umumnya dipakai untuk meletakkan batas-batas kajian dalam pengujian, sehingga pengujian dapat difokuskan untuk menguji hipotesa yang telah dinyatakan.

**Postulat** (*postulate*) adalah suatu dugaan yang langsung diyakini kebenarannya tanpa perlu dibuktikan. Sebagai misal adalah postulat untuk energi reaksi fusi disampaikan oleh Thomas A. Einstein dengan persamaan  $E = m \cdot C^2$ .

**Prinsip** (*principle*) adalah suatu pernyataan yang berlaku secara umum bagi sekelompok fenomena tertentu, yang mampu menjelaskan fenomena yang terjadi tersebut. Suatu prinsip dapat didefinisikan juga sebagai fundamen dari suatu hukum. Sejalan dengan waktu, suatu prinsip makin berkembang menjadi hukum dengan makin banyak kebenaran akan hasil pengujian yang dilakukan terhadap prinsip tersebut. Sebagai misal, Prinsip Archimedes yang kini telah diyakini sebagai Hukum Archimedes dalam persamaan  $\vec{F}_B = \vec{\gamma} \cdot V$ .

**Konsep** (*concept*) merupakan deskripsi dari satu atau lebih **ide/gagasan** yang dikembangkan secara kronologis dan utuh berdasar logika ilmiah. Konsep dikembangkan baik menggunakan asumsi maupun tidak menggunakan asumsi, tetapi harus berdasarkan pada hukum, teori, atau prinsip tertentu untuk mencapai tujuan tertentu, misalnya mencapai hukum/ teori baru. Suatu konsep dideklarasikan dalam bentuk hipotesa yang perlu dibuktikan kebenarannya melalui suatu eksperimen.

#### 1.2.4. Fisika terapan

Perkembangan pemakaian metode terapan untuk penyelesaian permasalahan-permasalahan praktis dalam bidang fisika di tengah masyarakat, memicu pengembangan bidang teknologi/ rekayasa di mana teori-teori fisika diterapkan, dan tentu saja pengembangan bidang fisika. Hal tersebut secara cukup pesat telah menumbuhkan cabang-cabang fisika baru dalam cabang-cabang fisika terapan yang diperlukan masyarakat.

Di antara cabang-cabang utama fisika, sebagai misal, mekanika merupakan cabang fisika paling tua. Pada masa awal perkembangannya, permulaan abad ke-18, mengacu Dugas (1955) dalam *A History of Mechanics*, mekanika memilah diri menjadi **kinematika** (*kinematics*) dan **kinetika** (*kinetics*) bersamaan dengan memilah juga menjadi **statika** (*statica*) dan **dinamika** (*dynamics*). Perkembangan mekanika saat itu identik dengan pengembangan ilmu alam. Beberapa karya di bidang ilmu alam yang telah dihasilkan para ahli fisika hingga akhir abad ke-17, terutama setelah ditemukannya teori gaya oleh Newton di pertengahan abad ke-17, dapat diklasifikasikan ke bidang kajian kinematika atau kinetika, di samping dapat diklasifikasikan lebih lanjut ke sub bidang kajian statika atau dinamika. Demikian halnya karya-karya yang dihasilkan sejak awal abad ke-18 melalui kerja kolektif dalam beberapa eksperimen fisika, dapat pula diklasifikasikan secara konsisten dalam bidang kajian tersebut.

Kini cabang-cabang fisika tersebut telah berkembang pesat terutama setelah menjadi induk/ inti bidang ilmu teknik (*engineering*) dalam cabang-cabang ilmu terapannya, antara lain:

- 1 mekanika teknik (*technical mechanics*),
- 1 mekanika fluida (*fluid mechanics*),
- 1 hidraulika (*hydraulics*),
- 1 mekanika tanah (*soil mechanics*),
- 1 mekanika kontinum (*continuum mechanics*),
- 1 otomotif (*automotive*),
- 1 robotika (*robotics*),
- 1 aeronautika (*aeromoutics*),
- 1 elektrik (*electrics*),
- 1 elektronik (*electronics*),
- 1 mekanika gelombang (*wave mechanics*)

Sejalan dengan perkembangan pola pikir dan kebutuhan manusia, beberapa cabang-cabang fisika terapan dikembangkan lebih lanjut melalui wadah disiplin ilmu yang lebih luas untuk memfokuskan pada pencapaian produk dan proses yang dihasilkan. Disiplin ilmu yang mewadahi tersebut antara lain disiplin ilmu teknik fisika, teknik sipil, teknik mesin, teknnik elektro, dan teknik kimia. Dalam ranah akademik lingkup perguruan tinggi, wadah pengembangan disiplin ilmu dikenal dengan istilah program studi.

Sesuai dengan tujuan penulisan buku ini, akan dijabarkan secara detil pokok-pokok penting yang perlu diperhatikan dalam pengembangan fisika terapan melalui bidang teknik, khususnya teknik sipil.

### **1.2.5. Kompetensi, Tujuan, dan Manfaat Fisika Terapan**

Mempelari **ilmu bangunan** atau **teknik sipil** (*civil engineering*) pada hakekatnya identik dengan mempelajari cara-cara dan upaya untuk menjadikan alam semesta makin beranekaragam dan unik, yang aman dan nyaman dihuni, serta asri disinggahi. Pengembangan bidang teknik sipil merupakan satu di antara ujung tombak pengembangan bidang **ilmu teknik** (*technology*) atau **teknologi/rekayasa** (*engineering*), dan tentu saja **ilmu alam** (*natural science*).

Pengembangan bidang teknik sipil ditempuh melalui beberapa upaya, antara lain melalui pengembangan mata kuliah fisika terapan. Pokok-pokok pengembangan mata kuliah diprogramkan melalui silabus, yang berisikan kompetensi, tujuan, manfaat, dan materi pokok bahasan dalam perkuliahan. Silabus mata kuliah fisika terapan disampaikan secara detil sebagai berikut.

**Tujuan** mata kuliah Fisika Terapan adalah penguasaan **kompetensi fisika terapan** yaitu penguasaan atas hukum-hukum dan teori-teori dasar dalam fisika yang menjadi dasar dalam bidang ilmu teknik/ rekayasa. Kompetensi itu diraih melalui pemahaman

dan kemampuan menjelaskan hukum-hukum dan teori-teori dasar dalam fisika, serta kemampuan menganalisis permasalahan fisika untuk menghasilkan solusi atas permasalahan fisika bersangkutan.

**Manfaat** yang dapat dipetik melalui penguasaan kompetensi fisika terapan adalah:

1. **dapat menyelesaikan berbagai permasalahan rekayasa di tengah masyarakat berlandaskan teori-teori fisika yang telah dikuasai.**

Pokok ini umum diterapkan/ diaplikasikan pada konteks permasalahan rekayasa yang telah umum dijumpai di masyarakat dan berkaitan dengan teori-teori fisika yang telah umum diterapkan.

Soal - penyelesaian demikian umum disampaikan melalui tugas-tugas pekerjaan rumah atau soal-soal latihan dalam perkuliahan.

2. **dapat melakukan upaya-upaya menerapkan teori-teori fisika di bidang rekayasa untuk menyelesaikan berbagai permasalahan rekayasa terkini yang berkembang di tengah masyarakat.**

Pokok ini umum berkaitan dengan penyelesaian terhadap permasalahan yang belum dapat diselesaikan pada waktu lalu dan permasalahan baru yang memberikan kontribusi pada pengembangan teori dalam fisika dan kemaslahatan masyarakat.

3. **memudahkan dalam mempelajari hukum-hukum dan teori-teori lanjut dalam fisika yang dikemas dalam mata kuliah - mata kuliah pada semester-semester selanjutnya.**

Untuk itu, mata kuliah - mata kuliah pada semester lanjut dalam kurikulum berjalan penting dicermati sejalan dalam mempelajari fisika terapan.

Pada institusi pencetak calon guru/ instruktur fisika, di samping merupakan syarat kemudahan dalam mempelajari kompetensi fisika lanjut sebagaimana pada institusi pencetak sarjana fisika (termasuk sarjana teknik), penguasaan kompetensi fisika terapan bermanfaat untuk memperluas pengetahuan dan wawasan calon guru untuk lebih mempertajam kajian fisika yang akan dilaksanakan di masa datang ketika mengajarkan fisika.

### **1.3 PENGUKURAN, BESARAN, SIMBOL, SATUAN, DAN DIMENSI**

Pengukuran merupakan sesuatu proses yang bersifat fundamental dalam fisika karena sifat kuantitatif dari fisika. **Pengukuran** (*measurement*) adalah proses perbandingan suatu besaran dengan besaran standarnya.

Proses pengukuran dilakukan untuk memperoleh **data**, baik untuk bahan analisis dan/ atau verifikasi hasil analisis terhadap nilai besaran tersebut di alam, termasuk nilai besaran yang dipetik di laboratorium.

Ilmu yang mempelajari seluk beluk dan semua hal yang berkaitan dengan pengukuran disebut **metrologi** (*metrology*). Kajian dalam metrologi mencakup:

- 1) besaran,
- 2) satuan,
- 3) simbol,
- 4) dimensi, dan
- 5) kriteria standar yang berkaitan dengan besaran, antara lain: sistem, prosedur, presisi, dan akurasi pengukuran.

**Besaran** (*quantity*) dimaknai sebagai suatu yang dikenai pengukuran. Hingga kini, terdapat 2 klasifikasi besaran sebagai berikut.

Klasifikasi pertama membagi besaran ke dalam 3 kelas, yaitu besaran pokok/ dasar, besaran turunan, dan besaran tambahan.

- 1) **Besaran pokok/ dasar** (*basic or fundamental quantity*) adalah besaran yang tidak dapat diturunkan menjadi besaran lain yang lebih sederhana, misalnya panjang, lebar, tinggi, dan selang waktu.
- 2) **Besaran turunan** (*derived quantity*) adalah besaran yang disusun dari besaran dasar. Oleh karena itu, besaran turunan dapat juga diturunkan ke besaran dasarnya.
- 3) **Besaran pelengkap/ tambahan** (*additional quantity*) merupakan besaran dasar baru yang ditambahkan untuk melengkapi besaran dasar yang telah ada.

Besaran dapat juga diklasifikasikan ke dalam 2 kelas, selain klasifikasi tersebut, yaitu besaran vektor dan besaran skalar. **Besaran vektor** (*vector*) adalah besaran yang memiliki besar/ magnitudo (*magnitud*) dan arah (*direction*). Sedangkan **besaran skalar** (*scalar*) adalah besaran yang hanya memiliki besar.

Setiap besaran selalu memiliki simbol, satuan, simbol satuan, dan dimensi yang digunakan untuk identitas dan sekaligus membedakan antara satu besaran dengan besaran lainnya.

Simbol untuk suatu besaran umumnya diambil dari huruf awal dari nama besaran bersangkutan, misalnya simbol "*l*" untuk panjang (*length*)".

Satuan dan simbol satuan untuk suatu besaran bervariasi bergantung pada sistem satuan yang ditetapkan di suatu wilayah atau negara.

**Tabel 1.1** Besaran Pokok, Turunan, dan Tambahan (Satuan SI)

Besaran	Simbol	Satuan	Simbol Satuan	Dimensi
<b>Besaran Dasar/ Pokok</b>				
panjang ( <i>length</i> )	$l$	meter	m	L
massa ( <i>mass</i> )	$m$	kilogram	kg	M
waktu ( <i>time</i> )	$t$	sekon	s	T
arus listrik ( <i>electric current</i> )	$I$	ampere	A	I
suhu termodinamik ( <i>thermodynamic</i> )	$T$	kelvin	K	$\Theta$
banyak zat ( <i>amount of substance</i> )	$n$	mole	mol	N
intensitas penyinaran ( <i>luminous intensity</i> )	$I$	candela	cd	J
<b>Besaran Pelengkap</b>				
susut datar ( <i>plane angle</i> )	$\alpha, \beta, \varphi$	radian	rad	-
sudut ruang ( <i>solid angle</i> )	$\theta$	steradian	sr	-
<b>Besaran Turunan</b>				
antara lain:				
luasan (area)	$A$	are	m <sup>2</sup>	L <sup>2</sup>
volume (volume)	$\zeta$	cubic	m <sup>3</sup>	L <sup>3</sup>

Lanjutan Tabel 1.1 Besaran Pokok, Turunan, ...

Besaran	Simbol	Satuan	Simbol Satuan	Dimensi
debit aliran ( <i>discharge</i> )	$Q$	-	m <sup>3</sup> /s	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>
kemiringan ( <i>slope</i> )	$S, i$	-	m/m	-
kecepatan/ laju ( <i>speed, velocity</i> )	$v$	-	m/s	L T <sup>-1</sup>
kecepatan sudut ( <i>angular velocity</i> )	$\omega$	-	rad/s	T <sup>-1</sup>
percepatan ( <i>acceleration</i> )	$a$	-	m/s <sup>2</sup>	L T <sup>-2</sup>
percepatan sudut ( <i>angular velocity</i> )	$\alpha$	-	rad/s <sup>2</sup>	T <sup>-2</sup>
frekuensi ( <i>frequenncy</i> )	$f$	hertz	Hz	T <sup>-1</sup>
rapat massa ( <i>mass density or specific mass</i> )	$\rho$	-	kg/m <sup>3</sup>	M L <sup>-3</sup>
berat jenis ( <i>weight density or specific weight</i> )	$\gamma$	-	kg/m <sup>3</sup>	M L <sup>-3</sup>
berat unit ( <i>unit weight</i> )	$\gamma$	-	kg/m <sup>3</sup>	M L <sup>-3</sup>
gaya ( <i>force</i> )	$\Phi, II, \Omega$	newton	N (= kg.m/s <sup>2</sup> )	M L T <sup>-2</sup>
tekanan ( <i>pressure</i> )	$p$	pascal	Pa (= N/m <sup>2</sup> )	M L <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
tegangan ( <i>stess</i> )	$\sigma, \tau$	pascal	Pa	M L <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
tegangan permukaan ( <i>surface tension</i> )	$\tau$	-	N/m	M L <sup>-2</sup> T <sup>-2</sup>

Lanjutan Tabel 1.1 Besaran Pokok, Turunan, ...

Besaran	Simbol	Satuan	Simbol Satuan	Dimensi
modulus elastisitas ( <i>elastic modulus or lastistity modulus</i> )	$E, n$	pascal	Pa	$M L^{-1} T^{-2}$
kekentalan kinematik ( <i>kinematic viscosity</i> )	$\mu$	-	$m^2/s$	$L^2 T^{-1}$
kekentalan dinamik ( <i>dynamic viscosity</i> )	$\nu$	-	$N.s/m^2$	$M L^{-1} T^{-1}$
tenaga, energy ( <i>energy</i> )	$E$	joule	$J = N.m$	$M L^2 T^{-2}$
kerja ( <i>work</i> )	$W$	joule	$J = N.m$	$M L^2 T^{-2}$
daya ( <i>power</i> )	$P$	watt	$W = J/s$	$M L^2 T^{-3}$
momen inersia ( <i>inertia momen or momen of inertia</i> )	$I$	-	$m^4$	$L^4$
momentum ( <i>momentum</i> )	$P, m$	-	$kg.m/s$	$M L T^{-1}$
momentum dari momentum ( <i>moment of momentum</i> )	$P, m$	-	$kg.m^2/s$	$M L^2 T^{-1}$
panas spesifik ( <i>specific heat</i> )	$h$	-	$J/(kg.K)$	$L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$
konstanta gas ( <i>specific heat</i> )	$R$	-	$J/(kg.K)$	$L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$
entropi ( <i>entropy</i> )	$R$	-	$J/K$	$M L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$
konduktifitas panas bumi ( <i>thermal conductivity</i> )		-	$W/(m.K)$	$M L T^{-3} \Theta^{-1}$

Sumber: BIPM (2008) dengan modifikasi

Pada Tabel 1.1 dimuat besaran-besaran dengan simbol, satuan, simbol satuan, dan dimensinya dalam Satuan SI atau Satuan Sistem Internasional (SI Units, *International System of Units*). Satuan SI mulai dipakai sejak disepakati di Paris tahun 1960 dalam *Elevent General Conference of Weight and Measures* guna menyeragamkan berbagai perbedaan satuan terpakai pada negara-negara di dunia. [Taylor B. N. dan A. Thompson, NIST Special Publication (2001) dan BIPM (Bureau *International des Poids et Mesures*) di Sèvres Perancis (2008)].

Sebelum Satuan SI, telah dipakai 4 jenis sistem satuan. Keempat sistem satuan didasarkan pada Hukum II Newton,  $\vec{F} = m \vec{a}$ . Bersamaan ditetapkannya satuan sistem metrik tahun 1791, ditetapkan massa standar kilogram (kg) untuk volume air 1 dm<sup>3</sup> atau gram (g) untuk volume air 1 cm<sup>3</sup> pada suhu 4°C (Modi, P.N. dan S.M. Seth, 1991).

Di antara 4 sistem satuan tersebut, 2 sistem satuan dalam **satuan sistem metrik** (*metric units*) yaitu CGS (*centimetres gram second*) dan MKS (*meter kilogram second*). Sedangkan 2 sistem lainnya dalam **satuan sistem Inggris** (*English units*), yaitu FPS (*Foot Pound Second*). Masing-masing satuan tersebut dikenal berkembang dalam **sistem absolut** yang dipakai oleh kalangan ahli fisika murni (*absolute of physicist's system*) dan **sistem gravitasional** yang digunakan oleh insinyur/ ahli fisika terapan (*gravitational or engineering's system*). Perbedaan antara kedua bentuk sistem satuan tersebut adalah bahwa pada sistem absolut dipakai unit standar massa dan gaya yang diturunkan berdasar Hukum II Newton. Sedangkan pada sistem gravitasional, dipakai unit standar gaya dan selanjutnya massa diturunkan berdasar Hukum II Newton. Untuk lebih detil, cermati persamaan dan perbedaan antar satuan dalam Tabel 1.2.

**Tabel 1.2** Perbandingan Satuan dalam Sistem Metrik dan Sistem Inggris

Besaran (Quantities)	Sistem Metrik (metric units)		Sistem Inggris (English units)	
	Gravitational	Absolute	Gravitational	Absolute
Panjang ( <i>l, length</i> )	meter (m)	meter (m)	foot (ft)	foot (ft)
Waktu ( <i>t, time</i> )	second (sec)	second (sec)	second (sec)	second (sec)
Massa ( <i>m, mass</i> )	metric slug (msl)	gram mass [gm(mass)]	slug (sl)	Pound [lb(m)]
Gaya ( <i>F, force</i> )	kilogram force [kg(f)]	Dyne	Pound [lb(f)]	Poundal [pdl]
Suhu ( <i>T, temperature</i> )	°C	°C	°F	°F

Sumber: Modi, P.N. dan S.M. Seth (1991)

**Tabel 1.3** Simbol Perkalian Sepuluh Angka Desimal pada Satuan SI

$.10^X$	Awalan	Awalan	$.10^X$	Awalan	Simbol
$10^{24}$	yetta	Y	$10^{-1}$	deci	d
$10^{21}$	zetta	Z	$10^{-2}$	centi	c
$10^{18}$	exa	E	$10^{-3}$	milli	m
$10^{15}$	peta	P	$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^{12}$	tera	T	$10^{-9}$	nano	n
$10^9$	giga	G	$10^{-12}$	pico	p
$10^6$	mega	M	$10^{-15}$	femto	f
$10^3$	kilo	k	$10^{-18}$	atto	a
$10^2$	hecto	h	$10^{-21}$	zepto	z
10	deca	da	$10^{-24}$	yecto	y

Sumber: BIPM (2008)

## Pendahuluan

Mengingat Satuan SI lebih universal, maka Satuan SI kini lebih populer daripada sistem satuan lainnya dan dipakai pada hampir semua negara di dunia. Beberapa ketentuan dalam pemakaian Satuan SI adalah sebagai berikut:

- 1) Huruf awal untuk nama satuan dituliskan dengan huruf kecil, meskipun merupakan nama orang, misalnya newton, pascal, joule, watt, dan hert.
- 2) Huruf untuk simbol satuan yang merupakan nama orang ditulis dengan huruf besar, misalnya N untuk newton, Pa untuk pascal, J untuk joule, W untuk watt, dan Hz untuk hert.
- 3) Huruf untuk simbol satuan selain dalam ketentuan no.2 ditulis dengan huruf kecil, misalnya m untuk meter, s untuk sekon, dan g untuk gram.
- 4) Tanda tidak disisipkan pada sela antar satuan, misalnya N.m untuk newton meter.
- 5) Angka melebihi 3 digit ditulis dalam bentuk grup diberi sela spasi, kecuali untuk urutan, misalnya:

20000	harus ditulis	20 000
98345'466	harus ditulis	98 345'466
0'25548	harus ditulis	0'255 48
7120	harus ditulis	7 120

- 6) Angka desimal sepuluh ditulis dengan simbol awalan (*prefix*) pada satuan dengan ketentuan dalam Tabel 1.3.

Penerapan Satuan SI di Indonesia secara konsisten juga harus memenuhi keenam ketentuan tersebut. Ejaan yang Disempurnakan (EYD) yang disepakati di Indonesia tahun 1972 telah disusun dengan meratifikasi ketentuan tersebut.

## 1.4 VEKTOR DAN SKALAR

**Besaran** (*quantity*) dalam fisika dapat juga dikelompokkan ke dalam kelas **besaran vektor** (*vector*) dan **besaran skalar** (*scalar*). Berlainan dengan besaran vektor yang memiliki **besar** (*magnitude*) dan **arah** (*direction*), besaran skalar hanya memiliki besar. Sebagai contoh besaran vektor:

- 1) perpindahan (1,5 km; 3,4 m; 2,65 dm),
- 2) elevasi (-1 cm; +2,3 m; +7,11 dm).
- 3) debit aliran (3,2 m<sup>3</sup>/s);
- 4) arus listrik (2,1 A; 4,65 mA; 7,99 kA);
- 5) kecepatan/ laju (2,3 m/s; 4 km/jam; 7 cm/s),
- 6) tekanan (2,7 kN/m<sup>2</sup>; 0,7 nN/m<sup>2</sup>; 1,11 kN/cm<sup>2</sup>), dan
- 7) gaya (1 N; 3,4 kN; 4,56 kg(f)).

Sedangkan contoh besaran skalar antara lain adalah:

- 1) jarak (1 m; 4,5 cm; 7,21 km),
- 2) kedalaman (3,4 m; 1,2 km; 8,4 cm),
- 3) tinggi (4,5 m; 6,2 cm; 5,2 km)
- 4) suhu/ temperatur (2°C; 27°F; 31°C), dan
- 5) waktu (1 jam; 3 sekon; 56 menit).

Dalam matematika, besaran skalar digunakan mengikuti operasi aljabar biasa, sedangkan besaran vektor digunakan mengikuti operasi aljabar vektor. Dalam buku ini, dua jenis operasi matematis tersebut digunakan secara intensif, namun tidak diuraikan lebih lanjut guna menghindari tumpang tindih antara materi dalam kuliah matematika yang juga disampaikan dalam semester sama. Jika informasi detil perihal kedua operasi aljabar tersebut diperlukan, dipersilakan merujuk pada pustaka matematika terkait. Beberapa referensi aljabar vektor dan kalkulus dapat dilihat pada bagian daftar pustaka.

## 1.5 KONVERSI SATUAN

**Konversi satuan** dipakai untuk mengubah satuan suatu besaran memakai suatu **faktor konversi** dari satu sistem satuan ke sistem satuan lainnya. Konversi ini kadang diperlukan agar karakteristik dan dampak yang ditimbulkan oleh benda yang diukur memakai suatu besaran tidak dipengaruhi oleh beda satuan besaran yang dipakai antara kedua tempat. Dengan kalimat lain, konversi satuan kadang diperlukan agar karakteristik dan dampak yang ditimbulkan oleh benda yang diukur memakai suatu besaran dapat diterapkan di dua tempat yang memakai sistem satuan berlainan. Misalnya, angka 35,3134 dalam soal-soal berikut disebut dengan faktor konversi dari satuan panjang feet ke satuan meter.

### Contoh soal 1.1

Suatu benda padat berbentuk tabung dengan diameter 4 inchi dan volume 35,3134 ft<sup>3</sup> bergerak lurus dengan kecepatan konstan 1 ft/s. Tentukan karakteristik dan keadaan, serta dampak benda tersebut dalam satuan SI.

Jawab:

Benda memiliki karakteristik:

- § Benda padat
- § Diameter benda 4 inchi =  $4 \cdot 2,54 \cdot 10^{-2} = 1,016 \cdot 10^{-1} \text{ m}$
- § Volume benda 35,3134 ft<sup>3</sup> = 1 m<sup>3</sup>

Benda dalam keadaan:

- § Bergerak
- § Kecepatan benda 1 ft/s = 0,3048 m/s.

Dampak yang dapat ditimbulkan benda antara lain adalah jarak pencapaian tujuan, gaya gesek, gaya tumbukan, dan energi kinetik oleh benda dengan kecepatan gerak 1 ft/s setara dengan 0,3048 m/s.

## Contoh soal 1.2

Dalam contoh 1.1, benda berupa cairan dalam kontainer dengan berat unit sebesar  $1 \text{ lb/ft}^3$  diam di atas kendaraan bergerak. Tentukan karakteristik, keadaan, dan dampak benda terhadap kendaraan dalam satuan SI.

Jawab:

Benda memiliki karakteristik:

- § Cairan
- § Volume benda  $35,3134 \text{ ft}^3 = 1 \text{ m}^3$
- § Berat unit sebesar  $1 \text{ lb/ft}^3 = 4,4482 / 2,832 \cdot 10^{-2} = 157,0692 \text{ N/m}^3$

Keadaan benda:

- § Diam di atas kendaraan bergerak
- § Berat benda = Volume. berat unit =  $1 \cdot 157,0692 = 1,570692 \cdot 10^2 \text{ N}$

Dampak-dampak yang dapat ditimbulkan benda berdasar karakteristik dan keadaan benda antara lain adalah membebani kendaraan sebesar  $1,570692 \cdot 10^2 \text{ N}$ .

## 1.6 ANALISIS DIMENSI

Analisis dimensi (*dimensional analysis*) merupakan analisis terhadap dimensi besaran-besaran yang akan digunakan sebagai parameter dalam uji laboratorium memakai model fisik. Analisis tersebut dimaksudkan untuk menetapkan **parameter-parameter tanpa/ non dimensi** (*nondimensional parameters*) dan digunakan untuk mengeliminasi pengaruh perbedaan antar sistem satuan terhadap parameter tersebut. Parameter non dimensi tidak memiliki satuan. Dengan demikian, dalam uji model di laboratorium, analisis dimensi tidak hanya dilakukan untuk menetapkan dimensi masing-masing besaran yang dipakai sebagai parameter, sebagaimana telah dijabarkan dalam sub bab terdahulu.

## Pendahuluan

Simulasi model fisik merupakan serial pengujian secara simulatan dengan model fisik untuk mempelajari fenomena (kejadian) di alam (Modi, P.N. dan S.M. Seth, 1991). **Model fisik** (*physical model*) adalah suatu bentuk tiruan dari benda di alam. Sedangkan bentuk benda sesungguhnya di alam, yang ditiru memakai model fisik, disebut **prototipe** (*prototype*). Model fisik dibuat untuk mencari solusi permasalahan fisik yang belum dapat diperoleh secara analitis maupun menggunakan model matematik.

Pemodelan fisik digunakan untuk membuat model dengan skala lebih kecil atau lebih besar daripada prototipe di lapangan, memakai **skala model**. Skala merupakan rasio antara nilai parameter pada prototip terhadap nilai parameter pada model. Di bidang teknik sipil dan teknik mesin, model fisik umumnya dibuat dengan skala lebih kecil daripada prototipenya. Sebaliknya, di bidang teknik elektro, model umumnya dibuat berukuran lebih besar daripada prototipenya.

Besar skala model dipilih dengan mempertimbangkan syarat-syarat kesebangunan (kemiripan) yang harus dipenuhi untuk dapat mewakili prototipenya. Sebagai contoh, skala model untuk uji laboratorium terhadap fenomena di bidang teknik sipil hidraulik, skala model dipilih berdasarkan analisis kesebangunan hidraulik.

Hukum kesebangunan hidraulik dinyatakan oleh Nur Yuwono (1994) mencakup 3 kriteria. Pertama, kriteria **sebangun geometrik** terpenuhi jika bentuk geometri model sama tetapi berbeda ukuran dengan prototip. Ada 2 macam model, yaitu model tak-distorsi jika skala panjang horisontal dan vertikal sama dan model distorsi jika tidak sama. Skala panjang horisontal ( $n_L$ ) ditentukan dari panjang di prototip ( $L_p$ ) dan panjang di model ( $L_m$ ) dengan persamaan:

$$n_L = \frac{L_p}{L_m} \dots\dots\dots (1.1)$$

Sedangkan skala panjang vertikal ( $n_h$ ) ditentukan dari tinggi di prototip ( $h_p$ ) dan tinggi di model ( $h_m$ ) dengan persamaan:

$$n_h = \frac{h_p}{h_m} \quad \dots\dots\dots (1.2)$$

Kedua, kriteria **sebangun kinematik** terpenuhi jika kecepatan dan percepatan pada model dan pada prototip memiliki besar dan arah sama dan memenuhi sebangun geometrik. Baik kecepatan maupun percepatan merupakan fungsi waktu. Skala waktu ( $n_t$ ) ditentukan dengan waktu di prototipe ( $t_p$ ) dan waktu di model ( $t_m$ ), yaitu:

$$n_t = \frac{t_p}{t_m} \quad \dots\dots\dots (1.3)$$

Ketiga, kriteria **sebangun dinamik** terpenuhi jika gaya-gaya yang bekerja pada model dan pada prototip memiliki besar dan arah sama serta memenuhi sebangun geometrik dan sebangun kinematik. Pada permasalahan refleksi dan transmisi gelombang, dipakai kriteria bilangan Froude ( $Fr$ ) sebagai rasio antara gaya gravitasi dan gaya inersia. Skala angka Froude ( $n_{Fr}$ ) untuk model tak-distorsi:

$$n_{Fr} = \frac{(Fr)_p}{(Fr)_m} \quad \dots\dots\dots (1.4)$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad \dots\dots\dots (1.5)$$

$U$ ,  $g$  dan  $L$  berurutan adalah kecepatan partikel air, percepatan gravitasi bumi dan jarak.

Hubungan antar parameter terskala harus ditetapkan melalui analisis dimensi guna mendapatkan parameter tanpa dimensi terbaik untuk interpretasi dari model ke prototip.

## Pendahuluan

Dalam teknik hidraulik, ada 3 elemen dimensi yaitu massa (M), panjang (L) dan waktu (T). Selain eliminasi dimensi, dilakukan identifikasi proporsi hubungan antar parameter dan orde sensitivitas setiap parameter. Modi, P.N. dan S.M. Seth (1991) menguraikan 2 teknik analisis di buku *Hidraulics and Fluid Mechanics* yaitu metode *Rayleigh* dan *Bukingham*. Nur Yuwono (1994) di buku *Perencanaan Model Hidraulik* juga menguraikan metoda *stepwise, basic echelon matrix*, dan *Langhaar*.

### Contoh soal 1.3

Suatu prototipe bangunan memiliki ukuran panjang 80 m, lebar 12 meter, dan tinggi 8 m. Tentukan skala model jika untuk memodelkan prototipe bangunan tersebut tersedia ruangan di laboratorium berukuran  $1 \times 1 \text{ m}^2$  dan tinggi 4 m.

Jawab:

Model harus dapat ditempatkan dalam ruang seluas ruang  $1 \times 1 \text{ m}^2$ , dapat dipilih panjang model rencana 80 cm = 0,8 m agar dapat ditempatkan dalam ruang tersedia.

$$\begin{aligned}\text{Skala panjang } (n_L) &= \text{panjang prototipe/panjang model} \\ &= 80 \text{ m}/0,8 \text{ m} \\ &= 100\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Lebar model } (L_m) &= \text{lebar prototipe/skala panjang} \\ &= 12/100 \\ &= 0,12 \text{ m} = 12 \text{ cm}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tinggi model } (h_m) &= \text{tinggi prototipe/ skala panjang} \\ &= 8/100 \\ &= 0,08 \text{ m} = 8 \text{ cm}.\end{aligned}$$

$$\text{Skala luas } (n_A) = S_L \cdot S_L = 100 \cdot 100 = 1 \cdot 10^4$$

$$\text{Skala luas } (n_V) = S_L \cdot S_L \cdot S_L = 100 \cdot 100 \cdot 100 = 1 \cdot 10^6$$

Jadi, skala panjang, luas, dan volume pada model berturut-turut adalah  $n_L = 100$ ,  $n_A = 1 \cdot 10^4$ , dan  $n_V = 1 \cdot 10^6$ .

Aspek-aspek dalam hukum kesebangunan lainnya antara model dan prototipe tidak dibahas lebih lanjut dalam buku ini. Pembaca dipersilakan mencari pada referensi pemodelan fisik sesuai dengan bidang penelitian dan pengkajian yang diminati.

Di antara referensi pemodelan fisik yang dapat dipilih dimuat dalam daftar pustaka buku ini, antara lain publikasi tulisan K. Satrijo Utomo et al [2004(a) dan 2004(b)] baik dalam "Karakteristik Hidraulik Hutan Bakau dalam Meredam Energi Tsunami" maupun "Rhizophora Forest as a Tsunami Damper". Di dalam 2 publikasi tersebut dapat diperoleh informasi tentang proses perencanaan dan pengujian fenomena *tsunami* memakai model fisik, meliputi:

- 1) penataan model di ruang pengujian,
- 2) pilihan bahan model,
- 3) penentuan skala model,
- 4) rencana peralatan uji,
- 5) rencana pengujian, dan
- 6) teknik pemetikan data.

Simulasi fenomena di bidang teknik dapat juga dilakukan dengan membuat konstruksi **prototipe** di laboratorium, yang berukuran sama dengan ukuran sebenarnya di lapangan. Berlainan dengan pengujian memakai model fisik yang dilakukan dengan skala model tertentu, pengujian prototipe tidak memakai skala sebagaimana menguji benda atau menyelidiki fenomena yang dialami oleh benda sesungguhnya di alam. Simulasi prototipe demikian dilakukan untuk menyelidiki fenomena yang mungkin dihadapkan pada kendala-kendala dan kesulitan-kesulitan jika dilakukan secara langsung di lapangan, misalnya jarak tempuh ke lokasi yang relatif jauh. Karena itu, penyelidikan dilakukan dalam ruangan khusus/ laboratorium.

Satu di antara publikasi pengujian prototipe di laboratorium dimuat dalam daftar pustaka disampaikan oleh Utomo et al (2011) bertajuk "Perilaku Lentur Dorpel Kusen Beton Bertulang". Dalam publikasi tersebut dimuat informasi prototipe baru kusen beton bertulang pracetak dengan inisial "Sentonnes (kuSEN beTON UNNES)", meliputi:

- 1) rencana prototipe,
- 2) rencana pengujian,
- 3) teknik pemetikan data, dan
- 4) teknik perhitungan dalam analisa.

Analisis dimensi dapat juga diterapkan untuk simulasi fenomena alam memakai model matematik, selain memakai model fisik. Namun demikian, dalam banyak kasus pemodelan matematik dilakukan tanpa analisis dimensi. Hal demikian mengingat bahwa simulasi model matematik dapat juga dilakukan memakai persamaan-persamaan yang melibatkan parameter non dimensi yang telah tersedia (eksisting).

Di antara referensi pemodelan matematik yang dapat dipilih dimuat dalam daftar pustaka buku ini, antara lain publikasi tulisan K. Satrijo Utomo (1999) berjudul "Penggambaran Jaring Aliran (*Flownet*) dengan Metoda Beda Hingga". Dalam publikasi ini dapat diperoleh pula informasi pemodelan aliran rembesan di bawah bendung memakai model matematik, mencakup:

- 1) penentuan skala model,
- 2) rencana peralatan uji,
- 3) rencana pengujian, dan
- 4) teknik pemetikan data
- 5) teknik perhitungan dalam analisa.

## 1.7 SISTEM

Identifikasi sistem pada suatu fenomena di alam semesta merupakan suatu konsep fundamental dalam fisika. Keahlian/kemahiran dalam mengidentifikasi dan menyederhanakan kompleksitas suatu sistem lebih lanjut akan memudahkan dalam mengkaji dan mengembangkan teori fisika yang berkaitan dengan sistem bersangkutan.

**Sistem** (*system*) pada hakekatnya adalah suatu rangkaian beberapa fenomena (*phenomeons*)/peristiwa (*events*)/kejadian (*facts*)/proses (*processes*) tertentu guna mendapatkan hasil/keluaran (*output*) tertentu dari berbagai masukan (*input*) yang juga tertentu.

Di antara sistem yang ada dan dikenal manusia, sistem paling sederhana disebut dengan **sistem kotak hitam** (*black box system*), sebagaimana ditunjukkan dalam gambar berikut. Sistem kotak hitam penting dikaji karena merupakan suatu konsep fundamental dalam setiap penerapan **metode empirik** (*empirical method*) atau metode eksperimen. Berkaitan dengan banyaknya persamaan-persamaan/rumus-rumus empirik yang diadopsi di Indonesia dari manca negara, diperlukan kecermatan dalam penerapannya sesuai dengan kondisi di Indonesia.



**Gambar 1.2** Sistem Kotak Hitam

Dalam sistim kotak hitam, kajian tidak difokuskan pada proses (*process*) yang terjadi dalam sistem, tetapi pada kondisi dan obyek sistem. Kondisi sistem diapresiasi dalam bentuk:

- (1) kondisi alam (*natural condition or default condition*) dan

## Pendahuluan

- (2) kondisi buatan/artificial (*artificial condition*) setelah perlakuan/ penanganan (*treatment*) tertentu dilakukan atas kondisi alam.

Sedang obyek sistem diapresiasi dalam bentuk:

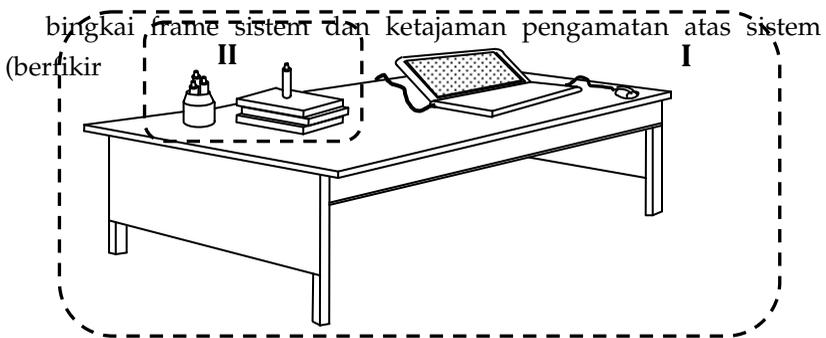
- (1) masukan sistem sebagai kondisi awal (*initial condition*) dan
- (2) keluaran sistem sebagai kondisi akhir (*final condition*) atau hasil (*result*).

Penerapan sistem kotak hitam dengan demikian hanya memandang hasil sistem berdasar masukan dan kondisi awal serta kondisi akhir sistem, tanpa menghiraukan proses yang terjadi dalam sistem akibat masukan dan kondisi awal yang diberikan pada sistem. Penggunaan sistem kotak hitam atau metode empirik dengan demikian harus dilaksanakan secara hati-hati dengan memberi perhatian pada perbedaan kondisi (awal) antara kondisi setempat di mana sistem/ persamaan/ rumus akan diterapkan terhadap kondisi setempat di mana sistem/ persamaan/ rumus bersangkutan dibentuk. Bilamana terdapat perbedaan kondisi antara kedua tempat tersebut, maka penerapan sistem/ persamaan/ rumus bersangkutan harus dilandaskan pada argumentasi dan asumsi ilmiah yang memadai.

Sementara itu, suatu sistem umumnya ada secara alami atau pun dibuat/ dikembangkan oleh manusia tidak hanya ditujukan untuk mengetahui keluarannya saja, tetapi juga proses-proses yang terjadi di dalamnya. Oleh karena itu, lingkup suatu sistem umumnya dirancang untuk dapat berfungsi melebihi fungsi sistem kotak hitam, yang menjadi dasar penerapan metode empirik.

Pengetahuan mengenai proses-proses yang terjadi di dalam sistem tersebut selanjutnya digunakan sebagai landasan teori atau pun persamaan/ rumus dalam penyelesaian memakai **metode analitis** (*analytical method*).

Suatu sistem pembebanan pada lantai dalam Gambar 1.3 merupakan satu contoh sistem yang lebih kompleks daripada sistem kotak hitam. Sistem tersebut dapat diperbesar maupun diperkecil lingkungannya, antara sistem I dan II, sesuai dengan kecermatan terhadap permasalahan yang perlu diselesaikan. Sistem tersebut dapat pula diperluas lingkungannya menjadi sistem III, IV, dan lainnya jika pengaruh beban tertentu dari luar sistem dipandang perlu pula untuk ditinjau/ diakomodasikan.



**Gambar 1.3** Contoh Sistem Pembebanan pada Lantai

## 1.8 SOAL-SOAL

1. Jelaskan definisi fisika dan fisika terapan!
2. Uraikan secara singkat cabang-cabang fisika!
3. Jelaskan yang dimaksud kompetensi dan tujuan fisika terapan.
4. Jelaskan manfaat mempelajari fisika terapan.
5. Dalam mempelajari fisika dapat digunakan beberapa metode? Deskripsikan jawaban Saudara!
6. Jelaskan makna istilah berikut ini:
  - a) asumsi,
  - b) hukum,

## *Pendahuluan*

- c) teori,
  - d) postulat,
  - e) konsep,
  - f) metode ilmiah,
  - g) prinsip, dan
  - h) hipotesis.
7. Uraikan pengertian besaran dan klasifikasinya, serta berikan juga masing-masing 2 contoh disertai simbol, satuan, dan dimensinya!
  8. Jelaskan yang dimaksud satuan dan dimensi!
  9. Jelaskan sistem-sistem satuan yang diterapkan hingga kini dan sebutkan pula negara-negara terkait yang menggunakannya!
  10. Jelaskan pengertian suatu sistem dalam fisika!
  11. Jelaskan sistem kotak hitam dalam fisika!
  12. Cermati Gambar 1.3, jika diketahui berat meja adalah 67 kg(f), berat satu batang alat tulis adalah 62 g(f), berat tempat alat tulis adalah 120 g(f), berat sebuah notebook adalah 9,6 kg(f), dan berat sebuah buku adalah 16 ons, sedangkan beban kabel dan mouse diabaikan, tentukan:
    - a) Beban yang harus ditopang meja pada sistem II dalam kN,
    - b) Beban yang harus ditopang lantai pada sistem I dalam kN.
  13. Uraikan beberapa fenomena dalam keseharian Saudara yang berkaitan dengan pokok bahasan atau materi dalam fisika. Jawaban harus disertai teori dalam fisika yang berkaitan dengan fenomena bersangkutan. Sertakan pula referensi, buku, atau sumber pustaka acuan di mana teori tersebut diacu.
  14. Hal-hal apa saja yang menarik Saudara untuk mempelajari fisika? (jawaban dapat lebih dari satu hal).
  15. Menurut Saudara, adakah pokok-pokok bahasan dalam fisika yang sulit untuk dipahami? Jelaskan alasan atas jawaban yang Saudara sampaikan tersebut. Pokok bahasan maupun alasan dapat lebih dari satu.

# BAB 2

## KINEMATIKA

Kinematika merupakan cabang mekanika paling tua dan Mekanika merupakan cabang fisika paling tua. Hingga pertengahan abad ke-17, materi-materi kajian dalam fisika masih banyak berupa konsep-konsep. Kemudian, setelah ditemukannya teori gaya oleh Newton di pertengahan abad ke-17, konsep-konsep tersebut dapat dikembangkan menjadi prinsip-prinsip yang memadai digunakan sebagai teori-teori fisika karena dapat dijabarkan secara matematis dalam bentuk persamaan matematis. Dalam bentuk persamaan matematik, konsep-konsep dan prinsip-prinsip fisika menjadi mudah digunakan, baik untuk pengembangan teori maupun diterapkan. Perkembangan fisika yang demikian pesat kala itu dipicu perkembangan matematika yang demikian pesat. Banyak teori-teori fisika yang dikaji bersama dengan matematika. Oleh karena itu pula, hingga akhir abad ke-17, ahli-ahli fisika identik dengan ahli-ahli matematika yang sekaligus juga berperan sebagai para filosof.

Sejalan dengan perkembangan awal Mekanika di awal abad ke-18, beberapa hasil-hasil kajian fisika yang telah ada dapat diklasifikasikan ke bidang kajian kinematika atau kinetika. Kedua bidang kajian tersebut jauh berbeda. Dalam **kinematika** (*kinematics*) dikaji fenomena-fenomena pada benda diam maupun bergerak tanpa meninjau gaya yang bekerja pada benda bersangkutan. Sedangkan dalam kinetika (*kinetics*) dikaji fenomena-fenomena pada benda diam maupun bergerak dengan meninjau gaya yang bekerja pada benda bersangkutan.

## *Kinematika*

Fisika mulai berkembang relatif sangat pesat pada pertengahan abad ke-17 sejak dikemukannya teori **gaya gerak** (*motion force*) oleh Sir Isaac Newton pada pertengahan abad ke-18, yang selanjutnya dipakai sebagai dasar pengembangan kinetika. Dalam perkembangan kinetika, dari teori gaya gerak selanjutnya berkembang teori gaya berat, inersia, sentripetal, sentrifugal, dan disusul kemudian teori momen, usaha, daya, energi, debit aliran, tekanan, impuls, momentum, gesekan, dan teori-teori lainnya.

Perkembangan kinematika juga demikian pesat di awal abad ke-18, meskipun kinetika jauh lebih berkembang pesat pada massa itu. Hingga akhir abad ke-20, hampir seluruh materi kajian fisika tercakup dalam kajian kinetika. Kurang lebih 90% materi fisika tercakup dalam kajian kinetika, sedangkan kurang dari 10% sisanya merupakan kajian kinematika. Hal demikian karena bidang kajian kinematika relatif lebih sempit daripada kinetika. Pokok-kokok kajian kinematika antara lain tentang titik pusat massa, gerak partikel maupun benda, gravitasi, dan tekanan air. Selain itu, perhitungan matematis dalam kajian kinematika jauh lebih rumit daripada dalam kajian kinetika.

Kajian-kajian dalam kinematika hampir seluruhnya dilakukan dalam lingkup partikel atau elemen dari suatu benda. **Partikel** (*particle*) adalah bagian terkecil dari suatu benda/ zat yang masih memiliki bentuk, massa, dan energi. Istilah partikel dapat dipakai untuk menyatakan suatu atom, sub atom, maupun suatu material/ benda/ zat yang umum dijumpai dalam ukuran debu.

Sedangkan **elemen** (*element*) adalah bagian terkecil dari suatu benda yang masih memiliki sifat-sifat fisik sebagaimana benda bersangkutan. Sejalan dengan perkembangan teknik komputasi (cara pengaplikasian komputer dalam berbagai bidang kehidupan) pada akhir abad ke-20, banyak ahli-ahli fisika berupaya mengaplikasikan kecanggihan komputer sebagai alat hitung dalam analisis sehingga

mulai tertarik kembali untuk mengembangkan kinematika, yang memerlukan perhitungan relatif lebih rumit daripada kinetika. Dalam praktek, pengembangan kinematika itu dilakukan dengan upaya mengaplikasikan teori-teori fisika yang telah berkembang pesat dalam ranah kinetika. Karena itu, pada awal abad ke-20, kajian kinematika makin berkembang pesat meskipun menjadi tidak mudah dibedakan terhadap kajian kinetika.

Kini pada awal abad ke-21, perkembangan fisika telah berlangsung makin cepat dengan dikembangkannya teori **fisika modern** (*modern physics*) dan **mekanika quantum** (*quantum mechanics*) dalam waktu yang hampir bersamaan yaitu tahun 1905 dan 1923. Pengembangan teori itu sekaligus menjadi pemilah kalangan para ahli fisika, mengingat fenomena dalam mekanika quantum belum dapat diklarifikasikan berdasar teori-teori mekanika terdahulu. Sementara, teori-teori mekanika terdahulu tetap masih diyakini kebenarannya dan penting diterapkan di berbagai bidang, antara lain bidang teknik sipil, kelistrikan, dan mesin. Para ahli fisika yang berfokus pada pengembangan dan aplikasi teori fisika modern dan mekanika quantum lebih lanjut dikelompokkan ke dalam kelompok ahli-ahli fisika modern. Sedangkan para ahli lainnya tetap berkecimpung dalam pengembangan dan penerapan teori **mekanika klasik** (*classical mechanics*).

## 2.2 PUSAT MASSA

Dalam konteks benda utuh dan bersifat homogen yang dapat dinyatakan sebagai suatu sitem partikel kontinyu, terdapat pengertian tentang pusat massa. **Pusat massa** (CM, *center of mass*) adalah titik di mana massa kumpulan partikel terpusat.

## Kinematika

CM dinyatakan berada pada koordinat  $x_{CM}$ ,  $y_{CM}$ , dan  $z_{CM}$ , secara berturut-turut dapat dituliskan:

$$\begin{aligned}x_{CM} &= \frac{1}{m} \sum m_i x_i \\y_{CM} &= \frac{1}{m} \sum m_i y_i \\z_{CM} &= \frac{1}{m} \sum m_i z_i \quad \dots\dots\dots (2.1)\end{aligned}$$

dengan  $m$  adalah massa total partikel-partikel dan  $m_i$  adalah massa partikel ke- $i$ . Sedangkan  $x_i$ ,  $y_i$ , dan  $z_i$  adalah absis dan ordinat partikel ke- $i$ .

### 2.3 GERAK, KECEPATAN, DAN PERCEPATAN

Perlu ditekankan, dalam kinematik dikaji fenomena-fenomena pada benda diam maupun bergerak tanpa meninjau gaya yang bekerja pada benda bersangkutan. Kajian dalam kinematik dilakukan dalam lingkup partikel atau elemen. Ada pun, materi-materi pokok kajian antara lain meliputi gerak, titik pusat massa, gravitasi, dan tekanan air.

#### 2.3.1. Gerak

Suatu partikel dikatakan mengalami **gerak** (*motion*), jika **lokasi/ titik** (*location or point*) di mana partikel berada berbeda dengan lokasi mula-mula partikel. **Daerah** (*region*) di mana partikel mula-mula berada disebut dengan daerah **asal** (*origin*). Namun demikian, istilah origin sering juga digunakan untuk menyatakan titik asal pada suatu salib sumbu koordinat Cartesian. Daerah di mana partikel berada setelah mengalami gerak disebut dengan lokasi **tujuan** (*destination*).

**Kondisi diam partikel merupakan fenomena yang bersifat relatif terhadap posisi pengamatnya.** Partikel pada benda bergerak dapat dinyatakan sebagai partikel diam (relatif diam) pada benda tersebut jika pengamatnya bergerak sebagaimana gerak benda tersebut, terutama jika pengamat berada pada benda bersangkutan. Sebagai contoh, partikel pada benda dalam keadaan diam di bumi dapat dinyatakan dalam keadaan bergerak terhadap matahari dan planet-planet lainnya karena bumi dan planet-planet lainnya bergerak mengelilingi matahari. Contoh lainnya adalah partikel pada kotak speaker yang dipasang pada suatu bus yang bergerak dapat dinyatakan dalam keadaan diam terhadap partikel pada spion bus yang dipasang pada bus yang sama. Namun, partikel pada kotak speaker maupun spion bus tersebut dapat dinyatakan dalam keadaan bergerak sesuai gerak bus jika ditinjau terhadap partikel pada halte bus yang diam di tepi jalan (di luar bus). Lalu menurut amatan Saudara, partikel pada kaca depan bus dalam contoh kasus tersebut dalam keadaan diam atau bergerak? Perlukah ditetapkan suatu asumsi untuk menjawab pertanyaan itu?

**Keadaan diam dan Bergeraknya suatu benda/ zat merupakan pokok penting dalam kinematika meskipun gerak benda bersifat relatif.** Dalam bab ini akan dibahas secara detil fenomena-fenomena yang dialami oleh partikel dalam keadaan diam dan bergerak.

### **2.3.2. Klasifikasi Gerak**

Berbagai gerak suatu partikel dapat diklasifikasikan dalam 2 kelas klasifikasi utama berdasarkan pada bentuk lintasan gerak dan kerangka inersia gerak. Berdasarkan **bentuk lintasan gerak (*path*) partikel**, gerak dapat diklasifikasikan dalam kelas:

1. **translasi (*translation*)** jika lintasan gerak partikel adalah garis lurus;

## Kinematika

Beberapa jenis gerak partikel dalam kelompok ini antara lain:

- a) **geser** (*sliding*);
- b) **jatuh bebas** (*falling*);
2. **rotasi** (*rotation*) jika lintasan gerak partikel adalah sudut dengan sumbu gerak di dalam partikel.
3. **dilatasi** (*dilatation*) jika lintasan gerak partikel adalah gabungan antara gerak translasi dan rotasi.

Beberapa jenis gerak partikel dalam kelompok ini antara lain:

- a) **gelinding** (*rolling*);
- b) **spin** (*spinning*);
- c) **voli** (*volley*);
- d) **revolusi** (*revolution*);
- e) **revolvi** (*revolving*) jika lintasan gerak melingkar dengan sumbu gerak di luar partikel, dapat berupa lintasan lingkaran, elips, dan kulit bola;

Gerak dapat diklasifikasikan **berdasar pada banyak partikel**, dalam kelas:

1. **gerak partikel tunggal** (*mono particle or single particle*) jika suatu partikel bergerak secara mandiri.

Beberapa jenis gerak partikel dalam kelompok ini meliputi gerak translasi, rotasi, dan dilatasi. Misalnya, gerak revolusi suatu elektron mengelilingi inti atom;

2. **gerak banyak partikel** (*group of particles*) jika 2 atau lebih partikel bergerak secara bersamaan, gerak partikel jenis ini dikelompokkan lebih lanjut dalam kelas:

- a) **gerak partikel demi partikel** jika setiap partikel dalam grup partikel bergerak secara mandiri/independen terhadap gerak partikel lainnya.

Beberapa jenis gerak partikel dalam kelompok ini membentuk pola gerak tertentu, antara lain:

- (1) **radial** (*radial*) jika lintasan gerak partikel dari satu titik ke segala arah dalam bidang, atau sebaliknya dari beberapa/segala arah dalam bidang ke satu titik;
  - (2) **sebar** (*surrounding*) jika lintasan gerak partikel dari satu titik ke segala arah dalam ruang, atau sebaliknya dari beberapa/segala arah dalam ruang menuju ke satu titik;
  - (3) **osilasi** (*oscillation*) jika lintasan gerak partikel bolak-balik atau dalam siklus (siklik), misal gerak osilasi bola, pendulum, dan gelombang mekanik;
- b) **gerak kelompok/ grup partikel** jika banyak partikel bergerak dalam suatu unit/ grup partikel.

Jenis-jenis gerak partikel dalam kelompok meliputi gerak translasi, rotasi, dan dilatasi dari grup partikel. Misalnya, **gerak benda padat pada umumnya**, gerak partikel pada batu yang jatuh ke tanah dari ketinggian tertentu, dan gerak partikel pada batu yang dilemparkan keatas.

Gerak rotasi grup partikel dalam kelompok dapat diklasifikasikan pula berdasar pada **simpangan antar sumbu** (*deflection of the axis*) dari grup partikel dalam kelompok:

- (1) **angguk** (*pitching*) jika sumbu longitudinal partikel sebelum dan setelah bergerak membentuk simpangan/ defleksi (*deflection*) vertikal;
- (2) **goyang** (*yawing*) jika sumbu longitudinal partikel sebelum dan setelah bergerak membentuk simpangan horizontal; dan
- (3) **putar** (*rolling*) jika sumbu transversal partikel sebelum dan setelah bergerak membentuk simpangan.

Selain gerak partikel dalam klasifikasi yang telah diuraikan, terdapat 2 jenis gerak yang memiliki ciri khusus, yaitu:

- 1) **alir** (*flowing*) merupakan gerak partikel dalam grup partikel namun setiap partikel dapat bergerak secara mandiri/independen terhadap partikel lainnya. Pada gerak mengalir, lintasan gerak partikel dapat serupa:
  - (a) gerak translasi partikel fluida pada aliran laminair dan osilasi gelombang,
  - (b) gerak dilatasi partikel fluida pada aliran turbulen,
  - (c) gerak radial partikel fluida pada pompa sentrifugal,
  - (d) gerak menyebar partikel air pada tumpahan air lantai,
  - (e) gerak osilasi partikel fluida pada gelombang fluida;
- 2) **Brown** (*brownian motion*) merupakan gerak partikel dengan lintasan gerak adalah acak.

Gerak partikel dapat juga diklasifikasikan kedalam kelas-kelas berdasar pada **kerangka geomeri** (*koordinat geometri*) atau pun **kerangka inersia** (*inertial frame*) sebagai berikut (misal digunakan sistem koordinat Cartesian):

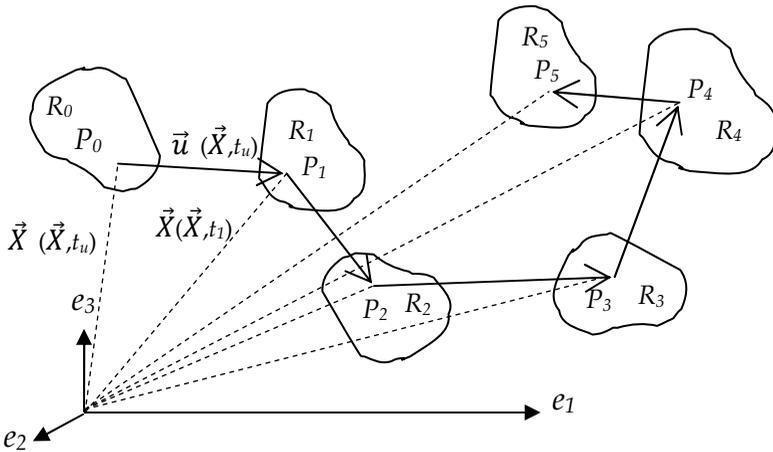
1. **Gerak 1-Dimensi** jika lintasan gerak hanya ditinjau (atau diproyeksikan) pada 1 sumbu saja di antara 3 salib sumbu koordinat Cartesian, lintasan gerak berbentuk garis lurus pada salib sumbu atau sejajar salib sumbu;
2. **Gerak 2-Dimensi** jika lintasan gerak hanya ditinjau pada 2 sumbu saja di antara 3 salib sumbu koordinat Cartesian, lintasannya gerak dapat berbentuk garis miring, lengkung, busur, lingkaran, elips, dan acak;
3. **Gerak 3-Dimensi** jika lintasan gerak ditinjau atau dapat diproyeksikan pada 3 salib sumbu koordinat Cartesian, lintasan gerak dapat berupa semua bentuk lintasan gerak.

**2.3.3. Metode Matematik untuk Menyatakan Gerak**

Sesuai kerangka geometri maupun inersia yang digunakan, misalnya koordinat Cartesius, menurut Bambang Suhendro (2000), gerak partikel secara matematis dapat dinyatakan dengan 2 cara yaitu memakai metode Lagrangian atau Eulerian.

Cara pertama disebut **metode Lagrangian**. Suatu sistem dinyatakan dengan metode Lagrangian jika semua partikel dalam sistem ditetapkan lokasinya dengan **referensi titik asal** (*origin*). Lihat Gambar 2.1, lokasi awal partikel *P* pada daerah (region)  $R_0$  ditunjukkan/ diidentifikasi dengan titik  $P_0$  dan waktu  $t = t_0$  dalam koordinat Cartesius (*Cartesian Coordinate*) dengan sumbu  $e_1, e_2,$  dan  $e_3$  dinyatakan menggunakan metode Lagrangian dengan persamaan:

$$P_0 (X_1, X_2, X_3, t_0) \quad \text{atau} \quad P_0 (\vec{X}, t_0) \quad \dots\dots\dots (2.2)$$



**Gambar 2.1** Gerak dalam Diskripsi Lagrangian

Lokasi tujuan partikel *P* pada daerah *R* diidentifikasi dengan titik  $P_1$  dan waktu  $t = t_1$  dalam sistem koordinat yang sama

*Kinematika*

Cartesius dinyatakan berdasar metode Lagrangian dengan persamaan:

$$P_1(X_1, X_2, X_3, t_1) \text{ atau } P_1(\vec{X}, t_1) \dots\dots\dots (2.3)$$

Dengan demikian, gerak partikel atau gerak  $\vec{u}$  dalam selang waktu  $t_u$  dari daerah  $R_0$  ke  $R$  didefinisikan sebagai:

$$\vec{u}(\vec{X}, t_u) = P_1(\vec{X}, t_1) - P_0(\vec{X}, t_0) \dots\dots\dots (2.4)$$

di mana:

$$\vec{u}(\vec{X}, t_u) = U(X_{1u}, X_{2u}, X_{3u}, t_u) \dots\dots\dots (2.5)$$

$$t_u = t_1 - t_0 \dots\dots\dots (2.6)$$

$$X_1^1 = X_0^0 + X_{1u}; X_2^1 = X_2^0 + X_{2u}; X_3^1 = X_3^0 + X_{3u} \dots\dots\dots(2.7)$$

dengan:

$X_1^0, X_2^0, \text{ dan } X_3^0$  : nilai  $X_1, X_2, \text{ dan } X_3$  pada waktu  $t_0$ ,

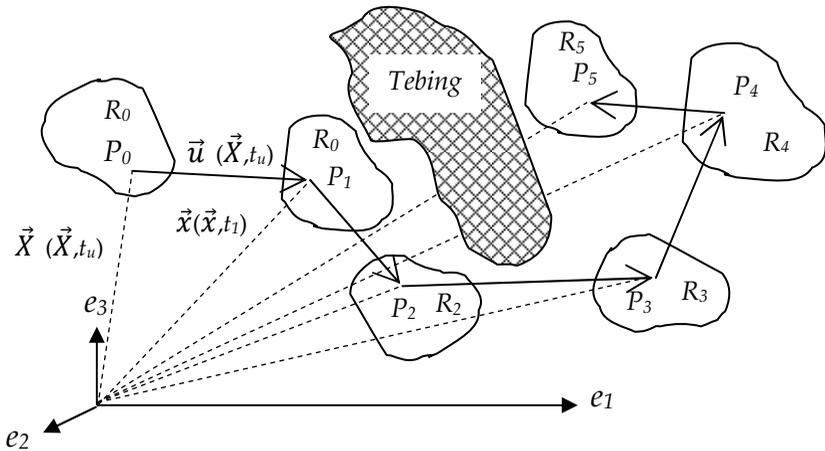
$X_1^1, X_2^1, \text{ dan } X_3^1$  : nilai  $X_1, X_2, \text{ dan } X_3$  pada waktu  $t_1$ .

Cara menyatakan gerak memakai metode Lagrangian tepat dipakai untuk sistem dengan kondisi:

- (1) lokasi titik asalnya diketahui atau dapat ditentukan,
- (2) berada pada kawasan terbuka, relatif datar, dan tidak terdapat penghalang pandang baik alami maupun buatan, sedemikian hingga titik asal yang telah ditentukan dapat dikaitkan dengan setiap titik dalam sistem dengan relatif mudah,
- (2) berada pada kawasan yang relatif kecil/sempit.

Cara kedua disebut dengan **metode Eulerian** dengan menetapkan lokasi di setiap titik dengan **referensi titik tujuan** (*destination*).

Dengan demikian, titik asal (*initial location*) atau titik awal (*initial condition*) tidak begitu dipandang penting karena dapat digantikan oleh titik tujuan pada lokasi tujuan sebelumnya (lokasi tujuan yang telah dicapai terdahulu).



**Gambar 2.2** Gerak dalam Diskripsi Lagrangian

Lihat Gambar 2.2, lokasi tujuan partikel  $P$  diidentifikasi dengan titik  $P_1$  dan waktu  $t = t_1$  dalam sistem dalam koordinat Cartesius (*Cartesian Coordinate*) dengan sumbu  $e_1$ ,  $e_2$ , dan  $e_3$  dinyatakan menggunakan metode Eulerian dengan persamaan:

$$P_1(x_1, x_2, x_3, t_1) \text{ atau } P_1(\vec{x}, t_1) \dots\dots\dots (2.8)$$

Dengan demikian, gerak partikel atau gerak  $\vec{u}$  dalam selang waktu  $t_u$  dari daerah  $R_0$  ke  $R$  didefinisikan sebagai:

$$\vec{u}(\vec{X}, t_u) = P_1(\vec{X}, t_1) - P_0(\vec{X}, t_0) \dots\dots\dots (2.9)$$

di mana:

$$\vec{u}(\vec{X}, t_u) = U(X_{1u}, X_{2u}, X_{3u}, t_u) \dots\dots\dots (2.10)$$

## Kinematika

$$tu = t_1 - t_0 \quad \dots \dots \dots (2.11)$$

$$x_1^1 = X_0^0 + X_{1u}; x_2^1 = X_2^0 + X_{2u}; x_3^1 = X_3^0 + X_{3u} \dots (2.12)$$

dengan:

$X_1^0, X_2^0, \text{ dan } X_3^0$  : nilai  $X_1, X_2, \text{ dan } X_3$  pada waktu  $t_0$ ,

$x_1^1, x_2^1, \text{ dan } x_3^1$  : nilai  $x_1, x_2, \text{ dan } x_3$  pada waktu  $t_1$ .

Persamaan 2.12 dapat digunakan untuk mengkonversi lokasi partikel dalam deskripsi Lagrangian ke Eulerian, atau sebaliknya.

Berlainan dengan cara Lagrangian, cara Eulerian ini tepat dipakai pada sistem yang memiliki kondisi:

- (1) lokasi titik asalnya tidak diketahui atau sulit ditentukan,
- (2) berada pada kawasan yang memiliki berkontur permukaan relatif rapat, terutama bila terdapat penghalang pandang alami atau buatan yang menyulitkan untuk menghubungkan lokasi tujuan dengan lokasi asal, dan
- (3) berada pada kawasan relatif luas, dan
- (4) jenis sistem yang menitik beratkan pada proses pencapaian tujuan karena lokasi tujuan ditentukan oleh pencapaian lokasi tujuan sebelumnya (lokasi tujuan yang telah dicapai terdahulu).

### 2.3.4. Kecepatan

Berdasarkan pada cara matematis dalam menyatakan gerak partikel yang telah diuraikan terdahulu, maka **kecepatan sesaat** (*velocity*) dari gerak partikel dari  $P$  pada daerah  $R_0$  ke  $R$  didefinisikan sebagai turunan/derivatif pertama dari fungsi gerak partikel sebagai berikut. Berdasar diskripsi Lagrangian didapatkan:

$$\vec{v} = \bar{v}(\vec{X}, t) = \frac{\partial \bar{u}(\vec{X}, t)}{\partial t} \quad \dots \dots \dots (2.13)$$

dengan  $\bar{u}(\vec{X}, t)$  dalam m dan  $v(X_1, X_2, X_3, t)$  dalam m/s.

Berdasarkan deskripsi Eulerian didapat:

$$\vec{v} = \vec{v}(\vec{x}, t) = \frac{\partial \vec{u}(\vec{x}, t)}{\partial t} \dots\dots\dots (2.14)$$

dengan  $\vec{u}(\vec{x}, t)$  dalam m dan  $v(x_1, x_2, x_3, t)$  dalam m/s.

### 2.3.5. Percepatan

Berdasarkan pada cara matematis dalam menyatakan gerak partikel, maka **percepatan sesaat** ataupun **percepatan rata-rata** (*acceleration*) dari gerak partikel didefinisikan berdasar diskripsi Lagrangian sebagai:

$$\vec{a} = \vec{a}(\vec{X}, t) = \frac{\partial \vec{v}(\vec{X}, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 \vec{u}(\vec{X}, t)}{\partial t^2} \dots\dots\dots (2.15)$$

dengan  $\vec{a}(\vec{X}, t)$  dalam m/s<sup>2</sup>,  $\vec{u}(\vec{X}, t)$  dalam m, dan  $v(X_1, X_2, X_3, t)$  dalam m/s.

Hal yang perlu diperhatikan, dalam pernyataan Eulerian, turunan kedua dari fungsi gerak  $\vec{u}(\vec{x}, t)$  dalam persamaan berikut bukan merupakan percepatan rata-rata karena selalu merupakan **percepatan sesaat** antara titik tujuan dengan titik yang telah dicapai terdahulu.

$$\vec{a} = \vec{a}(\vec{x}, t) = \frac{\partial \vec{v}(\vec{x}, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 \vec{u}(\vec{x}, t)}{\partial t^2} \dots\dots\dots (2.16)$$

dengan  $\vec{a}(\vec{x}, t)$  dalam m/s<sup>2</sup>,  $\vec{u}(\vec{x}, t)$  dalam m, dan  $v(x_1, x_2, x_3, t)$  dalam m/s.

## 2.4 GERAK PARTIKEL 1-DIMENSI

Gerak partikel 1-Dimensi (1-D) disebut juga gerak garis lurus/ linear atau translasi (*translation*). Gerak partikel 1-D merupakan gerak paling sederhana, sehingga perlu dibahas terlebih dulu. Gerak tersebut memiliki lintasan garis lurus, yaitu garis terpendek yang menghubungkan antara satu titik dengan titik lainnya (*strikeline*).

Pada koordinat Cartesius, gerak tersebut hanya ditinjau terhadap 1 di antara 3 salib sumbu koordinat yang dipakai, misalnya gerak pada arah sumbu  $e_1$  pada sistem koordinat Cartesius dalam uraian sub bab terdahulu.

Gerak lurus umum dinyatakan dalam bentuk garis bilangan nyata, lintasan gerak bisa bersifat horizontal atau vertikal. Gerak partikel 1-D mencakup gerak lurus beraturan dan gerak lurus berubah beraturan.

### 2.4.1. Gerak Lurus Beraturan

Gerak lurus beraturan (GLB) adalah gerak dengan lintasan garis lurus dan kecepatan konstan. **Besar gerak** ( $\vec{X}$ , *distance traveled*) dinyatakan dengan jarak (*magnitude*) dan arah (*direction*). Arah gerak positif untuk maju atau naik dan negatif untuk mundur atau turun, sebagaimana pada garis bilangan nyata. **Jarak** ( $D$ , *distance*) adalah beda posisi antara titik tujuan terhadap titik asal partikel dalam satuan panjang. Jarak gerak  $\vec{X}$ , (m) adalah  $X$  (m). Perlu ditekankan, jarak dan posisi partikel adalah besaran skalar, sedangkan gerak adalah besaran vektor.

Kecepatan ( $\vec{v}$ ) merupakan besaran untuk menyatakan cepat atau lambat waktu pencapaian posisi tujuan partikel. Kecepatan didefinisikan sebagai hasil bagi gerak dengan waktu, ditulis secara matematis:

$$\vec{v} = \frac{\vec{X}}{t} \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

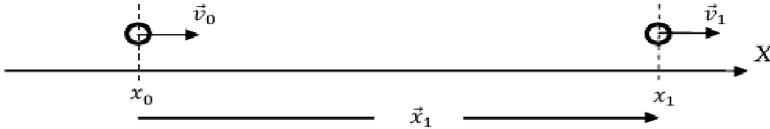
dengan  $\vec{v}$  adalah kecepatan (m/s),  $\vec{X}$  adalah gerak (m) dan  $t$  adalah waktu (s). Dalam bentuk diferensial, persamaan tersebut dituliskan:

$$d\vec{v} = \frac{d\vec{X}}{dt} \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

Bentuk persamaan 2.18 identik persamaan 2.13 atau persamaan 2.14.

Kecepatan gerak partikel di sepanjang lintasan adalah konstan, maka kecepatan sesaat partikel  $\vec{v}$  sama dengan kecepatan awal partikel  $\vec{v}_0$ , secara matematis:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 \quad \dots\dots\dots (2.19)$$



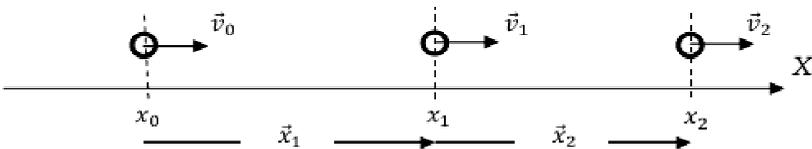
**Gambar 2.3** Gerak Lurus Beraturan (GLB)

**2.4.2. Gerak Lurus Berubah Beraturan**

Gerak lurus berubah beraturan (GLBB) adalah gerak dengan lintasan garis lurus dan kecepatan tidak konstan. Besaran untuk menyatakan peningkatan atau penurunan kecepatan pencapaian posisi tujuan partikel disebut dengan percepatan ( $\vec{a}$ , *acceleration*). Percepatan dirumuskan sebagai perbandingan beda kecepatan gerak dalam selang waktu  $t$ , ditulis secara matematis:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}}{t} \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

dengan  $\vec{v}$  adalah beda kecepatan gerak (m) dan  $t$  adalah waktu (s).



**Gambar 2.4** Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB)

Dalam bentuk difensial, persamaan 2.20 dituliskan:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

## Kinematika

Kecepatan sesaat  $\vec{v}$  dapat diperoleh dengan mengintegrasikan persamaan 2.21 dengan nilai konstan ( $\vec{a} = \text{konstan}$ ) sebagai berikut:

$$\vec{a} = \frac{\partial^2 \vec{X}(\vec{X}, t)}{\partial t^2} = \text{konstan}$$

$$\vec{v} = \int \vec{a} dt = \vec{a} t + C_1$$

Konstanta  $C_1$  dalam persamaan diperoleh berdasar ketentuan syarat awal ( $t = 0$ ) bahwa partikel bergerak dengan kecepatan awal  $\vec{v}_0$ , sehingga persamaan menjadi:

$$\vec{v}(t) = \vec{v}_0 + \vec{a} t \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

Dengan cara serupa didapat gerak  $\vec{X}$ ;

$$\begin{aligned} \vec{X} &= \int \vec{v} dt \\ &= \int (\vec{v}_0 + \vec{a} t) + C_2 \\ &= \vec{v}_0 t + \frac{1}{2} \vec{a} t^2 + C_2 \end{aligned}$$

Konstanta  $C_2$  dalam persamaan tersebut juga diperoleh berdasar ketentuan syarat awal ( $t = 0$ ) bahwa partikel bergerak dari lokasi  $x_0$  sehingga persamaan menjadi:

$$\vec{X}(t) = \vec{v}_0 t + \frac{1}{2} \vec{a} t^2 \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

$$X_t = X_0 + \vec{X}(t) \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

Persamaan 2.20 hingga 3.24 selanjutnya dipakai untuk menentukan gerak  $\vec{X}$ , kecepatan  $\vec{v}$ , dan posisi  $X_t$  dari partikel yang bergerak dengan percepatan  $\vec{a}$  konstan maupun tidak konstan.

Aplikasi paling sederhana dari persamaan-persamaan GMBB adalah pada fenomena gerak jatuh bebas. Dalam sistem koordinat Cartesius, variabel  $X$  dalam Persamaan 2.22 hingga 2.24 diubah menjadi variabel  $Z$  untuk menyatakan ketinggian benda dari dasar suatu sistem.

Untuk posisi awal benda adalah  $Z_0$ , kecepatan awal gerak benda adalah nol ( $\vec{v}_0 = 0$ ), dan percepatan gerak  $\vec{a}$  konstan berlawanan arah terhadap percepatan gravitasi bumi  $\vec{g}$ , maka:

$$\text{percepatan relatif partikel} = \vec{a} + \vec{g} \quad \dots\dots (2.25)$$

menjadi:

$$\vec{a} = -\vec{g} \quad \dots\dots (2.26)$$

Dengan demikian, gerak partikel  $\vec{Z}$  dan posisi partikel  $Z$  dalam persamaan 2.23 dan 2.24 dapat ditulis menjadi:

$$\vec{Z}(t) = -\frac{1}{2}\vec{g}t^2 \quad \dots\dots (2.27)$$

$$Z_t = Z_0 + \vec{Z}(t) \quad \dots\dots (2.28)$$

Pada fenomena jatuh bebas itu disyaratkan pula posisi awal benda  $Z_0$  tidak terlalu besar (terlalu tinggi) di mana jarak partikel terhadap pusat bumi relatif sama dengan jari-jari bumi, sehingga percepatan gravitasi bumi dan percepatan relatif gerak nilainya konstan. Selain itu, gesekan antara benda dengan udara dan efek Coriolis akibat perputaran bumi pada porosnya juga diabaikan.

### Contoh soal 2.1

Suatu partikel air sungai bergerak dengan kecepatan awal 2,75 m/s, tentukan gerak yang ditempuh oleh partikel air sungai tersebut dalam waktu 3 dan 5, serta tentukan juga jarak tempuh dalam waktu 10, dan 20 s.

Jawab:

$\vec{X} = \vec{v}_0 t$  dengan  $\vec{v}_0 = 2,75$  m/s maka:

untuk  $t = 3$  s  $\vec{X}(3) = 2,75 \cdot 3 = 8,25$  m (arah searah aliran sungai)

untuk  $t = 5$  s  $\vec{X}(5) = 2,75 \cdot 5 = 13,75$  m (arah searah aliran sungai)

untuk  $t = 10$  s  $\vec{X}(10) = 2,75 \cdot 10 = 27,50$  m

untuk  $t = 20$  s  $\vec{X}(20) = 2,75 \cdot 20 = 55,00$  m

## Kinematika

### Contoh soal 2.2

Gerak suatu partikel pada spion sebuah bus kampus yang bergerak diamati dari gerak bus kampus bersangkutan. Apabila bus kampus tersebut bergerak dari halte/ shelter 1 menuju shelter 2 yang berjarak 1 km dalam waktu 4 menit dan bergerak dari shelter 2 menuju shelter 3 yang berjarak 2 km dalam waktu 2 menit. Bus tersebut bergerak dari shelter 1 dengan kecepatan awal gerak  $\vec{v}_0 = 0$  dan tidak berhenti pada shelter 2. Tentukan kecepatan dan percepatan dalam sistem tersebut.

Jawab:

Kecepatan awal gerak partikel dari shelter 1  $\vec{v}_0 = 0$

$$\vec{X}(t_2) = X_2 - X_1 = 1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$$

$$\vec{v}(t_2) = \vec{X}(t_2)/t_2 = 1000/(4.60) = 4,1667 \text{ m/s}$$

$$\vec{X}(t_3) = X_3 - X_2 = 2 \text{ km} = 2000 \text{ m}$$

$$\vec{v}(t_3) = \vec{X}(t_3)/t_3 = 2000/(2.60) = 16,6667 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned}\vec{v} &= [\vec{v}(t_3) - \vec{v}(t_2)] / (t_3 - t_2) \\ &= (16,6667 - 4,1667) / ((4 - 2) .60) \\ &= 0,10417 \text{ m/s}^2\end{aligned}$$

### Contoh soal 2.3

Mata sebuah bor merupakan bagian mesin bor yang berada pada ujung paling bawah dari suatu mesin bor. Mata bor diharapkan dapat menembus lapisan tanah lunak setebal 10 m tepat di bawah permukaan tanah. Kemudian, diharapkan juga menembus ke dalam tanah keras di bawah lapisan tanah terdahulu sedalam 4 m. Berapa kecepatan konstan partikel untuk menembus lapisan tanah tersebut jika diharapkan dalam waktu 25 menit lapisan berhasil ditembus dan percepatan gravitasi bumi diabaikan.

Jawab:

$$\begin{aligned}\vec{Z} &= \vec{v}_0 t \text{ dengan } t = 25 \text{ menit} = 25 \cdot 60 \text{ s} = 1500 \text{ s dan } \vec{Z}(1500) = 10+4 = \\ &14 \text{ m maka } \vec{v}_0 = 14 / 1500 = 0,00933 \text{ m/s} = 0,933 \text{ cm/s}\end{aligned}$$

## Contoh soal 2.4

Partikel pada mata bor dari suatu mesin bor dalam contoh soal 2.3 diprediksikan akan dapat menembus lapisan tanah pertama setebal 10 m (tepat di bawah permukaan tanah) dalam waktu 9 menit. Sedangkan untuk menembus ke dalam lapisan tanah keras sedalam 4 m dibawahnya diprediksikan diperlukan waktu 11 menit. Berapa kecepatan bor untuk menembus lapisan tersebut jika percepatan gravitasi bumi diabaikan.

Bandingkan contoh soal 2.4 ini dengan contoh soal 2.3. Mengingat sifat lapisan tanah yang berbeda, maka kecepatan konstan sulit dihasilkan. Pengeboran pada lapisan tanah lunak relatif lebih cepat daripada pada lapisan tanah keras.

Jawab:

$$t_0 = 9 \text{ menit} = 9 \cdot 60 \text{ s} = 540 \text{ s}$$

$$\vec{Z}(t_0) = \vec{Z}(540) = 10 \text{ m}$$

$$\vec{Z} = \vec{v}_0 t \text{ maka } \vec{v}(t_0) = \vec{X}(t_0)/t_0 = 10 / 540 = 0,018519 \text{ m/s} = 1,852 \text{ cm/s}$$

$$t_1 = 11 \text{ menit} = 11 \cdot 60 \text{ s} = 660 \text{ s}$$

$$\vec{Z}(t_1) = \vec{Z}(660) = 4 \text{ m}$$

$$\vec{v}(t_1) = \vec{X}(t_1)/t_1 = 4 / 660 = 0,006061 \text{ m/s} = 0,6061 \text{ cm/s}$$

## Contoh soal 2.5

Apabila pada contoh soal 2.4, percepatan gravitasi bumi  $\vec{g} = 9,81 \text{ m/s}^2$  diperhitungkan, tentukan percepatan gerak partikel yang terletak pada mata bor.

Jawab:

Dari jawaban contoh soal 2.4, percepatan relatif partikel  $\vec{a}$  dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \vec{a} &= [\vec{v}(t_3) - \vec{v}(t_2)] / (t_3 - t_2) \\ &= (0,006061 - 0,018519) / ((9 - 11) \cdot 60) \\ &= 0,00010381666 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

## Kinematika

Percepatan gerak partikel  $\vec{a}_b$ :

$$\vec{a}_b = \vec{a} + \vec{g}$$

$$= -\vec{g} - 0.000010381666$$

$$= -9,81010381666 \text{ m/s}^2$$

Percepatan memiliki arah sama dengan arah percepatan gravitasi bumi.

## 2.5 GERAK PARTIKEL 2-DIMENSI

Gerak partikel 2-D disebut gerak pada bidang datar. Gerak ini lebih kompleks daripada gerak 1-D. Pada koordinat Cartesius, gerak partikel 2-D hanya ditinjau terhadap 2 di antara 3 salib sumbu, misal sumbu x-y atau sumbu y-z.

Lintasan partikel dalam gerak 2-D dapat berbentuk lengkung, busur, lingkaran, elips, gelombang, garis lurus miring, dan acak. Namun demikian, berkaitan dengan penerapan gerak partikel 2-D di bidang teknologi, khususnya bidang teknik sipil, hanya beberapa gerak tersebut dibahas di bagian ini.

### 2.5.1. Gerak Melingkar Beraturan

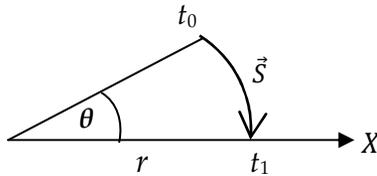
Pengukuran sudut dapat dilakukan dengan membandingkan simpangan sudut ( $\vec{S}$ , *angular displacement*) dengan jari-jari lingkaran ( $r$ ), di samping diukur memakai busur derajat. Lihat Gambar 2.5, dalam selang waktu gerak antara  $t_0$  dan  $t_1$  serta besar sudut  $\theta$  dinyatakan secara matematis:

$$\theta = \frac{\vec{S}}{r} \quad \dots \dots \dots (2.29)$$

Untuk satu lingkaran penuh  $\vec{S} = 2\pi r$  sehingga:

$$\theta = 2 \text{ radian} = 360^\circ \text{ maka:}$$

$$1 \text{ radian} = 57,296^\circ$$



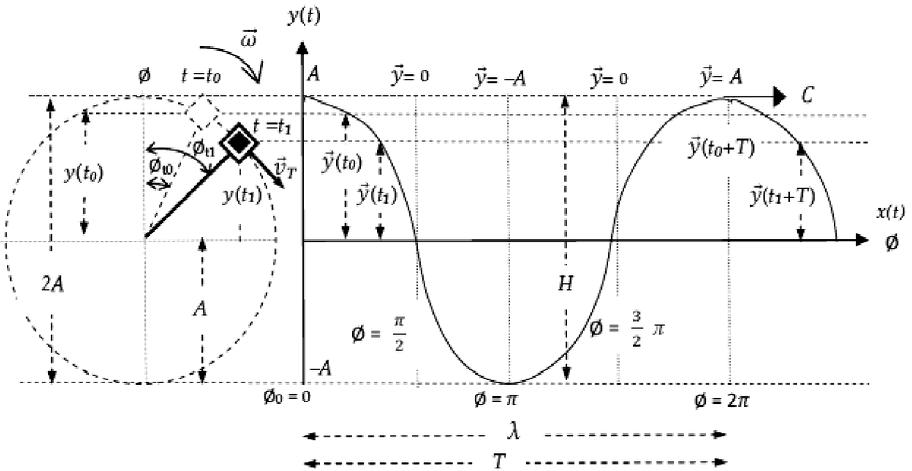
**Gambar 2.5** Sudut Arah

Sudut yang diukur dengan cara sebagaimana dalam persamaan 2.29 disebut **sudut arah** (*angel direction*) atau **sudut phasa** (*phase angel*). Selain menunjukkan besar sudut, sudut arah juga menunjukkan arah pembentukan sudut. Seperti pada jarum jam, arah sudut bernilai positif ke arah kanan, sebaliknya bernilai negatif ke arah kiri.

**Gerak Melingkar Beraturan** (GMB) merupakan gerak partikel dengan lintasan lingkaran dan kecepatan konstan. GMB penting dikaji karena merupakan dasar teori untuk berbagai kajian fenomena-fenomena siklik di alam semesta. Adapun **Fenomena siklik/ periodik** merupakan fenomena yang terjadi secara berulang-ulang atau periodik dalam siklus waktu tertentu. Gerak siklik antara lain terjadi pada getaran mesin, vibrasi kawat listrik, gelombang audio, gempa bumi, dan gelombang laut.

GMB merupakan ekspresi matematis lain dari fungsi gelombang, sebaliknya fungsi gelombang juga merupakan ekspresi matematis lain dari GMB. Hubungan GMB dan gelombang dapat dicermati dalam Gambar 2.6. Pada sisi kiri sumbu ( $t$ ) tampak lintasan gerak partikel berupa lingkaran dengan jari-jari (radius)  $A$  atau diameter  $2A$ . Posisi awal partikel pada waktu  $t_0$  memiliki sudut  $\emptyset_0$  dan simpangan  $\vec{Y}(t_0)$ . Sedangkan posisi tujuan partikel pada waktu  $t_1$  memiliki sudut  $\emptyset_1$  dan simpangan  $\vec{Y}(t_1)$ . Partikel bergerak melingkar 1 putaran hingga kembali ke posisi awalnya dalam jarak tempuh sepanjang keliling lingkaran  $4A$  dalam waktu 1 periode  $T$ . Pada sisi

kanan sumbu  $\vec{Y}(t)$  tampak bentuk/ profil gelombang dengan tinggi gelombang  $H$  atau  $2A$ , panjang gelombang  $\lambda$ , dan periode gelombang  $T$ . Sesuai gerak melingkar di sisi kiri, posisi awal partikel pada waktu  $t_0$  memiliki sudut  $\phi_0$  dan simpangan ( $t_0$ ). Sedangkan posisi tujuan partikel pada waktu  $t_1$  memiliki sudut  $\phi_1$  dan simpangan ( $t_1$ ). Pada satu periode  $T$  berikutnya (selisih sudut  $2\pi$ ), maka simpangan sebesar ( $t_0$ ) pada waktu  $t_0 + T$  dan ( $t_1$ ) pada waktu  $t_1 + T$ .



Gambar 2.6 Gerak Melingkar Beraturan

Dalam GMB, **Periode** ( $T$ , *wave periode*) didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan oleh partikel untuk bergerak melingkar 1 siklus putaran. Satu siklus putaran gerak diukur/dihitung dari posisi awal gerak partikel hingga kembali ke posisinya semula setelah bergerak. Periode dinyatakan dalam satuan waktu, misalnya menit dan sekon.

**Jumlah putaran** dinyatakan dengan **frekuensi** ( $f$ , *frequency*) yaitu cacah putaran per satuan waktu, diformulasikan:

$$f = \frac{1}{T} \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

dengan  $f$  adalah frekuensi dalam satuan Hz dan rpm (*revolution per minute*) dan  $T$  adalah periode (s).

Gerak pada GMB dinyatakan dengan posisi partikel berupa **simpangan** (*displacement atau deflection*) pada arah sumbu- $X$  dan sumbu- $Y$  terhadap orogin, titik pusat lingkaran  $O(0,0)$ . Simpangan arah sumbu- $X$  ( $\vec{X}$ ) dan sumbu- $Y$  ( $\vec{Y}$ ) dalam satuan panjang (m) diformulasikan:

$$\vec{X} = A \sin \emptyset \quad \dots\dots\dots (2.31)$$

$$\vec{Y} = A \cos \emptyset \quad \dots\dots\dots (2.32)$$

dengan  $A$  adalah **amplitudo** (*amplitude*) sebagai simpangan maksimal (m) dan  $\emptyset$  adalah **sudut phasa** (*phase angel*) (rad).

Dalam GMB, terdapat 2 jenis kecepatan yaitu kecepatan sudut dan kecepatan tangensial. **Kecepatan sudut** ( $\vec{\omega}$ , *angular velocity*) adalah besar sudut revolusi partikel dalam waktu tertentu (rad/s), diformulasikan:

$$\vec{\omega} = \frac{\vec{S}}{t} \quad \dots\dots\dots (2.33)$$

dengan  $\vec{S}$  adalah sudut arah (rad) dan  $t$  adalah selang waktu (s). Dalam bentuk persamaan deferensial dituliskan:

$$\vec{\omega} = \frac{\vec{S}}{t} \quad \dots\dots\dots (2.34)$$

Kecepatan sudut dapat juga diperoleh dengan membandingkan 1 revolusi ( $= 2\pi$  rad) dengan periode  $T$ , yaitu:

$$\vec{\omega} = \frac{2\pi}{T} \quad \dots\dots\dots (2.35)$$

*Kinematika*

Substitusi  $T$  pada persamaan 2.30 ke dalam persamaan 2.35, maka kecepatan sudut dapat dituliskan dengan persamaan:

$$\vec{\omega} = 2\pi f \quad \dots\dots\dots (2.36)$$

**Kecepatan tangensial** ( $\vec{v}_T$ , *tangential velocity*) adalah gerak linear dalam revolusi partikel dalam selang waktu tertentu. Gerak linear tersebut sebanding dengan lintasan lingkaran yang ditempuh partikel. Kecepatan tangensial memiliki arah sesuai arah gerak revolusi partikel, tegaklurus terhadap jari-jari lingkaran dan tepat pada garis singgung lingkaran. Besar kecepatan tangensial dirumuskan:

$$\vec{v}_T = \frac{\vec{D}}{t} \quad \dots\dots\dots (2.37)$$

dengan  $\vec{D}$  adalah gerak linear (m) dan  $t$  adalah waktu (s).

Hubungan kecepatan sudut dan kecepatan tangensial didapat dengan mensubstitusikan  $T$  pada persamaan 2.35 ke dalam persamaan 2.37 dengan gerak  $\vec{D}$  sepanjang keliling lingkaran ( $= \pi D = 2\pi r$ ) dimana  $D = 2r$  didapat:

$$\vec{v}_T = \vec{\omega} r \quad \dots\dots\dots (2.38)$$

Contoh soal 2.6

Sebuah partikel berevolusi dengan frekuensi 7000 rpm, tentukan frekuensi dalam Hz, kecepatan sudut dan periode revolusi partikel tersebut.

Jawab:

$$f = \frac{7000}{60} = 116,6667 \text{ Hz}$$

$$\vec{\omega} = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 116,6667 = 733,0383 \text{ rad/s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{116,6667} = 0,008571 \text{ s}$$

Contoh soal 2.7

Partikel berdiameter 1,2  $\mu\text{m}$  berada pada tepi tabung silinder berdiameter 40 cm yang bergerak berotasi menggelinding hingga mencapai jarak 62 cm dalam 5 s. Tentukan kecepatan sudut dan periode rotasi silinder tersebut.

Jawab:

$$\vec{D} = 62 \text{ cm} = 0,62 \text{ m}$$

$$r = D/2 = 0,40/2 = 0,2 \text{ m}$$

$$\vec{v}_T = \frac{\vec{D}}{t} = \frac{0,62}{5} = 1,24 \text{ m/s}$$

$$\vec{v}_T = \vec{\omega} r \text{ maka:}$$

$$\vec{\omega} = \frac{\vec{v}_T}{r} = \frac{1,24}{0,2} = 0,062 \text{ rad/s}$$

$$\vec{\omega} = \frac{2\pi}{T} \text{ maka:}$$

$$T = \frac{2\pi}{\vec{\omega}} = \frac{2 \cdot 3,14}{0,062} = 0,0779115 \text{ s}$$

### 2.5.2. Gerak Melingkar Berubah Beraturan

Gerak Melingkar Berubah Beraturan (GMBB) adalah gerak melingkar dengan lintasan lingkaran yang mengalami percepatan sudut. Di samping GMB yang dikaji dalam sub bab terdahulu, GMBB juga sering digunakan sebagai dasar teori dalam kajian fenomena-fenomena siklik, misalnya gelombang iregular, putaran rotor, dan roda kendaraan.

**Percepatan sudut** ( $\vec{\alpha}$ , *angular acceleration*) adalah beda kecepatan sudut dalam selang waktu tertentu. Arah percepatan sudut sesuai arah kecepatan sudut. Percepatan sudut secara matematis dituliskan:

$$\vec{\alpha} = \frac{\vec{\omega}}{t} \quad \dots\dots\dots (2.39)$$

dalam bentuk diferensial, percepatan sudut ditulis:

$$\vec{\alpha} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \frac{d^2\vec{s}}{dt^2} \quad \dots\dots\dots (2.40)$$

**Percepatan tangensial** ( $\vec{a}_T$ , *tangential acceleration*) adalah beda kecepatan tangensial dalam dalam selang waktu tertentu. Arah percepatan sesuai dengan arah kecepatan tangensial. Percepatan tersebut dirumuskan:

$$\vec{a}_T = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad \dots\dots\dots (2.41)$$

dalam bentuk diferensial, percepatan sudut ditulis:

$$\vec{a}_T = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{D}}{dt^2} \quad \dots\dots\dots (2.42)$$

Rasio kecepatan tangensial terhadap kecepatan sudut sama dengan radius lingkaran  $r$ , sebagaimana pada persamaan 2.38. Demikian halnya, rasio percepatan tangensial terhadap percepatan sudut adalah sebesar radius lingkaran  $r$ , secara matematis dituliskan:

$$\vec{a}_T = \vec{\alpha} r \quad \dots\dots\dots (2.43)$$

Kecepatan sudut  $\vec{\omega}$  pada GMBB dipengaruhi oleh percepatan sudut  $\vec{\alpha}$ , secara matematis dinyatakan dengan persamaan:

$$\vec{\omega}(t) = \vec{\omega}_0 + \vec{\alpha}t \quad \dots\dots\dots (2.44)$$

dengan  $\vec{\omega}_0$  adalah kecepatan sudut saat  $t_0$  (rad/s),  $\vec{\alpha}$  adalah percepatan sudut (rad/s<sup>2</sup>), dan  $t$  adalah waktu (s).

Gerak patikel dapat dinyatakan dalam simpangan sudut dengan persamaan:

$$\vec{S}(t) = \vec{\omega}_0 t + \frac{1}{2} \vec{\alpha} t^2 \quad \dots\dots\dots (2.45)$$

$$S = S_0 + \vec{S}(t) \quad \dots\dots\dots (2.46)$$

dengan  $\vec{S}$  adalah simpangan sudut (rad),  $S_0$  adalah simpangan sudut sebelumnya saat  $t_0$  (rad),  $\vec{\omega}_0$  adalah kecepatan sudut saat  $t_0$  (rad/s),  $\vec{\alpha}$  adalah percepatan sudut (rad/s<sup>2</sup>), dan  $t$  adalah waktu (s).

Posisi partikel dinyatakan dengan simpangan pada arah sumbu- $X$  dan sumbu- $Y$  terhadap orogin [=  $O(0,0)$ ], dalam satuan panjang, secara matematis diformulasikan:

$$\vec{X} = A \sin \emptyset \quad \dots\dots\dots (2.47)$$

$$\vec{Y} = A \cos \emptyset \quad \dots\dots\dots (2.48)$$

di mana:

$$\emptyset = \frac{\vec{S}}{r} \quad \dots\dots\dots (2.49)$$

dengan  $A$  adalah amplitudo (m),  $\emptyset$  adalah sudut fasa (rad),  $\vec{S}$  adalah simpangan sudut (rad),  $\vec{S}_0$  adalah kecepatan sudut saat  $t_0$  (rad/s),  $\vec{\alpha}$  adalah percepatan sudut (rad/s<sup>2</sup>), dan  $t$  adalah waktu (s).

#### Contoh soal 2.8

Partikel berdiameter 1,2  $\mu\text{m}$  berada pada tepi tabung silinder dengan diameter 4 cm yang bergerak berotasi menggelinding dengan kecepatan sudut 0,062 rad/s hingga mencapai jarak 62 cm dalam waktu 5 s. Jika gerak tabung silinder menerima percepatan sudut 0,022 rad/s<sup>2</sup>, tentukan:

- kecepatan sudut dalam rad/s dan
- jarak tempuh silinder dalam rad dan m,

Jawab:

$$\vec{D} = 62 \text{ cm} = 0,62 \text{ m} ; r = D/2 = 0,40/2 = 0,2 \text{ m}$$

$$\vec{\omega}_0 = \frac{\vec{D}}{t} = \frac{0,62}{5} = 0,062 \text{ rad/s} ; \vec{\alpha} = 0,022 \text{ rad/s}^2$$

$$\text{a) } \vec{\omega}(t) = \vec{\omega}_0 + \vec{\alpha}t = 0,062 + 0,022 \cdot 5 = 0,172 \text{ rad/s}$$

$$\text{b) } \vec{S}(t) = \vec{\omega}_0 t + \frac{1}{2} \vec{\alpha} t^2 = 0,062 \cdot 5 + 0,5 \cdot 0,022 \cdot 5^2 = 0,585 \text{ rad}$$

$$\vec{v}_T = \vec{\omega} r = 0,172 \cdot 0,2 = 0,0344 \text{ m/s}$$

$$\vec{\omega}_0 = \frac{\vec{D}}{t} \text{ maka: } \vec{D} = \vec{v}_T t = 0,0344 \cdot 5 = 1,72 \text{ m/s.}$$

### 2.5.3. Gerak Gelombang

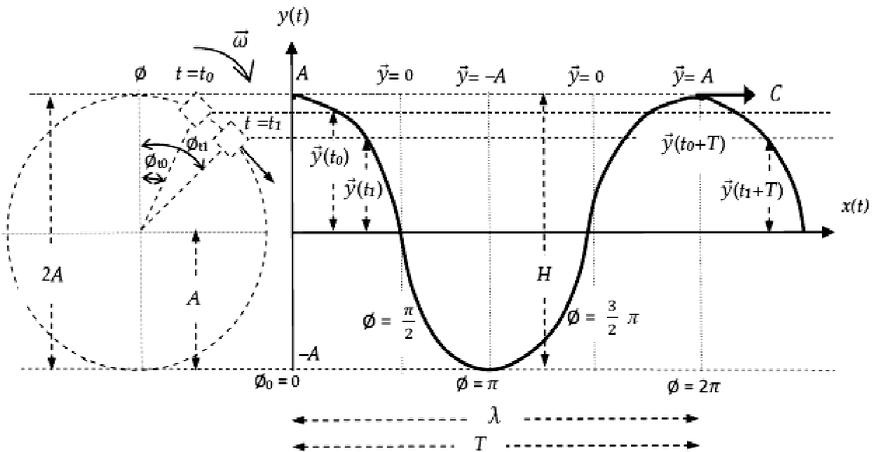
Gerak gelombang (*wave*) adalah gerak energi. Gerak gelombang disebut dengan penjaralan atau propagasi (*propagation*), yang memiliki ciri khas jaraknya dapat dinyatakan dalam satuan panjang gelombang.

**Panjang gelombang** ( $\lambda$ , *wave length*) adalah jarak puncak ke puncak gelombang berikutnya atau lembah ke lembah berikutnya, dalam satuan panjang. **Periode gelombang** ( $T$ , *wave periode*) adalah selang waktu yang diperlukan gelombang untuk merambat 1 panjang gelombang. Periode gelombang dapat juga dimaknai sebagai waktu yang diperlukan oleh partikel untuk bergerak dan kembali ke posisinya semula.

Intensitas terjadinya gelombang dipresentasikan dengan besaran **frekuensi** ( $f$ , *frequency*) yaitu cacah gelombang setiap satuan waktu sesuai dengan persamaan 2.30, diformulasikan:

$$f = \frac{1}{T} \dots\dots\dots (2.50)$$

dengan  $f$  adalah frekuensi (1/s atau Hz) dan  $T$  adalah periode (s).



Gambar 2.7 Gerak Gelombang

Pada Gambar 2.7 tampak profil gelombang di kanan sumbu  $Y(t)$  yang dapat mewakili gelombang tali, laut/air danau, dan bunyi. Profil tersebut merupakan posisi simpangan pada setiap sudut fasa (atau jarak) tertentu pada koordinat Cartesius. **Jarak penjalaran** ( $X(t)$ , *distance traveled*) adalah panjang dari posisi awal dalam satuan panjang. Sedangkan **simpangan** ( $\vec{Y}(t)$ , *displacement* atau *deflection*) didefinisikan sebagai beda posisi vertikal antara posisi partikel dengan sumbu- $x$  setiap waktu. Simpangan secara matematis dapat dinyatakan dengan fungsi cosinus sebagai berikut:

$$\vec{Y}(t) = A \cos \emptyset \quad \dots\dots\dots (2.51)$$

dengan  $\vec{Y}(t)$  adalah simpangan (m),  $A$  adalah amplitudo gelombang (amplitude) sebagai simpangan maksimal (m), dan  $\emptyset$  adalah sudut phase gelombang (*phasa angel*) dalam satuan radian (rad).

Tinggi gelombang ( $H$ , *wave height*) adalah jarak vertikal antara puncak dan lembah gelombang dalam satuan panjang. Tinggi gelombang adalah 2 kali amplitudo gelombang, dirumuskan:

$$H = 2A \quad \dots\dots\dots (2.52)$$

Substitusi  $A$  pada persamaan 2.52 ke dalam persamaan 2.51, maka simpangan dapat dituliskan dengan persamaan:

$$\vec{Y}(t) = \frac{H}{2} \cos \emptyset \quad \dots\dots\dots (2.53)$$

Kecepatan linear gelombang disebut **cepat rambat gelombang** ( $C$ , *celerity*) adalah kecepatan gelombang merambat searah sumbu- $x$  hingga mencapai jarak  $X(t)$  dalam selang waktu  $t$ . Cepat rambat gelombang dinyatakan dalam satuan m/s, diformulasikan sebagai:

$$C = \frac{X(t)}{t} \quad \dots\dots\dots (2.54)$$

Untuk jarak gerak  $X(t)$  sebesar **panjang gelombang**  $\lambda$ , waktu tempuh gelombang adalah satu periode gelombang  $T$ , maka:

$$C = \frac{\lambda}{T} \quad \dots\dots\dots (2.55)$$

**Kecepatan sudut** ( $\omega$ , *angle velocity*) merupakan kecepatan putaran partikel pada lintasan lingkaran dalam selang waktu tertentu, dinyatakan dalam satuan rad/s dan diformulasikan:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \dots\dots (2.56)$$

Substitusi  $T$  pada persamaan 2.50 ke dalam persamaan 2.56, maka kecepatan sudut dapat dituliskan dengan persamaan:

$$\omega = 2\pi f \quad \dots\dots (2.57)$$

Dalam hubungannya dengan cacah gelombang, diperlukan suatu **angka gelombang** ( $k$ , *wave number*) yang menunjukkan jumlah gelombang setiap satuan panjang gelombang. Angka tersebut diformulasikan:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \dots\dots (2.58)$$

dengan  $\lambda$  adalah panjang gelombang (m).

Fungsi gelombang dalam persamaan 2.53 dapat dinyatakan memakai parameter-parameter gelombang lebih lengkap sebagai berikut:

$$\vec{Y}(t) = \frac{H}{2} \cos [ k X(t) - \omega t ] \quad \dots\dots (2.59)$$

dengan:

- $\vec{Y}(t)$  : simpangan (m),
  - $H$  : tinggi gelombang (m),
- di mana:

$$H = 2A$$

dengan  $A$  adalah simpangan maksimal (m),

- $k$  : angka gelombang,
- $X(t)$  : jarak tempuh gelombang (m),
- $\omega$  : kecepatan sudut (rad/s), dan
- $t$  : waktu tempuh penjalaran gelombang (s).

Contoh soal 2.9

Gelombang laut dengan tinggi, panjang, dan periode berturut-turut 2,4 m, 30 m, dan 15 s menjalar dengan cepat rambat 2 m/s selama 4 menit. Tentukan besar simpangan dan jarak perambatan gelombang.

Jawab:

$$H = 2,4 \text{ m}$$

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

$$C = 2 \text{ m/s}$$

$$t = 4 \cdot 60 = 240 \text{ s}$$

$$C = \frac{X(t)}{t}, \text{ maka } X(240) = C t = 2 \cdot 240 = 480 \text{ m}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{15} = 0,418879$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{30} = 0,20944$$

$$\vec{Y}(t) = \frac{H}{2} \cos [ k X(t) - \omega t ] \text{ maka}$$

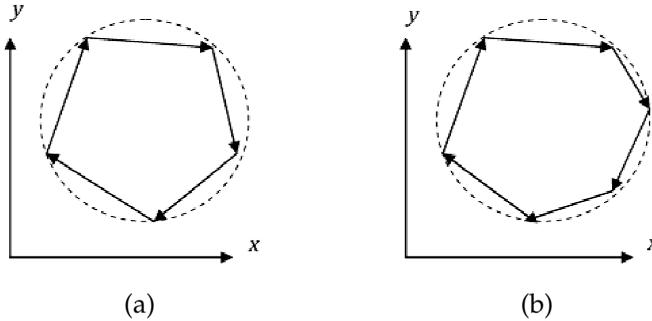
$$\vec{Y}(240) = \frac{2,4}{2} \cos [ 0,20944 \cdot 480 - 0,418879 \cdot 240 ] = 1,2 \text{ m}$$

Dengan demikian, koordinat partikel pada permukaan gelombang laut adalah  $P_{240}(480; 1,2)$ .

#### 2.5.4. Konversi GMB Menjadi GLB atau GLBB

Perlu pula dicermati, GMB dapat dikonversikan ke GLB maupun GLBB jika di antara parameter-parameter GMB hanya diperlukan informasi posisi partikel, sedang parameter-parameter lain GMB tidak diperlukan, antara lain: konstanta kecepatan sudut, periode, frekuensi, dan parameter-parameter gelombang terkait. Lihat pada Gambar 2.8, dalam gambar (a) GMB pada bidang x-y dapat dikoversi menjadi GLB pada bidang x-y dan dalam gambar (b) dapat juga dikoversi menjadi GLBB pada bidang x-y.

Kinematika



**Gambar 2.8** Konversi GMB ke GLB atau GLBB

Contoh soal 2.10

Suatu partikel bergerak melingkar horizontal ke kanan dengan kecepatan konstan 20 m/s, periode 60 s, dan jari-jari lingkaran 500 m. Tentukan posisi, kecepatan, dan besar gerak yang ditempuh partikel tersebut pada waktu 15, 30, 45, dan 60 s dalam pernyataan gerak lurus beraturan, jika posisi awal partikel pada  $P_0(600, 1000)$  dengan sudut azimuth  $30^\circ$ . Arah mata angin utara berhimpit dengan sumbu-Y.

Jawab:

$t_0 = 0$  s,  $\vec{v}_0 = 20$  m/s,  $T = 60$  s, dan  $\phi_0 = 30^\circ$  (azimuth)

$r = 500$  m, maka sesuai dalil pitagoras  $a = 400$  m dan  $b = 300$  m.

Pada  $t_1 = 15$  s: Posisi di  $P_1(800, 300)$  di mana:

$$X_{p1} = 600 + 200 = 800$$

$$Y_{p1} = 1000 - 700 = 300$$

Arah  $\phi_1 = (90-30)+90 = 150^\circ$  terhadap posisi  $P_0$

Kecepatan:  $\vec{v}_1 = 20$  m/s

$$\text{Gerak: } \vec{S}_1 = \vec{S}_0 + 500\sqrt{2} = 0 + 707,1068 = 707,1068 \text{ m}$$

Pada  $t_2 = 30$  s: Posisi di  $P_2(0, 200)$  di mana:

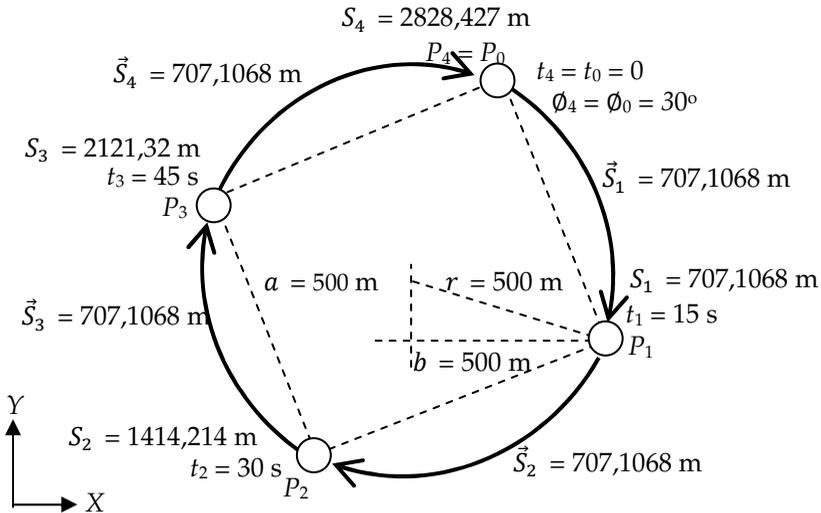
$$X_{p2} = 700 - 700 = 0$$

$$Y_{p2} = 300 - 100 = 200$$

Arah  $\phi_2 = 150+90 = 240^\circ$  terhadap posisi  $P_1$

Kecepatan:  $\vec{v}_2 = 20 \text{ m/s}$

Gerak:  $\vec{S}_2 = \vec{S}_1 + 500\sqrt{2} = 707,1068 + 707,1068 = 1414,214 \text{ m}$



Pada  $t_3 = 45 \text{ s}$ : Posisi partikel di  $P_3$  (-100, 900) di mana:

$$X_{P_3} = 0 - 100 = -100$$

$$Y_{P_3} = 200 + 700 = 900$$

Arah  $\phi_3 = 240 + 90 = 330^\circ$  terhadap posisi  $P_2$

Kecepatan:  $\vec{v}_2 = 20 \text{ m/s}$

Gerak:  $\vec{S}_3 = \vec{S}_2 + 500\sqrt{2} = 1414,214 + 707,1068 = 2121,32 \text{ m}$

Pada  $t_4 = 60 \text{ s}$ : Posisi di  $P_0$  atau  $P_4$  (600, 1000) di mana:

$$X_{P_4} = -100 + 700 = 600$$

$$Y_{P_4} = 900 + 100 = 1000$$

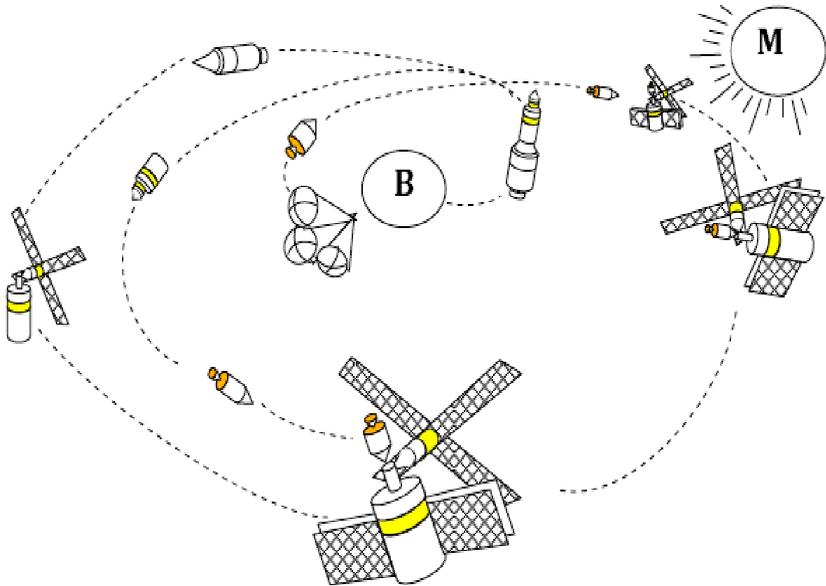
Arah  $\phi_4 = 330 + (90 - 30) = 30^\circ$  terhadap posisi  $P_3$

Kecepatan partikel:  $\vec{v}_2 = 20 \text{ m/s}$ ,

Gerak:  $\vec{S}_4 = \vec{S}_3 + 500\sqrt{2} = 2121,32 + 707,1068 = 2828,427 \text{ m}$

## 2.6 GERAK PARTIKEL 3-DIMENSI

Gerak partikel 3-Dimensi (3-D) disebut juga gerak pada ruang. Semua bentuk gerak secara prinsip dapat dipresentasikan dalam frame gerak 3-D. Pada koordinat Cartesius, gerak jenis ini ditinjau terhadap 3 salib sumbu koordinat yang dipakai, misalnya sumbu  $x, y$ , dan  $z$ . Gerak jenis ini tentu saja lebih kompleks daripada gerak 1-D dan 2-D diuraikan terdahulu. Transportasi satelit pada Gambar 2.9 meliputi peluncuran, transportasi ke orbit, dan transportasi orbit, serta transportasi suku cadang. Transportasi satelit dapat dipandang sebagai gerak partikel maupun benda di alam semesta.



**Gambar 2.9** Transportasi Satelit ke Ruang Angkasa

Di samping gerak transpor satelit dalam Gambar 2.9, sebagai contoh gerak partikel 3-D adalah gerak partikel gas di ruangan, gerak partikel air di sungai, gerak ke atas molekul uap air, dan gerak acak. Gerak acak dikenal dengan istilah gerak brown (*brownian motion*) merupakan jenis gerak partikel yang memiliki lintasan acak. Karena itu, kecepatan dan percepatan partikel dalam gerak brown juga bersifat acak. Gerak ini paling banyak diaplikasikan pada lingkup partikel mikroskopik. Gerak brown banyak dipakai sebagai dasar analisis dalam konteks 3-D, meskipun telah lebih banyak dipakai dalam konteks 2-D.

Gerak benda 3-D sangat umum pula dijumpai dalam keseharian, antara lain adalah gerak kendaraan di jalan raya, bola di lapangan, hingga sendok dan garpu di meja makan. Terminologi metode Lagrangian dan Eularian yang telah diuraikan terdahulu dalam sub bab Metode Matematik untuk Menyatakan Gerak, dapat digunakan untuk menyatakan gerak 3-D. Demikian halnya, kecepatan dan percepatan dalam persamaan terkait.

## 2.7 GERAK RELATIF

Gerak relatif adalah gerak suatu partikel yang bersifat relatif terhadap partikel lainnya, dapat dinyatakan dalam 4 opsi keadaan yaitu: diam, terkejar, mendekati, dan menjauhi. Dalam konteks 1-D, gerak relatif partikel  $A$  terhadap partikel  $B$  dapat dinyatakan:

1. dalam keadaan terkejar, mendekati, atau menjauhi. Apabila gerak partikel  $A$  berkecepatan  $\vec{v}_A$  dan partikel  $B$  berkecepatan  $\vec{v}_B$ , maka kecepatan relatif gerak partikel  $A$  terhadap partikel  $B$   $\vec{v}_{A\text{rel}}$  dan kecepatan relatif gerak partikel  $B$   $\vec{v}_{B\text{rel}}$  terhadap partikel  $A$  dirumuskan:

$$\vec{v}_{A\text{rel}} = \vec{v}_{B\text{rel}} = \vec{v}_A - \vec{v}_B \quad \dots\dots\dots (2.60)$$

## Kinematika

Jika satu di antara kedua partikel dalam keadaan diam maka kecepatan geraknya bernilai nol,

$$\vec{v}_A = 0 \text{ atau } \vec{v}_B = 0.$$

2. dalam keadaan diam jika gerak partikel A seiring partikel B. Keadaan tersebut terjadi saat kedua partikel bergerak dengan kecepatan sama pada arah sama.

$$\vec{v}_{A \text{ rel}} = \vec{v}_{B \text{ rel}} = \vec{v}_A = \vec{v}_B \quad \dots\dots\dots (2.61)$$

### Contoh soal 2.11

Suatu partikel bergerak dengan kecepatan 3,55 m/s dan satu partikel lain bergerak pada arah sama dengan kecepatan 6,77 m/s. Tentukan kecepatan relatif masing-masing partikel.

Jawab:

$$\vec{v}_{A \text{ rel}} = \vec{v}_{B \text{ rel}} = 3,55 - 6,77 = -3,22 \text{ m/s}$$

## 2.8 SOAL-SOAL

1. Uraikan secara singkat pengertian kinematika.
2. Berikan penjelasan makna gerak relatif partikel.
3. Sebutkan 3 klasifikasi gerak partikel dan jelaskan secara detil 1 (satu) di antara klasifikasi yang Saudara sebutkan dalam jawaban nomor terdahulu.
4. Syarat apakah yang harus dipenuhi untuk suatu partikel dapat dikatakan dalam keadaan diam.
5. Turunkan persamaan gerak partikel 1-D.
6. Jelaskan deskripsi Lagrangian disertai sketsa dan jelaskan pula deskripsi Eulerian juga disertai sketsa.
7. Turunkan persamaan kecepatan dan percepatan pada kasus sistem 3-D.
8. Sebutkan 3 fenomena siklik yang dapat dianalisa mamakai teori gerak sinusoidal.

# BAB 3

## KINETIKA

Berbagai fenomena fisika di alam semesta umumnya tercakup dalam kajian kinetika. **Kinetika** (*kinetics*) merupakan cabang mekanika yang mengkaji benda-benda padat, cair, dan gas dalam keadaan diam maupun bergerak dengan meninjau gaya yang bekerja pada benda atau pun yang ditimbulkan benda. Berlainan dengan kajian kinematika, yang dilakukan dalam lingkup partikel, kajian dalam kinetika umumnya dilakukan dalam lingkup benda (secara utuh) atau sistem partikel kontinyu.

Semua materi kajian dalam kinetika yang berkaitan dengan keadaan benda diam tercakup dalam lingkup **statika** (*statica*). Sedangkan semua materi kajian kinetika yang berkaitan dengan benda bergerak tercakup dalam lingkup **dinamika** (*dynamics*).

### 3.1 HUKUM GRAVITASI UNIVERSAL NEWTON

Fenomena gravitasi telah mulai dikaji sejak lama. Kurang lebih pada abad ke-3 sebelum masehi, Aristoteles telah melakukan uji coba menjatuhkan secara serentak sebuah bulu dan batu dari satu ketinggian di atas permukaan tanah, maka batu sampai di permukaan tanah lebih dulu. Hal itu menunjukkan benda berat sampai permukaan tanah lebih cepat, meskipun 20 abad kemudian diketahui lebih detil bahwa hambatan udara berpengaruh pada benda jatuh bebas. Pada sekitar pertengahan abad ke-16, Galileo Galilei melakukan pula uji coba sejenis dengan menjatuhkan

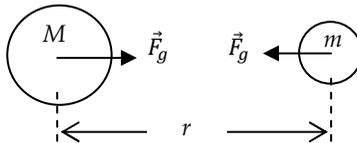
*Kinetika*

bola-bola dari menara Eifel, pengukuran dilakukan dengan teliti. Hasil uji itu menunjukkan bola-bola jatuh dengan kecepatan makin cepat, bola-bola jatuh dengan dipercepat.

Hubungan matematis yang memadai untuk fenomena tersebut baru diperoleh setelah Sir Issac Newton pada tahun 1687 menyatakan teori Hukum Gerak bahwa **gaya gravitasi** ( $\vec{F}_g$ ) bekerja tarik menarik antara dua benda tergantung pada massa benda dan kebalikan kuadrat jarak antara benda, lihat Gambar 3.1. Pernyataan tersebut diformulasikan secara matematis:

$$\vec{F}_g = - G \frac{Mm}{r^2} \dots\dots\dots (3.1)$$

dengan  $\vec{F}_g$  adalah gaya gravitasi,  $G$  adalah konstanta gravitasi universal yang besarnya  $6,6726 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg(f).s}^2$ ,  $M$  adalah massa benda yang lebih besar daripada  $m$ , sedangkan  $m$  adalah massa benda, dan  $r$  adalah jarak antara pusat massa  $M$  terhadap pusat massa  $m$ .



**Gambar 3.1** Hukum Gravitasi Universal Newton

Newton menyatakan pula bahwa untuk **gaya gravitasi bumi** ( $\vec{F}_b$ ) tergantung pada massa bumi ( $M_b$ ) dan kebalikan kuadrat jarak antara pusat massa benda terhadap pusat massa bumi ( $= R_b+h$ ), secara matematis:

$$\vec{F}_b = - G \frac{M_b}{(R_b+h)^2} \dots\dots\dots (3.2)$$

dengan  $\vec{F}_b$  adalah gaya gravitasi bumi,  $M_b$  adalah massa bumi,  $R_b$  adalah jarak antara permukaan bumi terhadap pusat massa bumi, dan  $h$  adalah jarak antara permukaan bumi terhadap pusat massa  $m$ .

Gaya gravitasi bumi, sebagaimana dimuat dalam persamaan 3.2, berpengaruh mempercepat terhadap semua massa benda di alam semesta. Besar percepatan yang ditimbulkan oleh gaya gravitasi bumi disebut dengan **percepatan gravitasi bumi** ( $\vec{g}$ , *acceleration of gravity*). Percepatan gravitasi bumi dapat juga dimaknai sebagai konstanta beda kecepatan benda jatuh bebas dalam selang waktu antara dua kecepatan tersebut, dalam  $\text{m/s}^2$ . Arah  $\vec{g}$  adalah vertikal ke bawah menuju pusat bumi.

Besar  $\vec{g}$  bersifat lokal, relatif konstan pada lingkup daerah yang tidak terlalu luas, misalnya  $\vec{g} = 9,80665 \text{ m/s}^2$  di wilayah Asean. Di kutub bumi, besar  $\vec{g}$  lebih besar 0,5% daripada di katulistiwa. Pada ketinggian  $h$  di atas permukaan bumi, besar  $\vec{g}$  lebih kecil daripada di permukaan bumi, besarnya sebanding dengan pengaruh  $h$  terhadap  $\vec{F}_b$  dalam persamaan 3.2. Nilai  $\vec{g}$  lebih besar daripada nilai percepatan gravitasi planet-planet lainnya, kecuali Jupiter dan Saturn, dalam laman internet Badan antariksa Amerika Serikat (NASA, *National Aeronautics and Space Administration*).

**Tabel 3.1** Faktor Pengali Besar Percepatan Gravitasi

Gravitasi	Faktor Pengali
Matahari	27,9
Mercury	0,377
Venus	0,9032
Bumi	1
Mars	0,3895
Jupiter	2,64
Saturn	1,139
Uranus	0,917
Pluto	0,0621
Bulan	0,1655
Kutub	9,86
Katulistiwa	9,81

### 3.2 HUKUM I NEWTON: GERAK DAN GAYA GRAVITASI

Dalam Hukum I, Newton menyatakan bahwa apabila lingkungan tidak melakukan gaya terhadap partikel, maka partikel akan **diam (tidak bergerak)** atau **bergerak lurus beraturan**. Dalam Hukum I Newton ini secara implisit terkandung makna tentang gaya oleh lingkungan partikel, sebagai sifat-sifat fisik dan keadaan lingkungan partikel.

Beberapa ketentuan untuk gaya dari lingkungan partikel adalah sebagai berikut:

- 1) Diam memiliki pengertian sama dengan bergerak lurus beraturan. Keadaan diam merupakan keadaan alami (*default*) suatu partikel dalam sistem, di mana partikel dalam sistem tidak terpengaruh oleh gaya dari lingkungan partikel.
- 2) Resultan gaya dari lingkungan partikel terhadap partikel adalah nol, atau tidak ada gaya dari lingkungan terhadap benda.
- 3) Adanya kerangka acuan inersia untuk sistem yang ditinjau, di mana Hukum I Newton berlaku.

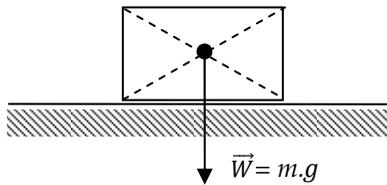
Suatu partikel dalam diam maupun bergerak dinyatakan mengalami **gaya gravitasi** ( $\vec{F}$ , *gravitational force*) akibat percepatan gravitasi yang ditimbulkan massa benda-benda kalestial, termasuk bumi. Dalam konteks partikel di bumi dan sekitar bumi, percepatan gravitasi bumi jauh lebih dominan daripada percepatan gravitasi oleh benda-benda kalestial lain.

Percepatan gravitasi bekerja pada seluruh massa partikel pada benda atau dikatakan percepatan gravitasi bekerja pada massa benda dan menimbulkan **berat** ( $\vec{W}$ , *weight*). Besar **berat benda** merupakan nilai yang diperoleh dari hasil pengukuran memakai timbangan/neraca. Besar berat benda dipengaruhi percepatan gravitasi. Berat benda di bumi tidak sama dengan berat benda di bulan.

Gaya gravitasi bekerja pada **titik pusat berat** (*CG, center of gravity*) di partikel tersebut. Arah gaya gravitasi adalah menuju pusat inti bumi.

Hukum II Newton untuk percepatan gravitasi bumi  $\vec{g}$  pada partikel dengan massa  $m$  (kg), sesuai persamaan 3.2, terkandung berat partikel sebesar:

$$\vec{W} = m \vec{g} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$



**Gambar 3.2** Gaya Berat

Contoh soal 3.1

Suatu batang emas 24 karat kadar 99,99% berukuran  $2,53 \times 42,5 \times 25,5$  mm<sup>3</sup>. Tentukan berat emas murni tersebut jika rapat massa jenis 19,296 kg/cm<sup>3</sup>.

Jawab:

$$\vec{W} = m \vec{g} = 0,00253 \cdot 0,0425 \cdot 0,0255 \cdot 19,296 \times 10^{-3} \cdot 9,81 = 5,19 \times 10^{-4} \text{ kN } (\downarrow)$$

Contoh soal 3.2

Batang emas berukuran  $118 \times 53,7 \times 8,85$  mm<sup>3</sup> memiliki rapat massa unit 16,01 kg/m<sup>3</sup>. Tentukan berat unit emas dan berat emas tersebut.

Jawab:

$$\text{Berat unit emas } (\gamma) = \rho \cdot \vec{g} = 16,01 \cdot 9,81 = 157,0581 \text{ N/m}^3$$

$$\vec{W} = m \vec{g} = 0,118 \cdot 0,0537 \cdot 0,0885 \cdot 157,0581 = 8,8076 \times 10^{-3} \text{ kN } (\downarrow)$$

## Kinetika

### Contoh soal 3.3

Hasil timbangan 16 butir telur 1 kg(f). Tentukan berat tiap butir telur dalam satuan MKS dan SI, jika masing-masing diasumsi beratnya sama.

Jawab:

Berat sebutir telur dalam MKS =  $1 / 16 = 6,25 \times 10^{-2}$  kg(f) =  $6,25 \times 10^{-1}$  ons (↓)

Berat sebutir telur dalam SI =  $6,25 \times 10^{-2} \cdot 9,81 = 6,13 \times 10^{-1}$  N (↓).

### Contoh soal 3.4

Satu kuintal (= 100 kg(f)) semen dikemas dalam 2 kemasan zak. Tentukan berat tiap zak semen dalam kg(f) dan SI jika diasumsi  $\vec{g} = 10 \text{ m/s}^2$ .

Jawab:

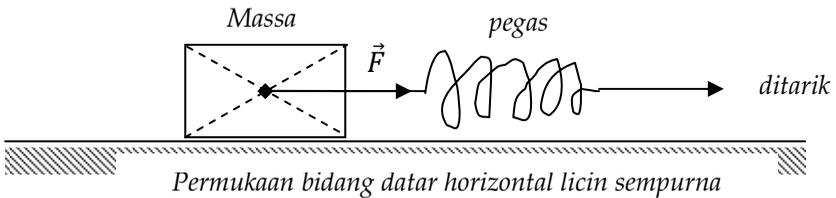
Berat 1 zak semen dalam MKS =  $100/2 = 50$  kg(f) (↓)

Berat 1 zak semen dalam SI =  $(100/2) \cdot 10 = 500$  N (↓) =  $5,905 \times 10^{-1}$  kN (↓)

## 3.3 HUKUM II NEWTON: GAYA GERAK DAN GAYA INERSIA

Pada partikel yang akan atau sedang bergerak dengan kecepatan tertentu, terdapat gaya dari lingkungan partikel yang mengusik partikel untuk berubah atau mempertahankan posisinya. Gaya tersebut disebut **gaya yang dipercepat** (*accelerated force*) dengan arah dapat menuju atau meninggalkan, menarik maupun mendorong partikel. Dalam pengaruh gaya luar tersebut, gaya yang mempertahankan posisi partikel agar tetap diam atau tidak bergerak disebut **gaya inersia** (*inertia force*), arahnya berlawanan dengan gaya yang mengusik partikel untuk berubah posisi.

Lihat Gambar 3.3, suatu massa partikel diandaikan suatu massa benda dengan lingkungan: bidang datar, horizontal licin sempurna (tanpa gesekan), pegas, dan gaya penarik  $\vec{F}$ . Pegas berfungsi memperlulus awal gerak benda sehingga proses awal gerak dapat diamati secara teliti. Satu dari ujung pegas dihubungkan dengan benda, ujung lainnya dihubungkan dengan gaya  $\vec{F}$  untuk memberikan percepatan pada benda.



Gambar 3.3 Hukum II Newton

Dalam Hukum II Newton dinyatakan bahwa **gaya** ( $\vec{F}$ , *force*) adalah perkalian antara massa benda  $m$  dengan percepatan gerak benda  $\vec{a}$ . Gaya merupakan besaran vektor, yang tidak dapat diindera tanpa alat bantu. Hukum tersebut diformulasikan dalam notasi vektor sebagai berikut:

$$\vec{F} = m \vec{a} \quad \dots\dots (3.4)$$

Sedangkan secara skalar, dalam koordinat Cartesian persamaan tersebut dituliskan:

$$F_x = m a_x , \quad \dots\dots (3.5)$$

$$F_y = m a_y , \text{ dan} \quad \dots\dots (3.6)$$

$$F_z = m a_z \quad \dots\dots (3.7)$$

dengan:

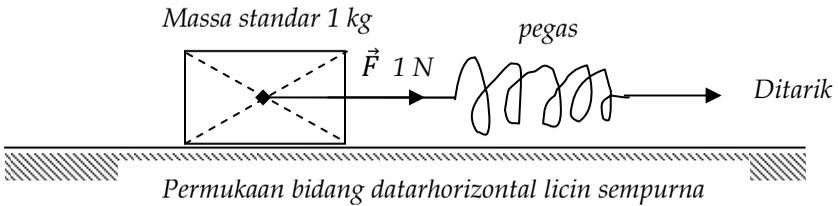
$F_x, F_y,$  dan  $F_z$  : komponen gaya  $\vec{F}$  pada arah sumbu- $x, y,$  dan  $z$  (N)

$m$  : massa benda (kg)

$a_x, a_y,$  dan  $a_z$  : komponen gaya  $\vec{a}$  pada arah sumbu- $x, y,$  dan  $z$  (m/s<sup>2</sup>)

### 3.2.1. Pengukuran Gaya

Berkaitan erat dengan Hukum II Newton, besar gaya  $\vec{F}$  sebesar 1 N didefinisikan sebagai suatu yang dapat menggerakkan benda dengan massa standar ( $m_0$ ) sebesar 1 kg dengan percepatan ( $\vec{a}$ ) sebesar  $1 \text{ m/s}^2$ . Arah kerja gaya sama dengan arah percepatan gerak massa standar.



**Gambar 3.4** Model Pengukuran Gaya dan Massa

Lihat Gambar 3.4, massa benda dibuat sebagai massa standar seberat 1 kg dan diandaikan sebagai suatu partikel dengan lingkungannya berupa bidang datar dan horizontal yang licin sempurna (tanpa gesekan) dan sebuah pegas, yang satu di antara ujungnya dihubungkan dengan massa standar. Dalam hal ini, pegas tersebut digunakan untuk memperhalus awal gerak massa standar sehingga proses awal gerak tersebut akan dapat diamati secara lebih teliti.

Pegas selanjutnya ditarik mendatar sehingga gaya penarik  $\vec{F}$  lebih besar daripada 1 N, maka pegas akan meregang dan memberikan gaya terhadap massa standar. Gaya dengan besar 1 N dapat diukur ketika gaya tersebut menyebabkan percepatan  $1 \text{ m/s}^2$  pada gerak massa standar seberat 1 kg. Percepatan yang dibangkitkan bekerja pada pusat massa dan memiliki arah sesuai dengan arah gerak massa standar, yang sesuai pula dengan arah dari gaya tarik bersangkutan.

Pengukuran dalam eksperimen selanjutnya divariasikan dalam berbagai alternatif besar gaya tarikan dan percepatan terukur. Sebagai misal, apabila dari hasil pengukuran pada massa standar diketahui mengalami percepatan sebesar  $4 \text{ m/s}^2$ , maka besar gaya adalah  $4 \text{ N}$  dengan arah sesuai dengan arah gerak massa standar. Eksperimen tersebut sekaligus menunjukkan bahwa gaya dan percepatan adalah besaran vektor dengan arah kerja sesuai dengan arah gerak massa standar.

### 3.2.2. Pengukuran Massa

Cara pengukuran gaya yang disampaikan terdahulu, lihat Gambar 3.4, dapat pula dipakai untuk mengukur massa suatu benda. Caranya adalah sebagai berikut.

Gaya yang telah dikerjakan pada massa standar  $m_0$  sehingga memicu percepatan sebesar  $a_0 \text{ m/s}^2$  dikenakan pada benda lain yang memiliki massa  $m$ , maka akan menghasilkan percepatan  $a \text{ m/s}^2$ . Massa benda lain  $m$  dapat diketahui berdasarkan hubungan matematis:

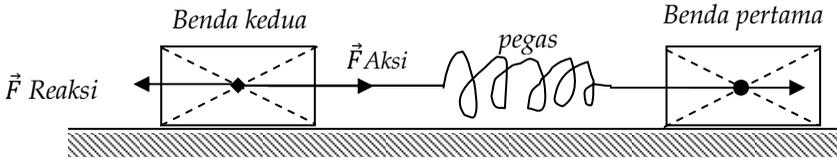
$$m = m_0 \left( \frac{a_0}{a} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (3.8)$$

## 3.4 HUKUM III NEWTON: GAYA AKSI DAN GAYA REAKSI

Dalam Hukum III, Newton menyatakan gaya selalu berpasangan, apabila sebuah benda melakukan gaya  $\vec{F}$  terhadap benda lain (benda kedua), maka benda kedua juga memberikan gaya  $-\vec{F}$  terhadap benda pertama. Gaya yang dilakukan oleh benda kedua sama besar dengan gaya yang dilakukan oleh benda pertama, namun berlawanan arah.

Gaya yang dilakukan benda pertama disebut **gaya aksi** (*action*). Gaya yang dilakukan benda kedua disebut **gaya reaksi** (*reaction*). Oleh karena itu, Hukum ini lebih dikenal dengan **Hukum Aksi-Reaksi**,

$$\vec{F}_{\text{Reaksi}} = -\vec{F}_{\text{Aksi}} \quad \dots\dots (3.9)$$



Gambar 3.5 Hukum III Newton

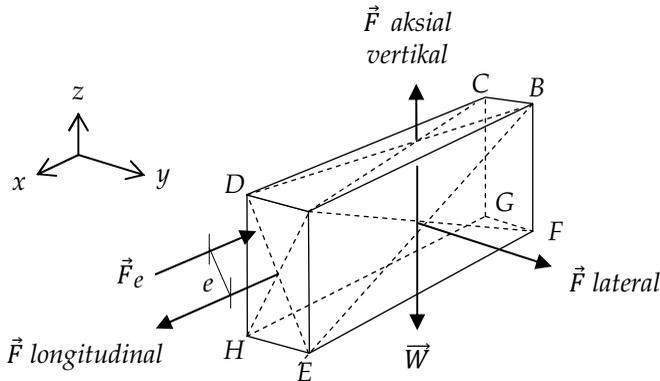
### 3.5 KLASIFIKASI GAYA BERDASAR PEMBANGKITAN GAYA

#### 3.5.1. Gaya Dalam atau Gaya Internal

Gaya dalam atau **gaya internal** (*internal force*) adalah gaya-gaya bekerja di dalam partikel, dikembangkan berdasar prinsip gaya inersia berdasarkan Hukum II Newton dan gaya reaksi dalam partikel berdasar Hukum III Newton. Misalnya, gaya internal antara lain: gaya berat sendiri benda, reaksi internal material, elastis benda, viskositas fluida, tegangan permukaan fluida, dan gesekan pada permukaan benda dengan benda lain.

#### 3.5.2. Gaya Luar atau Gaya External

Gaya luar atau **gaya external** (*external force*) adalah gaya yang bekerja pada benda dari luar atau lingkungan partikel. Gaya-gaya berdasarkan prinsip gaya yang dipercepat dalam Hukum II Newton dan gaya-gaya reaksi di luar benda berdasarkan Hukum III Newton. Misalnya, gaya penggerak benda, reaksi tumpuan, dan gesekan pada permukaan benda lain.



**Gambar 3.6** Gaya-gaya Internal, Eksternal, Aksial, dan Eksentris

Partikel diidentikkan dengan benda berbentuk prisma ABCDEFGH pada koordinat Cartersius dengan sumbu- $x$ ,  $y$ , dan  $z$ , lihat Gambar 3.6. Gaya internal pada benda adalah  $\vec{W}$ , merupakan gaya aksial dan vertikal. Gaya-gaya eksternal yang juga berupa gaya-gaya aksial pada benda adalah  $\vec{F}$  aksial *vertikal*, dan gaya-gaya horizontal meliputi:  $\vec{F}$  *longitudinal*, dan  $\vec{F}$  *lateral*. Gaya eksternal  $\vec{F}_e$  dengan besar eksentrisitas  $e$  terhadap sumbu- $x$  bekerja pada arah longitudinal benda bukan gaya aksial.

### 3.6 KLASIFIKASI GAYA BERDASAR POSISI GARIS KERJA TERHADAP SUMBU PARTIKEL

#### 3.6.1. Gaya Aksial

Gaya aksial (*axial force*) adalah gaya yang memiliki garis kerja berhimpit dengan satu di antara 3 salib sumbu partikel. Gaya aksial dapat diklasifikasikan lebih lanjut dalam 2 kelas gaya, yaitu:

**3.6.1.1. Gaya vertikal** (*vertical force*) jika garis kerja gaya berhimpit dengan sumbu vertikal partikel, umumnya sumbu- $z$  koordinat Cartesian. Cermati visualisasi dalam Gambar 3.6.

**3.6.1.2. Gaya horizontal** (*horizontal force*) jika garis kerja gaya berhimpit dengan sumbu horizontal partikel. Dapat berupa gaya longitudinal (*longitudinal force*) jika berhimpit dengan sumbu utama, sumbu sesuai dengan arah gerak partikel. Gaya lain yang tegak lurus terhadap sumbu utama disebut gaya lateral atau gaya transversal (*lateral force or transversal force*).

### **3.6.2. Gaya Eksentris**

Gaya eksentris adalah gaya yang memiliki garis kerja tidak berhimpit dengan sumbu partikel. Garis kerja gaya berjarak tertentu dari sumbu partikel yang disebut eksentrisitas (*e, eccentricity*). Garis kerja gaya bersifat parallel terhadap sumbu partikel. Gaya eksentris dapat berupa: (1) gaya vertikal atau (2) gaya horizontal, baik gaya longitudinal maupun gaya lateral/transversal.

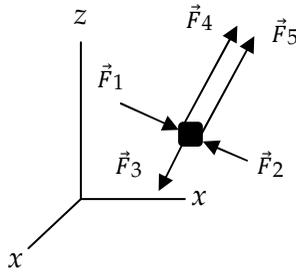
## **3.7 KLASIFIKASI GAYA BERDASAR BANYAK GAYA**

### **3.7.1. Gaya Tunggal**

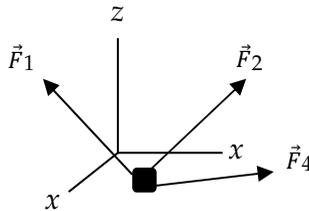
Suatu partikel dikatakan memiliki gaya tunggal (*single force*) jika hanya terdapat satu gaya pada partikel. Misal adalah gaya berat sendiri partikel (*particle weight*), yang sekaligus sebagai gaya internal. Gaya tunggal dapat juga berupa gaya eksternal. Misal adalah gaya pendorong gerak partikel.

### **3.7.2. Sistem Gaya**

Sistem gaya (*force system*) pada suatu partikel terbentuk apabila pada partikel terdapat 2 atau lebih gaya kerja yang bekerja secara bersama-sama. Lihat Gambar 3.7, sistem gaya dapat dibentuk oleh gaya-gaya yang bersifat satu bidang kerja (*coplanar*), satu garis kerja (*collinear*), sebagun (*concurrent*), sejajar (*parallel*), di samping oleh gaya-gaya dengan kombinasi sifat tersebut dan gaya-gaya yang tidak memiliki sifat tersebut (*non coplanar, non concurrent, non parallel*).



(a) Sistem gaya sebidang tidak sebangun tidak segaris tidak parallel



(b) Sistem gaya tidak sebidang sebangun tidak segaris

**Gambar 3.7** Beberapa Variasi Sistem Gaya**3.7.2.1. Gaya-gaya sebidang**

Sistem gaya sebidang (*coplanar forces system*) dibentuk oleh gaya-gaya kerja pada suatu partikel dalam satu bidang kerja. Bidang kerja gaya dapat vertikal, horizontal, atau miring. Garis kerja dan arah kerja gaya dapat sama atau berlainan.

**3.7.2.2. Gaya-gaya segaris**

Sistem gaya segaris (*collinear forces system*) dibentuk oleh gaya-gaya kerja pada suatu partikel dalam satu garis kerja, besar dan arah kerja gaya dapat sama atau berlawanan.

**3.7.2.3. Gaya-gaya sebangun**

Sistem gaya sebangun (*concurrent forces system*) dibentuk oleh gaya-gaya kerja pada suatu partikel dengan besar sama, namun arah kerja dapat sama atau berlawanan.

#### **3.7.2.4. Gaya-gaya parallel**

Sistem gaya segaris (*parallel forces system*) dibentuk oleh gaya-gaya kerja pada suatu partikel dalam posisi saling sejajar atau parallel antar satu gaya dengan lainnya, arah garis kerja gaya dapat sama atau berlawanan.

#### **3.7.2.5. Kombinasi antara gaya-gaya sebidang, segaris, sebangun, dan parallel**

Sistem gaya dapat juga dibentuk dari variasi kombinasi antara gaya-gaya sebidang, segaris, sebangun, dan parallel, antara lain dimuat dalam Gambar 3.7:

- 1 sistem gaya sebidang segaris (*coplanar collinear forces system*), dan
- 2 sistem gaya sebidang parallel (*coplanar parallel forces system*).

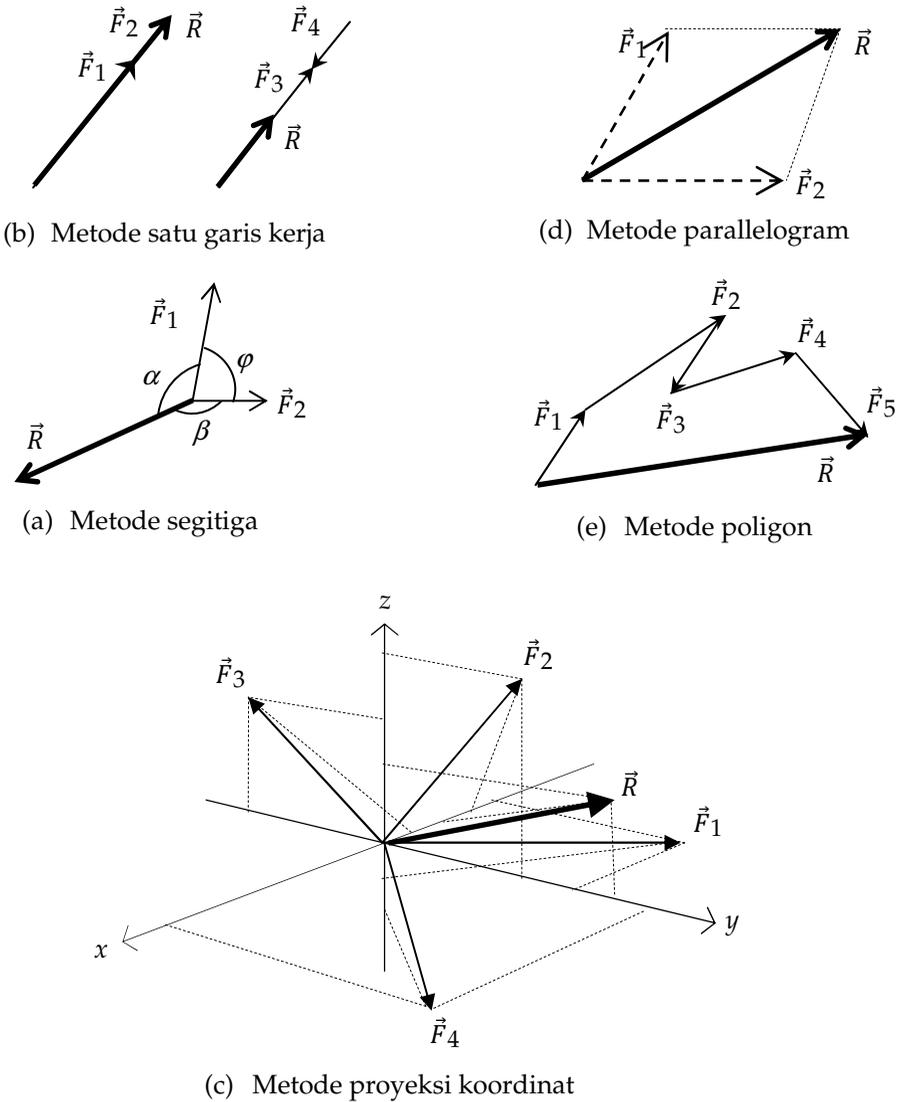
#### **3.7.2.6. Gaya-gaya tidak sebidang, tidak segaris, tidak sebangun, dan tidak parallel**

Sistem gaya yang tidak bersifat sebidang, segaris, sebangun, dan parallel jauh lebih bervariasi, antara lain sistem gaya yang dimuat dalam Gambar 3.7:

- 1 sistem gaya sebangun tidak sebidang (*non-coplanar concurrent forces system*), dan
- 2 sistem gaya tidak parallel tidak sebangun (*non-parallel non-concurrent forces system*).

#### **3.7.3. Resultan**

Beberapa gaya kerja dapat dikonversi menjadi suatu gaya tunggal yang disebut dengan **resultan** ( $\vec{R}$ , *resultante*). Sebagaimana dimuat dalam Gambar 3.7, Metode superposisi untuk mengkonversi 2 atau lebih gaya menjadi resultan, antara lain: metode gaya-gaya satu garis kerja, paralelogram, segitiga, poligon, dan proyeksi sumbu-sumbu koordinat.



**Gambar 3.8** Beberapa Metode Analisis Resultan pada Sistem Gaya

**3.7.3.1. Metode satu garis kerja**

Metode superposisi gaya-gaya dalam satu garis kerja sangat efektif digunakan untuk mendapatkan resultan pada:

- 1 sistem gaya segaris (*collinear forces system*), di mana gaya-gaya kerja langsung disuperposisikan, dan
- 2 sistem gaya parallel (*parallel forces system*), di mana gaya-gaya kerja yang parallel dapat dihimpitkan untuk disuperposisikan.

**3.7.3.2. Metode paralelogram**

Metode paralelogram dipakai untuk mensuperposisikan 2 gaya dengan titik tangkap sama menjadi resultan. Dua gaya yang dikonversi menjadi resultan selalu berada dalam sistem gaya sebidang (*coplanar forces system*).

**3.7.3.3. Metode segitiga**

Metode segitiga efektif dipakai untuk mendapatkan resultan sebagai reaksi terhadap superposisi 2 gaya dengan titik tangkap sama. Dua gaya yang dikonversi menjadi resultan reaksi selalu berada dalam sistem gaya sebidang (*coplanar forces system*).

**3.7.3.4. Metode poligon**

Metode poligon efektif dipakai untuk mensuperposisikan banyak gaya sebidang (*coplanar forces system*).

**3.7.3.5. Metode proyeksi koordinat**

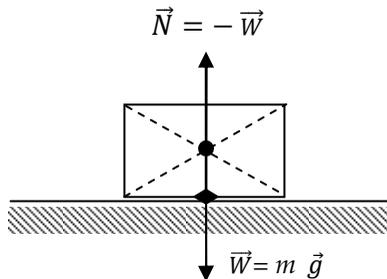
Metode proyeksi koordinat efektif dipakai untuk mensuperposisikan banyak gaya dengan titik tangkap sama dalam sistem gaya tidak segaris, tidak konkuren, tidak sebidang, tidak parallel (*non-coplanar, non-concurrent, non-collinear, non-parallel force system*).

### 3.8 GAYA NORMAL

**Gaya normal** ( $\vec{N}$ , *normal force*) adalah gaya perlawanan/ reaksi bidang dasar terhadap **berat benda** ( $\vec{W}$ ) sebagai bagian dari representasi gaya inersia. Besar gaya normal sama dengan berat benda tetapi arahnya berlawanan. Besar gaya normal secara matematis diformulasikan:

$$\vec{N} = -\vec{W} \quad \dots\dots (3.9)$$

Lihat visualisasi dalam Gambar 3.9, sebagai sistem gaya paling sederhana, gaya normal memiliki titik tangkap pada permukaan bidang dasar dan tegak lurus ( $\perp$ ) terhadap permukaan bidang dasar. Gaya normal terhadap partikel merupakan gaya eksternal yang ditimbulkan oleh benda lain sebagai pendukung/ penumpu benda. Gaya normal merupakan gaya reaksi dan sekaligus gaya pendukung ( $\vec{R}_i$ , *support reaction*) paling sederhana.



**Gambar 3.9** Gaya Normal

#### Contoh soal 3.5

Tentukan gaya normal satu zak semen dalam contoh soal 3.7.

Jawab:

$\vec{N}$  1 zak semen dalam MKS =  $100/2 = 50 \text{ kg(f)}$  ( $\uparrow$ )

dalam SI =  $(100/2) \cdot 10 = 500 \text{ N}$  ( $\uparrow$ ) =  $5,905 \times 10^{-1} \text{ kN}$  ( $\uparrow$ )

Contoh soal 3.6

Dalam contoh soal 3.5, apabila bidang dasar dibuat miring dengan sudut  $\theta$  sebesar  $30^\circ$ . Tentukan gaya normal untuk satu zak semen.

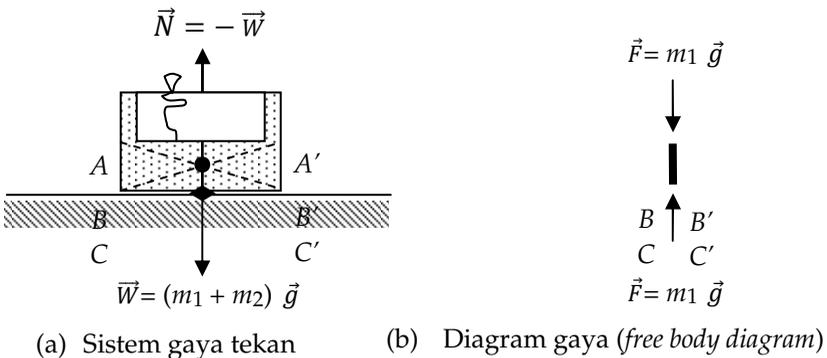
Jawab:

$$\vec{N} \text{ 1 zak semen} = \vec{W} \cdot \cos \theta = 5,905 \times 10^{-1} \cdot 0,7071 = 4,1754 \times 10^{-1} \text{ kN } (\uparrow)$$

**3.9 GAYA TEKAN, TEKANAN, DAN SUSUTAN**

Dalam Gambar 3.9 terkandung fenomena gaya tekan dan tekanan sebagai dampak bekerjanya percepatan gravitasi terhadap massa partikel yang berada pada posisi lebih tinggi dari dasar benda. Fenomena gaya tekan dan tekanan tersebut dapat dijabarkan secara lebih jelas dengan visualisasi Gambar 3.10 berikut ini.

Volume Air dalam bejana pada tampang  $ABB'A'$  memberikan gaya eksternal kebawah terhadap benda pada tampang  $BCC'B'$  sebesar  $\vec{F}_1 = m_1 \vec{g}$ . Gaya berat  $\vec{W} = (m_1 + m_2) \vec{g}$  sehingga  $\vec{N} = -(m_1 + m_2) \vec{g}$ . Karena  $\vec{F}_1 < |\vec{N}|$  maka gaya reaksi yang timbul didasar tampang  $BCC'B'$  sebesar  $\vec{F}_1 = m_1 \vec{g}$ . Lihat diagram gaya, tampang  $BCC'B'$  ditekan oleh dua gaya dengan arah berlawanan dan disebut menerima gaya tekan sebesar  $\vec{F}_1 = m_1 \vec{g}$ .



**Gambar 3.10** Gaya Tekan dan Tekanan

### 3.9.1. Gaya Tekan

**Gaya tekan** ( $\vec{F}$ , *compression force*) adalah sepasang gaya aksial yang bekerja menekan partikel, lihat Gambar 3.10. Dalam sistem SI, gaya tekan dinyatakan dalam N, sedangkan dalam sistem metrik dinyatakan dalam kg(f).

### 3.9.2. Tekanan

Sedangkan **tekanan** ( $\vec{p}$ , *pressure or stress*) adalah gaya tekan setiap satuan luas, secara matematis diformulsikan:

$$\vec{p} = \frac{\vec{F}}{A} \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

dengan  $\vec{p}$  adalah tekanan (N/m<sup>2</sup> atau kg(f)/m<sup>2</sup> atau Pa),  $\vec{F}$  adalah gaya tekan [ N kg(f) ], dan  $A$  adalah luas tampang partikel tegak lurus ( $\perp$ ) terhadap garis kerja gaya tekan (m<sup>2</sup>).

Contoh soal 3.7

Suatu bidang tekan pada partikel memiliki luas  $6,23 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ . Tentukan tekanan yang bekerja pada partikel yang ditimbulkan gaya  $2 \mu\text{N}$ . Partikel lain di samping partikel bersangkutan memiliki luas lebih besar yaitu  $8,4 \mu\text{m}^2$ , berapa gaya tekan yang diterima jika mengalami tekanan sama?

Jawab:

$$A_1 = 6,23 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\vec{F} = 2 \mu\text{N} (\rightarrow \leftarrow)$$

$$\vec{p} = \frac{\vec{F}}{A} = \frac{2 \times 10^{-6}}{6,23 \times 10^{-6}} = 3,210273 \text{ N/m}^2$$

$$A_2 = 8,4 \mu\text{m}^2 = 8,4 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\vec{F} = \vec{p}A = 3,210273 \cdot 8,4 \times 10^{-6} = 2,6966 \times 10^{-5} \text{ N} = 26,966 \mu\text{N} (\rightarrow \leftarrow)$$



(a) Gaya tekan atau tekanan

(b) Gaya tarik atau tegangan

**Gambar 3.11** Simbol Gaya Tekan dan Gaya Tarik

Di alam semesta ini, hubungan antara gaya tekan dan tekanan sangat erat. Sebagaimana ditunjukkan dalam contoh soal 3.7, suatu gaya tekan dapat diekspresikan dalam bentuk tekanan. Sebaliknya, suatu tekanan dapat juga diekspresikan dalam bentuk gaya tekan. Hal tersebut dapat dinyatakan bahwa dalam luasan sama, gaya tekan merupakan ekspresi dari suatu tekanan dan sekaligus tekanan merupakan suatu ekspresi gaya tekan.

Dalam mekanika zat padat, gaya tekan umumnya lebih mudah ditentukan daripada tekanan sehingga tekanan ditentukan dari gaya tekan tersebut. Sedangkan pada mekanika fluida (zat cair, gas, dan plasma), tekanan umumnya lebih mudah ditentukan daripada gaya tekan maka gaya tekan diperoleh dari tekanan tersebut.

Dalam gambar teknik atau perhitungan teknik, gaya tekan, gaya tarik, tekanan, dan tegangan dinyatakan dengan simbol yang dimuat dalam Gambar 3.11.

### 3.9.3. Susutan

**Susutan** (*shrinkage*) merupakan fenomena berkurangnya panjang, luas, atau volume benda setelah menerima gaya tekan atau tekanan dari luar atau lingkungan.

### 3.10 GAYA TARIK, TEGANGAN, DAN REGANGAN

Fenomena tarik merupakan kebalikan/ inversi dari fenomena tekan, fenomena tegangan kebalikan dari fenomena tekanan, dan fenomena regangan kebalikan dari fenomena susutan. Hubungan antara gaya tarik, tegangan, dan regangan sangat erat sebagaimana eratny hubungan antara gaya tekan, tekanan, dan susutan.

#### 3.10.1. Gaya Tarik

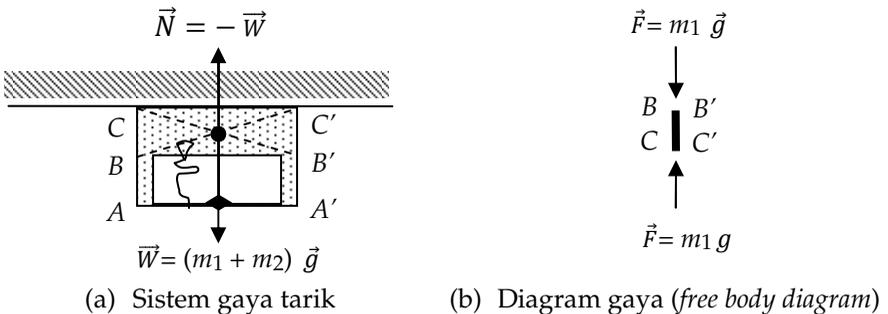
Pada fenomena tarik, **gaya tarik** ( $\vec{T}$ , *tention force*) merupakan sepasang gaya aksial bekerja menarik partikel, lihat Gambar 3.12.

#### 3.10.2. Tegangan Tarik

Gaya tarik menimbulkan **tegangan tarik** ( $\vec{\sigma}$ , *stress or axial stress*) pada partikel, yaitu gaya tarik setiap satuan luas, diformulasikan:

$$\vec{\sigma} = \frac{\vec{T}}{A} \dots\dots\dots (3.11)$$

dengan  $\vec{\sigma}$  adalah tegangan (N/m<sup>2</sup> atau kg(f)/m<sup>2</sup> atau Pa),  $\vec{T}$  adalah gaya tarik [ N atau kg(f) ], dan A adalah luas tampang partikel tegak lurus ( $\perp$ ) terhadap garis kerja gaya tekan (m<sup>2</sup>).



**Gambar 3.12** Gaya Tarik dan Tegangan

**3.10.3. Regangan**

Regangan ( $\vec{\epsilon}$ , *strain*) merupakan fenomena bertambahnya panjang, luas, atau volume benda setelah menerima gaya tarik atau tegangan dari luar atau lingkungan.

**3.11 GAYA GESER DAN TEGANGAN GESER**

**3.11.1. Gaya Geser**

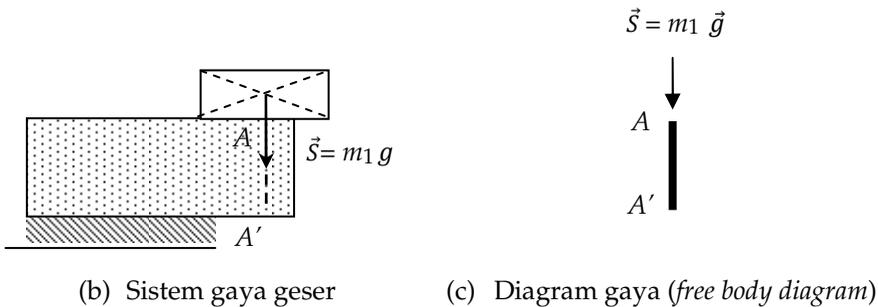
Pada fenomena tarik, gaya geser ( $\vec{S}$ , *shear force*) merupakan gaya lateral yang bekerja memotong partikel, lihat Gambar 3.12.

**3.11.2. Tegangan Geser**

Gaya geser menimbulkan tegangan geser ( $\vec{\sigma}_s$ , *shear stress or lateral stress*) pada partikel, yaitu gaya geser setiap satuan luas, diformulasikan:

$$\vec{\sigma}_s = \frac{\vec{S}}{A} \dots\dots\dots (3.12)$$

dengan  $\vec{\sigma}_s$  adalah tegangan geser (N/m<sup>2</sup> atau kg(f)/m<sup>2</sup> atau Pa),  $\vec{S}$  adalah gaya geser [ N atau kg(f) ], dan A adalah luas tampang partikel pada garis kerja gaya geser (m<sup>2</sup>).



**Gambar 3.13** Gaya Tarik dan Tegangan

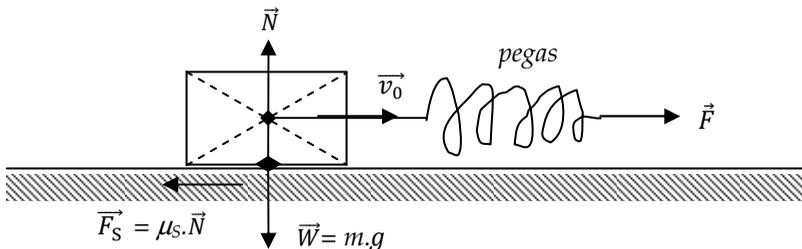
### 3.12 GAYA GESEKAN

#### 3.12.1. Hukum Gesekan Statis

Benda pada bidang datar horisontal berpermukaan kasar akan tetap diam ketika ditarik gaya  $\vec{F}$  kurang dari batas tertentu, dan jika gaya terus diperbesar maka benda tiba-tiba bergerak dengan bergeser sesuai arah gaya penarik saat batas itu terlampaui. Fenomena itu menunjukkan dalam keadaan diam terdapat gaya gesekan sebagai gaya reaksi terhadap gaya aksi pemicu gerakan.

**Gaya gesek statis** ( $\vec{F}_S$ , *static friction force*) adalah gaya gesekan yang timbul berfungsi gaya penahan benda agar tetap diam atau tidak bergerak. (*force resisting motion*). Besar gaya gesekan statis  $\vec{F}_S$  sebanding dengan gaya normal  $\vec{N}$ , yang menekan benda terhadap permukaan dasar sehingga timbul gesekan. Arahnya berlawanan dengan gaya aksi  $\vec{F}$  penggerak benda (*applied force or driving force*). Gaya gesek statis  $\vec{F}_S$  diformulasikan dengan **koefisien gesek statis** ( $\mu_s$ , *coefficient of static friction*) sebagai berikut:

$$\vec{F}_S = \mu_s \cdot N \quad \dots\dots (3.13)$$



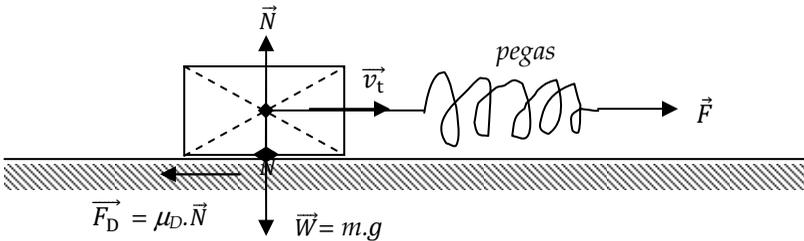
**Gambar 3.14** Gaya Gesekan Statis

Dengan demikian, lihat Gambar 3.7, batas kritis benda diam untuk bergerak adalah  $\vec{F}_S$ , saat awal gerak benda nilai  $\vec{F}$  melampaui  $\vec{F}_S$  ( $\vec{F} > \vec{F}_S$ ).

**3.12.2. Hukum Gesekan Dinamik**

Setelah benda mulai bergerak, maka saat benda bergerak selain  $\vec{F}_S$  timbul juga **gaya gesek dinamik** ( $\vec{F}_D$ , *dynamic friction force*) yaitu gaya gesekan yang timbul saat benda bergerak berfungsi menahan gerak benda untuk menjadikan benda kembali diam. Besar gaya gesekan dinamik sebanding dengan gaya normal  $\vec{N}$ . Gaya gesek dinamik  $\vec{F}_D$  dirumuskan dengan **koefisien gesek dinamik** ( $\mu_D$ , *coefficient of dynamic friction*) sebagai berikut:

$$\vec{F}_D = \mu_D \cdot \vec{N} \quad \dots\dots\dots (3.14)$$



**Gambar 3.15** Gaya Gesekan Dinamik

Pada keadaan benda diam hingga mulai bergerak berlaku  $\mu_s$  yang menimbulkan  $\vec{F}_S$  dan dalam keadaan bergerak berlaku  $\mu_D$  yang menimbulkan  $\vec{F}_D$ . Gaya  $\vec{F}$  harus lebih besar daripada  $\vec{F}_D$  ( $\vec{F} > \vec{F}_D$ ) agar benda bergerak dan gaya  $\vec{F}$  harus lebih besar daripada  $\vec{F}_D$  ( $\vec{F} > \vec{F}_D$ ) agar benda tetap bergerak dengan kecepatan konstan.

Hasil-hasil eksperimen menunjukkan umumnya untuk memulai gerak benda dibutuhkan gaya  $\vec{F}$  lebih besar daripada mempertahankan benda tetap bergerak dalam kecepatan konstan. Maka, umumnya  $\mu_s$  lebih besar daripada  $\mu_D$  ( $\mu_s > \mu_D$ ).

Contoh soal 3.8

Tentukan besar gaya untuk menggerakkan benda seberat  $5,00 \times 10^1$  kg(f) pada bidang dengan koefisien gesekan sebesar 0,76 ke kanan.

Jawab:

$$\begin{aligned}\vec{N} &= -\vec{W} \\ &= 5,00 \times 10^1 \text{ kg(f)} (\uparrow) \\ &= 5,00 \times 10^1 \cdot 9,81 = 4,905 \times 10^2 \text{ N} (\uparrow)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{F}_S &= \mu_s \cdot N \\ &= 0,76 \cdot 5,00 \times 10^1 = 3,8 \times 10^1 \text{ kg(f)} (\leftarrow) \\ &= 0,76 \cdot 4,905 \times 10^2 = 3,7278 \times 10^2 \text{ N} (\leftarrow)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{F} \text{ minimal} &= -\vec{F}_S \\ &= 3,8 \times 10^1 \text{ kg(f)} (\rightarrow) \\ &= 3,7278 \times 10^2 \text{ N} (\rightarrow)\end{aligned}$$

### 3.13 GAYA SENTRIPETAL DAN SENTRIFUGAL

Gaya sentripetal dan sentrifugal merupakan 2 gaya yang sifatnya berpasangan. Secara logis gaya sentripetal terjadi lebih dahulu sebagai gaya aksi, kemudian diimbangi munculnya gaya sentrifugal sebagai gaya reaksi. Karena itu, benda-benda langit terjaga keteraturan posisinya di alam semesta.

Dalam beberapa fenomena, gaya sentrifugal dapat berdampak buruk jika menjadi jauh lebih dominan daripada gaya sentripetal sehingga perlu diatasi. Misal, gaya sentrifugal yang dibangkitkan percepatan sesaat pada kendaraan berkecepatan tinggi yang melintas pada tikungan tajam dapat mengakibatkan kendaraan oleng keluar tikungan. Massa aliran air sungai deras yang membelok mengalami gaya sentrifugal menggerus tepi luar belokan sungai.

Fenomena-fenomena tidak menguntungkan tersebut menunjukkan gaya sentripetal dan sentrifugal dapat muncul mendadak, yang diartikan seakan benda berada pada suatu kerangka acuan yang dipengaruhi oleh gaya-gaya tertentu yang tidak mudah ditentukan. Kerangka acuan (sistem koordinat) demikian disebut **kerangka acuan non-inersia** (*non-inertial frame*) yaitu kerangka acuan

yang mengalami percepatan. Jenis kerangka acuan ini umum dipakai dalam ruang kendaraan. Sedangkan kerangka acuan yang umum dipakai dalam analisis tidak dipengaruhi gaya-gaya tertentu di luar sistem yang disebut **kerangka acuan inersia** (*inertial frame*).

Sedangkan untuk prinsip pompa sentrifugal, gaya sentrifugal hingga kini makin efektif dimanfaatkan. Pompa sentrifugal terbaru dapat dipakai menaikkan air dengan debit tinggi dalam waktu cepat.

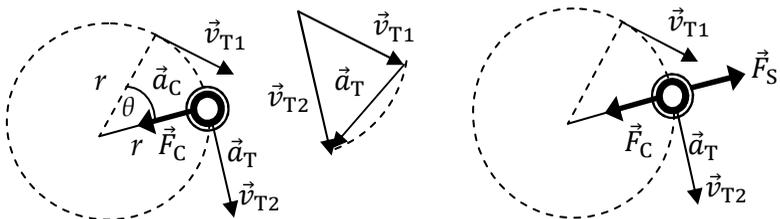
### 3.13.1. Gaya Sentripetal

**Percepatan sentripetal** ( $\vec{a}_C$ , *centripetal acceleration*) adalah percepatan yang mendorong benda menuju pusat lingkaran dalam gerak rotasi atau revolusi. Percepatan ini bekerja pada jari-jari lingkaran, mulai dari posisi benda hingga pusat lingkaran, karena itu percepatan ini disebut juga dengan **percepatan radial** ( $\vec{a}_R$ , *radial acceleration*). Percepatan sentripetal secara matematis dirumuskan:

$$\vec{a}_C = \frac{\vec{v}^2}{r} \quad \dots\dots (2.15)$$

**Gaya sentripetal** ( $\vec{F}_C$ , *centripetal force*) adalah gaya yang mendorong benda menuju pusat lingkaran dalam gerak rotasi atau revolusi. Gaya itu muncul karena massa benda mengalami percepatan sentripetal  $\vec{a}_C$  akibat perbedaan kecepatan tangensial  $\vec{v}_T$ . Susuai Hukum II Newton:

$$\vec{F}_C = m \vec{a}_C \quad \dots\dots (3.12)$$



**Gambar 3.16** Gaya Sentripetal dan Gaya Sentrifugal

### 3.13.2. Gaya Sentrifugal

Gaya sentrifugal ( $\vec{F}_S$ , *centrifugal force*) merupakan gaya reaksi atas gaya sentripetal  $\vec{F}_C$  sehingga arahnya berlawanan dengan gaya sentripetal. Secara matematis diformulasikan:

$$\vec{F}_S = -\vec{F}_C \quad \dots\dots (3.16)$$

Contoh soal 3.9

Sebuah payung berdiameter 80 cm diputar dengan kecepatan 2 m/s dari posisi diam. Tentukan gaya centripetal dan sentrifugal yang dialami butir air dengan massa 2,1 ng pada payung tersebut.

Jawab:

$$D = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m}$$

$$r = 0,80./2 = 0,4 \text{ m}$$

$$\vec{v} = 2 \text{ m/s}$$

$$m = 2,25 \text{ ng} = 2,1 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

$$\vec{a}_C = \frac{\vec{v}^2}{r} = \frac{2^2}{0,4} = 10 \text{ m/s}^2$$

$$\vec{F}_C = m \vec{a}_C = 2,1 \times 10^{-6} \cdot 10 = 2,1 \times 10^{-5} \text{ N} \quad \left( \begin{array}{c} \nearrow \\ \nearrow \end{array} \right)$$

$$\vec{F}_S = -\vec{F}_C = 2,1 \times 10^{-5} \text{ N} \quad \left( \begin{array}{c} \boxtimes \\ \boxtimes \end{array} \right)$$

Contoh soal 3.10

Apabila pada ujung-ujung jeruji payung dalam soal terdahulu ditancapkan bola-bola kecil bermassa 5,4 g yang tidak lepas saat payung diputar. Tentukan gaya centripetal dan sentrifugal pada bola.

Jawab:

Dari jawaban terdahulu:  $D = 0,8 \text{ m}$ ;  $r = 0,4 \text{ m}$ ;  $\vec{v} = 2 \text{ m/s}$ ; dan  $\vec{a}_C = 2 \text{ m/s}^2$

$$m = 5,4 \text{ g} = 5,4 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

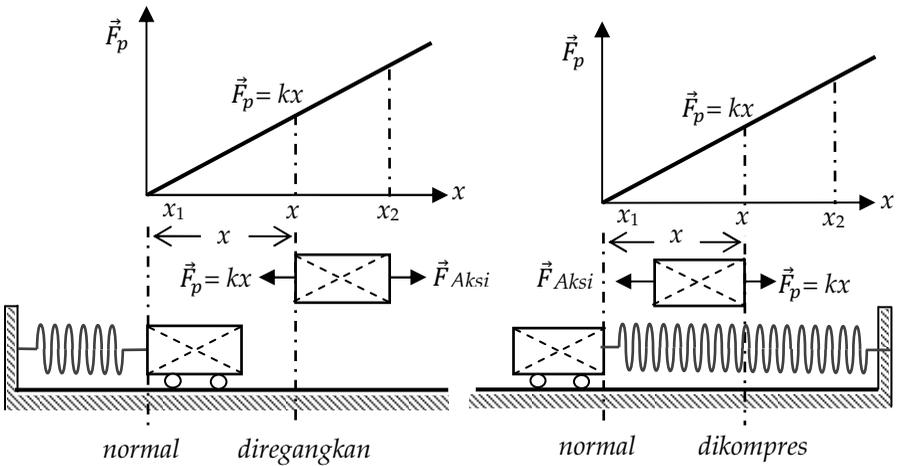
$$\vec{F}_C = m \vec{a}_C = 5,4 \times 10^{-3} \cdot 2 = 1,08 \times 10^{-2} \text{ N} \quad \left( \begin{array}{c} \nearrow \\ \nearrow \end{array} \right)$$

$$\vec{F}_S = -\vec{F}_C = 1,08 \times 10^{-2} \text{ N} \quad \left( \begin{array}{c} \boxtimes \\ \boxtimes \end{array} \right)$$

**Catatan:** Dalam 2 contoh soal tersebut, mengapa air keluar daerah payung ketika diputar, sementara bola-bola tidak demikian.

### 3.14 GAYA PEGAS

Gerak pegas merupakan satu di antara bentuk gerak *osilasi*, di samping gerak pendulum dan gelombang. Gerak pegas penting dikaji karena sering digunakan sebagai dasar teori dalam kajian dampak gempa pada bangunan, vibrasi, dan respons benda elastik.



**Gambar 3.17** Hukum Hooke tentang Pegas

**Gaya pegas** ( $\vec{F}_p$ , *spring force*) merupakan gaya reaksi dari gaya aksi  $\vec{F}_{Aksi}$  terhadap pegas. Persamaan dasar pegas dikenal sebagai Hukum Hooke tentang pegas, diformulasikan:

$$\vec{F}_p = kx \quad \dots\dots (3.17)$$

dengan  $k$  adalah konstanta pegas (N/m) dan  $x$  adalah regangan pegas (m).

Contoh soal 3.11

Sebuah pegas diregangkan dengan gaya 1 kN. Tentukan konstanta pegas jika pegas meregang 4 mm.

Jawab:

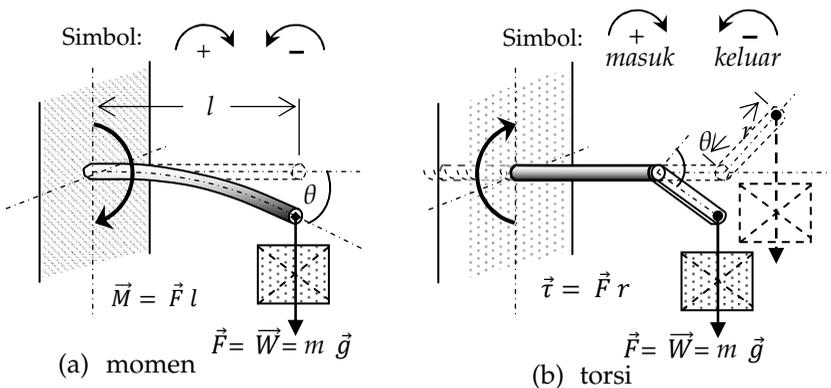
$$\vec{F}_p = kx, \text{ maka } k = \vec{F}_p / x = 1000 / 0,004 = 2,5 \times 10^2 \text{ kN/m.}$$

**3.15 GAYA KEJUT**

Hingga kini belum diketahui banyak informasi mengenai gaya kejut. Dalam beberapa referensi, gaya kejut dimaknai sebagai **gaya bentur** ( $\vec{F}$ , *drag force or impact force*) karena terjadi dalam waktu sangat singkat. Pada buku ini, kajian mengenai gaya bentur dijabarkan dalam bab impuls dan momentum. (torsi)

**3.16 MOMEN**

Gaya kerja pada suatu partikel atau pada sistem partikel kontinyu dapat membangkitkan momen. Fenomena momen dapat terjadi dalam bentuk momen linier dan momen puntir bergantung posisi gaya terhadap posisi sumbu referensi di mana momen bekerja.



Gambar 3.18 Momen dan Torsi

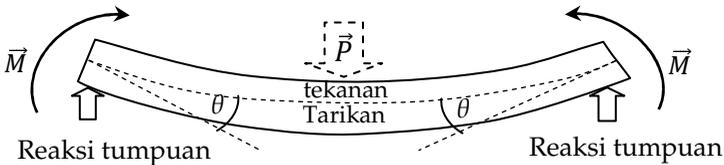
### 3.16.1. Momen dan Tegangan Lentur

**Momen linear** atau lebih umum disebut **momen** ( $\vec{M}$ , *moment*) adalah perkalian antara gaya dengan lengan momen yaitu jarak antara garis kerja gaya terhadap suatu titik tertentu, lihat Gambar 3.18(a). Momen diformulasikan:

$$\vec{M} = \vec{F} l \quad \dots\dots (3.18)$$

dengan  $\vec{M}$  adalah momen [ Nm atau kg(f).m ],  $\vec{F}$  adalah gaya kerja [ N atau kg(g) ], dan  $l$  adalah lengan momen (m).

Momen dapat menimbulkan simpangan atau defleksi (*deflection*) pada batang dengan besar sudut simpangan  $\theta$ . Momen juga menimbulkan tegangan lentur pada batang yang bersifat lenturan disertai simpangan  $\theta$  dan lendutan  $\delta$ , lihat Gambar 3.19.



Gambar 3.19 Tegangan Lentur

### 3.16.2. Torsi dan Tegangan Puntir

**Torsi** ( $\vec{\tau}$ , *torque*) adalah perkalian antara gaya dengan radius torsi yaitu jarak antara garis kerja gaya terhadap suatu titik tertentu sehingga menimbulkan simpangan sudut sebesar  $\theta$ , lihat Gambar 3.18(b). Torsi diformulasikan:

$$\vec{\tau} = \vec{F} r \quad \dots\dots (3.19)$$

dengan  $\vec{\tau}$  adalah torsi [ Nm atau kg(f).m ],  $\vec{F}$  adalah gaya kerja [ N atau kg(g) ], dan  $l$  adalah lengan torsi (m).

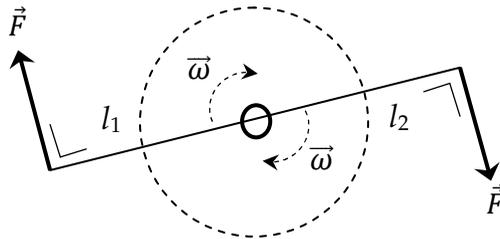
Putaran pada sumbu batang oleh torsi mendapatkan perlawanan tegangan torsi (*intensity of torsional stress*). Oleh karena itu, tegangan torsi bekerja berlawanan arah terhadap arah putaran torsi.

### 3.17 MOMEN KOPEL

Gaya kerja pada suatu partikel atau pada sistem partikel kontinu dapat juga membangkitkan **momen kopel** ( $\vec{M}$ , *kopel moment*), yaitu perkalian antara pasangan gaya terhadap jarak antara garis kerja gaya terhadap suatu titik tertentu dengan sistem gaya ditunjukkan dalam Gambar 3.20. Fenomena momen kopel bekerja sebagaimana momen puntir terhadap sumbu partikel. Besar momen kopel diformulasikan:

$$\vec{M} = \vec{F} l_1 = \vec{F} l_2 \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

dengan  $\vec{M}$  adalah momen kopel [ Nm atau kg(f).m ],  $\vec{F}$  adalah gaya kerja [ N atau kg(g) ], dan  $l_1 = l_2$  adalah lengan momen (m).

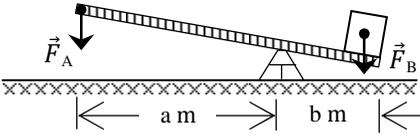
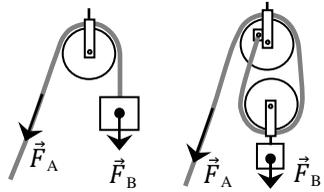
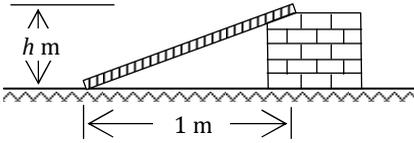
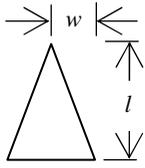
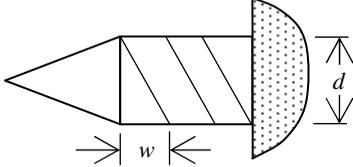


Gambar 3.20 Momen Kopel

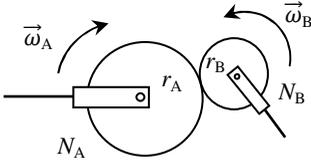
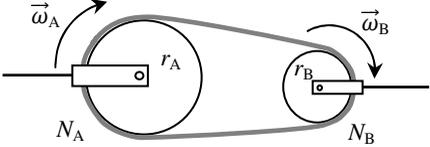
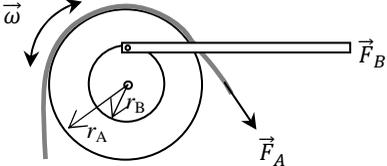
### 3.18 KEUNTUNGAN MEKANIS

Di antara keuntungan mempelajari mekanika adalah untuk dapat menggunakan keuntungan mekanik (*MA, Mechanical Advantage*) dari bentuk-bentuk geometri tertentu, baik dalam konteks bangunan dan peralatan canggih, menengah, maupun sederhana.

Tabel 3.2 Keuntungan Mekanis Beberapa Bentuk Konstruksi

Keuntungan Mekanis	Sketsa Alat/ Konstruksi
<p><b>Pengungkit/dongkrak</b> (<i>lever</i>)</p> $MA = \frac{\vec{F}_B}{\vec{F}_A} = \frac{b}{a}$	
<p><b>Katrol</b> (<i>pulley</i>)</p> $MA = \frac{\vec{F}_B}{\vec{F}_A} = 2n$ <p><math>n =</math> jumlah katrol terpakai</p>	
<p><b>Bidang miring</b> (<i>ramp or inclined plane</i>)</p> $MA = \frac{1}{h}$	
<p><b>Keruncingan</b> (<i>wedge</i>)</p> $MA = \frac{1}{w}$	
<p><b>Sekrup</b> (<i>screw</i>)</p> $MA = \frac{\pi d}{w}$	

Lanjutan Tabel 3.2 Faktor Pengali ...

Keuntungan Mekanis	Sketsa Alat/ Konstruksi
<p><b>Roda gigi berderet</b> (gear train)</p> $MA = \frac{\omega_B}{\omega_A} = \frac{r_A}{r_B} = \frac{N_B}{N_A} = \frac{T_A}{T_B}$	
<p><b>Roda gigi dan rantai</b> (gear chain)</p> $MA = \frac{\omega_B}{\omega_A} = \frac{r_A}{r_B} = \frac{N_B}{N_A} = \frac{T_A}{T_B}$	
<p><b>Roda besar dan kecil</b> (wheel and axle)</p> $MA = \frac{r_A}{r_B} = \frac{\vec{F}_B}{\vec{F}_A}$	

### 3.19 SOAL-SOAL

1. Jelaskan Hukum I Newton.
2. Jelaskan Hukum II Newton dan beri contoh 2 fenomena.
3. Jelaskan Hukum III Newton dan beri contoh 2 fenomena.
4. Uraikan secara singkat makna berat dan massa, serta perbedaannya.
5. Jelaskan yang dimaksud dengan gaya gesekan statik dan berikan contoh 2 fenomena.
6. Jelaskan yang dimaksud dengan gaya gesekan dinamik dan berikan contoh 2 fenomena.

## *Kinetika*

7. Dua buah pegas dari bahan sama memiliki koefisien pegas 1,919 N/m. Salah satu di antara ujung pegas tersebut dihubungkan. Sedangkan pada ujung lainnya ditarik dengan gaya. Pegas pertama ditarik dengan gaya 180 N, sedangkan pegas kedua ditarik dengan gaya 240 N. Apabila pegas pertama meregang 4,4 cm, tentukan regangan pada pegas kedua.
8. Jelaskan 3 di antara bentuk-bentuk geometri benda/konstruksi yang mengandung keuntungan mekanis, penjelasan harus disertai dengan sketsa.

# BAB 4

## KERJA, DAYA, DAN ENERGI

Kerja, daya, dan energi merupakan besaran-besaran yang saling berhubungan erat dan terkandung dalam setiap fenomena di alam semesta, baik yang berkaitan dengan benda-benda alamiah maupun buatan, dalam keadaan diam maupun bergerak, yang telah maupun belum dimanfaatkan. Benda-benda alami atau buatan selalu menghasilkan kerja. Kerja tersebut dipengaruhi daya benda, yang dapat digunakan untuk mengindikasikan batas kemampuan, kecepatan, dan transformasi sejumlah energi dalam proses maupun untuk mencapai suatu hasil kerja. Sementara itu, suatu kerja selalu pula mensyaratkan atau disertai oleh daya dan energi tertentu yang diperlukan untuk kerja. Sebaliknya, suatu ketersediaan atau pun transformasi energi selalu berkaitan dengan kerja yang dilakukan dengan daya tertentu.

Sejalan dengan perkembangan ilmu dan teknologi hingga awal abad ke-22 ini, teori kerja, daya, dan energi telah banyak dimanfaatkan untuk pengembangan berbagai teori lanjut dalam bidang fisika dan teknik. Khususnya di bidang teknik sipil, 3 teori tersebut telah banyak juga dimanfaatkan untuk penciptaan berbagai sarana dan prasarana guna mempermudah dalam pelaksanaan berbagai aktivitas sehari-hari.

Pada banyak pustaka, artikel-artikel ilmiah, dan materi-materi kursus yang digunakan tutor selaku nara sumber, hingga kini besaran kerja, daya, dan energi dipahami, dipakai, dan disajikan dalam persamaan-persamaan matematis sebagai besaran skalar.

Karena banyaknya pustaka dan artikel demikian maka sulit disebutkan di sini satu persatu, misalnya dipersilakan membaca kembali pustaka dalam daftar pustaka artikel ini.

Dalam buku ini dijabarkan lebih dalam "**konsep baru bahwa besaran kerja, daya, dan energi adalah besaran vektor**". Konsep tersebut telah dikaji cukup dalam publikasi K. Satrijo Utomo (2014) "*Redefinisi Besaran Kerja, Daya, dan Energi sebagai Besaran Vektor*", berdasarkan analisis data ekperimental. Hal demikian mengingat ketidaktepatan pemakaian ketiga besaran sebagai besaran skalar dalam beberapa referensi dan publikasi hingga.

Konsep tersebut secara konsisten merubah jangkauan aplikasi 3 besaran tersebut menjadi makin luas, karena penerapan besaran vektor jauh lebih luas daripada besaran skalar. Pengaplikasian konsep baru tersebut perlu juga disertai upaya konsisten dalam pemakaian dan penyajiannya melalui persamaan-persamaan terkait dalam pustaka, artikel, maupun berbagai sarana publikasi ilmiah di masa datang.

#### **4.1 KERJA**

Di manca negara, hanya digunakan istilah **kerja** (*work, work done, or workability*) untuk menyatakan sejumlah energi yang ditransformasi untuk atau pun dalam suatu proses. Di Indonesia, digunakan istilah usaha selain istilah kerja untuk menyatakan hal tersebut. Penggunaan istilah tersebut sering menimbulkan kerancuan atau bias makna, terutama dalam penerapan teori-teori terkait. Jika dicermati, istilah usaha memiliki makna yang lebih luas daripada istilah kerja, meskipun beda kedua istilah tersebut tidak tampak jelas. **Guna menghindari bias makna, dalam uraian selanjutnya hanya dipakai istilah kerja.**

Keberadaan suatu gaya dalam ruang dan waktu, termasuk **berat sendiri benda** ( $\vec{W}$ , *weight*), selalu berpotensi atau cenderung menimbulkan kerja untuk merubah posisi partikel penyusun benda atau posisi benda bersangkutan, sebagai suatu sistem partikel kontinyu. Karena perubahan posisi partikel atau pun benda tidak selalu menguntungkan (berdampak positif), maka keberadaan gaya dalam ruang dan waktu perlu selalu dicermati, dikendalikan, atau diseimbangkan.

Pengendalian gaya-gaya mencakup pengendalian terhadap gaya-gaya yang bersifat alami maupun buatan. Gaya-gaya yang bersifat alami umumnya dibangkitkan oleh benda-benda alami, antara lain gaya tarik bumi, gaya tekan angin, dan gaya hidraustatik arus air. Sedangkan gaya-gaya buatan dapat diproduksi melalui benda-benda buatan yang umum dibuat sebagai alat, antara lain gaya pintu air, gaya tegangan tali, gaya magnetik, dan gaya traksi mesin.

Dalam konteks perubahan posisi partikel atau benda pada ruang dan waktu tertentu, **kerja** ( $\vec{W}$ , *workability*) dapat diartikan sebagai **kemampuan gaya** (atau resultan) untuk merubah posisi partikel atau benda pada ruang dan waktu. Kerja ( $\vec{W}$ , *work*) dapat juga diartikan sebagai **jumlah energi yang ditransformasikan** dalam perubahan posisi partikel atau benda pada ruang dan waktu. Di samping itu, kerja dapat juga diartikan sebagai **energi yang dihasilkan oleh gaya** ( $\vec{W}$ , *work done or work to be handled*) dalam merubah posisi partikel atau benda pada ruang dan waktu.

Dalam konteks kerja oleh gaya reaksi ( $\vec{R}$ , *reaction*) untuk menjaga stabilitas benda dalam keadaan tetap tegar atau rigid, kerja diartikan sebagai suatu energi yang dihasilkan oleh gaya reaksi dalam melawan gaya aksi, yang bekerja merubah posisi partikel dalam ruang dan waktu.

**Kerja** adalah hasil perkalian vektor antara gaya dan gerak. Sebagai besaran vektor, kerja dapat bernilai positif, nol, maupun negatif sesuai arah gaya kerja atau arah gerak partikel. Hal demikian karena gaya dapat bernilai positif maupun negatif sesuai dengan arah gerak partikel, sementara itu arah kerja selalu sesuai dengan arah gaya. Dengan demikian, kerja bernilai positif jika arah gaya kerja sesuai dengan arah gerak partikel. Suatu kerja umumnya dirancang sesuai dengan arah gaya, sehingga kerja umumnya bernilai positif. Kerja dapat juga bernilai nol jika gaya kerja tidak menyebabkan gerak partikel. Contohnya antara lain adalah kerja oleh gaya tegak lurus arah gerak (kemungkinan arah lintasan) partikel dan kerja oleh gaya reaksi (gaya normal, gaya reaksi tumpuan, gaya reaksi tarikan, gaya reaksi dorongan, dan gaya reaksi tekanan). Selain itu, kerja dapat juga bernilai negatif jika gaya kerja berlawanan dengan arah gerak partikel atau dihasilkan oleh gaya yang berada pada posisi di bawah elevasi rencana. Sebagai misal adalah kerja oleh gaya gesek, gaya rem, peluru menembus permukaan obyek, dan pengeboran di bawah elevasi rencana.

Kerja diklasifikasikan berdasarkan gaya kerja yang memicu kerja, meliputi kerja oleh gaya tetap dan kerja oleh gaya berubah.

#### **4.1.1. Kerja oleh Gaya Tetap**

Gaya tetap (atau resultan tetap) pada benda dikatakan melakukan kerja  $\vec{W}$  jika gaya  $\vec{F}$  menyebabkan benda bergerak  $\vec{S}$  m dalam waktu  $t$ . Dalam notasi vektor, kerja dinyatakan:

$$\vec{W} = \vec{F} \times \vec{S} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

Dalam notasi skalar, persamaan dituliskan sebagai:

$$\vec{W} = F S \cos \emptyset \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

dengan  $\emptyset$  adalah sudut antara garis kerja gaya  $\vec{F}$  dan arah gerak. Kerja dinyatakan dalam satuan joule (J) atau  $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ .



## Kerja, Daya, dan Energi

Gaya kerja berubah  $\vec{F}_1$  dan  $\vec{F}_2$  terhadap benda dikatakan melakukan kerja  $\vec{W}_{t_{12}}$  sebesar:

$$\vec{W}_{t_{12}} = \int_{t=t_1}^{t=t_2} \vec{F} \times \vec{S} \mid dt \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

Dalam notasi skalar, untuk arah sumbu- $x$ , persamaan dituliskan:

$$\vec{W}_{x \ t_{12}} = F_t \cdot \cos \phi_t \cdot S_t \mid_{t=t_1}^{t=t_2}$$
$$\vec{W}_{x \ t_{12}} = (F_2 \cos \phi_2 - F_1 \cos \phi_1) \cdot S_{t_{12}} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

Sehingga persamaan (4.3) dapat dinyatakan menjadi:

$$\vec{W}_{x \ t_{12}} = F_{x \ t_{12}} S_{x \ t_{12}} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

### 4.2 DAYA

Dalam pengertian kerja pada sub bab terdahulu, waktu tertentu yang diperlukan oleh gaya untuk menyelesaikan kerja belum digunakan secara optimal dalam persamaan. Oleh karena itu, capaian kerja dalam waktu tertentu belum pula diakomodasikan dalam persamaan. Dengan demikian, berdasar persamaan 4.1 sampai persamaan 4.5, kerja yang memiliki besar sama tetapi dilakukan oleh 2 gaya pada 2 sistem gaya yang berbeda/ terpisah dalam selang waktu berlainan tidak dapat dibedakan. Sebagai misal, pada 2 sistem gaya yang berlainan, masing-masing sistem memiliki satu gaya kerja. Sistem benda pertama selesai dalam waktu 1 jam dan sistem kedua selesai dalam waktu 30 menit. Apabila kerja pada kedua sistem benda tersebut sama, masing-masing sebesar 10 J, unjuk kerja oleh gaya pada kedua sistem gaya tidak dapat dibedakan meskipun kedua sistem gaya selesai dalam waktu berlainan. Untuk

membedakan unjuk kerja antar kedua sistem dengan waktu kerja berlainan tersebut, digunakan besaran yang disebut dengan daya. Pemakaian besaran daya digunakan juga untuk menentukan besar energi terpakai dalam suatu proses dalam selang waktu tertentu. Misalnya, dalam contoh tersebut sistem gaya terdahulu, besar energi terpakai pada masing-masing sistem setelah proses berjalan 20 menit. Selain itu, daya juga dimaknai sebagai kekuatan gaya (atau resultan gaya) dalam melakukan kerja. Oleh karena itu, untuk keberhasilan pencapaian hasil pada suatu proses sering disyaratkan besar daya minimal yang harus dipenuhi.

**Daya** ( $\vec{P}$ , *power*) didefinisikan sebagai kerja per satuan waktu. Daya merupakan besaran vektor dengan arah sesuai dengan arah kerja gaya, secara matematis diformulasikan:

$$\vec{P} = \frac{\vec{W}}{t} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

dengan  $\vec{W}$  adalah kerja yang dilakukan oleh gaya  $\vec{F}$  (atau resultan) dalam joule dan  $t$  adalah selang waktu kerja dalam sekon.

Definisi tersebut menyiratkan pula bahwa daya dimaknai juga sebagai **laju pencapaian kerja**. Hal itu menyiratkan bahwa daya merupakan laju pemakaian sumber daya oleh gaya kerja dan sekaligus menunjukkan adanya **batas minimal kekuatan gaya kerja yang disyaratkan** dalam pemakaian sumber daya untuk dapat melaksanakan kerja secara efektif.

Substitusi persamaan 4.6 di mana  $\vec{W} = \vec{F} S$  dan  $\vec{v} = S/t$  dengan  $S$  adalah jarak gerak, maka persamaan 4.6 dapat dinyatakan dalam notasi vektor sebagai:

$$\vec{P} = \frac{\vec{F} \times \vec{S}}{t} = \vec{F} \times \vec{v} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

## Kerja, Daya, dan Energi

Dalam notasi skalar, untuk arah sumbu- $x$ , persamaan dituliskan sebagai:

$$\vec{P}_x = F_x v_x \cos \phi \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

Satuan daya adalah watt (W) dengan  $1 W = 1 \text{ Joule/s} = 1 \text{ J/s}$  atau pun  $\text{kg.m}^2/\text{s}^3$ . Selain itu, di bidang elektrik dapat juga digunakan satuan daya  $1 W = 1 \text{ VA}$  dengan V adalah Volt untuk satuan voltase (potensial tegangan listrik). Sedangkan dimensi daya adalah  $\text{ML}^2\text{T}^{-3}$ .

### 4.3 ENERGI/ TENAGA

Kerja yang dilakukan oleh gaya berkaitan erat dengan besar energi yang diperlukan untuk melakukan kerja tersebut. Selain itu, pengertian kerja berkaitan pula dengan besar energi yang dialihragamkan/ ditransformasikan melalui kerja bersangkutan. Eratnya hubungan antara kerja dengan energi diformulasikan dalam **teorema kerja-energi**.

Energi atau tenaga (*energy*) adalah potensi yang dikandung pada massa benda baik dalam keadaan diam maupun bergerak. Satuan dan dimensi energi kinetik sama dengan satuan dan dimensi kerja. Satuan J atau  $\text{kg.m}^2/\text{s}^2$  dan dimensi  $\text{ML}^2\text{T}^{-2}$ .

#### 4.3.1. Energi Kinetik

Energi kinetik ( $\vec{E}_k$ , *kinetic energy*) adalah energi yang dimiliki benda karena geraknya. Energi kinetik merupakan besaran vektor dengan arah sesuai arah gerak benda dan

Pada fenomena gerak partikel dengan massa  $m$  kg dengan kecepatan  $\vec{v}$  m/s, partikel dikatakan memiliki energi kinetik sebesar:

$$\vec{E}_k = \frac{1}{2} m \vec{v}^2 \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

Besar energi dalam persamaan 4.9 tersebut dapat diartikan sebagai besar energi yang diperlukan untuk mempercepat partikel dari keadaan diam ( $\vec{v} = 0 \text{ m/s}$ ) hingga bergerak dengan kecepatan  $\vec{v} \text{ m/s}$ . Selain itu, besar energi tersebut dapat juga diartikan sebagai besar energi yang diperlukan partikel untuk bergerak dengan kecepatan  $\vec{v} \text{ m/s}$  dari keadaan diam ( $\vec{v} = 0 \text{ m/s}$ ).

#### 4.3.2. Teori Kerja-Energi

Teori kerja-energi (*work-energy theory*) yang dijabarkan dari hukum-hukum Newton tentang gerak dinyatakan bahwa kerja yang dilakukan oleh gaya terhadap benda adalah sama dengan perubahan energi kinetik benda. Secara matematis dituliskan:

$$\vec{W} = \vec{E}_k - \vec{E}_{k0} = \Delta\vec{E}_k \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

dengan  $\vec{W}$  adalah kerja yang dilakukan gaya  $\vec{F}$  (atau resultan) dalam joule,  $\vec{E}_{k0}$  adalah energi kinetik mula-mula benda, dan  $\vec{E}_k$  adalah energi kinetik benda setelah bergerak akibat gaya yang bekerja pada benda. Ketiga besaran dinyatakan dalam satuan joule.

Dalam konteks teori kerja-energi ini dikenal terminologi **gaya konservatif** (*conservative force*) dan **gaya tidak konservatif** (*non-conservative force*). Suatu gaya disebut bersifat konservatif jika memenuhi salah satu dari 3 persyaratan berikut:

- 1) Gaya kerja tidak merubah kedudukan benda semula, karena setelah benda bergerak, benda kembali ke lokasi benda semula dengan energi kinetik sama dengan keadaan sebelum bergerak.
- 2) Gaya kerja melakukan kerja sebesar nol ditinjau dari keadaan benda sebelum dan setelah bergerak, karena kerja yang dilakukan oleh gaya kerja pada benda dengan sembarang lintasan tidak menghalangi benda kembali ke kedudukan semula.

- 3) Gaya kerja melakukan kerja tanpa dipengaruhi lintasan gerak benda dan hanya bergantung pada lokasi awal dan akhir benda.

Gaya-gaya yang tidak memenuhi persyaratan itu dikelompokkan dalam gaya yang bersifat tidak konservatif.

### 4.3.3. Energi Potensial

Energi potensial ( $\vec{E}_p$ , *potential energy*) merupakan energi pada benda karena posisinya.  $\vec{E}_p$  adalah besaran vektor dengan arah sesuai gaya gravitasi.  $\vec{E}_p$  didefinisikan sebagai perkalian antara massa, percepatan gravitasi, dan tinggi benda terhadap referensi tertentu, dinyatakan secara matematis:

$$\vec{E}_p = m\vec{g}h \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

dengan  $m$  adalah massa partikel/ benda (kg), percepatan gravitasi ( $m/s^2$ ), dan tinggi/ posisi partikel terhadap referensi tertentu (m).

Setiap gaya konservatif mempunyai energi potensial ( $\vec{E}_p$ , *potential energy*) yang besarnya dipengaruhi oleh perubahan susunan (konfigurasi) sistem. Di sini, **pengertian sistem mencakup benda dan lingkungannya**. Perubahan energi potensial  $\vec{E}_p$  didefinisikan sebagai nilai negatif dari kerja yang dilakukan gaya pada benda. Untuk kasus 1-Dimensi pada arah sumbu- $x$ , dinyatakan dengan persamaan:

$$\Delta\vec{E}_p = -\vec{W} = \int_{x=x_0}^{x=x_1} \vec{F}(x) dx \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

### 4.3.4. Kekekalan Energi

Pada sistem dengan gaya-gaya konservatif, **energi mekanis** ( $\vec{E}_k$ , *mechanical energy*) yaitu jumlah energi kinetik dan energi potensial pada sistem adalah tetap. Pernyataan tersebut identik

dengan perubahan energi mekanis pada benda adalah nol, yang dinyatakan secara matematis:

$$\vec{E}_k + \vec{E}_p = \text{Constan} \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

atau

$$\Delta\vec{E} = \Delta\vec{E}_k - \Delta\vec{E}_p = 0 \quad \dots\dots\dots (4.14)$$

Persamaan tersebut menunjukkan sistem tidak mengalami perubahan energi mekanis, atau jumlah perubahan energi mekanis sistem adalah nol.

**4.3.5. Energi Gesek**

Gaya gesek adalah gaya reaksi atau perlawanan terhadap gaya kerja pada benda. Gaya gesek dapat berupa **gaya gesek internal** ( $\vec{F}_s$ , *shear force*) dalam benda atau **gaya gesek eksternal** ( $\vec{F}_s$ , *friction force*) di luar benda.

Dalam sistem gaya gesek dapat diabaikan, namun dapat juga diperhitungkan. Jika gaya gesek turut diperhitungkan dalam sistem, maka gaya tersebut akan bekerja mereduksi energi mekanis benda. Energi oleh gaya gesek tersebut diperhitungkan sebagai rasio terhadap energi potensial benda sehingga disebut dengan **potensial energi gesekan** ( $\vec{E}_{pf}$ , *potential friction-energy*).

Untuk menyatakan fenomena itu, prinsip kekekalan energi mekanis dapat dipertahankan dengan mengakomodasikan kerja oleh gaya gesekan dalam pernyataan matematis:

$$\vec{E}_k + \vec{E}_p + \vec{E}_{pf} = \text{Constan} \quad \dots\dots\dots (4.15)$$

atau

$$\Delta\vec{E} = \Delta\vec{E}_k + \Delta\vec{E}_p + \Delta\vec{E}_{pf} = 0 \quad \dots\dots\dots (4.16)$$

Pernyataan prinsip kekekalan energi tersebut menunjukkan sistem tidak mengalami perubahan energi mekanis akibat gesekan, atau jumlah perubahan energi mekanis dalam sistem adalah nol.

#### 4.3.6. Energi Bentuk Lain

Gaya-gaya kerja pada suatu sistem, baik gaya konservatif maupun tak konservatif secara umum selalu melakukan kerja sesuai dengan jenis energi yang dapat diproduksi pada setiap sistem.

Pernyataan prinsip kekekalan energi tersebut dapat dituliskan secara matematis dengan persamaan:

$$\Delta \vec{E} = \Delta \vec{E}_k + \Delta \vec{E}_p + \Delta \vec{E}_{pf} + (\text{perubahan energi bentuk lain}) = 0 \quad \dots \quad (4.17)$$

#### 4.3.7. Energi Diam

Prinsip kekekalan energi dapat diperluas ke bentuk yang lebih lengkap dalam pengertian kekekalan **energi relativistik** ( $\vec{E}_{\text{total}}$ , *conservation of relativity energy*). Konsep relativitas energi tersebut diperkenalkan dalam bentuk postulat oleh Thomas A. Einstein dengan istilah **energi diam**  $m_0 c^2$  dengan  $m_0$  massa benda dalam keadaan diam dan  $c$  adalah cepat rambat cahaya pada vakum.

Dengan demikian, persamaan perubahan energi mekanis pada sistem dapat dinyatakan secara matematis:

$$\Delta \vec{E}_k + \Delta \vec{E}_p + \Delta \vec{E}_{pf} + \dots + m_0.c^2 = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (4.18)$$

**Keselarasan massa energi** ( $\xi = -m_0.c^2$ ) menunjukkan bahwa bentuk energi ini dapat berubah dalam bentuk energi lain.

#### 4.3.8. Efisiensi Energi

Ketika kerja dilakukan, tidak seluruh energi dapat ditransformasikan menjadi hasil kerja ke bentuk energi yang diharapkan, sebagian di antara energi diubah ke bentuk energi lain yang tidak diharapkan maupun dihamburkan ke lingkungan sistem, antara lain dihamburkan dalam bentuk *heat* (energi thermal).

Bagian energi yang dapat/berhasil ditransformasikan dalam sistem menjadi hasil kerja ke bentuk energi yang diharapkan dinyatakan dalam nilai rasio terhadap energi total yang ditransformasikan dan disebut **efisiensi energi** ( $\eta_E$ , *energy efficiency*).

Nilai efisiensi energi  $\eta_E$  secara matematis diformulasikan dengan persamaan:

$$\eta_E = \frac{\vec{E}_T}{\vec{E}_{Tot}} 100\% \quad \dots (4.19)$$

dengan:

$\eta_E$  : efisiensi tranformasi energi (%),

$\vec{E}_T$  : energi yang berhasil ditranformasikan (J), dan

$\vec{E}_{Tot}$  : energi total yang akan ditranformasikan (J).

#### 4.4 SOAL-SOAL

1. Jelaskan pengertian usaha oleh gaya tetap.
2. Jelaskan pengertian usaha oleh gaya berubah.
3. Apa yang dimaksud dengan daya?
4. Uraikan secara singkat tentang energi kinetik.
5. Jelaskan yang dimaksud dengan energi potensial.
6. Jelaskan pengertian kekekalan energi mekanis.
7. Sebutkan syarat-syarat agar gaya disebut gaya konservatif.
8. Terangkan secara singkat teorema usaha-energi.
9. Sebuah bak berukuran panjang 2,0 m, lebar 3,0 m, dan tinggi 2,4 m diisi air hingga ketinggian 2,0 m. Tentukan besar gaya, daya, kerja, dan energi yang dikandung dalam bak tersebut jika rapat massa air dalam bak adalah 1,00 kg(f)/m<sup>3</sup>.
10. Sebuah partikel bergerak lurus horizontal dengan kecepatan 44,41 m/s. Tentukan besar gaya, daya, kerja, dan energi yang dikandung dalam partikel jika massa partikel adalah 0,25 kg.

### *Kerja, Daya, dan Energi*

11. Tentukan gaya, daya, kerja, dan energi pada sebuah partikel dengan massa 2 kg yang bergerak melingkar beraturan dengan jari-jari 1 m dan periode 1,6 sekon.
12. Tentukan gaya, daya, kerja, dan energi pada sebuah partikel dalam soal 11 jika gerak partikel dipercepat dengan percepatan tangensial 0,5 m/s.

# BAB 5

## MOMENTUM DAN IMPULS

Momentum dan impuls merupakan dua fenomena penting yang dapat dialami oleh benda/ zat yang dapat bergerak. Oleh karena itu, baik momentum maupun impuls penting dikaji secara mendalam untuk dipakai sebagai dasar dalam analisis gerak benda maupun benda yang bergerak bersangkutan. Benda yang bergerak dapat berwujud padat dan zat alir, yang mencakup zat cair, gas, dan plasma.

Dalam kajian gerak benda padat, tinjauan atas fenomena momentum dan impuls umum dilakukan dalam lingkup partikel maupun benda, sebagai suatu sistem partikel kontinyu. Dalam lingkup partikel, tinjauan sedimen dalam lairan air, gerak pesawat di ruang angkasa, dan gerak peluru kendali di angkasa.

Sedangkan dalam kajian gerak zat alir, tinjauan atas kedua fenomena tersebut lebih umum dilakukan dalam lingkup partikel, meskipun gerak zat cair umum pula ditinjau dalam lingkup sistem partikel kontinyu. Dalam lingkup partikel, sebagai misal, tinjauan gerak partikel air pada gelombang dan difusi partikel air pada media porous. Sedangkan tinjauan dalam lingkup sistem partikel kontinyu antara lain tinjauan streamline dan tube aliran pada aliran dalam pipa dan jet.

Konservasi momentum berlaku untuk gaya konservatif maupun tak konservatif. Berlainan dengan konservasi energi yang hanya dapat dipakai jika gaya-gaya kerja dalam sistem merupakan gaya konservatif.

## 5.1 SISTEM PARTIKEL

Dalam konteks benda utuh sebagai suatu sistem partikel kontinyu, terdapat pengertian tentang pusat massa. **Pusat massa** ( $CM$ , *center of mass*) adalah titik di mana massa sistem partikel berada.

### 5.1.1. Sistem 2 Partikel

Dalam sistem koordinat Cartesian dengan sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ , pusat massa 2 partikel memiliki koordinat  $CM(x_{CM}, y_{CM}$ , dan  $z_{CM}$ ) secara matematis dituliskan:

$$\begin{aligned}x_{CM} &\equiv \frac{m_1x_1+m_2x_2}{m_1+m_2}; \\y_{CM} &\equiv \frac{m_1y_1+m_2y_2}{m_1+m_2}; \text{ dan} \\z_{CM} &\equiv \frac{m_1z_1+m_2z_2}{m_1+m_2}; \quad \dots\dots\dots (5.1)\end{aligned}$$

### 5.1.2. Sistem n Partikel Tersebar di Ruang

Dalam sistem koordinat Cartesian dengan sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ , pusat massa sejumlah  $n$  partikel memiliki koordinat  $CM(x_{CM}, y_{CM}$ , dan  $z_{CM}$ ) secara matematis dituliskan:

$$\begin{aligned}x_{CM} &\equiv \frac{m_1x_1+m_2x_2+\dots+m_nx_n}{m_1+m_2+\dots+m_n} \equiv \frac{\sum m_ix_i}{\sum m_i} \equiv \frac{\sum m_ix_i}{M}; \\y_{CM} &\equiv \frac{m_1y_1+m_2y_2+\dots+m_ny_n}{m_1+m_2+\dots+m_n} \equiv \frac{\sum m_iy_i}{\sum m_i} \equiv \frac{\sum m_iy_i}{M}; \text{ dan} \\z_{CM} &\equiv \frac{m_1z_1+m_2z_2+\dots+m_nz_n}{m_1+m_2+\dots+m_n} \equiv \frac{\sum m_iz_i}{\sum m_i} \equiv \frac{\sum m_iz_i}{M}; \text{ dengan} \\M &= \sum m_i \quad \dots\dots\dots (5.2)\end{aligned}$$

### 5.1.3. Sistem Benda Pejal atau Sistem Partikel Kontinyu

Dalam sistem koordinat Cartesian dengan sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ , pusat massa sistem partikel kontinyu memiliki koordinat  $CM(x_{CM}, y_{CM}, \text{ dan } z_{CM})$  secara matematis dituliskan:

$$\begin{aligned}x_{CM} &= \frac{\sum m_i x_i}{M} ; \\y_{CM} &= \frac{\sum m_i y_i}{M} ; \text{ dan} \\z_{CM} &= \frac{\sum m_i z_i}{M} ; \text{ dengan} \\M &= \sum m_i \quad \dots\dots\dots (5.3)\end{aligned}$$

dengan  $M$  adalah massa total partikel-partikel dan  $m_i$  adalah massa partikel ke- $i$ . Sedangkan  $x_i$ ,  $y_i$ , dan  $z_i$  adalah koordinat partikel ke- $i$ .

$CM(x_{CM}, y_{CM}, \text{ dan } z_{CM})$  untuk sistem partikel kontinyu yang dapat juga diidentifikasi secara matematik dalam fungsi  $x$ ,  $y$ , dan  $z$  sesuai persamaan berikut:

$$\begin{aligned}x_{CM} &= \iiint x \, dV ; \\y_{CM} &= \iiint y \, dV ; \text{ dan} \\z_{CM} &= \iiint z \, dV ; \text{ dengan} \\M &= \sum m_i \quad \dots\dots\dots (5.4)\end{aligned}$$

## 5.2 HUKUM II NEWTON UNTUK SISTEM PARTIKEL

Dalam konteks benda sebagai kumpulan partikel, Hukum II Newton dapat dituliskan:

$$F_{\text{ext}} = m \cdot a_{CM} \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

dengan  $F_{\text{ext}}$  adalah gaya eksternal (N),  $m$  adalah massa total partikel-partikel (kg), dan  $a_{CM}$  adalah percepatan pusat massa ( $m/s^2$ ).

### 5.3 TEORI ENERGI-KERJA UNTUK SISTEM PARTIKEL

Pada sistem partikel, gaya-gaya luar/ eksternal ( $\vec{F}_{\text{ext}}$ , *external forces*) yang bekerja pada sistem partikel tidak melakukan kerja terhadap sistem. Namun, energi kinetik dari sistem dapat berubah naik maupun turun. Kerja yang berkaitan dengan perubahan energi kinetik tersebut adalah kerja dalam, yang nilainya dapat positif maupun negatif.

Pengertian pusat massa memungkinkan suatu solusi persoalan diperoleh tanpa mengetahui secara rinci tentang kerja dalam. **Kerja pusat massa partikel** atau **kerja dalam** ( $\vec{W}_{\text{CM}}$ ) yang dilakukan oleh pusat massa sistem partikel didefinisikan sebagai kerja dari gaya luar  $\vec{F}_{\text{ext}}$ , seolah-olah bekerja pada pusat massa, dinyatakan secara matematis:

$$\vec{W}_{\text{CM}} = \int \vec{F}_{\text{ext}} d(z_{\text{CM}}) \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

Nilai **kerja dalam**  $\vec{W}_{\text{CM}}$  adalah sama dengan **perubahan energi kinetik** dengan gerak sistem partikel diidentikkan dari pusat massa sistem partikel. Fenomena itu dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\vec{W}_{\text{CM}} = \vec{K}_{\text{CM}} - \vec{K}_{\text{CM}-0} = \Delta\vec{K}_{\text{CM}} \quad \dots\dots (5.7)$$

### 5.4 MOMENTUM LINEAR

#### 5.4.1. Momentum Linier untuk Sistem Partikel Kontinyu

Pada setiap partikel yang bergerak lurus, baik gerak lurus beraturan maupun gerak lurus tidak beraturan, terkandung momentum linier sebagai **ekspresi energi potensial dan energi kinetik** yang dimiliki benda bersangkutan, serta **potensi untuk membangkitkan gaya tumbukan** ( $\vec{F}_i$ , *impact force*).

**Momentum linier** ( $\vec{p}$ , *linear momentum*) didefinisikan sebagai perkalian antara massa dan kecepatan, dituliskan secara matematis:

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad \dots\dots\dots (5.8)$$

dengan  $\vec{p}$  adalah momentum linier (kg.m/s),  $m$  adalah massa total partikel-partikel (kg), dan  $\vec{v}$  adalah kecepatan pusat massa partikel (m/s). Oleh karena,

$$\vec{F} = m\vec{a} = m\frac{d\vec{v}}{dt} = m\frac{d(m\vec{v})}{dt} \quad \dots\dots\dots (5.9)$$

maka Hukum II newton dapat dituliskan dalam terminologi momentum linier sebagai:

$$\vec{F} = \frac{d(\vec{p})}{dt} \quad \dots\dots\dots (5.10)$$

Dengan demikian, **perubahan momentum merupakan gaya**. Apabila dalam gerak partikel mengalami perubahan kecepatan, maka partikel mengalami percepatan dan selanjutnya melakukan gaya. Gaya tersebut memiliki arah sama dengan arah kecepatan dan gerak benda.

#### 5.4.2. Momentum Linier untuk Sistem Partikel

Untuk sistem partikel, hubungan antara gaya dengan momentum dapat dituliskan:

$$\vec{F}_{\text{ext}} = \frac{d(\vec{p})}{dt} \quad \dots\dots\dots (5.11)$$

dengan

$$\vec{p} = m\vec{v}_{\text{CM}} \quad \dots\dots\dots (5.12)$$

dengan  $\vec{p}$  adalah momentum linier (kg.m/s),  $m$  adalah massa total partikel-partikel (kg), dan  $\vec{v}_{\text{CM}}$  adalah kecepatan pusat massa sistem partikel (m/s).

### 5.4.3. Kekekalan Momentum Linier

Dalam hukum ini dinyatakan jika tidak ada gaya luar yang bekerja pada sistem partikel, maka momentum linier dari sistem akan tetap. Hal itu dijabarkan dalam persamaan-persamaan berikut:

$$\text{Kecepatan: } \vec{v}_{\text{CM}} = \frac{\sum m_i \vec{v}_i}{M}$$

$$\text{Percepatan: } \vec{a}_{\text{CM}} = \frac{\sum m_i \vec{a}_i}{M}$$

$$\text{Momentum: } M\vec{v}_{\text{CM}} = \sum m_i \vec{v}_i = \sum \vec{p}_i = \vec{p}$$

$$\text{Gaya: } M\vec{a}_{\text{CM}} = \sum m_i \vec{a}_i = \sum \vec{F}_i = \vec{F} = \frac{d(\vec{p})}{dt}$$

Hukum kekekalan momentum linier:

$$\sum \vec{F}_i = 0; \quad \frac{d(\vec{p})}{dt} = 0; \quad \vec{p} = M\vec{v}_{\text{CM}} = \text{konstan}$$

## 5.5 IMPULS

Pemakaian Hukum II Newton pada 2 partikel yang bertumbukan, baca persamaan 5.10, akan menghasilkan persamaan:

$$J = P_f + P_i \quad \dots\dots (5.13)$$

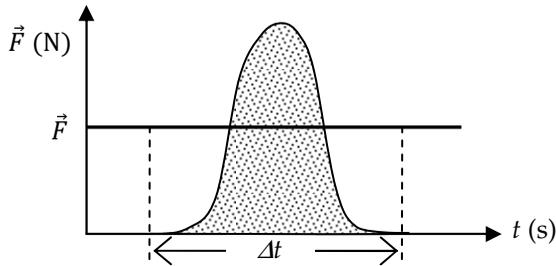
$$J = \int_{t=t_0}^{t=t_1} \vec{F}(t) dt \quad \dots\dots (5.14)$$

dengan  $\vec{F}(t)$  adalah gaya antara kedua partikel selama tumbukan,  $P_f$  adalah momentum setelah 2 partikel bertumbukan, dan  $P_i$  adalah momentum sebelum 2 partikel bertumbukan.

**Gaya impulsif** ( $\vec{F}$ , *impulsive force*) adalah gaya yang bekerja sangat singkat tetapi dapat menyebabkan perubahan besar pada momentum yang dikandung benda. Gaya impuls dianalisis memakai metode pemrosesan signal, respons impuls, dan **fungsi respon impuls** (*IRF, impuls response function*).

Dalam perhitungan sering dipakai term  $\Delta t$  untuk menggantikan  $dt$  dalam persamaan 5.14. Hal tersebut perlu dilakukan dengan mengambil nilai  $\Delta t$  sekecil mungkin, karena fenomena impuls terjadi dalam waktu yang sangat singkat. Dalam perhitungan impuls dipakai persamaan:

$$J = \vec{F} \Delta t \quad \dots\dots (5.15)$$



Gambar 5.1 Impuls

Grafik impuls dalam Gambar 5.1 umumnya diperoleh dengan pemetikan data pengukuran yang dilengkapi *plotter*.

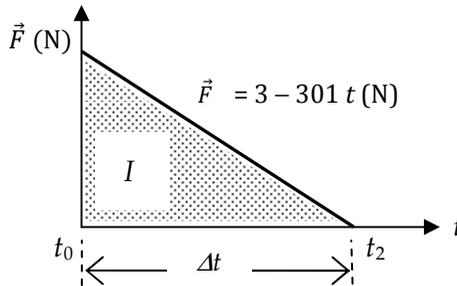
Gambar 5.1 Impuls

$\Delta t$ (s)	$\vec{F}$ (N)	$I$ (Ns)
0,001	$1 \times 10^4$	10
0,01	$1 \times 10^3$	10
0,1	$1 \times 10^2$	10
1	$1 \times 10^1$	10
10	$1 \times 10^0$	10
100	$1 \times 10^{-1}$	10
100	$1 \times 10^{-2}$	10

## Momentum dan Impuls

Nilai  $\Delta t$  terlalu besar dapat menghasilkan nilai  $\vec{F}$  terlalu kecil. Tampak dalam Tabel 5.1 hubungan  $\Delta t$  dengan  $\vec{F}$  untuk menghasilkan impuls 10 Ns, nilai  $\vec{F}$  dapat 10 kali lebih kecil akibat pengambilan nilai  $\Delta t$ .

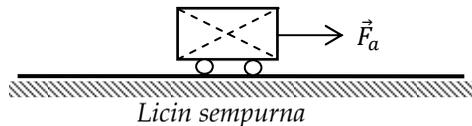
Fenomena impuls dalam persamaan 5.14 dan Gambar 5.1 umumnya didekati dengan persamaan 5.15 dengan grafik hasil pengukuran maupun perhitungan ditunjukkan dalam Gambar 5.2 berikut. Untuk nilai  $\Delta t$  yang sangat kecil, hasil perhitungan gaya  $\vec{F}$  memakai kedua persamaan tersebut adalah sama.



**Gambar 5.2** Grafik Impuls

### Contoh soal 5.1

Suatu benda berbentuk kotak dengan massa 1,2 kg diletakkan di atas meja yang licin sempurna sebagaimana sketsa berikut.



**Gambar 5.3** Benda di Meja Licin Sempurna

Benda tersebut digerakkan dengan gaya  $\vec{F}_a = 9 - 900t$  (N) dengan  $t$  adalah waktu dalam sekon. Tentukan (a) grafik hubungan  $\vec{F}_a$  dan  $t$ , (b) berapa impuls benda setelah bergerak 0,01 s, (c) berapa kecepatan setelah 0,01 s.

Jawab:

$$m = 1,2 \text{ kg}$$

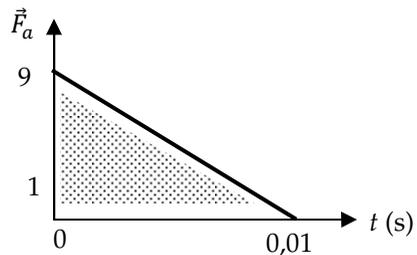
$\vec{v}_0 = 0$ , benda mula-mula diam

$$\vec{F}_a = 9 - 900t \text{ (N)}$$

a) Grafik hubungan  $\vec{F}_a$  dan  $t$ ,

Tabel hitungan Impuls

No	$t$ (s)	$\vec{F}_a$ (N)
0	0	9
1	0,002	7,2
2	0,004	5,4
3	0,006	3,6
4	0,008	1,8
5	0,01	0



Grafik hubungan  $\vec{F}_a$  dan  $t$

b) Impuls  $t = 0$  s hingga  $t = 4$  s

Dari grafik hubungan  $\vec{F}_a$  dan  $t$ , tampak luasan yang diarsir untuk Impuls setelah  $t = 0,01$  s berbentuk segitiga, maka

$$\text{Impuls} = 0,01 \cdot 9 / 2 = 1,8 \times 10^{-1} \text{ Ns}$$

c) Hukum Impuls: Impuls = perubahan momentum

$$\vec{F}_a \Delta t = m [\vec{v}_4 - \vec{v}_0]$$

$$1,8 \times 10^{-1} = 1,2 \cdot [\vec{v}_4 - 0]$$

$$\vec{v}_4 = 1,5 \times 10^{-1} \text{ m/s}$$

## 5.6 TUMBUKAN

Suatu partikel dikatakan mengalami **tumbukan** (*collision*) jika dalam gerak mengalami singgungan/sentuhan/benturan dengan partikel lain sehingga saling memberi gaya. Gaya bentur/tumbuk yang relatif besar bekerja pada masing-masing partikel yang

bertumbukan dalam waktu sangat singkat. Permasalahannya, bagaimana mempelajari tumbukan tanpa mengetahui proses terjadinya tumbukan, karena waktu fenomena sangat singkat, sebagaimana dinyatakan dalam persamaan 5.15.

Tumbukan antara 2 buah partikel dibedakan dalam 3 tipe, sebagai berikut:

1. **tumbukan lenting** (*elastis*) jika energi kinetik partikel sebelum dan setelah tumbukan sama. Sebagai misal, dalam konteks partikel makroskopis, tumbukan bola biliard.
2. **tumbukan tidak lenting** dan jika energi benda sebelum tumbukan dan setelah tumbukan tidak sama. Setelah tumbukan sebagian dari energi benda sebelum tumbukan ditransformasikan ke benda yang ditumbuk, sebagian lain energi didissipasikan/ dihamburkan ke bentuk energi lain, antara lain: heat dan gaya internal untuk merekonstruksi bentuk benda.
3. **tumbukan tidak lenting sama sekali** memiliki keadaan energi kinetik benda sebelum tumbukan dan setelah tumbukan tidak sama, mirip dalam kasus tumbukan tidak lenting sebagian.

**Tumbukan pada partikel mikroskopis** seperti proton, neutron, dan quark, sering bersifat lenting. Pada partikel-partikel tersebut tidak ada friksi internal yang menyebabkan energi terdissipasi. Namun, tumbukan antar partikel mikroskopis dapat tidak lenting yang disertai pembentukan partikel baru. Pembentukan partikel baru dapat disebabkan transformasi energi ke massa atau perubahan bentuk struktur partikel yang telah ada.

Dalam **Hukum Tumbukan** (*collision law*) dinyatakan bahwa pada peristiwa tumbukan, jumlah momentum benda-benda sebelum dan sebuah tumbukan adalah tetap.

### 5.6.1. Tumbukan Lenting 1-Dimensi

Untuk tumbukan antara 2 partikel yang bergerak segaris, kecepatan masing-masing partikel setelah tumbukan dapat ditentukan berdasar hukum kekekalan energi mekanis dan momentum. Apabila lintasan tumbukan bersifat horizontal, energi potensial partikel sebelum dan setelah tumbukan adalah konstan, sehingga energi mekanis dapat disederhanakan dengan mengeliminasi energi potensial. Selanjutnya, perhitungan energi hanya memperhitungkan energi kinetik.

**Koefisien restitusi** ( $e$ , *coefficient of restitution*) adalah perbandingan negatif antara beda kecepatan sesudah tumbukan dengan beda kecepatan sebelum tumbukan.

$$e = - \frac{\vec{v}_2^1 - \vec{v}_2^2}{\vec{v}_1^2 - \vec{v}_1^1} \quad \text{dengan } 1 \geq e > 0 \quad \dots\dots\dots (5.15)$$

dengan indeks bawah menyatakan benda pertama atau ke dua dan indeks atas waktu sebelum atau setelah tumbukan. Nilai  $e = 1$  menunjukkan tumbukan bersifat tidak lenting, di mana hukum konservasi energi kinetik dan momentum berlaku dalam tumbukan. Nilai  $e < 1$  menunjukkan tumbukan bersifat tidak lenting atau tidak lenting sama sekali di mana hukum konservasi energi tidak dapat diaplikasikan, sedangkan hukum kekekalan momentum yang diaplikasikan.

Contoh soal 5.2

Sebuah benda dengan massa 500 kg bergerak dengan kecepatan 2 cm/s. Sebuah benda lain dengan massa 10 t berkecepatan 10 cm/s bergerak mendekat. Tentukan:

- a) kecepatan masing-masing benda dan energi yang hilang setelah tumbukan, jika tumbukan lenting sempurna,

## Momentum dan Impuls

- b) kecepatan masing-masing benda dan energi yang hilang setelah tumbukan, jika tumbukan tidak lenting samasekali,  
c) kecepatan benda kedua setelah tumbukan, jika setelah tumbukan kecepatan benda pertama 4 m/s berlawanan dengan sebelum tumbukan,  
d) tentukan koefisien restitusi untuk jawaban (a), (b), dan (c)

Jawab:

$$m_1 = 5 \times 10^2 \text{ kg}; m_2 = 10 \text{ t} = 1 \times 10^4 \text{ kg};$$

$$\vec{v}_1^1 = 2 \text{ m/s}; \vec{v}_2^1 = 10 \text{ cm/s} = -1 \times 10^{-1} \text{ m/s}$$

- a) Tumbukan lenting sempurna

Energi kinetik sebelum dan setelah tumbukan terkonservasi, tidak ada dissipasi energi kinetik, kandungan energi kinetik sama pada masing-masing benda ( $\vec{E}_{k1} = \vec{E}_{k2}$ ), maka besarnya kecepatan masing-masing benda sama tetapi berlawanan arah.

$$\vec{v}_2^1 = -\vec{v}_1^1 = -2 \text{ m/s}; \vec{v}_2^2 = -\vec{v}_1^2 = 1 \times 10^{-1} \text{ m/s}$$

$$\Delta \vec{E}_k = 0$$

- b) Tumbukan tidak lenting samasekali

Kecepatan benda setelah tumbukan tidak disebutkan dalam soal sehingga setelah tumbukan benda pertama dan kedua diam ( $\vec{E}_{k2} = \mathbf{0}$ ).

$$\vec{v}_1^2 = \mathbf{0} \text{ m/s dan } \vec{v}_2^2 = 0 \text{ m/s}$$

Energi kinetik sebelum tumbukan dissipasi:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{k1} &= \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot (\vec{v}_1^1)^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot (\vec{v}_2^1)^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 5 \times 10^2 \cdot (2)^2 + \frac{1}{2} \cdot 1 \times 10^4 \cdot (-1 \times 10^{-1})^2 \\ &= 1050 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\Delta \vec{E}_k = 1050 \text{ J}$$

- c) Tumbukan tidak lenting sebagian

$$\vec{v}_1^2 = -4 \text{ m/s}$$

Konservasi sebelum dan setelah tumbukan:

$$\begin{aligned} m_1 \vec{v}_1^1 + m_2 \vec{v}_2^1 &= m_1 \vec{v}_1^2 + m_2 \vec{v}_2^2 \\ 5 \times 10^2 \cdot 2 + 1 \times 10^4 (-1 \times 10^{-1}) &= 5 \times 10^2 (-4) + 1 \times 10^4 \vec{v}_2^2 \end{aligned}$$

$$\vec{v}_2^2 = \frac{1000 - 1000 - (-2000)}{10000} = 0,2 \text{ m/s}$$

d) Tumbukan tidak lenting sebagian,

$$e = - \frac{\vec{v}_2^1 - \vec{v}_2^2}{\vec{v}_1^2 - \vec{v}_1^1} = - \frac{-1 \times 10^{-2} - (-2)}{1 \times 10^{-2} - (-2)} = 1$$

$e$  tidak dapat dihitung karena kecepatan setelah tumbukan tidak diketahui dalam soal.

$$e = - \frac{\vec{v}_2^1 - \vec{v}_2^2}{\vec{v}_1^2 - \vec{v}_1^1} = - \frac{-1 \times 10^{-2} - (-0,2)}{-4 - (-2)} = 0,5$$

### 5.6.2. Gaya Bentur

Pada fenomena benturan atau tumbukan muncul suatu **gaya bentur** ( $\vec{F}$ , *drag force or impact force*) sebagai gaya yang ditransfer dari partikel yang bergerak ke partikel lain yang dibentur atau ditumbuk. Besar gaya benturan sebanding dengan perubahan momentum partikel sebelum dan setelah bertumbukan, sebagaimana persamaan 5.10 dan persamaan 5.14. Fenomena gaya benturan berhubungan sangat erat dengan fenomena tahanan dan redaman

### 5.6.3. Gaya Tahan

Pada medium fluida, gaya benturan bekerja setiap saat antara partikel obyek terhadap partikel-partikel fluida di sekeliling obyek atau partikel-partikel fluida dikatakan melakukan **gaya tahanan** ( $\vec{R}$ , *resistance*). Sebagai gaya reaksi terhadap gaya bentur partikel obyek, maka gaya tahan memiliki besar sama dengan gaya bentur tetapi berlawanan arah, secara matematis diformulasikan:

$$\vec{R} = -\vec{F} \quad \dots \dots \dots (5.16)$$

dengan  $\vec{R}$  adalah gaya tahan (N atau kg(f)) dan  $\vec{F}$  adalah gaya bentur [ N atau kg(f) ].

#### 5.6.4. Tahanan

Pada medium fluida, gaya tahanan merupakan ekspresi atau pun diekspresikan oleh **tahanan** ( $\vec{R}$ , *resistance*) terhadap partikel obyek. Fenomena tahanan secara matematis diformulasikan:

$$\vec{\alpha} = \frac{\vec{R}}{A} \dots\dots\dots (5.17)$$

dengan  $\vec{\alpha}$  adalah tahanan (N/m<sup>2</sup> atau kg(f)/m<sup>2</sup> atau Pa),  $\vec{R}$  adalah gaya tahanan [ N atau kg(f) ], dan  $A$  adalah luas tampang partikel tegak lurus ( $\perp$ ) terhadap garis kerja gaya tahanan (m<sup>2</sup>).

Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap tahanan antara lain rapat massa, viskositas, compresibilitas, kecepatan gerak, luas permukaan tumbukan antar partikel, baik padat maupun fluida.

#### 5.6.5. Redaman

Fenomena gaya benturan juga memiliki hubungan erat dengan fenomena **redaman** ( $D$ , *damping*), di samping fenomena tahanan. Redaman terhadap gaya benturan diformulasikan:

$$D = \frac{\vec{E}_2 - \vec{E}_1}{\vec{E}_1} \times 100\% \dots\dots\dots (5.18)$$

dengan  $D$  adalah koefisien redaman (%),  $\vec{E}_1$  adalah energi total partikel sebelum fenomena benturan (J) dan  $\vec{E}_2$  adalah energi total partikel setelah fenomena benturan (J). Nilai  $D$  dapat diambil dalam kisaran antara 0,001 % hingga 100 % (0,001 % <  $D$  < 100%).

Redaman dipengaruhi oleh faktor-faktor yang bergantung pada bentuk dan kecepatan gerak jenis zat yang digunakan sebagai peredam gaya bentur oleh partikel obyek, di samping faktor-faktor pada sifat jenis zat dari partikel obyek antara lain: rapat massa, compresibilitas, kekasaran permukaan, elastisitas, dan viskositas.

## Contoh soal 5.3

Suatu zat cair dalam keadaan diam dalam kolam berukuran  $4 \times 4 \text{ m}^2$ . Kedalaman air pada kolam tersebut 1,2 m. Tentukan berapa nilai tahanan dan redaman air dalam kolam pada sebuah kubus kayu dengan sisi 3 cm dan rapat massa kayu  $0,78 \text{ kg(f)/m}^3$  jika dijatuhkan secara bebas dari ketinggian 3 m.

Jawab:

Sisi kubus kayu ( $s$ ) = 3 cm = 0,3 m.

Volume kubus kayu ( $s^3$ ) =  $0,3^3 = 0,027 \text{ m}^3$ .

Massa kubus kayu ( $m$ ) =  $\rho V = 0,78 \cdot 0,027 = 21,06 \text{ kg}$ .

Kecepatan kubus membentur air ( $\vec{v}$ ) =  $\sqrt{2gH} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 3} = 7,6702 \text{ m/s}$ .

Gaya benturan ( $\vec{F}$ ) =  $m\vec{v} = 21,06 \cdot 7,6702 = 161,5344 \text{ kg(f)}$ .

Tahanan ( $\vec{F}$ ) =  $-\vec{W} = -161,5344 \text{ kg(f)}$ .

Kecepatan kubus kayu setelah memasuki cairan tidak dimuat dalam soal karena itu diasumsi ( $\vec{v}_2$ ) = 5,00 m/s.

$$\begin{aligned} \text{Redaman } (D) &= \frac{\vec{E}_2 - \vec{E}_1}{\vec{E}_1} \times 100\% \\ &= \frac{\frac{1}{2}(m\vec{v}_2^2 - m\vec{v}_1^2)}{\frac{1}{2}m\vec{v}_1^2} \times 100\% \\ &= \frac{\frac{1}{2}(21,06 \cdot 5^2 - 21,06 \cdot 7,6702^2)}{\frac{1}{2}21,06 \cdot 7,6702^2} \times 100\% \\ &= 57,5061 \% \end{aligned}$$

## 5.7 SOAL-SOAL

1. Jelaskan pengertian usaha oleh gaya tetap
2. Jelaskan pengertian usaha oleh gaya berubah
3. Apa yang dimaksud dengan daya?

## *Momentum dan Impuls*

4. Uraikan secara singkat tentang energi kinetik
5. Jelaskan yang dimaksud dengan energi potensial
6. Jelaskan pengertian kekekalan energi mekanis
7. Sebutkan syarat-syarat agar gaya disebut gaya konservatif
8. Terangkan secara singkat teorema usaha-energi.
9. Tentukan kerja, daya, dan energi pada pegas pertama dan kedua dalam soal no.9.
10. Enam buah kubus dengan massa berturut-turut 4,4; 4,5; 4,7; 8,2; 5,9, dan 6,9 kg ditempatkan pada koordinat 1(5,2,10); 2(2,2,10), 3(-6,4,9), 4(-6,3,9), 5(0,6,9), dan 6(0,6,9). Tentukan koordinat titik pusat massa enam buah benda tersebut.
11. Empat orang berada di atas perahu sekoci dengan massa 300 kg. Orang pertama, kedua, ketiga, dan keempat tersebut secara berurutan memiliki berat 90, 76, 42, dan 36 kg(f). Apabila perahu sekoci melaju dengan kecepatan 0,65 m/s dan orang kedua melompat keluar perahu untuk berenang dengan kecepatan 1,4 m/s. Tentukan kecepatan perahu jika orang kedua tersebut melompat:
  - (a) searah dengan gerak perahu
  - (b) berlawanan arah dengan gerak perahu
  - (c) tentukan pula koefisien restitusi untuk jawaban (a) dan (b) yang Saudara berikan..
12. Sebuah peti berbentuk persegi dari bahan besi baja dijatuhkan dari ketinggian 0,8 m di atas permukaan tanah. Peti tersebut memiliki berat 24 t(f). Tentukan:
  - (a) kecepatan peti ketika membentur tanah
  - (b) energi kinetik yang ditransfer peti ke tanah
  - (c) jika tanah bergerak ke bawah 1 cm/s dalam 0,01 s, tentukan kecepatan peti saat membentur tanah
  - (d) tentukan pula energi kinetik yang ditransfer peti ke tanah pada contoh soal (c) tersebut.

# BAB 6

## THERMODYNAMIKA

Hampir seluruh kawasan di bumi menerima panas matahari. Hanya sebagian kawasan saja di kutub bumi tidak pernah mengenal panasnya terik matahari.

Dalam bidang teknik sipil, fenomena itu menjadi petunjuk bahwa bangunan gedung seperti rumah, hotel, rumah sakit, dan kantor harus dirancang dengan mengakomodasikan perilaku penyerapan panas dan cahaya matahari, terutama jika bangunan tersebut dibangun di kawasan katulistiwa. Tentu saja, upaya perencanaan tidak sekedar dilakukan dengan memilih bahan yang tepat agar tidak melepuh atau pun rapuh diterpa panas matahari sepanjang tahun, tetapi juga agar bangunan rencana akan nyaman dihuni. Pemanfaatan cahaya dan panas alami dari matahari dengan pemakaian elemen kaca, kisi-kisi, dan pengaturan warna pewarna elemen bangunan perlu diupayakan. Selain itu, penempatan pohon dan tanaman serta penyejuk udara perlu juga perlu diupayakan untuk mengendalikan terpaan cahaya dan panas alami dari matahari. Akomodasi perilaku transfer panas matahari harus pula dilakukan dalam perancangan bendungan/ dam agar air yang ditampung tidak lenyap, menguap dihempas panas terik dari matahari. Demikian pula jalan raya, bangunan ini harus pula dirancang dengan mengakomodasikan perilaku transfer panas matahari ke badan jalan dan perkerasan jalan agar jalan hasil rancangan tidak melepuh saat diterpa panas terik dari matahari sepanjang tahun.

Dalam bidang teknik mesin, fenomena transfer panas alami oleh matahari perlu juga diakomodasikan dalam perancangan kendaraan mirip dengan perancangan bangunan gedung. Elemen-elemen pada kendaraan yang langsung berhadapan dengan terik matahari harus dirancang dengan pemilihan material yang tahan terhadap terpaan panas. Ruangan dalam kendaraan perlu juga diupayakan agar berudara nyaman dan sejuk dengan isolasi panas dari matahari maupun mesin. Elemen-elemen di sekitar mesin perlu juga dirancang dengan memilih material dengan karakteristik pemuaiannya rendah supaya tahan terhadap pengaruh panas dari mesin maupun udara yang terpanaskan matahari dari luar mesin.

Beberapa teori dasar fenomena transfer panas dikaji pada bab ini sebagai modal dalam mempelajari upaya-upaya teknis pemanfaatan dan pengendalian panas dalam perencanaan perancangan (*planning & design*).

## 6.1. SUHU/ TEMPERATURE

**Suhu** atau **temperatur** (*temperature*) suatu zat umumnya diketahui melalui pengukuran memakai *termometer*. Terdapat 4 skala yang dapat dipakai untuk menyatakan suhu, yaitu skala Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ) yang digunakan dalam sistem satuan SI dan 3 skala lainnya dalam sistem satuan lain yaitu Celcius ( $^{\circ}\text{C}$ ), Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ), dan Reamur ( $^{\circ}\text{R}$ ). Tiga skala suhu yang pertama disebutkan dipakai dalam fisika. Konversi antara ketiga skala ini dapat dinyatakan dalam skala Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ) sesuai perasamaan:

$$T_C = T_K - 273 \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

$$T_F = \left(32 + \frac{9}{5}T_C\right) \text{ } ^{\circ}\text{F} \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

dengan  $T_K$  adalah suhu dalam skala Kelvin,  $T_C$  adalah suhu dalam skala Celcius dan  $T_F$  adalah suhu dalam skala Fahrenheit.

## 6.2. HEAT

**Kalor** atau **kalori** ( $Q$ , *calorie*) adalah jumlah energi thermal atau lebih dikenal dengan sebutan *heat* yang ditransfer dari satu lokasi ke lokasi lain yang memiliki suhu lebih rendah.

Fenomena tersebut mulai dikaji mendalam sejak akhir tahun 1830 ketika James Prescott Joule tertarik menyelidiki fenomena muncul dan hilangnya sejumlah energi thermal tertentu yang selalu diikuti oleh hilang atau munculnya energi mekanik yang ekuivalen. Eksperimen dilakukan oleh Joule dengan menambahkan energi panas pada berbagai jenis zat dan mengukur perubahan kalor dan temperaturnya. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Joule menuju pada teori bahwa jumlah energi thermal yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur zat adalah sebanding dengan perubahan temperatur dan massa zat bersangkutan. Hasil penelitian dinyatakan dengan kapasitas kalor dan kalor jenis.

Dalam perkembangan termodinamika, teori kalor lebih dikenal dengan teori *heat*. Istilah kalor secara praktis digantikan istilah *heat* dan dinyatakan dalam satuan J/K. Sebelum satuan SI mulai digunakan, kapasitas kalor dinyatakan dalam satuan cal (*calorie*). Di Inggris dan negara persemakmurnya, serta Amerika Serikat digunakan satuan *British thermal unit* (Btu).

Jika 1 cal didefinisikan sebagai banyak kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu 1 gr air sebesar  $1^{\circ}\text{C}$ , maka 1 Btu didefinisikan sebagai banyak kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 pound (lbs) air sebesar  $1^{\circ}\text{F}$ .

Sedangkan kini, setelah satuan SI populer di banyak negara di dunia, digunakan terminologi:

1 J/K didefinisikan sebagai besar *heat* yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 kg air sebesar  $1^{\circ}\text{K}$ .

Faktor konversi antar satuan-satuan kapasitas *heat*:

$$\begin{aligned} 1 \text{ cal/C} &= 4,184 \text{ J/K} \\ 1 \text{ k.cal/C} &= 3,968 \text{ Btu/F} = 4,184 \text{ kJ/K} \\ 1 \text{ Btu/F} &= 252 \text{ cal/C} = 1,054 \text{ kJ/K} \end{aligned}$$

Faktor konversi antar satuan-satuan kapasitas spesifik *heat*:

$$\begin{aligned} 1 \text{ cal/(kg.K)} &= 4,184 \text{ J/(kg.K)} \\ 1 \text{ k.cal/(kg.K)} &= 4,184 \text{ kJ/(kg.K)} \end{aligned}$$

### 6.2.1. Kapasitas *Heat*

Kapasitas *heat* ( $c$ , *heat capacity*) adalah banyak *heat* yang diperlukan oleh zat untuk menaikkan setiap derajat suhu zat bersangkutan (J/K), dinyatakan secara matematis:

$$c = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad \dots\dots\dots (6.3)$$

dengan  $\Delta Q$  adalah perubahan *heat* atau besar *heat* yang diperlukan (J/K) dan  $\Delta T$  adalah perubahan suhu zat ( $^{\circ}\text{K}$ ).

### 6.2.2. *Heat Spesifik*

*Heat* spesifik ( $h$ , *specific heat capacity*) adalah banyak *heat* yang diperlukan oleh zat untuk menaikkan setiap derajat suhu zat per satuan massa zat bersangkutan [J/(kg.K)], dinyatakan secara matematis:

$$h = \frac{c}{m} = \frac{\Delta Q}{m \Delta T} \quad \dots\dots\dots (6.4)$$

dengan  $c$  adalah kapasitas *heat* (J/K),  $m$  adalah massa benda (kg), dan  $\Delta T$  adalah perubahan suhu zat ( $^{\circ}\text{K}$ ).

Persamaan 6.3 dan persamaan 6.4 dapat dinyatakan dengan satu persamaan yang relatif lebih sederhana yaitu:

$$\Delta Q = c \Delta T = m h \Delta T \quad \dots\dots\dots (6.5)$$

Heat spesifik zat padat diukur dengan *colorimeter*. Peralatan tersebut dibuat berdasar pada prinsip bahwa *heat* keluar dari benda atau beberapa benda sama dengan *heat* masuk kedalam benda atau beberapa benda dalam air dan bejana *colorimeter*, secara matematis dituliskan:

$$Q_{\text{keluar}} = Q_{\text{masuk}} \dots\dots\dots (6.6)$$

Jumlah *heat* pada imbalan *heat* tersebut dihitung memakai persamaan 6.5 berdasar perubahan suhu terukur pada air dalam bejana terisolasi. Jumlah *heat* keluar dari zat padat.

$$Q_{\text{keluar}} = m h \Delta T = m h (T_i - T_f) \dots\dots\dots (6.7)$$

dengan suhu mula-mula terukur adalah  $T_i$  (*initial measured temperature*) dan suhu akhir terukur adalah  $T_f$  (*final measured temperature*),  $m$  adalah massa zat padat, dan  $h$  adalah *heat* spesifik. Sedangkan *heat* yang masuk ke dalam air dan bejananya:

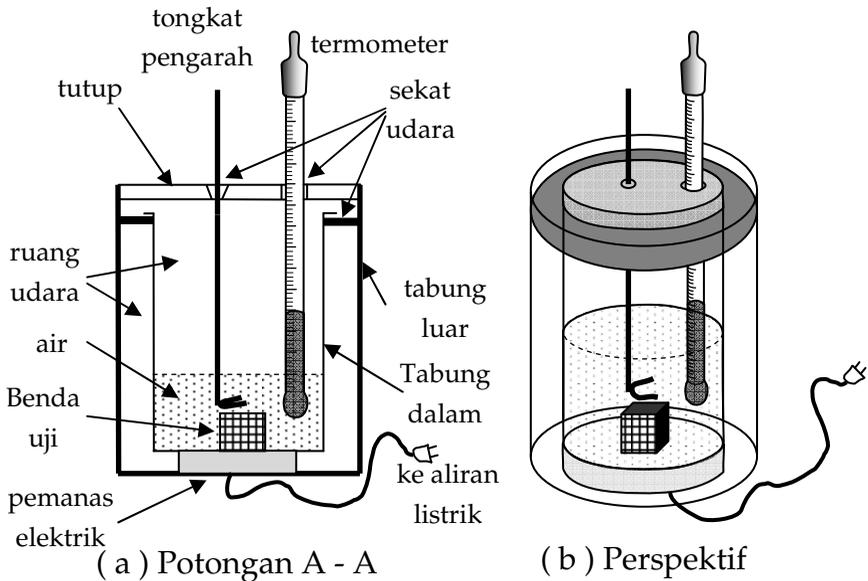
$$Q_{\text{keluar}} = m_a h_a (T_f - T_{ia}) + m_b h_b (T_f - T_{ib}) + m_c h_c (T_f - T_{ic}) \dots (6.8)$$

dengan  $T_{ia}$  adalah temperatur awal air,  $T_{ib}$  temperatur awal bejana,  $T_{ic}$  adalah temperatur awal tongkat pengarah. Temperatur akhir benda, bejana, air, dan tongkat pengarah sama karena setimbang. Sementara itu,  $m_a$  adalah massa air dalam bejana,  $h_a$  adalah *heat* spesifik air [= 4,184 kJ/(kg.K)],  $m_b$  adalah massa bejana,  $h_b$  adalah *heat* spesifik bejana,  $m_c$  adalah tongkat pengarah, dan  $h_c$  adalah *heat* spesifik tongkat pengarah. Substitusi persamaan 6.7 dan persamaan 6.8 ke dalam persamaan 6.6 menghasilkan persamaan:

$$m h (T_i - T_f) = m_a h_a (T_f - T_{ia}) + m_b h_b (T_f - T_{ib})$$

sehingga:

$$h = \frac{m_a h_a (T_f - T_{ia}) + m_b h_b (T_f - T_{ib})}{m(T_i - T_f)} \dots\dots\dots (6.9)$$



Gambar 6.1 Colorimeter Elektrik

Colorimeter dibuat untuk mengukur *heat* spesifik dengan beberapa elemen, lihat Gambar 6.1, meliputi:

- (1) tabung bejana dalam dengan dimensi menyesuaikan kapasitas *heat* yang direncanakan, misalnya  $42 \text{ J}/^\circ\text{K}$ ;
- (2) tabung luar dengan dimensi lebih besar daripada tabung dalam;
- (3) tutup;
- (4) sekat udara untuk mengisolasi udara keluar tabung;
- (5) air dengan volume kurang lebih  $\frac{1}{4}$  -  $\frac{1}{3}$  volume bejana dalam;
- (6) pemanas dapat dibuat sistem pemanas elektrik dengan kapasitas sesuai dengan kapasitas *heat* yang direncanakan;
- (7) termometer untuk mengukur suhu air dalam tabung;

- (8) tongkat pengarah untuk menempatkan benda uji pada posisi tepat;
- (9) ruang udara untuk mengontrol secara otomatis tekanan udara dalam tabung bejana;
- (10) benda uji dengan dimensi sesuai tabung dalam bejana.

**Tabel 6.1** Perhitungan *Heat* spesifik Hasil Uji dengan *Calorimeter*

Alat dan Benda Uji	Berat [ kg(f) ]	Massa (kg)	Temperatur		
			Awal (°K)	Akhir (°K)	Perubahan (°K)
<i>Calorimeter</i> dengan air	320	320	293,5	305,2	11,7
<i>Calorimeter</i>	240	240	293,5	305,2	11,7
Tongkat pengarah	0,00727	0,00727	293,5	305,2	11,7
Tutup <i>Calorimeter</i>	45,8	45,8	293,5	305,2	11,7
Air	80	80	293,5	305,2	11,7
Logam	125,89	125,89	373	305,2	67,8
<i>Heat</i> spesifik logam	$(80. 4,184.11,7)+(320.0,9.11,7)+(0,00727.0,9. 11,7) / (125,89.67,8)$ $= 0,8536 \text{ kJ}/(\text{kg.K})$				

Setiap material memiliki nilai *heat* spesifik. Dalam tabel berikut ini ditunjukkan hasil pengujian nilai *heat* spesifik untuk beberapa material yang diukur menggunakan *calorimeter*.

**Tabel 6.2** *Heat* spesifik pada Tekanan Tetap

Jenis Zat		<i>Heat</i> Spesifik, $h$ [ J/(kg.K) ]	<i>Heat</i> Molar, $c_m$ [ J/( k.mole.K) ]
Padat	Al	941	25400
	Cu	384	24400
	Fe	450	25100
Cairan	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	2430	112000
	CCl <sub>4</sub>	852	131000
	H <sub>4</sub> O	4184	
	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	1740	136000
Gas	Helium	5250	2100
	Argon	526	2100
	H <sub>2</sub>	14400	28800
	O <sub>2</sub>	919	29400
	CO <sub>2</sub>	843	37100
	N <sub>2</sub>	1040	29100

**6.2.3. Heat Molar**

*Heat* molar ( $c_m$ , *molar heat capacity*) suatu zat adalah banyak *heat* per mol zat, yaitu hasil perkalian *heat* spesifik (kapasitas *heat* per satuan massa) dengan massa molar  $M$  (massa per mol) zat bersangkutan, dinyatakan secara matematis:

$$c_m = Mh \quad \dots \dots \dots (6.10)$$

Untuk sejumlah  $n$  mol zat dan  $h$  kapasitas kalor (J/K) dituliskan:

$$c = n c_m \quad \dots \dots \dots (6.11)$$

Dalam satuan metrik CGS, untuk kalkulasi jumlah molekul digunakan sejumlah  $6 \times 10^{23}$  molekul setiap mole. Dalam satuan SI, digunakan  $6 \times 10^{26}$  molekul setiap kilomole (k.mole) dan satuan

### 6.3. SUPLAI HEAT PADA TEKANAN ATAU VOLUME KONSTAN

Penambahan *heat* pada zat dalam keadaan tekanan konstan akan selalu lebih besar daripada dalam keadaan volume konstan. Fenomena itu tidak tampak nyata pada zat padat dan cair, tetapi tampak nyata pada gas. Sebagai misal, fenomena pengapian gas dalam ruang piston. Apabila ditambahkan *heat* pada gas dalam ruang dengan tekanan gas dijaga konstan, *heat* yang ditambahkan cenderung langsung dikonversi menjadi kerja eksternal daripada diabsorpsi oleh molekul-molekul gas untuk meningkatkan suhu gas. Namun, penambahan *heat* terhadap gas dalam ruang dengan volume konstan meningkatkan suhu gas dalam ruangan. Hal tersebut dinyatakan dalam hubungan antara  $C_P$  terhadap  $C_V$ , dengan:

$$C_P > C_V, \quad \dots\dots\dots (6.12)$$

dengan  $C_P$  adalah kapasitas *heat* molar pada tekanan konstan [J/(k.mole.K)] dan  $C_V$  adalah kapasitas *heat* molar pada volume konstan [J/(k.mole.K)].

### 6.4. RASIO KAPASITAS HEAT GAS

Rasio kapasitas *heat* molar pada tekanan konstan terhadap volume konstan ( $\gamma$ ) efektif dipergunakan untuk perhitungan dan interpretasi cepat terhadap keadaan gas dalam ruangan. Rasio ini diformulasikan:

$$\frac{C_P}{C_V} = \gamma \quad \dots\dots\dots (6.13)$$

dengan  $C_P$  adalah kapasitas *heat* molar pada tekanan konstan [J/(k.mole.K)] dan  $C_V$  adalah kapasitas *heat* molar pada volume konstan [J/(k.mole.K)]. Untuk mengidentifikasi kecepatan gelombang menjalar pada medium gas, sebagai misal, dapat digunakan hasil riset bahwa makin besar nilai  $\gamma$  maka cepat rambat gelombang makin besar.

## **6.5. TRANSPOR HEAT**

*Heat* dapat ditranspor atau ditransfer dari suatu lokasi ke lokasi lain pada zat atau dari suatu zat ke zat lain dalam 3 cara, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.

### **6.5.1. Konduksi**

*Heat* dapat ditranspor secara konduksi (*conduction*) yaitu transpor *heat* dari suatu lokasi ke lokasi lain pada suatu medium zat padat atau cair melalui sentuhan (kontak langsung) antar partikel-partikel pada medium bersangkutan. Konduksi *heat* dinyatakan secara matematis:

$$\frac{dQ}{dT} = -k A \frac{dQ}{dx} \dots\dots\dots (6.14)$$

dengan  $dQ/dT$  adalah laju perubahan *heat* [J/(K.s) atau W/K] melalui luas tampang zat  $A$  ( $m^2$ ),  $dT$  adalah gradien temperatur (K), dan  $k$  adalah koefisien konduktivitas thermal dari zat bersangkutan [W/(m.K)]. Nilai  $k$  dapat dibaca dalam Tabel 6.3.

Fenomena konduksi *heat* misalnya transpor *heat* dari ujung logam ke ujung logam lainnya terjadi karena beda temperatur. *Heat* bergerak dari bagian logam bersuhu lebih tinggi ke bagian logam bersuhu lebih rendah, hingga suhu pada semua lokasi pada logam sama, merata, atau setimbang.

**Tabel 6.3** Koefisien Konduktivitas Thermal

<b>Material</b>		<b>Konduktivitas Thermal, <math>k</math></b> (W/m K)
Padat	Intan	1000
	Perak	406
	Perunggu	385
	Emas	314
	Aluminum	205
	Brasso	109
	Besi	79,5
	Baja	50,2
	Es padat	1,6
	Beton	1,25
	Bata merah	1,15
	Bata dengan insulasi	0,15
	Kaca	1,05 – 0,8
	Asbes	0,08
	Fiberglass	0,05 – 0,04
	Papan tulis kapur	0,04
	Wool	0,04
	Kayu	0,144 – 0,04
	Polystyrene	0,039 – 0,033
	Polyurethane	0,02
Cair	Air raksa	8,3
	Air 20° C	0,6
Gas	Udara 0° C	0,024
	Hidrogen (20°C)	0,172
	Helium (20°C)	0,138
	Nitrogen (20°C)	0,0234
	Oksigen (20°C)	0,0238
	Silica aerogel	0,003

### 6.5.2. Konveksi

*Heat* dapat juga bergerak secara konveksi (*convection*) dari suatu lokasi ke lokasi lain pada medium gas melalui sentuhan (kontak langsung) antara partikel-partikel gas.

### 6.5.3. Radiasi

Radiasi atau pancaran (*radiation*) adalah transpor *heat* dari suatu lokasi ke lokasi lain pada medium gas atau vakum melalui gelombang dengan arah menyebar (*surrounding*). Hasil penyelidikan Stefan dan Boltzman bahwa "benda hitam" memancarkan energi setiap waktu dengan  $O$  adalah laju radiasi  $5,6 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$  dan luas  $Ae$  sesuai persamaan berikut:

$$\frac{dQ}{dT} = Ae \cdot O \cdot (T_2^4 - T_1^4) \quad \dots\dots\dots (6.15)$$

dengan  $dQ/dT$  adalah laju perubahan *heat* [J/(K.s) atau W/K] melalui luasampang zat  $Ae$  ( $\text{m}^2$ ),  $T_1$  adalah temperatur awal ( $^\circ\text{K}$ ), dan  $T_2$  adalah temperatur akhir ( $^\circ\text{K}$ ).

Radiasi sinar inframerah dan ultraviolet dari matahari ke bumi merupakan contoh-contoh fenomena radiasi yang mudah dijumpai dalam kehidupan sehari-hari. Kedua jenis sinar tersebut tidak tampak oleh indera penglihatan manusia tanpa alat bantu.

## 6.6. ABSORBSI HEAT

Dalam dunia industri absorpsi *heat* dilakukan untuk beberapa keperluan, antara lain:

- (1) meningkatkan suhu partikel-partikel gas dalam ruang mesin sehingga menghasilkan tekanan dan gaya untuk melakukan kerja tertentu, misalnya mesin uap untuk mesin pabrik dan kereta api, pengapian pada kendaraan berbahan bakar minyak.

- (2) meningkatkan suhu material sehingga lebih mudah ditransfer dari suatu ruang ke ruang lain dalam bentuk fluida. Contohnya, destilasi minyak bumi dan transportasi bahan dalam pabrik baja.
- (3) meningkatkan suhu partikel-partikel gas dalam ruang reaksi. Peningkatan suhu partikel-partikel gas makin meningkatkan gerak partikel-partikel gas sehingga energi kinetik gas makin besar. Energi kinetik tersebut dapat ditransformasikan ke bentuk energi lain, misalnya reaksi fusi pada pemanfaatan tenaga nuklir.
- (4) meningkatkan proses fotosintesa yang terjadi secara alami pada tumbuhan sehingga meningkatkan produktivitas tumbuhan. Sebagai misal, peningkatan produksi buah jeruk dan mangga pada industri pertanian.

Fenomena-fenomena absorpsi tidak mudah penerapan dinyatakan dalam persamaan-persamaan matematika analitis, namun beberapa persamaan telah dihasilkan dari hasil eksperimen. Oleh karena berupa persamaan empirik, maka tidak dijabarkan lebih lanjut di sini. Untuk mengetahui persamaan-persamaan tersebut pembaca dipersilakan mengacu pada referensi terkait.

## **6.7. EKSPANSI THERMAL**

Dampak yang ditimbulkan oleh suplai dan absorpsi *heat* terhadap zat adalah terjadinya ekspansi thermal (*thermal expansion*). Beberapa parameter yang penting ditinjau pada proses ekspansi thermal meliputi:

- (1) besar *heat* yang diabsorpsi oleh suplai *heat* dari lingkungan zat,
- (2) suhu zat mula-mula, sebelum menyerap *heat*,
- (3) karakteristik/sifat zat dalam mengabsorpsi *heat*.

Respon zat terhadap perubahan *heat* (*heat change*) pada zat adalah terjadinya fenomena **pemuaian** (*elongation or enlarge*) atau **penyusutan** (*srinkage*). Suatu zat disebut memuai jika ukuran zat bertambah karena suhu zat meningkat oleh pemanasan. Sebaliknya, suatu zat dikatakan menyusut jika ukuran zat berkurang karena suhu zat menurun oleh pendinginan. Kajian atas fenomena pemuaian dan penyusutan berpegang pada prinsip:

Petambahan ukuran zat pada pemuaian adalah berbanding terbalik dengan pengurangan zat pada penyusutan.

Oleh karena itu, di bagian ini cukup dijabarkan kajian parameter pemuaian zat.

Ekspansi thermal dapat ditinjau dalam konteks satu, dua, maupun tiga dimensi. Dalam konteks 1-D, ekspansi thermal pada tekanan gas konstan secara matematis dinyatakan dengan **koefisien ekspansi linier** ( $\alpha$ ) dengan persamaan:

$$\alpha = \frac{1}{l} \left( \frac{\partial l}{\partial T} \right) \quad \dots\dots (6.16)$$

ekspansi thermal dapat juga ditinjau dalam konteks 2-D dengan **koefisien ekspansi luas/area** ( $b$ ) sesuai pernyataan matematis:

$$b = \frac{1}{A} \left( \frac{\partial A}{\partial T} \right) \quad \dots\dots (6.17)$$

Selain itu, ekspansi thermal dapat juga ditinjau dalam konteks 3-D dengan **koefisien ekspansi volume** ( $\beta$ ) sesuai pernyataan:

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right) \quad \dots\dots (6.18)$$

dengan  $l$  adalah panjang zat (m),  $A$  adalah luas area zat (m<sup>2</sup>), dan  $V$  adalah volume zat (m<sup>3</sup>) dalam keadaan mula-mula atau awal. Sedangkan  $dl/dT$ ,  $dA/dT$ , dan  $dV/dT$  secara berurutan adalah laju pertambahan panjang, area, dan volume zat pada setiap kenaikan suhu 1 °K. Koefisien-koefisien tersebut memiliki hubungan  $b = 3a$  dan  $\beta = 2a$ .

Perhitungan matematis dapat disederhanakan dengan aproksimasi persamaan diferensial tertentu. Untuk keperluan itu, persamaan 6.16 hingga persamaan 6.18 dapat ditulis sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{1}{l} \frac{\Delta l}{\Delta T} \dots\dots\dots (6.19)$$

$$b = \frac{1}{A} \frac{\Delta A}{\Delta T} \dots\dots\dots (6.20)$$

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} \dots\dots\dots (6.21)$$

di mana:

$$\begin{aligned} \Delta l &= l_f - l_i , \\ \Delta A &= A_f - A_i, \\ \Delta V &= V_f - V_i, \\ \Delta T &= T_f - T_i \dots\dots\dots (6.22) \end{aligned}$$

Panjang, luas (m<sup>2</sup>), dan volume akhir zat dapat diketahui memakai persamaan berikut:

$$l_f = l_i ( 1 + \alpha \Delta T ) \dots\dots\dots (6.23)$$

$$A_f = A_i ( 1 + b \Delta T ) \dots\dots\dots (6.24)$$

$$V_f = V_i ( 1 + \beta \Delta T ) \dots\dots\dots (6.25)$$

dengan:

- $l, A, \text{ dan } V$  : panjang (m), luas (m<sup>2</sup>), dan volume (m<sup>3</sup>) awal zat.
- $l_i, A_i, \text{ dan } V_i$  : panjang (m), luas (m<sup>2</sup>), dan volume (m<sup>3</sup>) awal zat,
- $l_f, A_f, \text{ dan } V_f$  : panjang (m), luas (m<sup>2</sup>), dan volume (m<sup>3</sup>) akhir zat,
- $T_i$  : suhu awal zat (°K), dan
- $T_f$  : suhu akhir zat (°K).

## **6.8. KONDENSASI**

Fenomena kondensasi (*condensation*) merupakan proses perubahan fase zat dari uap menjadi cair atau padat. Kondensasi uap air menjadi cair atau es misalnya jika berada pada lingkungan uap basah yang sangat lembab dengan kondisi kelembaban relatif 100%.

Teori kondensasi pertama kali dikemukakan oleh Eucken pada tahun 1937 berdasar eksperimen yang dilakukannya memakai model kondensasi (*dropwise condensation model*). Hasil eksperimen dapat dijabarkan sebagai berikut. Setiap molekul uap dapat berfungsi sebagai inti kondensasi, yang disebut kondensat. Cairan yang terbentuk di sekitar inti kondensasi bersifat heterogen. Tetesan cairan akan bergabung dengan tetesan lain di sekitarnya jika radius kondensat melebihi kesetimbangan. Setelah massa kondensat mencapai kritis maka akan dihapus oleh gaya gravitasi dari gas di sekitarnya. Lapisan kondensat kembali dibersihkan dan berfungsi sebagai inti kondensasi. Pembersihan tersebut terjadi secara berkala, karena tidak ada resistensi terhadap transfer panas melalui kondensat ketika lapisan kondensat akan dihapus, dan dengan demikian laju transfer panas sangat meningkat. Pada kenyataannya, hampir selalu diperlukan untuk memiliki partikel asing yang berfungsi sebagai inti kondensasi atau inti es bahkan ketika kondisi lingkungan agak jenuh.

Antara tetes terdapat film cairan tipis dan tidak stabil pada permukaan zat padat. Sejalan proses kondensasi, film tipis makin menebal, hingga film ini mencapai ketebalan kritis kurang lebih berukuran  $1 \mu\text{m}$  dan memecah menjadi tetesan. Kondensasi kemudian berlanjut di daerah kering di antara tetesan yang baru saja pecah, dan di atas tetesan yang sudah terbentuk. Kondensat baru tidak terjadi pada permukaan dinding karena ada sedikit resistensi terhadap konduksi panas dibandingkan dengan jika kondensat baru

terbentuk pada tetesan yang sudah ada. Tetesan kondensat baru kemudian ditarik ke tetesan di sekitarnya oleh efek tegangan permukaan, menghasilkan film tipis yang baru. Film ini kemudian akan tumbuh dan pecah pada ketebalan kritis, dan proses akan mengulangi terus menerus.

$$\theta = \frac{\sigma_{sv} - \sigma_{sl}}{\sigma_{lv}} \dots\dots\dots (6.26)$$

dengan  $\sigma_{sv}$  adalah tegangan permukaan padat-uap,  $\sigma_{sl}$  adalah tegangan permukaan padat-cair, dan  $\sigma_{lv}$  adalah tegangan permukaan cair-uap. Ketika sudut kontak ( $\theta$ , *contact angle*) lebih dari  $90^\circ$ , kondensat tidak dapat membasahi permukaan dan muncul tetes demi tetes kondensasi. Kriteria untuk tetes demi tetes kondensasi adalah tegangan permukaan kritis  $\sigma_{cr}$ . Jika tegangan permukaan antara antarmuka cairan-uap  $\sigma_{lv}$  lebih dari  $\sigma_{cr}$ , kondensasi tetes demi tetes terjadi.

Tegangan permukaan kritis untuk zat padat dalam tabel berada di bawah tegangan permukaan air pada 1 atm ( $\sigma_{lv} = 58,91 \times 10^{-3}$  N/m). Oleh karena itu, permukaan logam, di mana film kondensasi biasanya terjadi, bisa dilapisi dengan zat lain dengan tegangan permukaan kritis yang lebih rendah untuk memicu terjadinya kondensasi tetes demi tetes.

**6.9. KERJA YANG DISEBABKAN PERUBAHAN VOLUME**

Kerja merupakan sebuah proses pada suatu sistem di mana disertai terjadinya pertukaran energi antara sistem dengan lingkungannya. Besar energi yang dilepas oleh sistem ke lingkungan oleh zat yang mengalami kontraksi/ ekspansi dari volume awal  $V_i$  (*initial volume*) ke volume akhir  $V_f$  (*initial volume*) dinyatakan dengan:

$$W = \frac{1}{V} \int_{V=V_i}^{V=V_f} p dV \dots\dots\dots (6.27)$$

### **6.10. HUKUM THERMODINAMIKA 0 (KE-0)**

Dalam Hukum thermodinamika ke-0 dinyatakan kesetimbangan thermal bahwa apabila A dan B adalah lokasi-lokasi pada zat atau dua zat yang mengalami kesetimbangan thermal dengan lokasi atau pun zat ketiga C, maka A dan B berada dalam kesetimbangan thermal satu sama lain.

### **6.11. HUKUM THERMODINAMIKA I**

Dalam Hukum thermodinamika I dinyatakan kekekalan energi/ tenaga bahwa energi bersifat kekal tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, energi dapat diubah dari bentuk satu ke bentuk lainnya, pada sebuah sistem terhadap lingkungannya yang saling menukarkan kerja dengan *heat*.

Dengan adalah energi dakhil yaitu energi internal sistem pada keadaan akhir (*final internal – energy in system*). Adalah energi dakhil pada keadaan awal (*initial* ).  $Q$  adalah energi panas yang diberikan pada sistem. Sedangkan  $W$  adalah energi yang diserahkan sistem ke lingkungan karena sistem melakukan kerja.

### **6.12. TEORI KINETIK GAS**

Teori kinetik gas mencakup sifat-sifat makroskopis gas seperti volume, tekanan, dan suhu (*VPT, volume, pressure, and temperature*) molekul-molekul gas, dikembangkan sejak pertengahan abad ke-17 oleh banyak ahli antara lain: Robert Boyle, Edme Mariotte, Jacques Charles, Joseph L. Gay-Lussac, Amedeo Avogadro, Émile Clapeyron, Rudolf Clausius, James P. Joule, dan William Thomson (Lord Kelvin). Teori-teori tersebut diwujudkan dalam standar teksbook thermodinamika oleh William Rankine pada tahun 1859.

Dalam perkembangan teori kinetik gas, dicakup pula kajian sifat-sifat mikroskopis gas antara lain mencakup: massa, kecepatan, percepatan, gaya, dan energi kinetik gerak atom, yang dikembangkan pada tahun 1905 oleh Albert Einstein.

### 6.12.1. Gas Sempurna

Teori gas sempurna dikembangkan dari Hukum Boyle dan Hukum Charles oleh Émile Clapeyron pada tahun 1834. Hukum Boyle dinyatakan di Inggris dengan persamaan  $PV = c$ , yang dalam waktu hampir bersamaan dinyatakan juga oleh Edme Mariotte di Perancis. Sedangkan Hukum Charles atau lebih dikenal dengan sebutan hukum perbandingan volume dinyatakan di Inggris dengan persamaan  $V/T = c$ .

Pada lingkup kajian makroskopis, suatu gas sempurna atau disebut gas ideal dinyatakan oleh Émile Clapeyron memenuhi persamaan:

$$p.V = n.R.T \quad \dots\dots\dots (6.28)$$

dengan  $p$  adalah tekanan gas dalam ruang,  $V$  adalah volume gas,  $n$  adalah jumlah mol gas,  $R$  adalah konstanta gas universal nilainya  $8314.472 \text{ J k.mole}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , dan  $T$  adalah temperatur/suhu gas ( $^{\circ}\text{K}$ ).

Pada lingkup kajian mikroskopis, tingkat molekul-molekul suatu gas sempurna memenuhi persamaan:

$$p = \frac{1}{3}\rho.\bar{v}^2 = \frac{1}{3}\rho.v_{rms}^2 \quad \dots\dots\dots (6.29)$$

dengan  $p$  adalah tekanan gas,  $\rho$  adalah rapat massa gas,  $v$  adalah kecepatan aliran rata-rata gas, dan  $v_{rms}$  adalah kecepatan rata-rata akar kuadrat dari kecepatan sesaatnya (*root mean square of velocity*).

### 6.12.2. Heat Molar dari Suatu Gas Sempurna

Tenaga dakhil dari gas sempurna hanya dipengaruhi oleh temperatur gas. Dari Hukum Termodinamika I, didapatkan:

$$C_P - C_V = R \quad \dots\dots\dots (6.30)$$

dengan  $C_P$  adalah kapasitas *heat* molar pada tekanan konstan,  $C_V$  adalah kapasitas *heat* molar pada volume konstan, dan  $R$  adalah konstanta gas universal.  $C_P$  dan  $C_V$  biasanya dinyatakan dalam satuan calorie (cal), sedangkan  $R$  dinyatakan dalam satuan joule. Untuk pemakaian satuan SI,  $C_P$  dan  $C_V$  perlu dikonversikan dalam satuan joule, sebagaimana telah disampaikan terdahulu.

#### Contoh soal 6.1

Suatu calorimeter menggunakan energi elektrik dengan catu daya sebesar 0,220 W selama 40 s. Tentukan kapasitas heat calorimeter jika suhu pada calorimeter meningkat sebesar 1 °K.

Jawab:

$$D = 0,220 \text{ W}$$

$$\Delta t = 40 \text{ s}$$

$$\Delta T = 2 \text{ °K}$$

$$Ec = D \Delta t = 0,220 \cdot 40 = 8,80 \text{ J}$$

$$c = Ec / \Delta T = 8,80 / 2 = 4,40 \text{ J/K}$$

#### Contoh soal 6.2

Tentukan kapasitas heat 1 mole air

Jawab:

$$1 \text{ mole} = 18 \text{ gram}$$

$$c = 18 \text{ g mol}^{-1} \cdot 4.184 \text{ J cal}^{-1} = 75,3 \text{ J (K mol)}^{-1}.$$

Contoh soal 6.3

Berapa *heat* yang diperlukan untuk menaikkan temperatur 40 kg tembaga sebesar 10 °C, jika *heat* spesifik tembaga adalah 0,386 kJ/(kg.K).

Jawab:

$$h = 40 \text{ kg}$$

$\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C} = 10 \text{ }^\circ\text{K}$ , karena skala pada kedua jenis satuan suhu adalah sama yang disebut skala 1/100 (*centigrade*).

$$h = 0,386 \text{ kJ}/(\text{kg.K})$$

$$\Delta Q = m h \Delta T = 40 \cdot 0,386 \cdot 10 = 15,440 \text{ kJ}$$

Contoh soal 6.4

Peluru timah dengan massa 200 g dipanaskan sampai 100 °C, selanjutnya dicelupkan dalam 500 g air pada bejana alumunium dengan massa 200 g. Temperatur akhir pada saat telah setimbang diukur sebesar 20 °C. Jika bejana alumunium dibuat terisolasi hanya dilengkapi termometer (tidak dilengkapi tongkat pengarah) dan suhu air mula-mula diukur sebesar 17,3 °C, *heat* spesifik air adalah 4,184 kJ/(kg.K), dan *heat* spesifik alumunium adalah 0,941 kJ/(kg.K), tentukan *heat* spesifik timah.

Jawab:

$$m = 6000 \text{ g} = 6 \text{ kg}$$

$$m_a = 500 \text{ g} = 0,5 \text{ kg}$$

$$m_b = 200 \text{ g} = 0,2 \text{ kg}$$

$$h_a = 4,184 \text{ kJ}/(\text{kg.K})$$

$$h_b = 0,99 \text{ kJ}/(\text{kg.K})$$

$$t = 100 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ maka } T = 273+100 \text{ }^\circ\text{C} = 373 \text{ }^\circ\text{K},$$

$$t_a = 17,3 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ maka } T_{ia} = 273+17,3 \text{ }^\circ\text{C} = 290,3 \text{ }^\circ\text{K},$$

$$t_b = 17,3 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ maka } T_{ib} = 273+17,3 \text{ }^\circ\text{C} = 290,3 \text{ }^\circ\text{K},$$

$$t_f = 20 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ maka } T_f = 273+20 \text{ }^\circ\text{C} = 293 \text{ }^\circ\text{K},$$

Heat spesifik peluru timah:

$$\begin{aligned}h &= \frac{m_a h_a (T_f - T_{ia}) + m_b h_b (T_f - T_{ib})}{m \cdot (T_f - T)} \\&= \frac{0,5 \cdot 4,184 \cdot (293 - 290,3) + 0,2 \cdot 0,941 \cdot (293 - 290,3)}{0,2 \cdot (293 - 373)} \\&= 0,38478 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})\end{aligned}$$

### 6.13. SOAL-SOAL

1. Jelaskan pengertian *heat*.
2. Jelaskan pengertian kapasitas *heat*!
3. Jelaskan pengertian *heat* spesifik.
4. Uraikan secara singkat pengertian ekspansi thermal.
5. Apa yang dimaksud dengan gas ideal?
6. *Heat* spesifik suatu benda perlu diketahui dengan pengujian benda uji memakai *calorimeter*. Berat benda uji adalah 135,89 kg(f). Air dengan berat 84,6 kg(f) diisikan kedalam bejana. Berat alat sebelum diisi air 248,65 kg(f) dengan *heat* spesifik 0,941 kJ/kg.K. Tongkat pengarah memiliki berat 7,27 g. Temperatur awal alat, air, dan tongkat pengarahnya adalah 293,5 °K dan temperatur setelah setimbang 305,2 °K.
7. Sebuah kotak pejal berukuran 40x40x40 cm<sup>3</sup> dipanaskan di bawah terik panas matahari sehingga suhunya naik dari 26 °C menjadi 85 °C. Apabila kotak dibuat dengan bahan alumunium dengan koefisien ekspansi volume 24x10<sup>-6</sup> tentukan berapa cm<sup>3</sup> volume kotak tersebut setelah dipanaskan.

# BAB 7

## STABILITAS BENDA KAKU

Stabilitas benda merupakan satu di antara teori-teori fundamental di bidang teknik, karena hasil kerja/ karya di bidang teknik umumnya berkaitan dengan stabilitas benda, baik stabilitas statik maupun dinamik. Sesuai Hukum I Newton, gerak benda bersifat relatif terhadap kerangka inersianya, maka terdapat 2 pengertian stabilitas benda yaitu:

- 1) Benda dalam **stabilitas statis** (*static equilibrium*) jika benda dalam keadaan diam (*static*) terhadap suatu kerangka acuan inersia.
- 2) Benda dalam **stabilitas dinamik** (*dynamic equilibrium*) jika benda dalam keadaan bergerak (*dynamic*) secara beraturan baik dalam lintasan lurus, lingkaran, elips dan lain sebagainya terhadap suatu kerangka acuan inersia.

Sejak akhir abad ke-20, aplikasi mekanika zat padat (*solid*) untuk perancangan di bidang ilmu teknik sipil, dikaji secara detil dalam konteks **mekanika kontinum** (*continuum mechanics*) dengan fokus kajian gerak **benda kaku** (*rigid body motion*) dan kesetimbangan statik benda. Dalam konteks partikel, **benda kontinum** disebut juga **sistem partikel kontinyu**. Dalam mekanika kontinum, matematika diterapkan dengan proporsi jauh lebih besar daripada dalam mekanika klasik, sejalan pesatnya perkembangan teknik komputasi dan metode numeris. Teori-teori dasar dalam mekanika kontinum, antara lain: gerak, displesi, deformasi, tekanan, tegangan, regangan, gesekan, ekspansi termal, gaya-gaya statik dan dinamik, serta momen linier maupun momen puntir.

Akhir-akhir ini, mekanika kontinum telah dikembangkan makin luas tidak hanya di bidang teknik sipil, tetapi juga bidang bioteknologi, teknik komputasi kedokteran, nanoteknologi, hingga pengalihragaman energi. Perubahan bentuk, fasa, dan kepadatan zat dapat disebabkan oleh terjadinya **perubahan suhu**, sebagaimana telah dijabarkan pada bab pendahuluan dan termodinamika. Pada bab ini akan dijabarkan perubahan bentuk, fasa, dan kepadatan zat oleh **perubahan tekanan** dan **tegangan**, khususnya benda kaku (zat padat) melalui parameter-parameter sifat fisik khas zat padat, antara lain: kohesi, adhesi, rapat massa, berat unit, dan konpresibilitas, permeabilitas.

Teori-teori tersebut penting dijabarkan untuk mendasari analisis dan upaya teknis untuk mengantisipasi dan mengatasi dampak negatif perubahan tekanan dan tegangan yang dapat menimbulkan gangguan terhadap stabilitas benda kaku, memicu reduksi fungsi maupun keruntuhan struktural benda. Selain itu, teori-teori tersebut penting dijabarkan untuk mendasari kajian dalam mekanika kontinum atau pun mekanika klasik dalam perencanaan dan perancangan struktur.

## **7.1 BENDA KAKU**

Perencanaan (*planning*) dan perancangan (*design*) di bidang teknik secara prinsip ditujukan untuk menghasilkan suatu benda kaku yang bermanfaat secara efektif dan efisien bagi masyarakat. Benda kaku hasil perencanaan dan perancangan dapat diwujudkan dalam beberapa bentuk antara lain:

- 1) **suatu bentuk konstruksi baru** untuk melakukan fungsi tertentu yang belum dapat dilakukan dengan bentuk-bentuk konstruksi yang telah ada. Bentuk konstruksi baru perlu dibuat melalui riset atau penelitian.

- 2) **suatu bentuk konstruksi yang telah ada**, antara lain: patung, prasasti, dan pohon dalam pot/ herbarium, meubel, kendaraan, papan reklame, gapura, dan antena pemancar. Bentuk konstruksi demikian umum pula dibuat secara massal jika memiliki fungsi dan nilai komersial bagi masyarakat.
- 3) **suatu fasilitas infra struktur** untuk dapat melakukan fungsi tertentu untuk mendukung pencapaian tujuan suatu negara, kota, perusahaan, atau sistem organisasi lainnya. Dalam bidang konstruksi, fasilitas infra struktur mencakup **konstruksi dasar** dan **konstruksi atas**. Fasilitas infra struktur antara lain: jalan, jembatan, penahan tanah, rumah tinggal, pertokoan, terminal, pasar, rumah sakit, sporthall, hotel. Konstruksi dasar fasilitas infra struktur umum disebut konstruksi fondasi, namun kini pada bangunan gedung bertingkat sering mencakup pula konstruksi lantai dasar (*basement*), di samping konstruksi fondasi.

Bentuk konstruksi yang tergolong dalam fasilitas infra struktur umum disebut dengan **pra sarana**. Sedangkan bentuk konstruksi yang lain umum disebut **sarana**. Bentuk-bentuk konstruksi tersebut umumnya dibuat dengan rangka, yang disebut sebagai bagian **struktur** dari konstruksi bersangkutan. Sebagai misal pada konstruksi bangunan gedung beton bertulang, bagian struktur dari bangunan meliputi fondasi, kolom, balok, dan rangka atap.

### **7.1.1. Efektivitas dan Efisiensi Struktur**

Benda kaku hasil perencanaan dan rancangan disebut efektif jika minimal memenuhi kriteria:

- 1) **tepat teknologi**, artinya teknologi yang dipilih untuk diterapkan harus tidak jauh dari harapan kebutuhan masyarakat;

- 2) **berfungsi sesuai rencana**, artinya benda yang dihasilkan harus dapat dipakai secara aman dan nyaman minimal sesuai umur rencana. Beberapa upaya perlu dipertimbangkan untuk menjamin keamanan struktur benda kaku minimal melalui:
- a) pemakaian faktor aman dalam perhitungan struktur,
  - b) pemilihan material yang tepat,
  - c)antisipasi kegagalan struktur, dan
  - d) meminimalisir resiko kegagalan fungsi.

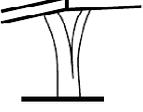
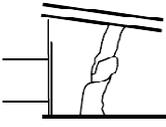
Selain itu, benda kaku yang dihasilkan harus berfungsi secara efisien dengan minimal memenuhi kriteria:

- 1) tenaga pembuatan minimal,
- 2) waktu pembuatan cepat,
- 3) awet/ tahan lama,
- 4) berfungsi minimal sesuai umur rencana,
- 5) biaya produksi/ konstruksi minimal, dan
- 6) harga jual terjangkau oleh masyarakat pengguna.

### **7.1.2. Kegagalan Struktur yang Perlu Diantisipasi**

Suatu benda kaku mengalami fenomena kegagalan struktur jika bagian struktur benda tidak berfungsi sesuai rencana. Kegagalan struktur pada bangunan dapat disebabkan oleh beberapa hal antara lain: perencanaan dan perancangan kurang memadai, pembangunan tidak sesuai dengan hasil-hasil perencanaan dan perancangan, beban kerja melebihi beban rencana, kebakaran, bencana alam (gempa bumi, banjir, *tsunami*). Benda kaku mengalami kegagalan struktur karena hal-hal tersebut berdampak merusak bagian-bagian struktur dari benda kaku. Sedangkan apabila hal-hal tersebut tidak berdampak merusak bagian-bagian struktur dari konstruksi benda kaku maka tidak menimbulkan kegagalan struktur. Beberapa jenis kerusakan bagian/elemen struktur pada benda kaku dimuat dalam tabel berikut.

Tabel 7.1 Tipe Kegagalan Struktur Lokal

Visualisasi	Kerusakan	Pembenahan
<p style="text-align: center;"><b>Retak</b></p> <p>(a) </p> <p>(b) </p> <p>(c) </p>	<p>Retak dapat berupa (a) retak tekuk, (b) retak geser, atau (a) retak lentur. Bentuk benda masih utuh, pada bagian tertentu muncul kurva seukuran rambut, jika tidak diatasi makin lebar ukurannya.</p>	<p>Perkuatan dengan struktur penyangga atau plat baja pengaku di sisi-sisi bagian struktur retak.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Patah</b></p> <p>(a) </p> <p>(b) </p> <p>(c) </p>	<p>Patah dapat berupa (a) patah tekuk, (b) patah geser, atau (c) patah lentur. Bentuk benda sudah tidak utuh, umumnya terpotong menjadi 2 bagian.</p>	<p>Penyambungan disertai perkuatan penyangga dan/ atau plat baja pengaku, atau penggantian elemen struktur.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Belah</b></p> 	<p>Bentuk elemen struktur sudah tidak utuh, terbelah menjadi 2 bagian akibat gaya aksial, lateral, atau pun longitudinal material</p>	<p>Perkuatan dengan paku, klem, begel, atau penggantian elemen struktur yang terbelah serta elemen-elemen struktur yang berkaitan.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Peyok</b></p> 	<p>Bentuk elemen struktur sudah tidak utuh dan tidak menentu akibat kombinasi gaya dan/ atau kombinasi momen</p>	<p>Penggantian elemen struktur yang peyok dan elemen-elemen struktur yang berkaitan.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Hancur</b></p> 	<p>Bentuk elemen struktur sudah tidak utuh dan tidak menentu, serta berantakan/ berserakan</p>	<p>Penggantian elemen struktur yang hancur dan elemen-elemen struktur yang berkaitan.</p>

**Bagian struktur pada bangunan gedung** berbeda dengan bagian struktur bangunan fisik lainnya seperti penahan tanah, jalan, jembatan, dan dermaga. Pada bangunan gedung dengan konstruksi beton bertulang, bagian struktur bangunan relatif sama dengan bangunan gedung dengan konstruksi kayu, baja, atau pun kombinasi antara konstruksi tersebut. Bagian struktur pada bangunan gedung dengan konstruksi beton bertulang dapat diklasifikasikan dalam kelompok:

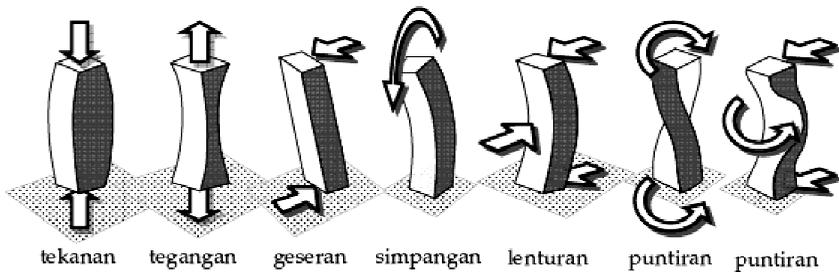
- 1) **struktur bawah**, meliputi: fondasi dan basement bangunan dan
- 2) **struktur atas**, meliputi: kolom, balok, dan rangka atap. Pelat pada konstruksi beton bertulang dapat dimasukkan elemen struktur jika dirangkai dan dicetak secara menyatu (monolith) dengan elemen struktur yang telah disebutkan terdahulu.

Kegagalan struktur pada bangunan dapat terjadi dalam lingkup lokal dan total sebagai berikut:

- 1) **Kegagalan struktur lokal** hanya terjadi pada bagian tertentu saja pada bangunan, bagian lainnya dalam keadaan aman dan berfungsi sesuai rencana.

Lihat Gambar 7.1, tipe-tipe kegagalan struktur lokal antara lain: retak, patah, belah, peyok, dan hancur. Dalam gambar diuraikan pula beberapa **metode renovasi/ pembenahan** bagian struktur yang rusak saja.

Satu di antara metodeantisipasi terhadap kegagalan struktur lokal adalah kecermatan dalam analisis respon elemen-elemen struktur terhadap gaya dan momen pada elemen bersangkutan sebagaimana dalam gambar berikut.



Gambar 7.1 Tipe Respon Elemen Struktur terhadap Gaya dan Momen

- 2) **Kegagalan struktur total** yang umum disebut **keruntuhan struktur** (*structure failure*) terjadi pada sebagian besar atau seluruh bagian struktur.

Kegagalan struktur total selalu dipicu oleh kegagalan struktur lokal dan waktu kejadiannya dapat relatif sangat cepat, misal kegagalan struktur akibat gempa bumi.

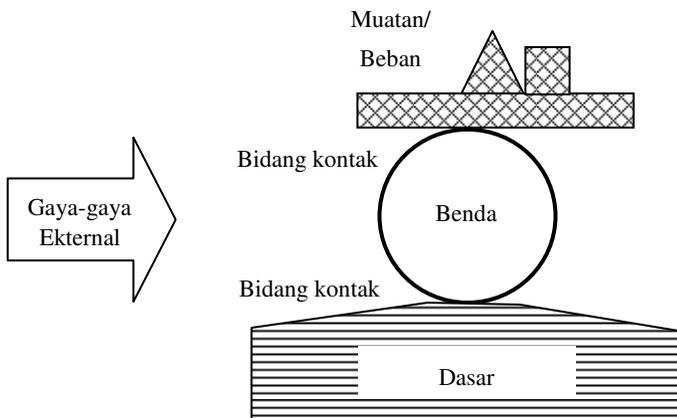
Guna mengatasi kegagalan struktur total dilakukan upaya **rehabilitasi** pada hampir atau seluruh bangunan, yang didahului dengan upaya **revitalisasi** bagian-bagian struktur yang secara fungsional masih dapat dipertahankan.

## 7.2 PERLAWANAN BENDA KAKU TERHADAP GERAK

Dalam perencanaan dan perancangan bangunan di bidang teknik sipil, sekurangnya terdapat 2 aspek harus diperhitungkan untuk mewujudkan suatu **bangunan yang stabil/ kaku**. Kedua aspek tersebut adalah: potensi gerak dan ketahanan benda terhadap gerak, sebagaimana visualisasi dalam Gambar 7.2. Masing-masing aspek dapat dirincikan lebih lanjut dalam beberapa aspek yang lebih detil sebagai berikut.

## Stabilitas Benda Tegar

- 1) **Potensi gerak** merupakan sumber-sumber penggerak yang dimungkinkan memicu gaya-gaya aksi terhadap benda untuk bergerak, dapat dikelompokkan dalam 2 kelas:
  - (a) Sumber-sumber eksternal benda
    - daya dukung dasar/ tanah
    - kemiringan dasar
    - bidang kontak
    - gaya-gaya muatan/ beban
    - bentuk dan dimensi muatan/ beban
    - gaya-gaya alami yang dipengaruhi kondisi geologis, geografis, iklim, dan cuaca
  - (b) Sumber-sumber internal pada benda, terutama:
    - berat
    - bentuk dan dimensi
    - karakteristik material
    - kekuatan material



**Gambar 7.2** Kestimbangan Statis terhadap Gaya dan Momen

2) **Ketahanan benda dari gerak** merupakan reaksi terhadap gaya-gaya aksi yang akan menggerakkan benda, dapat dikelompokkan dalam 2 kelas:

(a) Reaksi eksternal di luar benda

- pelindung alami sekitar lokasi
- tumpuan
- bidang kontak
- kemiringan dasar
- kekasaran permukaan

(b) Reaksi internal dari dalam benda (*inertia forces*), terutama:

- berat
- kelembaman

Teori kelembaman benda merupakan teori lanjut dari teori gerak dalam Hukum II Newton.

Gaya inersia merupakan gaya dalam benda yang melakukan perlawanan terhadap gaya penggerak dari luar benda agar benda tetap diam, tidak bergerak translasi.

Besar gaya inersia dipengaruhi oleh bentuk dan posisi benda.

Kelembaman merupakan gaya yang juga dihasilkan dari dalam benda untuk tidak bergerak rotasi dan dilatasi (menggelinding).

Besar kelembaman benda juga dipengaruhi oleh bentuk dan posisi benda.

- momen inersia

Teori momen inersia juga merupakan teori lanjut dari teori gerak dalam Hukum II Newton. Momen inersia dihasilkan dari dalam benda untuk memberi

perlawanan terhadap gaya geser dan gaya lentur dari luar benda.

Besar momen inersia dipengaruhi oleh luas bidang / tampang lintang benda.

- eliminasi momen sisa  
Momen sisa merupakan momen yang ditimbulkan oleh gaya dan eksentrisitas yang dapat ditimbulkan sebagai dampak posisi gaya yang tidak sentris terhadap sumbu benda. Momen sisa penting dihindarkan atau dieliminasi pada struktur agar struktur stabil seutuhnya, terutama pada struktur yang melibatkan sistem gaya.
- karakteristik kekuatan material  
Setiap material memiliki karakteristik kekuatan tertentu dalam menahan gaya dan momen. Karakteristik kekuatan struktur dalam memberikan reaksi internal berkaitan langsung dengan karakteristik kekuatan material penyusun struktur bersangkutan. Oleh karena itu, untuk menghasilkan struktur dengan reaksi internal memadai, karakteristik kekuatan material penting diperhatikan dalam perencanaan dan perancangan struktur.
- karakteristik lainnya dari material  
Untuk menghasilkan struktur dengan kekuatan material dan reaksi internal memadai, penting pula diperhatikan karakteristik lainnya dari material agar tidak berpengaruh negatif terhadap kestabilan struktur.

**Tabel 7.2** Identifikasi Sifat/ Karakteristik Fisik Material/ Zat

1	Nama Material	
2	Alami	Buatan
3	Masif/ pejal	Porous
4	Transparan	Non-transparan
5	Magnetik	Non-magnetik
6	Granular	Kohesif
7	Homogen	Heterogen/ komposit
8	Adhesi	Non-adhesif
9	Isotrophic	Ortrothopic
10	Elastis/ lentur	Non-elastis/ getas
11	Plastis	Non-plastis
12	Konduktor	Isolator
13	Kompresibel	Non-kompresibel
14	Permeabel	Non-permeabel
15	Permukaan halus	Permukaan kasar
16	Kental	Encer
Karakteristik kekuatan material		
1	Rapat massa/ rapat unit	
2	Berat jenis/ berat unit	
3	Tekanan	
4	Tegangan tarik	
5	Tegangan geser	
6	Tegangan lentur	
Ukuran/ dimensi		
1	Panjang	
2	Area	
3	Tebal/ tinggi	
4	Volume	

### 7.3 KARAKTERISTIK ZAT PADAT

Bagian dari suatu benda yang bersifat struktur umum disusun dari zat padat, terutama konstruksi bangunan stabil. Oleh karena itu, pemahaman terhadap sifat/ karakteristik material / zat padat merupakan pokok penting dalam perencanaan dan perancangan benda buatan. Penguasaan terhadap pengetahuan karakteristik material ini merupakan dasar dalam mempelajari lebih lanjut pokok-pokok materi kajian di bidang mekanika bahan.

Material / zat padat diidentifikasi dari sifat fisik dan kimia yang dikandung dalam material. Beberapa di antara karakteristik fisik zat padat disampaikan dalam Tabel 7.2.

### 7.4 KESEIMBANGAN STATIS

Suatu zat padat disebut dalam keadaan stabil atau kaku jika berada dalam **keseimbangan statis** (*static equilibrium*) jika dalam keadaan diam terhadap suatu kerangka acuan inersialnya. Pada keadaan tersebut, zat padat harus memenuhi ketentuan:

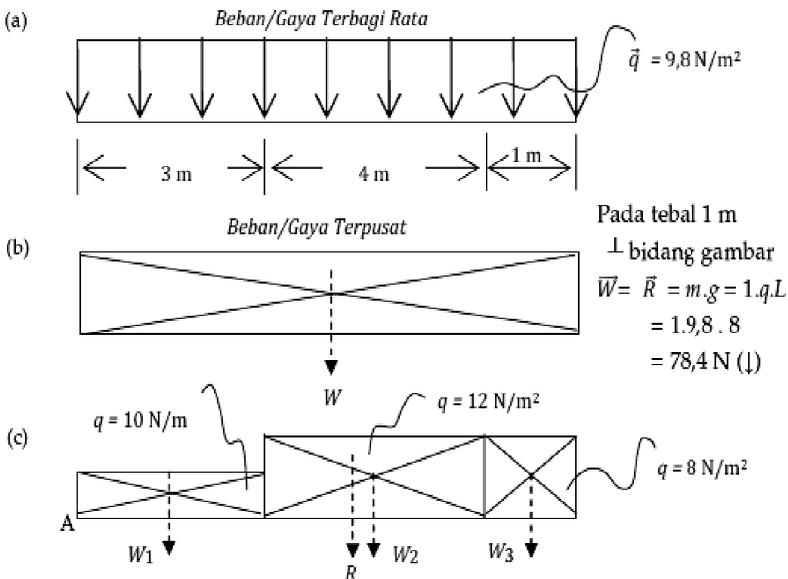
- 1) Percepatan linier pusat massa adalah nol ( $\vec{a}_{CM} = 0$ )
- 2) Percepatan sudut terhadap setiap titik juga nol ( $\vec{\alpha} = 0$ )

Terpenuhinya 2 syarat itu mengandung makna gaya-gaya dan momen-momen yang ditimbulkan gaya-gaya dalam keadaan seimbang. Kondisi ini diketahui melalui perhitungan struktur.

Untuk zat padat dengan tampang lintang sama di setiap panjang zat, maka dalam keadaan seimbang, keseimbangan luas pada luas tampang lintang zat akan identik dengan keseimbangan gaya-gaya dalam pada zat. Keadaan seimbang pada luas tampang lintang zat dapat diketahui melalui perhitungan memakai **metode momen statis**, di samping memakai **pengujian model fisik**.

### 7.4.1. Pusat Gravitasi

Gaya berat sebagaimana dinyatakan dalam Hukum I Newton merupakan gaya yang ditimbulkan oleh gaya gravitasi. **Gaya gravitasi** sering disebut **gaya/ beban terbagi rata** ( $\vec{q}$ , *uniform load/ force*) karena bekerja pada seluruh pusat massa partikel penyusun benda. Lihat visualisasi beban terbagi rata pada Gambar 7.3(a), beban tersebut dapat dinyatakan dalam berbagai variasi **beban satuan** (*unit load*), antara lain: gaya tiap satuan panjang [ $t(f)/m$ ;  $N/m$ ], gaya tiap satuan luasan [ $ton(f)/m^2$ ;  $N/m^2$ ], atau pun gaya tiap satuan volume [ $ton(f)/m^3$ ;  $N/m^3$ ]. Beban kerja atau gaya kerja merupakan perkalian antara dimensi benda (dapat berupa panjang, luas, atau volume) terhadap beban satuan.



Gambar 7.3 Gerak dalam Diskripsi Lagrangian

Gaya gravitasi bekerja pada **pusat massa** ( $CM$ , *center of mass*) pada suatu benda maka gaya berat atau berat benda sering juga diasumsi sebagai **beban terpusat**. Lihat Gambar 7.3(b), gaya terbagi rata di seluruh bagian benda dapat disubstitusikan menjadi satu **gaya terpusat/ titik** ( $\vec{P}$ , *point load/ force*) yang bekerja pada pusat berat. **Pusat gravitasi** ( $CG$ , *center of gravity*) atau **pusat berat** ( $CW$ , *center of weight*) pada suatu benda berhimpit dengan pusat massanya. Untuk bentuk benda prismatis, dengan tampang lintang berbentuk persegi panjang titik berat benda tepat pada perpotongan diagonal persegi panjang bersangkutan. Oleh karena benda bersifat simetris, hitungan transformasi beban merata (terbagi rata) menjadi beban titik tersebut dapat dilakukan relatif mudah dan sederhana.

#### 7.4.2. Keseimbangan Luasan

Keseimbangan luasan merupakan ekspresi keseimbangan gaya-gaya dalam dan momen yang ditimbulkannya pada benda dengan bentuk tampang seragam. Keadaan tersebut dipenuhi jika jumlah momen elemen luasan terhadap sumbu pusat benda adalah nol. Substitusi variabel  $m$  dalam persamaan 2.1 dengan variabel  $A$  diperoleh persamaan:

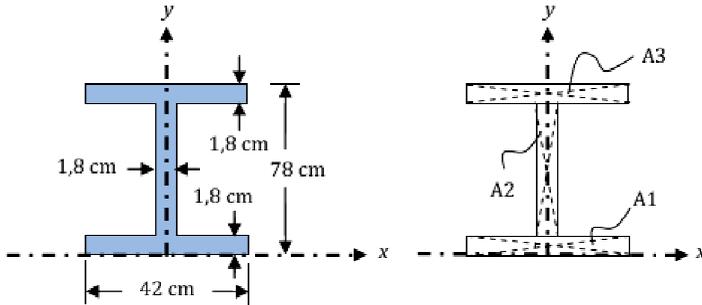
$$x_{CM} = \sum \frac{A_i x_i}{A} \quad \text{dan} \quad y_{CM} = \sum \frac{A_i y_i}{A} \quad \dots\dots (7.1)$$

dengan  $x_{CM}$  dan  $y_{CM}$  adalah koordinat pusat luasan dari tampang lintang benda, di mana pusat massa dan pusat berat luasan berada;  $A$  adalah luas total partikel-partikel,  $A_i$  adalah luas partikel ke- $i$ ,  $x_i$  serta  $y_i$  berturut-turut adalah jarak partikel ke- $i$  terhadap titik tertentu yang tetap/ statis. Kondisi tersebut efektif digunakan untuk menentukan titik pusat massa benda atau pun titik berat benda dengan menempatkannya pada resultan momen statis. Metode hitungan ini disebut **metode momen statis**.

Contoh soal 7.1

Tentukan titik pusat tampang lintang luasan balok baja berikut ini.

Jawab:



Gambar 7.4 Gaya Gravitasi pada Pusat Gravitasi

Luasan dibagi dalam 3 sub luas, berturut-turut luasan I, II, dan III.

Masing-masing luasan:  $A_1 = 42 \cdot 1,8 = 75,6 \text{ cm}^2$ ,  $A_2 = (78 - 2 \cdot 1,8) \cdot 1,8 = 133,92 \text{ cm}^2$ ,  $A_3 = 42 \cdot 1,8 = 75,6 \text{ cm}^2$

$$\begin{aligned} x_{CM} &= \sum \frac{A_i x_i}{A} \\ &= \frac{A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3 x_3}{A_1 + A_2 + A_3} \\ &= \frac{75,6 \cdot 0 + 133,92 \cdot 0 + 75,6 \cdot 0}{75,6 + 133,92 + 75,6} \\ &= 0 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{CM} &= \sum \frac{A_i y_i}{A} \\ &= \frac{A_1 y_1 + A_2 y_2 + A_3 y_3}{A_1 + A_2 + A_3} \\ &= \frac{75,6 \cdot 1,8/2 + 133,92 \cdot [1,8/2 + (78 - 2 \cdot 1,8)/2] + 75,6 \cdot (78 - 1,8/2)}{285,12} \\ &= 39 \text{ cm} \end{aligned}$$

Jadi koordinat titik berat tampang lintang ( $x_{CM}$ ,  $y_{CM}$ ) adalah (0, 39).

## Stabilitas Benda Tegar

### Contoh soal 7.2

Perhitungan momen statis dapat juga digunakan untuk menentukan resultan. Misalnya, resultan berat benda pada Gambar 7.3(c) yang tidak simetris dan memakai ukuran serta beban satuan bervariasi.

Jawab:

$$\begin{aligned}\vec{R} &= \vec{W}_1 + \vec{W}_2 + \vec{W}_3 \\ &= 10 + 12 + 8 \\ &= 30 \text{ N } (\downarrow)\end{aligned}$$

Lokasi  $\vec{R}$  dicari dengan asumsi struktur beban memiliki tebal 1 m  $\perp$  bidang gambar, momen statis terhadap titik tetap A, didapatkan:

$$\vec{R} \cdot l_R = \vec{W}_1 \cdot \frac{3}{2} + \vec{W}_2 \cdot (3 + \frac{4}{2}) + \vec{W}_3 \cdot (3 + 4 + \frac{1}{2})$$

$$30 \cdot l_R = 10 \cdot \frac{3}{2} + 12 \cdot (3 + \frac{4}{2}) + 8 \cdot (3 + 4 + \frac{1}{2})$$

$$l_R = \frac{15 + 60 + 60}{2}$$

$$= 67,5 \text{ m di sebelah kanan A.}$$

### 7.4.3. Keseimbangan Gaya

Keseimbangan gaya dicapai jika jumlah vektor-vektor dari semua gaya luar dan berat benda yang bekerja pada benda adalah nol. Sesuai ketentuan SI, semua gaya dalam sistem dinyatakan dalam satuan newton (N). Keseimbangan gaya secara matematis dituliskan:

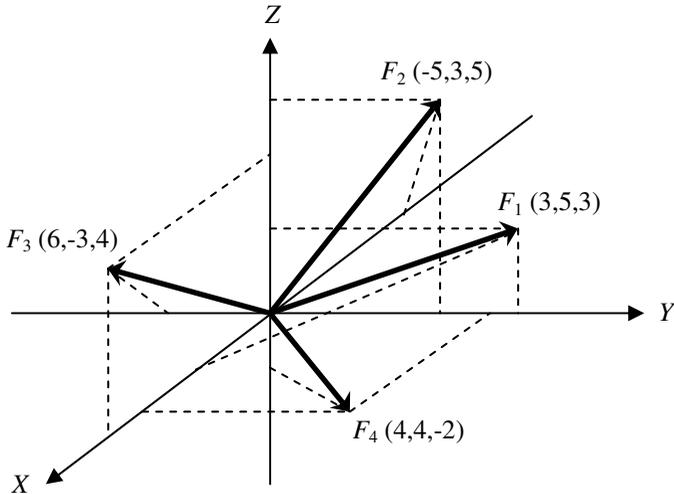
$$\Sigma \vec{F}_i = 0$$

$$\Sigma \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots = 0 \quad \dots \quad (7.2)$$

Semua gaya dalam atau gaya internal saling menyeimbangkan dengan pasangannya berdasarkan Hukum III Newton sehingga tidak termasuk dalam persamaan 7.2.

Contoh soal 7.3

Tentukan resultan dari gaya-gaya yang ditunjukkan dengan vektor posisi  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ , dan  $F_4$ . Tentukan pula beswar momen oleh resultan terhadap titik P(-7,3,-2).



Gambar 7.5 Sistem Gaya pada Sistem Koordinat X, Y, dan Z

**7.4.4. Keseimbangan Momen**

Keseimbangan momen dicapai jika jumlah vektor-vektor momen yang ditimbulkan oleh semua gaya luar dan berat benda yang bekerja pada benda adalah nol. Sesuai ketentuan SI, semua momen dinyatakan dalam satuan newton (Nm atau Nmm). Keseimbangan momen dinyatakan secara matematis:

$$\begin{aligned} \Sigma \vec{M}_i &= 0 \\ \Sigma \vec{M}_i &= \vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \vec{M}_3 + \dots = 0 \end{aligned} \quad \dots \quad (7.3)$$

**7.5 SOAL-SOAL**

1. Uraikan secara singkat mengenai pusat gravitasi.
2. Jelaskan makna kesetimbangan statis.
3. Sebutkan dan tuliskan 4 di antara karakteristik zat padat.
4. Uraikan yang dimaksud reaksi internal dari dalam benda.

# BAB 8

## Z A T A L I R

Zat alir merupakan jenis zat yang dapat bergerak (*moving*) secara mengalir (*flow*). Gerak zat alir tersebut berlainan dengan gerak zat padat. Zat padat dapat bergerak secara bergeser (*sliding*) dan menggelinding (*rolling*) dalam bentuk unit. Sebagai contoh, gerak sebuah kursi yang bergeser akibat didorong oleh seseorang. Kursi tersebut akan berpindah dari tempatnya semula ke tempat lain secara unit, artinya baik kayu, plastik, paku, cat, maupun lem pada unit kursi tersebut bergerak secara bersama-sama sesuai dengan gerak yang dialami unit kursi bersangkutan. Sedangkan pada zat alir, zat dapat bergerak secara mengalir di mana gerakan terjadi pada setiap partikel pada zat alir, baik pada zat alir yang bersifat sejenis (*homogen*) maupun campuran (*mixture/ composition*). Tentu saja, air dapat juga bergerak secara unit bersama dengan tempat/ wadah tertentu yang digunakan untuk memindahkannya. Perbedaan antara dua fenomena gerak cairan tersebut dapat ditinjau dari perbedaan antara gerak air dari suatu tempat ke tempat lain yang dipindahkan memakai ember dan pipa plastik (selang). Gerak air menggunakan ember memungkinkan air berpindah secara unit bersama dengan embarnya. Gerak air dengan cara demikian bukan fenomena mengalir. Sedangkan gerak air secara mengalir tampak pada gerak air dalam suatu pipa plastik (selang) transparan. Pada fenomena gerak air mengalir dalam selang plastik, selang plastik dapat saja dalam kondisi diam.

## Zat Alir

Zat alir atau fluida (*fluid*) mencakup zat cair (*liquid*), gas (*gases*), dan *plasma*. Ketiga zat alir tersebut memiliki sifat-sifat fisik hampir sama. Cabang mekanika yang mengkaji lebih detil zat alir disebut mekanika fluida (*fluid mechanics*) atau hidraulika (*hydraulics*). Lebih lanjut, untuk dapat dikaji lebih detil, mekanika fluida dipilah dalam cabang **hidraustatika** (*hydraustatics*) yang merupakan kumpulan kajian mengenai zat alir dalam kondisi diam (*static*) dan **hidraudinamika** (*hydraudynamics*) yang merupakan kumpulan kajian mengenai zat alir dalam kondisi bergerak (*dynamics*).

### 8.1 KARAKTERISTIK FISIK KHAS ZAT ALIR

Semua jenis zat, secara umum memiliki parameter sifat fisik bentuk, volume, rapat massa, dan berat jenis. Selain itu, setiap zat juga memiliki sifat fisik khas yang penting untuk jenis zat bersangkutan dan sekaligus merupakan ciri khas yang membedakan jenis zat bersangkutan terhadap jenis zat lainnya.

Dibandingkan dengan zat padat pada volume sama, partikel-partikel zat alir relatif lebih mudah bergerak. Karakteristik tersebut menjadikan zat alir memiliki perilaku yang khas daripada zat lainnya, antara lain:

- 1) tidak memiliki bentuk (*body*) tetap dan mudah berubah bentuk sesuai dengan tempatnya (wadahnya).
- 2) dapat berpindah dari satu tempat ke tempat lain secara mengalir (*flow*), yaitu perpindahan massa zat dalam bentuk partikel demi partikel penyusunnya, karena itu zat alir dapat mengalami rembesan, adhesi, kapilaritas, dan kompresibilitas.
- 3) sedikit/ tidak dapat menahan tegangan dan gaya geser/ sorong.

Pada zat cair, parameter sifat fisik khas yang penting diperhatikan meliputi: kohesi, adhesi, tegangan permukaan, kekentalan/ viskositas, tegangan gesek, dan kapilaritas. Sedangkan pada zat gas parameter sifat fisik khas yang penting diperhatikan mencakup pula kompresibilitas dan ekspansi thermal.

Pada bagian ini lebih lanjut hanya akan dideskripsikan beberapa karakteristik fisik khas zat alir yang belum ditinjau pada uraian bab terdahulu, meliputi: tegangan permukaan, kekentalan/ viskositas, tegangan gesek, dan kapilaritas. Sedangkan parameter-parameter lainnya, antara lain adalah rapat massa, berat jenis, permeabilitas, kompresibilitas, kohesi, dan adhesi dapat diacu dari uraian-uraian dalam bab dan sub bab terdahulu.

### 8.1.1. Tegangan permukaan

Fenomena kohesi menjadikan ikatan antar molekul zat alir seakan-akan memiliki lapisan tipis pada bagian permukaan yang dapat menahan gaya luar.

Gaya perlawanan ini timbul akibat adanya **tegangan permukaan** ( $\vec{\sigma}$ , *surface tension*) pada bagian permukaan zat alir. Tegangan permukaan dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\vec{\sigma} = \frac{E_p}{dA} \quad \dots\dots (8.1)$$

dengan  $E_p$  adalah energi potensial (J) dan  $dA$  adalah satuan luas permukaan ( $m^2$ ).

Nilai  $\vec{\sigma}$  dipengaruhi oleh suhu zat alir, makin tinggi suhu zat alir maka makin kecil. Di samping terjadi pada permukaan zat alir, tegangan permukaan terjadi juga pada perbatasan antara zat alir yang memiliki rapat massa (atau berat jenis) berbeda.

**8.1.2. Kekentalan**

**Kekentalan/ viskositas** (*viscosity*) adalah sifat cairan untuk melawan tegangan geser. Adanya kekentalan menjadikan suatu cairan kental dan lebih sukar mengalir daripada cairan encer. Apabila diasumsikan:

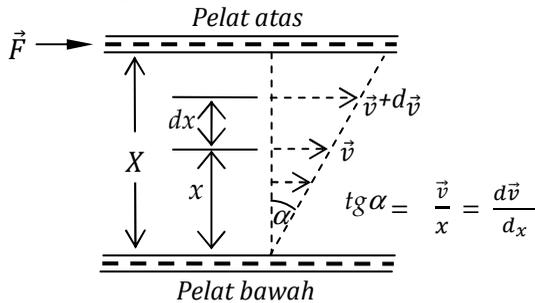
- 1) partikel-partikel cairan yang bersinggungan dengan pelat gerak mendapatkan kecepatan sebesar  $\vec{v}$ ,
- 2) tingkat perubahan kecepatan adalah sama pada arah tegak lurus arah gerakan pelat, dan
- 3) gaya geser cairan sebanding dengan tingkat perubahan kecepatan.

Maka jika suatu zat cair diisikan pada tempat antara dua pelat, selanjutnya pelat bagian atas digerakkan dengan kecepatan  $\vec{v}$  terhadap pelat di bawahnya yang tetap, akan diperoleh hubungan

$$\vec{F} = \mu \frac{A\vec{v}}{x} \dots\dots\dots (8.2)$$

dengan  $\vec{F}$  adalah gaya yang digunakan untuk menggerakkan pelat bagian atas,  $A$  adalah luas permukaan zat cair,  $x$  adalah jarak antara plat bagian atas dan bawah,  $\vec{v}$  adalah kecepatan gerak plat bagian atas, dan  $\mu$  adalah **kekentalan kinematik** (*kinematics viscosity*).

$$\text{tg } \alpha = \frac{\vec{v}}{x} = \frac{d\vec{v}}{dx} \dots\dots\dots (8.3)$$



**Gambar 8.1** Benda Padat Terapung di Permukaan Zat Cair

**Kekentalan absolut** ( $\tau$ , *absolute viscosity*) diperoleh pada tiap satuan luas sehingga:

$$\tau = \mu \frac{v}{x} \quad \dots\dots\dots (8.4)$$

atau

$$\tau = \mu \frac{dv}{dx} \quad \dots\dots\dots (8.5)$$

Sedangkan **kekentalan dinamik** ( $\nu$ , *dynamics viscosity*) diperoleh dari nilai banding antara kekentalan absolut cairan terhadap massa cairan, yaitu:

$$\nu = \frac{\tau}{\rho} \quad \dots\dots\dots (8.6)$$

### 8.1.3. Tegangan Gesek

Tegangan gesek diformulasikan:

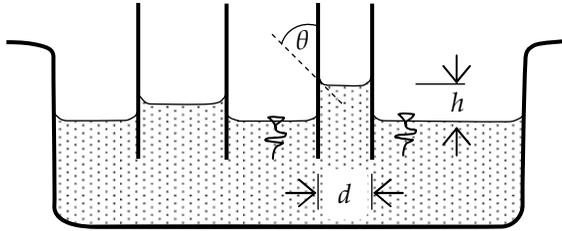
$$\vec{\tau} = \frac{\vec{F}}{x} \quad \dots\dots\dots (8.7)$$

### 8.1.4. Kapilaritas

Pengaruh tegangan permukaan dan adhesi, zat cair dalam pipa mengalami fenomena kapilaritas (*capillary action*). Makin kecil diameter pipa tinggi zat cair dalam pipa makin tinggi. Lihat Gambar 8.2, kapilaritas dituliskan dengan pernyataan matematik:

$$h = \frac{2 \tau \cos \theta}{\rho \bar{g} r} \quad \dots\dots\dots (8.8)$$

dengan  $h$  adalah tinggi muka air dalam tabung (m),  $\tau$  adalah tegangan permukaan zat cair,  $\theta$  adalah sudut antara permukaan air dan pipa pada dinding pipa (radian),  $\rho$  adalah rapat massa air dalam bejana ( $\text{kg(f)/m}^3$ ),  $\bar{g}$  adalah kecepatan gerak pelat bagian atas, dan  $r$  adalah adalah percepatan gravitasi bumi ( $\text{m/s}^2$ ),  $r$  adalah jari-jari pipa (m).



Gambar 8.2 Kapilaritas Zat Cair dalam Pipa

## 8.2 STATIKA ZAT ALIR

Karakteristik zat alir diam dan fenomena yang terjadi padanya sudah mulai dikaji sejak berabad-abad lalu. Namun hingga kini hanya terdapat 2 teori dasar yang telah berhasil dibangun dan telah banyak pula dimanfaatkan untuk kesejahteraan manusia.

### 8.2.1. Hukum Pascal

Hukum Pascal dinyatakan pada tahun 1653 oleh Blaisius Pascal, ahli matematika berbangsa Perancis, tekanan (*head*) pada kedalaman tertentu dalam zat alir akan diteruskan ke segala arah.

Pada Gambar 8.3 ditunjukkan gambar suatu kolam berbentuk tabung berisi cairan dengan suatu elemen volume pada kedalaman  $h$ . Dengan mendefinisikan elemen dalam kolam tersebut berbentuk prisma dengan panjang elemen (tegak lurus bidang gambar) adalah 1 satuan panjang, lebar elemen adalah 1 satuan panjang, tebal/ tinggi elemen adalah  $dh$  satuan panjang, dan massa elemen  $m$ . Maka diperoleh volume elemen:

$$dV = 1.1.dh = dh.$$

Tekanan ke atas  $p$  dan ke bawah  $\vec{p}+d\vec{p}$  bekerja pada luas alas  $A$  satuan luas.

Rapat massa cairan ( $= \rho$ ):

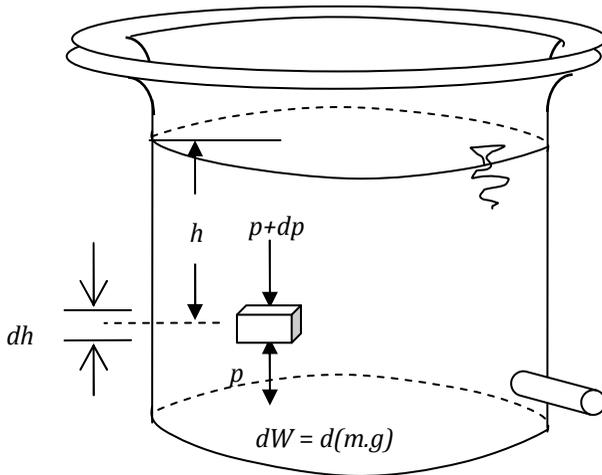
$$\rho = \Delta m / \Delta V = \Delta m / dV, \quad \dots \dots \dots (8.9)$$

sehingga didapat massa elemen ( $= dm$ ):

$$dm = \rho \cdot \Delta V = \rho \cdot dh,$$

dengan  $\vec{g}$  adalah percepatan gravitasi bumi, maka didapat gaya ke bawah elemen ( $= \vec{W}$ ):

$$\begin{aligned} \vec{W} &= \int_{h=h_0}^{h=h} dm \cdot \vec{g} \, dh \\ &= \int_{h=h_0}^{h=h} d\rho \cdot \vec{g} \, dh \\ &= \rho \cdot \vec{g} \cdot \int_{h=h_0}^{h=h} dh \end{aligned}$$



**Gambar 8.3** Tekanan pada Kedalaman Tertentu dalam Zat Cair

Zat Alir

Imbangan tekanan arah vertikal:

$$\vec{p} + d\vec{p} - \vec{p} + \vec{W}/A = dh.$$

$$\vec{W} = \int_{h=h_0}^{h=h} dm \cdot \vec{g} dh = \int_{h=h_0}^{h=h} d\rho \cdot \vec{g} dh$$

$$\vec{p} + d\vec{p} - \vec{p} + \frac{\vec{W}}{A} = d\vec{p} + \left( \rho \cdot \vec{g} \cdot \int_{h=h_0}^{h=h} dh \right) / 1$$

$$-d\vec{p} = \rho \cdot \vec{g} \cdot \int_{h=h_0}^{h=h} dh$$

$$-d\vec{p} = \rho \cdot \vec{g} \cdot h \quad \dots\dots\dots (8.10)$$

Tanda minus pada persamaan 8.10 menunjukkan bahwa arah tekanan adalah ke atas.

Pada zat cair, rapat massa relatif konstan, sehingga tekanan hidraulis ( $\vec{p}$ ) pada zat cair sebanding dengan kedalaman ( $h$ ) pada zat cair bersangkutan. Artinya makin dalam lokasi elemen dari permukaan zat cair, maka makin besar tekanan hidraulis di lokasi elemen bersangkutan.

Pada gas, rapat massa bervariasi sebanding lurus dengan tekanan akibat perubahan suhu gas. Pada suhu konstan, tekanan rata-rata gas adalah ( $\vec{p}$ ), sedangkan rapat massa gas ( $= \rho$ ):

$$\rho = a \vec{p} \quad \dots\dots\dots (8.11)$$

Maka, substitusi persamaan 8.11 ke dalam persamaan 8.10, didapat:

$$-d\vec{p} = a \cdot \vec{p} \cdot \vec{g} \cdot h$$

atau

$$-\frac{dp}{p} = a \cdot \vec{g} dh$$

sehingga:

$$-p(h) = p_0 \cdot e^{-kh} \quad \dots\dots\dots (8.12)$$

dengan  $k = a \cdot \vec{g} = (\rho/p) \cdot \vec{g} = \vec{g} \cdot (\rho_0/p_0)$

Untuk keadaan di atmosfer bumi,

$$\vec{p}_0 = 1 \text{ atm} = 1,1013256 \cdot 10^5 \text{ Pa,}$$

$$\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3 \text{ pada suhu } 20^\circ\text{C,}$$

$$\vec{g} = 9,8 \text{ m/s}$$

Maka:

$$k = 1,16 \cdot 10^{-4} \text{ km}^{-1}$$

Jadi, pada  $h < 8,6 \text{ km}$  didapat:

$$\vec{p}(h+dh) \equiv \vec{p}(h) - \rho(h) \vec{g} h$$

Maka:

$$- \vec{p}(h) = \rho(h) \vec{g} h \quad \dots\dots\dots (8.13)$$

Persamaan tekanan pada gas (persamaan 8.13) serupa dengan persamaan tekanan pada zat cair sebagaimana dinyatakan dalam persamaan 8.10.

### 8.2.2. Hukum Archimedes

Teori kedua tentang statika zat alir dikemukakan oleh Archimedes kurang lebih pada 300 B.C. bahwa suatu benda yang dicelupkan ke dalam zat alir akan mengalami gaya keatas sama besar dengan berat zat alir yang dipindahkan. Gaya tersebut disebut dengan **gaya apung** ( $F_B$ , *bouyancy force*) dan bekerja mengapungkan benda ke permukaan zat alir.

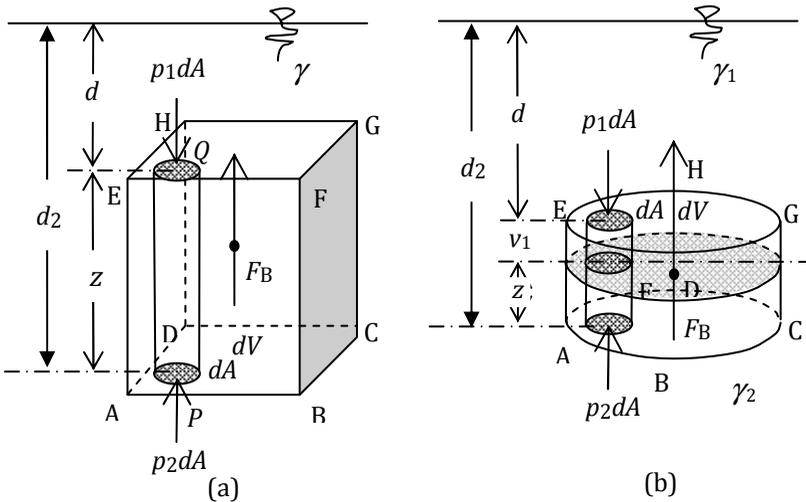
Gambar 8.4(a) memvisualisasikan benda padat ABCDEFGH terendam penuh (*wholly submerged*) dalam zat alir dengan berat jenis  $\gamma$  ( $=\rho \cdot g$ ). Resultan gaya-gaya horisontal yang bekerja pada benda sama dengan nol ( $\Sigma F_H = 0$ ), karena proyeksi vertikal dari tekanan-tekanan yang bekerja di kanan dan kiri benda memiliki besar sama tetapi berlawanan arah kerja.

Zat Alir

Amati elemen tabung vertikal  $PQ$  dengan  $V$  adalah volume benda terapung tersebut dan  $dV = z.dA$  dengan  $z = d_2 - d_1$ . Sedangkan  $p_1 = \gamma.d_1$  dan  $p_2 = \gamma.d_2$  dengan  $p_2 > p_1$ , maka:

$$\begin{aligned}
 dF_B &= (p_2 dA - p_1 dA) \\
 &= \gamma(d_2 - d_1) \\
 &= \gamma y dA \\
 dF_B &= \gamma dV \qquad \dots\dots\dots (8.14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= F_B \\
 &= \int dF_B \\
 &= \int \gamma dV \\
 F_B &= \gamma V \qquad \dots\dots\dots (8.15)
 \end{aligned}$$

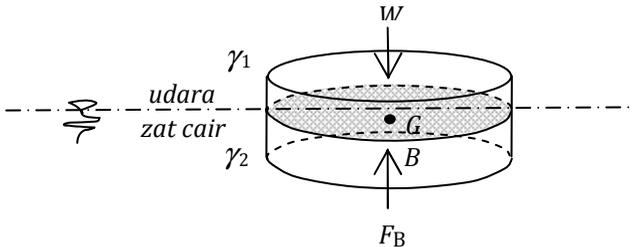


Gambar 8.4 Benda Padat Terendam dalam Zat Alir

Gambar 8.4(b) memvisualisasikan benda padat serupa dengan benda padat dalam Gambar 8.3, tetapi benda tampak terapung di permukaan lapisan zat alir dengan berat jenis  $\gamma_1$  dan  $\gamma_2$ . Dalam keadaan ini,

$$\begin{aligned}
 dF_B &= (p_2 dA - p_1 dA) \\
 &= [\gamma_1 (d_2 + y_1) + \gamma_2 y_2 - \gamma_1 d_1] dA \\
 &= [\gamma_1 d_1 + \gamma_1 y_1 + \gamma_2 y_2 - \gamma_1 d_1] dA \\
 &= [\gamma_1 y_1 + \gamma_2 y_2] dA \\
 dF_B &= \gamma_1 dV_1 + \gamma_2 dV_2 \quad \dots\dots\dots (8.16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_B &= \int dF_B = \int (\gamma_1 dV_1 + \gamma_2 dV_2) \\
 F_B &= \gamma_1 V_1 + \gamma_2 V_2 \quad \dots\dots\dots (8.17)
 \end{aligned}$$



**Gambar 8.5** Benda Padat Terapung di Permukaan Zat Cair

Gambar 8.5 memvisualisasikan benda padat terendam sebagian (*partially submerged*) pada permukaan lapisan zat alir serupa dalam Gambar 8.4(b), tetapi lapisan bagian atas zat alir adalah udara dan lapisan bagian bawah adalah cairan dengan berat jenis  $\gamma$ . Karena berat jenis udara relatif sangat ringan daripada berat jenis cairan maka berat jenis udara dapat dianggap nol (diabaikan), sehingga:

$$F_B = \gamma V \quad \dots\dots\dots (8.18)$$

## Zat Alir

Dalam keadaan setimbang (*equilibrium*), benda padat terapung harus mengalami gaya apung sebesar berat benda tersebut, sedang arahnya saling berlawanan.

$$F_B = -W \quad \dots\dots\dots (8.19)$$

### 8.3 DINAMIKA ZAT ALIR

Zal alir bergerak di alam ternyata harus memenuhi cukup banyak ketentuan. Hal itu dapat dicermati dari banyaknya hukum yang berlaku padanya. Karena banyaknya, dar-dasar hukum tidak dikaji semuanya dalam buku ini. Penilaian materi dalam hal ini dilakukan berdasar teori paling mendasar yang harus dikuasai. Teori-teori dimaksud meliputi hukum kontinuitas aliran, Bernoulli, Toricelli, dan Stokes.

#### 8.3.1. Debit Zat Alir

Banyak atau volume zat alir yang mengalir disebut debit aliran zat alir (*fluid discharge*). Debit zat alir ditentukan berdasar persamaan,

$$Q_i = v A \quad \dots\dots\dots (8.20)$$

dengan:

- $Q_i$  : debit aliran zat alir ( $m^3/s$ ),
- $v$  : kecepatan aliran zat alir, dan
- $A$  : luas tampang aliran zat alir,  
di mana untuk aliran dalam pipa dengan diameter  $D$ ,  
nilai  $A$  sesuai dengan rumus:

$$A = \pi D^2/4 \quad \dots\dots\dots (8.21)$$

**8.3.2. Hukum Kontinuitas Aliran**

Hukum kontinuitas aliran (*continuity law of motion*) berlaku baik untuk aliran dalam saluran tertutup (pipa) maupun saluran terbuka. Dalam Hukum kontinuitas aliran dinyatakan bahwa debit aliran pada tampang aliran dalam pipa adalah konstan.

$$Q_i = \text{konstan} \dots\dots\dots (8.22)$$

**A. Aliran melalui tampang saluran berbeda**

Sesuai dengan Gambar 8.6, pada aliran pipa tampang penuh dengan diameter pipa secara berturut-turut pada tampang 1, 2, dan 3  $D_1, D_2,$  dan  $D_3$

maka:

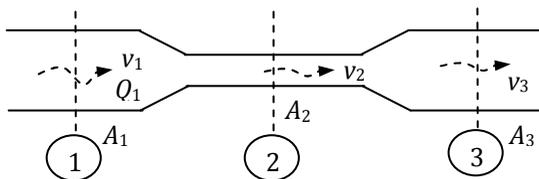
$$Q_1 = Q_2 = Q_3 \dots\dots\dots (8.23)$$

Dengan luas tampang alirannya secara berturutan:

$$\begin{aligned} A_1 &= \pi.D_1^2/4, \\ A_2 &= \pi.D_2^2/4, \text{ dan} \\ A_3 &= \pi.D_3^2/4 \end{aligned} \dots\dots\dots (8.24)$$

maka persamaan 8.23 dapat dituliskan dengan term kecepatan aliran pada masing-masing tampang aliran berturut-turut adalah  $v_1, v_2,$  dan  $v_3$  dengan persamaan:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = v_3 A_3 \dots\dots\dots (8.25)$$



**Gambar 8.6** Aliran Melalui Tampang Saluran Berbeda

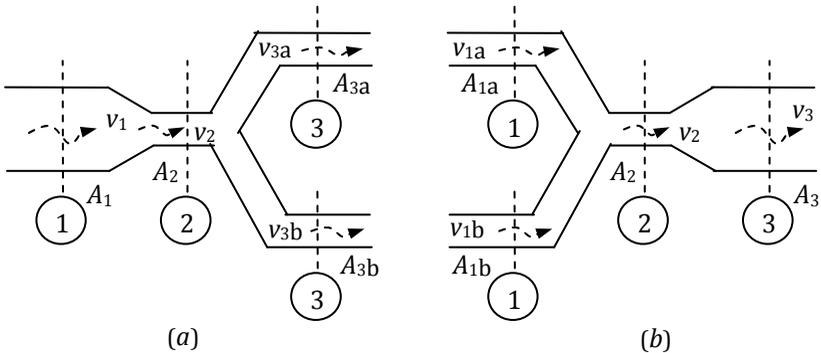
**B. Aliran melalui tampang saluran bercabang**

Pada aliran zat cair dalam pipa dengan percabangan (*divergen*) sesuai dengan Gambar 8.7(a), Hukum Kontinuitas aliran dinyatakan dengan persamaan:

$$Q_1 = Q_2 = Q_{3a} + Q_{3b} \quad \dots\dots\dots (8.26)$$

sehingga didapatkan:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = v_{3a} A_{3a} + v_{3b} A_{3b}$$



Gambar 8.7 Aliran Melalui Tampang Saluran

**C. Aliran melalui tampang saluran bergabung**

Sedangkan pada aliran dengan penggabungan (*convergen*) sesuai dengan Gambar 8.7(b) dinyatakan:

$$Q_{1a} + Q_{1b} = Q_2 = Q_3 \quad \dots\dots\dots (8.27)$$

sehingga didapatkan:

$$v_{1a} A_{1a} + v_{1b} A_{1b} = v_2 A_2 = v_3 A_3$$

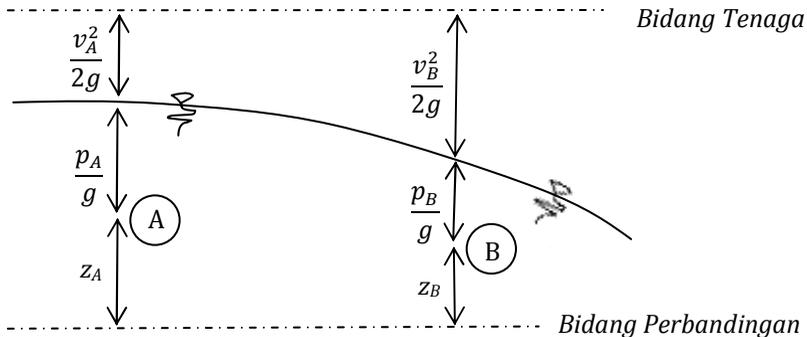
### 8.3.3. Hukum Bernoulli

Hukum Bernoulli dinyatakan dengan pernyataan jumlah tinggi tempat, tinggi tekanan, dan tinggi kecepatan pada setiap titik pada zat alir selalu tetap. Secara matematis dituliskan:

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = \text{konstan} \quad \dots\dots (8.28)$$

dengan

- $z$  : tinggi tempat (elevasi) dalam satuan panjang (m),
- $p/\gamma$  : tinggi tekanan dalam satuan panjang (m),  
di mana  $p$  adalah tekanan pada titik yang diukur dalam  $\text{kg(f)/m}^2$  dan  $\gamma$  adalah berat jenis zat alir dalam  $\text{kg(f)/m}^3$ ,
- $v^2/2g$  : tinggi kecepatan dalam satuan panjang (m),  
di mana  $v$  adalah kecepatan aliran pada titik tinjauan dalam  $\text{m/s}$ , dan  $g$  adalah konstanta percepatan gravitasi bumi dalam  $\text{m/s}^2$ .



**Gambar 8.8** Tinggi Tempat, Tinggi Tekanan, dan Tinggi Kecepatan

### Zat Alir

Pada kasus aliran air dalam perhitungan memakai sistem satuan MKS dengan nilai  $\gamma = 1 \text{ t(f)/m}^3$ , dengan membagi term pada bagian kiri dan kanan tanda sama dengan pada persamaan  $\gamma = \rho g$ , Hukum Bernoulli dapat juga dinyatakan dengan persamaan:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = \text{konstan} \quad \dots\dots (8.29)$$

dengan  $z$  adalah tinggi tempat (elevasi) dalam satuan panjang (m), adalah tinggi tekanan dalam satuan panjang (m), dan  $\gamma$  adalah berat unit air ( $\text{kg(f)/m}^3$ )

#### Contoh soal 8.1

Air dinaikkan memakai pipa berdiameter 28 cm dan debit sebesar 24 l/s. Tentukan tekanan pada tinggi 2,75 m dari ujung dasar pipa, jika pada ujung dasar tersebut tepat berhubungan dengan pompa dengan tekanan air 12 Pa.

Jawab:

$$D = 28 \text{ cm} = 0,28 \text{ m}$$

$$A = \frac{1}{4} \pi D^2 = \frac{1}{4} \pi 0,28^2 = 0,061575 \text{ m}^2$$

$$Q = 24 \text{ l/s} = 0,024 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$v_1 = v_2 = 0,024/0,061575 = 0,389767 \text{ m/s}$$

$$h_1 = 0 \text{ m}$$

$$h_2 = 2,75 \text{ m}$$

$$p_1 = 12 \text{ Pa}$$

$$p_1 + \frac{1}{4} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{4} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

$$12 + \frac{1}{4} \cdot 1 \cdot 0,389767^2 + 1 \cdot 9,81 \cdot 0 = p_2 + \frac{1}{4} \cdot 1 \cdot 0,389767^2 + 1 \cdot 9,81 \cdot 2,75$$

$$12 + 0,03798 + 0 = p_2 + 0,03798 + 26,9775$$

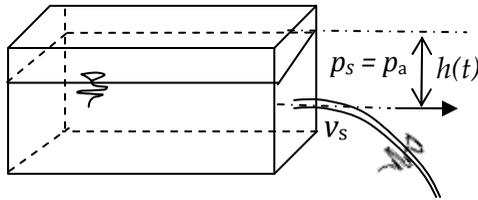
$$p_2 = 12 - 26,9775$$

$$= -14,9775 \text{ Pa}$$

### 8.3.4. Hukum Toricelli

Hukum Toricelli berkaitan dengan banyaknya kasus aliran zat cair melalui lubang pada bejana, antara lain: kecepatan zat cair melalui lubang di tepi bejana terbuka ( $v_s$ ) berisi zat cair merupakan fungsi jarak permukaan zat cair dari as lubang [ $h(t)$ ], di mana jarak tersebut merupakan fungsi waktu [ $f(t)$ ] sesuai persamaan:

$$v_s = \sqrt{2 g h(t)} \quad \dots\dots (8.30)$$



**Gambar 8.9** Kecepatan Zat Cair Keluar Melalui Lubang

Waktu yang diperlukan untuk mengosongkan bejana terbuka (tangki) tersebut dapat dirumuskan:

$$v_s = \frac{2 A}{S} \sqrt{\frac{h(t)}{2 g}} \quad \dots\dots (8.31)$$

dengan  $t$  adalah waktu pengosongan tangki (s),  $A$  adalah luas dasar tangki ( $m^2$ ),  $S$  adalah luas lubang ( $m^2$ ),  $h(t)$  adalah tinggi awal zat cair dalam tangki diukur dari as lubang (m), dan  $g$  adalah konstanta percepatan gravitasi bumi ( $m/s^2$ ).

### 8.3.5. Hukum Stokes

George Gabriel Stokes (1819-1903), seorang ilmuwan berkebangsaan Inggris yang dilahirkan, di Irlandia banyak memberikan sumbangan untuk pengembangan fisika, baik pada bidang optik, akustik, maupun hidraudinamika.

## Zat Alir

Satu di antara hukum-hukum yang dinyatakan adalah tentang gesekan antara bola berjari-jari  $a$  yang bergerak melalui zat alir dengan kecepatan  $v$ , dirumuskan:

$$F_{\text{gesekan}} = -6 \pi \mu a v \quad \dots\dots\dots (8.32)$$

Pada kasus tetes air hujan jatuh bebas di udara, persamaan 8.32 dinyatakan dengan persamaan:

$$F_{\text{gesekan}} = \frac{2}{9} (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{udara}}) g \frac{\sigma^2}{\mu} \quad \dots\dots\dots (7.33)$$

## 8.4 SOAL-SOAL

1. Uraikan secara singkat pola transformasi bentuk zat akibat perubahan suhu, lengkapi jawaban Anda dengan sketsa!
2. Jelaskan Pengertian tinggi tekanan hidraustatis!
3. Uraikan mengenai Hukum Archimedes!
4. Uraikan secara singkat makna kekentalan dan 2 jenis kekentalan zat cair!
5. Tuliskan dan berikan sketsa tentang Hukum Bernoulli!

# BAB 9

## GELOMBANG

Gerak harmonik pada gelombang paling sederhana telah dijabarkan dalam kajian kinematika pada bab terdahulu, di mana gerak harmonik pada gelombang dapat diidentikkan dengan GMB. Dalam bab tersebut telah diuraikan beberapa parameter pada gelombang, sebagai ekspresi fenomena periodik/siklik, yaitu panjang, tinggi, periode, frekuensi, amplitudo, simpangan, cepat rambat, kecepatan sudut, dan angka gelombang. Pada bab ini akan dikaji lebih jauh teori-teori mendasar tentang gelombang.

Gerak Gelombang adalah gerak energi. Gerak gelombang disebut perambatan/ penjalaran/ propagasi, yang memiliki ciri khas bentuk, jarak tempuh, dan waktu tempuh. Bentuknya yang khas dan disebut gelombang merupakan kompensasi dari tekanan, gaya, dan energi yang ditranspor. Jarak tempuh gelombang memiliki ciri khas dapat dinyatakan dalam satuan panjang gelombang. Demikian halnya, waktu tempuh gelombang dapat dinyatakan dalam periode gelombang.

Propagasi energi pada gelombang terjadi dari sumber energi ke ruang di sekelilingnya. Transportasi energi tersebut dapat berlangsung melalui medium zat padat, cair, gas, dan plasma, di samping dapat pula berlangsung tanpa melalui medium tertentu di ruang vakum. Pada hampir semua kasus gelombang, massa medium tidak ditranspor, kecuali *tsunami* dan badai. Pada umumnya gelombang, partikel-partikel penyusun medium, di mana massa medium tersimpan, hanya bergerak secara bolak-balik dengan

## *Gelombang*

simpangan tertentu dari posisinya mula-mula ke posisi lain, kemudian bergerak kembali ke posisinya mula-mula setelah gelombang bersangkutan berlalu. Gerak bolak-balik ini disebut osilasi. Dengan demikian, fenomena gelombang tidak merubah massa medium, karena itu pula bentuk medium umumnya tidak mengalami perubahan akibat dilalui oleh gelombang. Namun demikian, transportasi energi gelombang dapat juga terjadi disertai oleh transformasi massa medium di mana gelombang berpropagasi, pada *tsunami* dan badai. Dalam konteks *tsunami*, partikel-partikel penyusun medium dari permukaan air hingga dasar mengalami gerakan translasi searah dengan arah gelombang. Dalam konteks badai terjadi pula transpor massa udara.

### **9.1 KLASIFIKASI GELOMBANG**

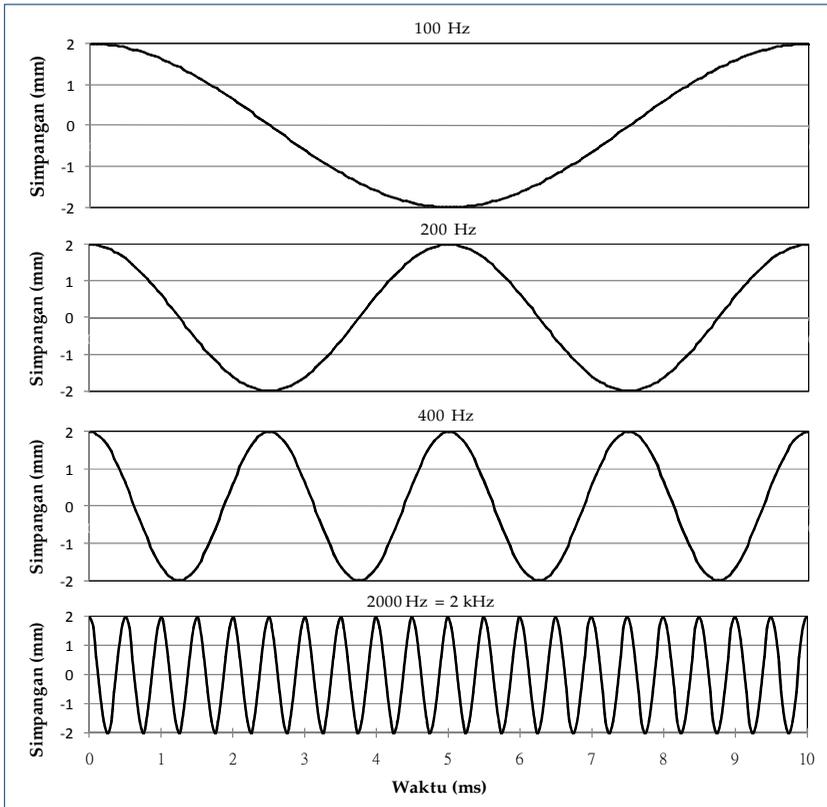
Gelombang dapat diklasifikasikan dalam 3 kelas berdasar gerak partikel medium, medium, dan frekuensi gelombang. Berdasarkan gerak partikel medium, dikenal 3 kelas gelombang:

- 1) **Gelombang longitudinal/ memanjang** (*longitudinal wave*) adalah gelombang dengan arah gerak partikel medium searah dengan arah perambatan gelombang.
- 2) **Gelombang transversal/melintang** (*tranverse wave*) adalah gelombang dengan arah gerak partikel medium tegak lurus terhadap arah perambatan gelombang.

Berdasar pada medium yang dilalui gelombang, gelombang dapat dikelompokkan kedalam 2 kelas yaitu:

- 1) **Gelombang mekanik** (*mechanics wave*) jika merambat melalui medium.
- 2) **Gelombang elektromagnetik** (*electromagnetic wave*) jika merambat melalui semua jenis medium dan vacuum.

Berdasar pada frekuensi gelombang, dikenal berbagai kelas gelombang yang merupakan klasifikasi lebih detil dari klasifikasi yang telah dijabarkan terdahulu. Pokok tersebut tidak dikaji lebih lanjut dalam buku ini karena diluar tujuan penulisan buku ini. Namun, di bagian ini dikaji lebih detil makna frekuensi gelombang.



**Gambar 9.1** Frekuensi Gelombang

Frekuensi merupakan satu parameter penting pada gelombang. Definisi frekuensi  $f$  telah disampaikan dalam persamaan 2.33 pada

## *Gelombang*

Bab 2,  $f = 1/T$  dengan  $T$  adalah periode gelombang. Frekuensi merupakan besaran untuk menyatakan intensitas gelombang dalam satuan waktu, dalam satuan Hz. Pengaruh besar frekuensi terhadap gelombang ditunjukkan dalam Gambar 9.1. Makin besar frekuensi maka makin banyak gelombang terbentuk, periode gelombang dan panjang gelombang makin pendek.

### **9.2 GELOMBANG MEKANIK**

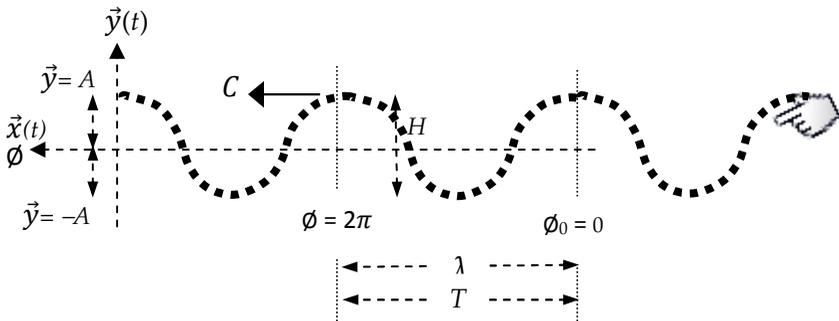
Gelombang mekanik relatif mudah dijumpai dalam kehidupan sehari-hari karena dapat diidentifikasi dengan indera manusia tanpa alat bantu. Gelombang ini merambat melalui medium dan dapat dibedakan dari bentuk dan medium di mana gelombang merambat.

#### **9.2.1. Gelombang Zat Padat**

Gelombang zat padat merupakan gelombang yang menjalar pada medium zat padat. Hingga kini telah banyak dikenal berbagai jenis gelombang yang menjalar melalui zat padat. Misal, gempa bumi, vibrasi lempeng tektonik dan tanah, vibrasi tali/kabel, dan vibrasi pegas. Di antara jenis-jenis gelombang tersebut, gelombang tali (*rope/string wave*) merupakan jenis paling sederhana.

Gelombang tali relatif mudah ditemui dalam kehidupan sehari-hari dan mudah dipraktikkan dengan menggerakkan sebuah tali yang cukup panjang. Satu ujung tali diikatkan pada tiang yang tidak bergerak jika tali digerakkan cukup kuat. Ujung tali lainnya digerakkan ke atas dan ke bawah berulang-ulang, maka akan merambat energi mekanis pada tali membentuk gelombang. Gerak gelombang mulai dari sumber energi, di ujung tali yang digerakkan tangan, ke ujung tali lainnya yang diikatkan pada tiang. Gelombang tali adalah gelombang transversal.

Bentuk tipikal gelombang tali ditunjukkan dalam Gambar 9.2. Pada gambar tersebut, awal gelombang dapat diambil pada  $\phi_0 = 0$  dan terbentuk gelombang hingga  $\phi_0 = 4\pi$ . Gelombang memiliki karakteristik panjang, tinggi, dan periode gelombang berurutan  $\lambda$  m,  $H$  m, dan  $T$  m, di samping frekuensi, cepat rambat  $C$  m/s, amplitudo  $A$  m, simpangan  $\vec{y}(t)$ , dan jarak tempuh  $x(t)$ . Detil parameter tersebut dapat dibaca dalam Bab 2.



**Gambar 9.2** Gerak Gelombang Tali

Teori gelombang tali telah banyak diaplikasikan, antara lain untuk peralatan musik petik dan gesek. Selain itu, teori gelombang tali juga banyak diaplikasikan dalam konteks geraran/vibrasi kawat (*wire vibration*), yaitu gelombang dengan amplitudo  $A$  sangat kecil dibandingkan dengan panjang gelombang  $\lambda$ . Teori vibrasi telah banyak diaplikasikan dalam rekayasa fasilitas-fasilitas infrastruktur, misalnya vibrasi kabel listrik, telepon, dan jembatan gantung.

Jenis gelombang lain dengan medium zat padat dapat berbentuk mirip dengan gelombang tali, tetapi arah penjarannya dapat menyebar baik dalam bidang atau pun ruang. Gelombang ini disebut juga vibrasi, misalnya: vibrasi selaput tipis (*membrane*), lempeng/plat/selaput tebal (*shell*), dan vibrasi partikel tanah.

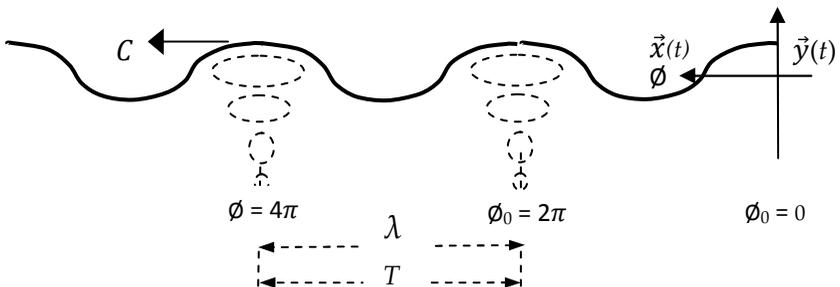
## Gelombang

Gerak pegas merupakan jenis gelombang longitudinal, beda dengan jenis gelombang dengan medium zat padat yang dijelaskan terdahulu. Namun demikian, gerak pegas sering pula disebut dengan vibrasi pegas.

Teori vibrasi banyak diaplikasikan pada analisis dan rekayasa alat musik pukul/ perkusi, stuktur baja, beton, pipa, dan rotor mesin, di samping diaplikasikan juga dalam analisis gempa bumi, ketahanan struktur bangunan terhadap gempa.

### 9.2.2. Gelombang Zat Cair

Gelombang zat air adalah gelombang yang merambat pada medium zat cair. Gelombang zat air memiliki bentuk permukaan seperti gelombang tali, tetapi puncak gelombang dapat lebih runcing dan lembah gelombang lebih lebar. Zat cair yang umum dilalui gelombang adalah air, meskipun dapat juga berupa minyak atau oli. Gelombang air termasuk gelombang transversal, kecuali *tsunami* yang termasuk gelombang longitudinal. Gelombang air dapat merambat ke segala arah tidak seperti gelombang tali yang hanya merambat pada satu arah. Partikel air bergerak bolak-balik disebut dengan **osilasi** (*oscilasi*), di sekitar permukaan air melingkar berbentuk elips dan makin ke bawah berbentuk lingkaran.



Gambar 9.3 Gerak Gelombang Air

Gelombang air umumnya umumnya terjadi di laut atau danau. Gelombang tersebut disebabkan oleh penyerapan energi angin ke perairan, di samping dapat dibangkitkan oleh pergerakan dasar perairan dan gaya tarik benda-benda langit. Gelombang air dapat juga dipraktikkan di kolam dalam laboratorium dengan memberi gaya aksi pada air diam sehingga bergelombang.

Gelombang air dapat diklasifikasikan berdasarkan frekuensi, dari frekuensi yang paling besar ke paling kecil berturut-turut meliputi:

1. gelombang laut,
2. pasang surut,
3. badai,
4. *tsunami*.

Aplikasi teori gelombang air antara lain adalah untuk pembuatan bangunan pelindung pantai, sungai, muara sungai, danau, pelabuhan, dan bangunan lepas pantai, baik yang dibangun oleh pemerintah maupun swasta. Teori gelombang air juga diperlukan untuk keamanan navigasi dan transportasi menggunakan kapal, baik transportasi di sungai, danau, dan saluran air hingga transportasi antar pelabuhan internasional.

### **9.2.3. Gelombang Zat Gas**

Gelombang dengan medium gas antara lain adalah gelombang bunyi, asap keluar kenalpot, asap keluar cerobong, dan gas keluar piston. Udara di atmosfer bumi adalah gas, sehingga gelombang yang merambat pada medium udara dapat juga merambat pada medium gas. Di antara contoh tersebut, gelombang bunyi dijabarkan lebih lanjut dalam bagian ini.

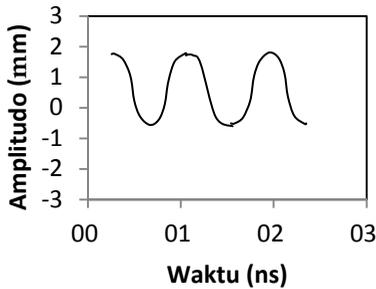
### **A. Gelombang bunyi akustik**

**Gelombang bunyi** (*sound wave*) di alam semesta sering hanya disebut **bunyi** (*sound*). Berbagai ragam bunyi dapat dihasilkan oleh makhluk hidup dan benda mati, misalnya suara manusia, binatang, nyanyian, alat musik, guruh, dan benda yang disentuh ke benda lainnya. Jenis-jenis bunyi itu dikelompokkan dalam kelas **gelombang bunyi benda alami**. Kajian bunyi itu sejak lama dikaji dalam **akustik** (*acoustic*). Dari sumbernya, bunyi menjalar di udara/gas ke segala arah dalam bentuk gelombang transversal. Energi bunyi ditransformasi ke udara di sekitar sumbernya transversal sehingga partikel-partikel udara mengalami vibrasi. Vibrasi partikel-partikel udara ditangkap selaput telinga manusia dengan vibrasi. Vibrasi itu diperkuat dan ditransformasikan dari jaringan telinga ke jaringan otak manusia dalam berbagai frekuensi yang disebut **bunyi yang dapat didengar manusia** (*audible sound*).

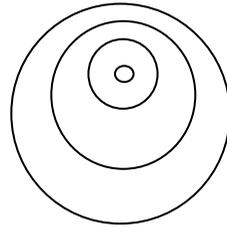
Dalam konteks gelombang bunyi benda alami, gelombang bunyi memiliki karakteristik:

1. merambat melalui medium dan tidak merambat di vakum,
2. dapat menerobos ke dalam ruangan melalui celah sangat sempit yang dapat ditembus udara,
3. cepat rambat dapat mencapai 350 m/s, dan
4. tidak disertai radiasi.

Dalam analisis, bunyi dapat ditinjau dalam konteks 1-D dengan satu arah penjalaran saja, meskipun visualisasi demikian jarang dilakukan. Dalam konteks ini gelombang bunyi merambat secara longitudinal dan divisualisasikan sebagaimana gelombang cahaya dalam teori optik.



(a)

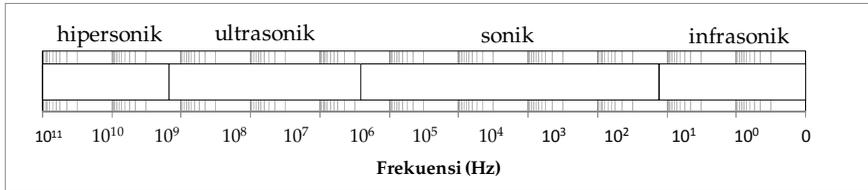


(b)

**Gambar 9.4** (a) Gelombang Bunyi 2-D dengan Amplitudo 1 mm dan (b) Gelombang Bunyi 2-D dengan Lingkaran Puncak Gelombang

Dalam konteks 2-D, lihat Gambar 9.4(a), gelombang bunyi dapat divisualisasikan sebagaimana gelombang tali, lihat kembali gelombang dalam Gambar 9.2. Lihat juga Gambar 9.4(b), gelombang bunyi sering divisualisasikan berbentuk lingkaran-lingkaran yang menghubungkan titik-titik pada puncak gelombang dan atau lembah gelombang. Garis yang menghubungkan posisi/lokasi titik-titik pada gelombang dengan fasa sama demikian disebut dengan **front gelombang** (*wave front*). Dalam visualisasi ini, sumber bunyi berupa titik pada pusat lingkaran terdalam. Energi gelombang bunyi dari sumber bunyi tersebut bergerak menyebar ke semua arah dalam bidang.

Pada konteks 3-D, gelombang bunyi dapat divisualisasikan dalam bentuk kulit bola berlapis-lapis. Kulit bola tersebut merupakan front gelombang bunyi. Sumber bunyi juga divisualisasikan berupa titik yang berada pada pusat bola. Energi gelombang bunyi dari sumber bunyi bergerak menyebar ke semua arah dalam ruang.



**Gambar 9.5** Spektrum Gelombang Bunyi Akustik

Berdasarkan pada frekuensi, bunyi diklasifikasikan dalam 4 jenis (lihat Gambar 9.5) yaitu:

1. infrasonik (*infrasonic*) adalah bunyi dengan frekuensi kurang dari 20 Hz yang tidak dapat didengar manusia tanpa alat bantu;
2. sonik (*sonic*) adalah bunyi yang dapat didengar manusia (*audible sound*), dalam frekuensi antara 20 Hz hingga 20 kHz, sebagai misal bunyi percakapan, peralatan musik;
3. ultrasonik (*ultrasonic*) adalah bunyi dengan frekuensi antara 20 kHz hingga 1 GHz yang tidak dapat didengar manusia tanpa alat bantu. Bunyi dalam kisaran frekuensi ini dapat merusak pendengaran manusia, umumnya dihasilkan mesin-mesin industri dan pesawat terbang. Bunyi dalam frekuensi ini dapat didengar oleh beberapa jenis binatang seperti kelelawar dan ikan lumba-lumba;
4. hipersonik (*hypersonic*) adalah bunyi dengan frekuensi lebih dari 1 GHz yang tidak dapat didengar manusia tanpa alat bantu.

Teori gelombang bunyi diaplikasikan dalam rekayasa pada berbagai bidang kehidupan, antara lain bidang teknik, ilmu bumi, kedokteran, psikologi, dan kesenian. Rekayasa bunyi digunakan untuk pembuatan berbagai sarana dan prasarana yang berkaitan dengan kesehatan dan kenyamanan dari kebisingan. Sebagai misal

adalah untuk pembuatan gedung rumah tinggal, gedung umum, pertunjukan/ opera, ruangan studio musik dan rekaman, penataan ruang wilayah untuk jalan raya, pabrik, bengkel kerja, dan tempat hiburan yang umumnya untuk menghindari kebisingan.

Gelombang bunyi diaplikasikan juga untuk bahasa sandi dan pembuatan peralatan musik baik musik tiup, petik, gesek, dan pukul di samping beberapa aplikasi yang disebutkan terdahulu.

### **B. Gelombang bunyi elektromagnetik**

Bunyi dapat juga dihasilkan oleh benda-benda elektronik buatan manusia, antara lain radio, TV, *syntilyzer*, dan pemancarnya. Jenis-jenis bunyi tersebut diklasifikasikan dalam kelas gelombang elektromagnetik. Dalam konteks ini, bunyi memiliki karakteristik:

1. merambat melalui semua jenis medium dan vakum,
2. dapat menerobos ke dalam ruangan melalui celah sangat sempit yang dapat ditembus udara,
3. cepat rambat dapat mencapai 299.792.458 m/s di vakum, dan
4. disertai radiasi.

Karena dapat merambat di vakum, gelombang ini dapat merambat di luar atmosfer bumi dan dapat melintasi lapisan ionosfer. Karena itu, bunyi jenis elektromagnetik dapat digunakan untuk komunikasi di bidang astronomi.

Teori-teori bunyi jenis gelombang elektromagnetik dikaji lebih lanjut dalam sub bab gelombang elektromagnetik.

## **9.3 GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK**

Gelombang elektromagnetik (gelombang EM, *electromagnetic wave*) adalah gelombang transversal dengan perambatan medan elektrik tegak lurus terhadap medan magnetik. yang merupakan

## *Gelombang*

gelombang yang dapat merambat pada ruang hampa (*vakum*), di samping dapat juga merambat melalui semua jenis medium (padat, cair, dan gas). Banyak jenis gelombang EM yang telah ditemukan hingga akhir abad ke-19, antara lain jenis-jenis gelombang yang diaplikasikan untuk peralatan telegram, faksimili, telepon, dan radio.

Hingga awal abad ke-21 ini, dikenal banyak jenis gelombang EM. Sesuai kronologi penemuannya, cahaya merupakan gelombang EM paling awal ditemukan, dinyatakan oleh Sir Issac Newton tahun 1708 bahwa cahaya memiliki spektrum warna merah, jingga, hijau, kuning, biru, nila, dan ungu. Pada tahun 1800, Freidrich William Herschel menemukan sinar inframerah, lalu setahun kemudian ditemukan sinar ultraviolet oleh Johann Wilhelm Ritter. Gelombang mikro dan radio ditemukan tahun 1886 oleh Heinrich Hertz. Sinar-X atau sinar Röntgen ditemukan tahun 1895 oleh Wilhelm Röntgen. Setelah ditemukan radio oleh Marconi tahun 1899, gelombang *amplitude modulation* (AM) ditemukan oleh Reginald Fessenden tahun 1906. Sinar- $\gamma$  ditemukan oleh Ernest Rutherford tahun 1914. Kemudian gelombang *frequency modulation* (FM) ditemukan oleh Major Edwin Howard Armstrong pada tahun 1933.

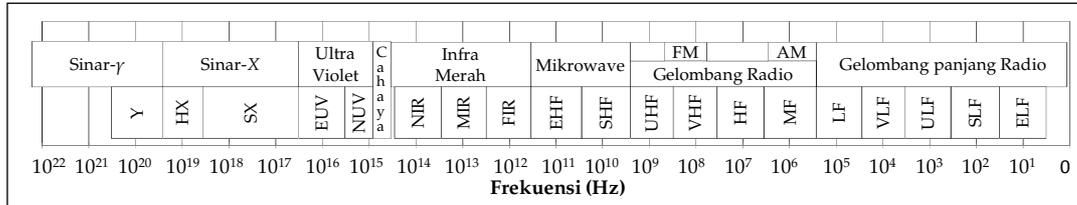
Pemanfaatan gelombang EM baru berkembang cukup pesat setelah didasarkan teori relativitas melalui publikasi *the Evolution of Physics* (1938) oleh A. Einstein dan L. Infeld dan teori mekanika quantum oleh Louis de Broglie melalui publikasi *Introduction of Quantum Mechanics* (1924), selanjutnya diperbarui dengan *An Introduction to the Study of Wave Mechanics* (1990).

Dua teori baru tersebut memunculkan teknologi baru yang disebut teknologi nuklir, teknologi quantum, dan nanoteknologi. Dewasa ini, ketiga teknologi tersebut berkembang sangat pesat karena diaplikasikan pada banyak bidang kehidupan beserta teknologi lainnya, antara lain di bidang optik, komunikasi, biologi, kedokteran, sipil, elektronik, dan kimia.

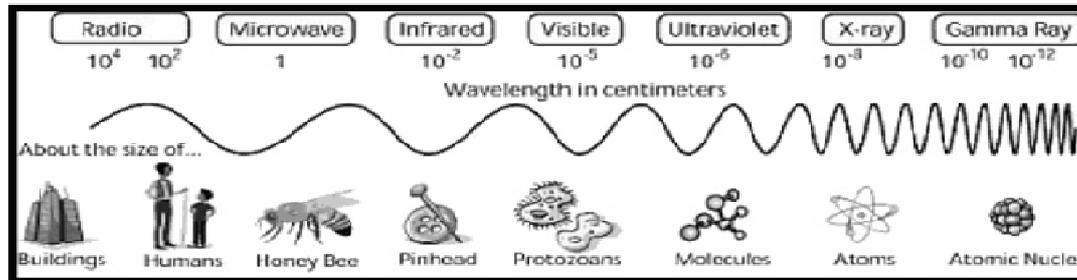
**Tabel 9.1** Indeks Refraksi Udara, Air, dan Kaca Bening

Kelas	Nama	Simbol	Frekuensi
Sinar- $\gamma$	$\gamma$ -rays (Gamma rays)	Y	> 30 EHz
Sinar-X	Hard X-rays	HX	3 EHz – 30 EHz
	Soft X-Rays	SX	30 PHz – 3 EHz
Sinar Ultraviolet	Extreme ultraviolet	EUV	3 PHz – 30 PHz
	Near ultraviolet	NUV	300 THz – 3 PHz
Cahaya			400 THz – 800 THz
Sinar Infrared	Near infrared	NIR	30 THz – 300 THz
	Mid infrared	MIR	3 THz – 30 THz
	Far infrared	FIR	300 GHz – 3 THz
Gelombang Mikro	Extremely high frequency	EHF	30 GHz – 300 GHz
	Super high frequency	SHF	3 GHz – 30 GHz
Gelombang Radio	Ultra high frequency	UHF	300 MHz – 3 GHz
	Very high frequency	VHF	30 MHz – 300 MHz
	High frequency	HF	3 MHz – 30 MHz
	Medium frequency	MF	300 kHz – 3 MHz
	Low frequency	LF	30 kHz – 300 kHz
	Very low frequency	VLf	3 kHz – 30 kHz
	Voice frequency	ULF	300 Hz – 3 kHz
	Super low frequency	SLF	30 Hz – 300 Hz
	Extremely low frequency	ELF	3 Hz – 30 Hz

## Gelombang



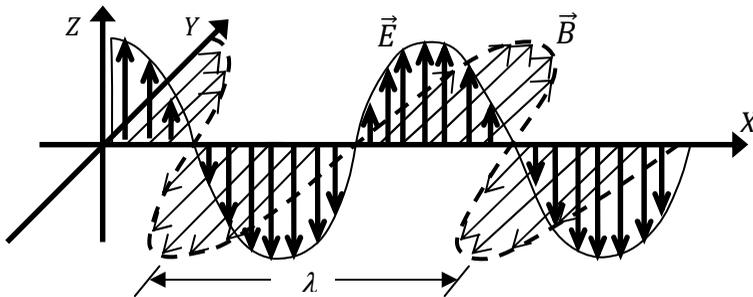
**Gambar 9.6** Frekuensi Gelombang EM



Sumber: Evolution of Physics (1938, Einstein , T.A. dan L. Infeld)

**Gambar 9.7** Panjang Gelombang EM

Pada medium zat padat, cair, atau gas, gelombang EM termasuk gelombang transversal. Profil gelombang EM atau disebut *photon* ditunjukkan dalam Gambar 9.8. Gelombang EM bergerak dari sumber searah sumbu-X. Energi *photon* diukur dalam elektron volts (eV) ditransformasikan dalam medan elektromagnetik  $\vec{E}$  dan  $\vec{B}$ , berturut-turut pada arah sumbu-Z dan sumbu-Y. Panjang gelombang  $\lambda$  adalah jarak antara puncak ke puncak gelombang pada medan elektromagnetik.



**Gambar 9.8** Gelomban EM

Gelombang EM memiliki cepat rambat  $c$  pada ruang vakum, besarnya adalah 299.792.458 m/s. Cepat rambat gelombang EM pada ruang dengan indeks refraksi medium sebesar  $n$  adalah  $c_0$ , dinyatakan secara matematis:

$$n = \frac{c}{c_0} \quad \dots \dots \dots (9.1)$$

**Tabel 9.2** Indeks Refraksi Udara, Air, dan Kaca Bening

Medium	Indeks Refraksi ( $n$ )
Udara	1,0003
Air	1,33
Kaca bening	1,55 ~ 2,42

Cepat rambat, panjang, frekuensi, dan energi gelombang EM memiliki hubungan sangat erat. Hubungan 4 parameter gelombang EM tersebut secara matematis dituliskan:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \dots\dots\dots (9.2)$$

$$\vec{E} = hf \quad \text{atau} \quad \vec{E} = \frac{hc}{\lambda} \quad \dots\dots\dots (9.3)$$

dengan  $\lambda$  adalah panjang gelombang (m),  $c$  adalah cepat rambat gelombang (m/s),  $f$  adalah frekuensi gelombang (Hz),  $\vec{E}$  adalah energi gelombang (eV), dan  $h$  adalah konstanta Plank ( $h \approx 6,626069 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \approx 4,13567 \text{ } \mu\text{eV}/\text{GHz}$ ).

Gelombang EM dapat diklasifikasikan berdasarkan panjang gelombang. Besar energi radiasi gelombang EM bergantung pada panjang gelombang EM. Panjang gelombang makin besar maka frekuensi dan energi gelombang makin kecil. Sebaliknya, panjang gelombang makin kecil maka frekuensi dan energi gelombang makin besar.

Panjang gelombang EM diukur dengan alat spektroskop (*spectroscopy*) dengan ketelitian nano meter (nm). Spektroskop yang ada saat ini dapat mengukur panjang gelombang antara 2 nm hingga 2500 nm. Panjang gelombang cahaya dengan spektrum warna merah, jingga, hijau, kuning, biru, nila, dan ungu berada dalam rentang antara 400 nm hingga 700 nm. Panjang gelombang sinar- $\gamma$  adalah mulai 0.1 nm hingga cm atau m, sebagaimana gelombang radio.

**Tabel 9.3** Pemanfaatan Gelombang EM

<b>Kelas</b>	<b>Sumber</b>	<b>Pemanfaatan</b>	<b>Dampak negatif</b>
Sinar- $\gamma$	Peluruhan bahan radioaktif	Transmisi energi nuklir, deteksi, medis, pembersihan kanker, sterilisasi	Kerusakan sel, mutasi sel, kanker
Sinar-X	Elektron membentur logam	Foto medik dan deteksi benda tersembunyi	Kerusakan sel, mutasi sel, kanker
Sinar Ultraviolet	Gas, benda sangat panas, matahari	Mengaktifkan vitamin D dan ionisasi atom	Kerusakan sel kulit, kanker kulit
Cahaya	Peralatan elektronik (LED), peralatan panas, matahari	Penerangan dan pemanasan alami, energi panas alami, fotografi, transmisi data fiber optik (telepon, TV, dan video)	Kabakaran dan kebutaan jika terkonsentrasi
Sinar Infrared	Peralatan elektronik, peralatan hangat, matahari	Transmisi data remot control, pendeteksian data digital dan gerak partikel maupun benda	Kabakaran jika terkonsentrasi
Gelombang Mikro	Peralatan elektronik, peralatan dingin	Oven dan pemanasan air dan makanan, studi struktur galaxi, navigasi satelit, radar, faksimili, dan Wi-fi	Kabakaran jika terkonsentrasi
Gelombang Radio	Peralatan elektronik, peralatan dingin	Stasiun dan pemancar radio, TV, telepon, navigasi, transmisi data	Aman kecuali terkonsentrasi

## *Gelombang*

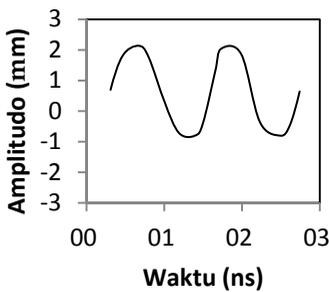
Aplikasi gelombang EM sangat pesat sejak pertengahan abad ke-20 hingga awal abad ke-21 ini, terutama melalui cabang ilmu terapan *quantum electrodynamics (QED)* dengan *nanotechnology*. Pesatnya perkembangan tersebut terutama diinspirasi oleh hasil penemuan metode pembuatan mesin-mesin mini (*micromachines*) oleh Richard Feynman pada tahun 1959. Beberapa contoh aplikasi gelombang EM dimuat dalam Tabel 9.3.

### **9.4 BEBERAPA ISTILAH PADA GELOMBANG**

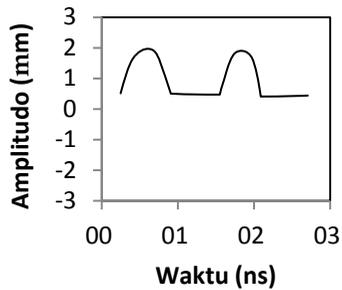
#### **9.4.1. Sinyal**

Informasi penting dalam bentuk gelombang dalam berbagai medium dan vakum yang diukur, ditransmisikan, atau pun diterima disebut dengan sinyal (*signal*). Suatu sinyal mencirikan gelombang. Istilah ini mula-mula digunakan dalam terminologi bunyi/ suara (*sound*). Sejalan perkembangan teknologi dalam penemuan gelombang radio oleh Heinrich Hertz, sinyal yang dibangkitkan secara elektromagnetik lebih lanjut disebut dengan sinyal suara (*audio signal*). Sinyal bunyi tersebut dapat direkam dan diputar ulang dengan *tape recorder*, *magnetic tape*, dan *compact disk player*, serta dapat ditransmisikan dan disiarkan dengan pemancar, atau diolah dengan komputer berbentuk sintesis bunyi (*sound synthesis*).

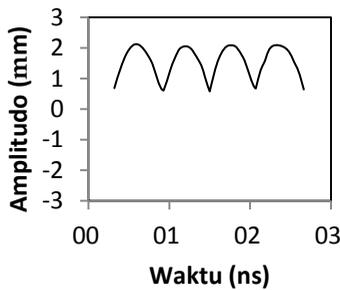
Dalam konteks gelombang EM. Gelombang dalam beberapa kasus perlu diolah dalam lingkup signal. Sebagai misal gelombang aliran listrik dapat diolah pada amplitudo positif atau negatif. Sinyal 1/2 gelombang digunakan untuk pengolahan sinyal bagian positif atau negatif. Sinyal tersebut dapat diinversikan menjadi sinyal gelombang penuh di mana seluruh bagian sinyal memiliki amplitudo positif.



(a) Sinyal Asli



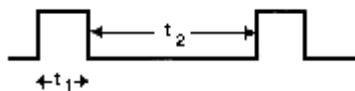
(b) Sinyal 1/2 Gelombang



(c) Sinyal Gelombang penuh

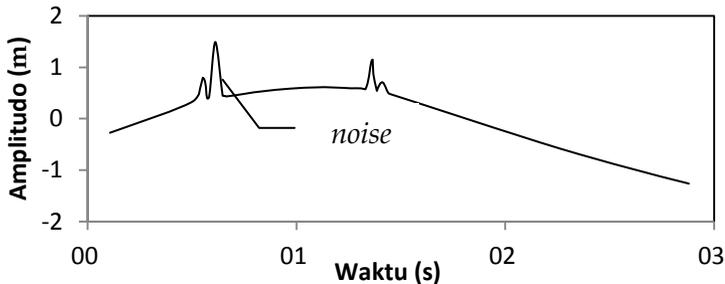
**Gambar 9.9** Sinyal**9.4.2. Pulsa**

Pulsa (*pulse*) adalah sinyal dengan bentuk sangat sederhana dan durasi sangat pendek kurang dari waktu untuk suatu bunyi klik. Durasi pulsa identik dengan impact atau impuls. Sebagai misal pulsa aliran listrik dalam waktu  $t_1$  dan durasi sebagai berikut  $t_2$ .

**Gambar 9.10** Pulsa Suatu Aliran Listrik

### 9.4.3. Noise

Semua jenis gangguan terhadap sinyal atau pun semua bunyi yang tidak diharapkan disebut *noise*. Besar noise dipengaruhi frekuensi dan intensitas bunyi. Bunyi tunggal dengan frekuensi tertentu lebih terganggu daripada banyak bunyi. Bunyi berfrekuensi tinggi lebih terganggu daripada bunyi berfrekuensi rendah.



Gambar 9.11 Noise

Noise direduksi atau dieliminasi baik dalam analisis maupun praktek pengukuran dan transmisi gelombang. Durasi noise umumnya lebih kecil daripada suatu sinyal, namun rentetan noise dapat berdurasi lebih panjang daripada suatu sinyal.

### 9.4.4. Timbre

Suara khas yang dihasilkan oleh seorang disebut timbre atau warna suara (*pitch*). Setiap orang memiliki kemampuan khas untuk menghasilkan suatu suara/bunyi dan nada dengan frekuensi tertentu, misalnya A, B, C, C#, do, re, mi. Kemampuan tersebut dipengaruhi aspek psikologis. Seorang yang memiliki sensitifitas tinggi terhadap frekuensi natural nada dapat menghasilkan suara dengan timbre merdu/ harmoni (*perfect pitch*). Timbre membedakan suara seorang dengan orang lainnya. Timbre juga membedakan alat musik akustik dengan alat musik elektronik.

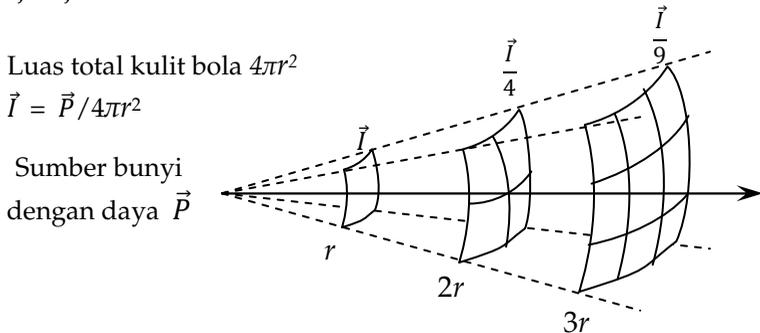
### 9.4.5. Intensitas Gelombang

Gelombang memiliki intensitas yang besarnya dipengaruhi oleh daya dan luas kulit bola sesuai dengan fasa gelombang, secara matematis diformulasikan:

$$\vec{I} = \frac{\vec{P}}{A} \quad \dots \dots \dots (9.4)$$

dengan  $I$  adalah intensitas bunyi ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $\vec{P}$  adalah daya ( $\text{W}$ ), dan  $A$  adalah luas kulit bola ( $\text{m}^2$ ). Intensitas bunyi yang dapat didengar telinga normal manusia hingga  $10^{12}$  pada frekuensi standar 1 kHz.

Intensitas gelombang berkurang dengan bertambahnya jarak penjalaran gelombang. Energi gelombang pada jarak 2 kali jari-jari bola  $r$  bekerja pada luasan 4 kali luasan kulit bola dengan jari-jari bola  $r$ , sehingga intensitasnya adalah  $1/4$  intensitas gelombang dengan jari-jari bola  $r$ .



**Gambar 9.12** Intensitas Bunyi 3-D

Contoh soal 9.1

Tentukan intensitas suara sebuah handphone yang memproduksi suara dengan daya 0,25 mW, jika jarak handphone dari telinga 1 cm.

Jawab:

$$\vec{P} = 0,25 \text{ mW} = 2,5 \times 10^{-4} \text{ W}$$

$$r = 1 \text{ cm}$$

$$\vec{I} = \vec{P}/4\pi r^2 = 2,5 \times 10^{-4} \text{ W} / 4\pi(0,01)^2 = 1,9635 \text{ W}/\text{m}^2$$

## Gelombang

### Contoh soal 9.2

Tentukan daya pada gendang telinga yang ditimbulkan oleh intensitas suara handphone dalam contoh soal no 9.1, jika luasan gendang telinga manusia adalah  $4 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ .

Jawab:

$$\vec{I} = 1,9635 \text{ W/ m}^2$$

$$A = 4 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$\vec{I} = \vec{P} / A, \text{ maka } \vec{P} = \vec{I} A = 1,9635 \cdot 4 \times 10^{-5} = 7,854 \times 10^{-5} \text{ W}$$

### 9.4.6. Kekerasan Bunyi

Tingkat kekerasan bunyi adalah rasio antara intensitas bunyi sesaat dibandingkan dengan intensitas bunyi dalam batas yang dapat didengar oleh manusia ( $\vec{I}_0$ , *TOH*, *threshold of hearing*). Tingkat kekerasan bunyi ( $\beta$ ) dinyatakan dalam satuan decibel (dB) untuk menghargai Alexander Graham Bell, secara matematis diformulasikan:

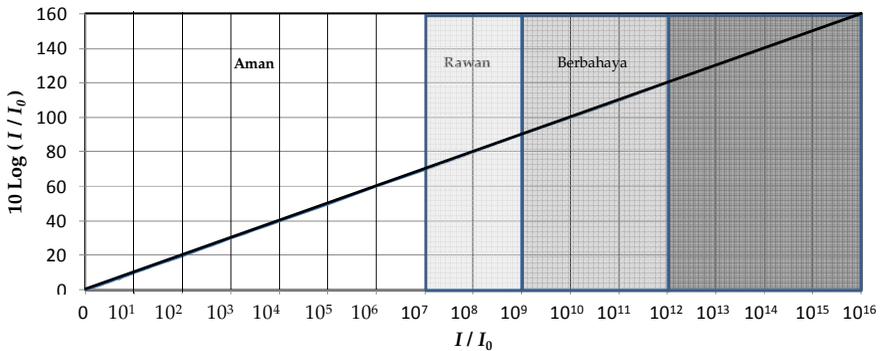
$$\beta = 10 \log \frac{\vec{I}}{\vec{I}_0} \quad \dots \dots \dots \quad (9.5)$$

di mana  $\vec{I}_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$  (*TOH*).

Kebanyakan orang dapat membedakan kekerasan bunyi (JND, *just noticeable difference in sound intensity*) setiap 1 *decibel*, sebanding dengan perubahan intensitas bunyi 10 kali lipat, yang disebut *decibel*.

$$\text{JND} = 1 \text{ decibel} \quad \dots \dots \dots \quad (9.6)$$

Namun demikian, dapat dipahami dengan mudah, JND sesuai untuk suara yang relatif umum dalam tingkat kekerasan suara antara 30 dB hingga 40 dB pada frekuensi rendah atau moderat. Pada tingkat kekerasan suara relatif keras besar JND dapat turun 1/3 hingga 1/2 dari 1 decibel.



**Gambar 9.13** Intensitas Bunyi

**Tabel 9.4** Intensitas dan Kekerasan Bunyi

Sumber bunyi	Intensitas Bunyi, $I$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Kekerasan Bunyi, $\beta$ (dB)	Reaksi Psikologis
Batas pendengaran	$10^{-12}$	0	
Gesekan daun	$10^{-11}$	10	
Bisikan, studio siaran	$10^{-10}$	20	amat hening
Perpustakaan, kamar mandi	$10^{-9}$	30	hening
Ruang keluarga, nyamuk	$10^{-8}$	40	
Kantor, ipod (low)	$10^{-7}$	50	Moderat
Pembicaraan normal	$10^{-6}$	60	
Vakum cleaner, ipod (half)	$10^{-5}$	70	keras
Lalu-lintas sibuk, musik keras	$10^{-4}$	80	

## Gelombang

Lanjutan Tabel 9.4 Intensitas dan Kekerasan ...

Sumber bunyi	Intensitas Bunyi, $I$ ( $W/m^2$ )	Kekerasan Bunyi, $\beta$ (dB)	Reaksi Psikologis
Truck berat, ipod (3/4)	$10^{-3}$	90	kerusakan (setelah 8 jam)
Lorong bawah tanah	$10^{-2}$	100	
Palu pancang pneumatis, ipod (penuh)	$10^{-1}$	110	kerusakan (setelah 2 jam)
Sirine, konser rock	$10^0$	120	berbahaya
Palu pancang	$10^1$	130	
Mesin jet (30 m)	$10^2$	140	amat gila
Mesin jet (10 m)	$10^3$	150	tidak tertoleransi
Mesin jet (3 m)	$10^4$	160	gendang telinga rusak

### Contoh soal 9.3

Tentukan kekerasan bunyi speaker laptop dengan intensitas  $0,1 W/m^2$ .

Jawab:

$$\vec{I} = 0,1 W/m^2$$

$$\beta = 10 \log \frac{\vec{I}}{I_0} = 10 \log \frac{0,1}{10^{-12}} = 110 \text{ dB}$$

## 9.5 FENOMENA-FENOMENA PADA GELOMBANG

Dalam fenomena gelombang selain dikaji proses pembentukan gelombang pada sumber gelombang, dikaji pula perambatan gelombang dan transmisi energi gelombang ke benda yang disentuh gelombang. Lebih detil lagi, pada fenomena perambatan gelombang tidak hanya dikaji karakteristik gelombang (tinggi, panjang, dan frekuensi), namun dikaji pula fenomena-fenomena yang dialami gelombang dalam penjalaran.

Fenomena-fenomena yang dapat dialami oleh gelombang dapat dikelompokkan dalam kelompok fenomena-fenomena umum dan khusus. Fenomena-fenomena umum dapat dialami oleh semua jenis gelombang, sedangkan fenomena-fenomena khusus hanya dialami oleh jenis-jenis gelombang tertentu. Fenomena-fenomena umum dalam penjalaran gelombang yaitu: refraksi, refleksi, difraksi, interferensi, absorpsi, resonansi, harmoni, gelombang berdiri, dispersi, dan penghamburan. Fenomena-fenomena khusus dalam penjalaran gelombang antara lain: polarisasi dan amfidromi.

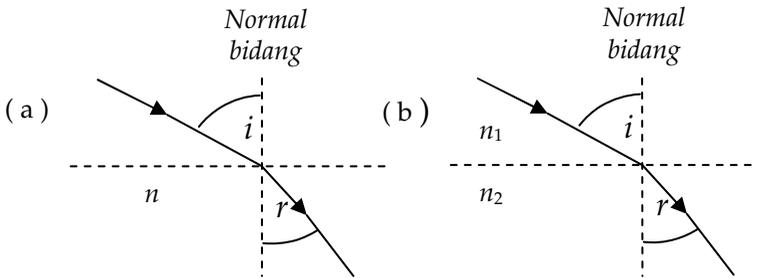
Dalam fenomena transmisi gelombang ke benda yang disentuh gelombang, dikaji bentuk gelombang pada kondisi batas dan transformasi tekanan, gaya, dan energi ke benda bersangkutan.

### 9.5.1. Refraksi

Fenomena pembiasan atau refraksi (*refraction*) adalah pembelokan arah penjalaran gelombang karena melalui medium yang memiliki rapat massa berlainan. Lihat Gambar 9.14(a), refraksi dalam Hukum Snell diformulasikan dengan  $n$  indeks refraksi medium,  $i$  adalah sudut datang (*incident angle*) dan  $r$  sudut refraksi (*refraction angle*):

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} \quad \dots\dots\dots (9.7)$$

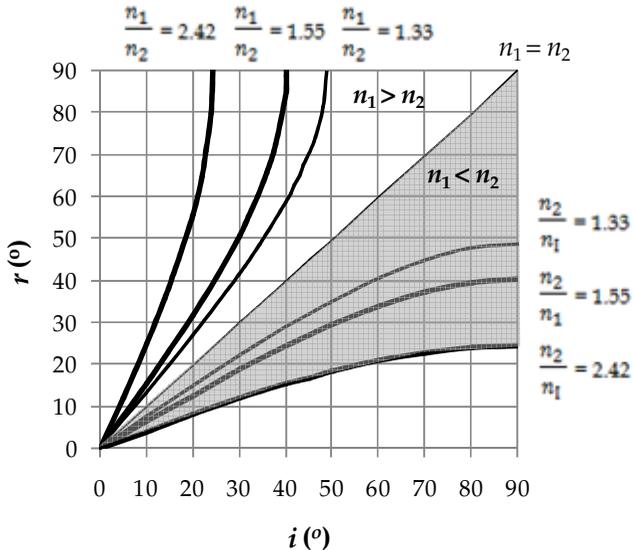
Gelombang



Gambar 9.14 Refraksi Sinar Cahaya

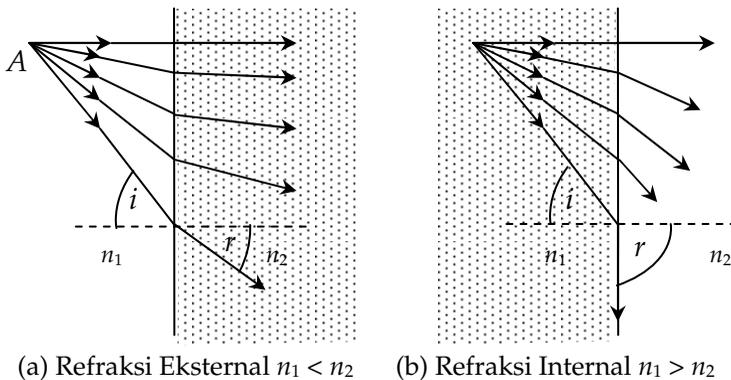
Refraksi gelombang cahaya yang melalui medium dengan indeks refraksi  $n_1$  dan  $n_2$ , lihat Gambar 9.14(b) dinyatakan dengan persamaan:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin i}{\sin r} \quad \dots \dots \dots (9.8)$$



Gambar 9.15 Hubungan Sudut Datang  $i$  dengan Sudut Refraksi  $r$

Refraksi cahaya dapat terjadi dalam 2 kemungkinan, yaitu refraksi eksternal dan internal. Lihat Gambar 9.16 (a), refraksi cahaya disebut **refraksi eksternal** (*eksternal refraction*) jika cahaya datang dari medium dengan indeks refraksi kecil  $n_1$  menembus lapis batas dengan medium yang memiliki indeks refraksi lebih besar  $n_2$ , di mana  $n_1 < n_2$ . Hubungan sudut  $i$  dan  $r$  sesuai dengan bagian luasan yang diarsir tebal dalam Gambar 9.15. Sebaliknya, lihat Gambar 9.16 (b), **refraksi internal** (*internal refraction*) cahaya terjadi jika cahaya datang dari medium dengan indeks refraksi besar  $n_2$  menembus lapis batas dengan medium yang memiliki indeks refraksi lebih kecil  $n_1$ , di mana  $n_1 > n_2$ . Hubungan sudut  $i$  dan  $r$  sesuai dengan bagian luasan yang diarsir tipis dalam Gambar 9.15.



**Gambar 9.16** Refraksi Eksternal dan Internal Cahaya

#### Contoh soal 9.4

Gelombang cahaya membentur kaca bening dengan sudut datang  $30^\circ$ . Tentukan sudut bias di dalam kaca dan sudut bias keluar kaca.

Jawab:

Sudut di dalam kaca

$$i = 30^\circ,$$

Gelombang

$$n = 1,55$$

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

$$\sin r = \frac{\sin i}{n} \text{ didapat:}$$

$$r = \arcsin\left(\frac{\sin i}{n}\right) = \arcsin\left(\frac{\sin 30^\circ}{1,55}\right) = 18,81906^\circ$$

Sudut di luar kaca

$$i = 18,81906^\circ, n = 1/1,55 = 0,645161$$

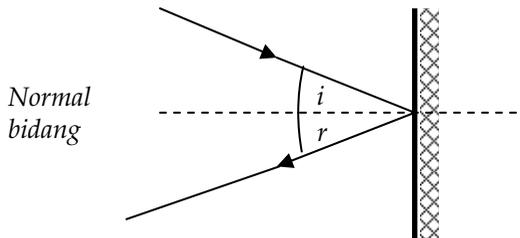
$$r = \arcsin\left(\frac{\sin i}{n}\right) = \arcsin\left(\frac{\sin 18,81906^\circ}{0,645161}\right) = 30^\circ$$

### 9.5.2. Refleksi

Fenomena pantulan atau refleksi (*reflection*) adalah pembalikan arah gelombang karena membentur benda yang memiliki kerapatan sangat padat atau cermin. Cairan bening yang relatif dalam dengan bagian belakang atau dasarnya gelap dapat disebut sebagai cermin, misalnya air telaga atau kolam.

Pada cahaya dengan sudut datang  $i$  dan sudut refleksi  $r$  (*reflection angle*), Hukum Snell tentang refleksi gelombang dinyatakan dengan sudut datang sama dengan sudut refleksi, secara matematis diformulasikan:

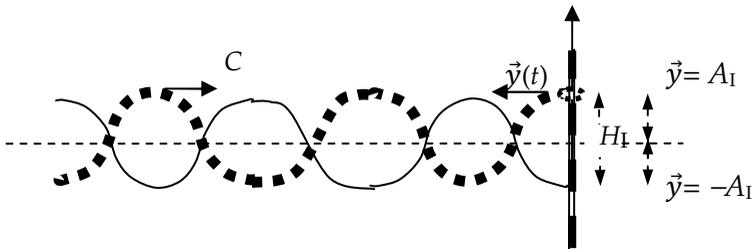
$$i = r \quad \dots\dots (9.10)$$



Gambar 9.17 Refleksi Gelombang Cahaya

Pada gelombang yang merambat pada medium zat padat, cair, dan gas. Refleksi gelombang dinyatakan dengan koefisien refleksi ( $K_R$ , *relection coefficient*) yaitu angka koefisien perbandingan antara tinggi gelombang refleksi ( $H_R$ , *relected wave high*) terhadap tinggi gelombang datang ( $H_I$ , *incident wave high*) dalam satuan prosentase, diformulasikan:

$$K_R = \frac{H_R}{H_I} \cdot 100\% \quad \dots\dots\dots (9.11)$$



**Gambar 9.18** Refleksi Gelombang Zat Padat, Cair, dan Gas

**9.5.3. Interferensi**

Dua gelombang atau lebih dapat mengalami interferensi (*interference*) yaitu superposisi antara satu gelombang dengan gelombang lainnya. Interferensi antara dua atau lebih gelombang dapat saling menguatkan (*construction*) atau mereduksi/menghilangkan (*deconstruction*).

Dua gelombang dengan frekuensi  $\omega/2\pi$  dan fase  $\emptyset$  memiliki amplitudo masing-masing sebesar  $A_1$  dan  $A_2$ . Simpangan yang dibentuk pada kedua gelombang tersebut berturut-turut adalah  $\vec{y}_1(t)$  dan  $\vec{y}_2(t)$  sesuai dengan persamaan 2.51 berikut:

$$\vec{y}_1(t) = A_1 \cos \omega t \quad \dots\dots\dots (9.13)$$

$$\vec{y}_2(t) = A_2 \cos (\omega t + \emptyset) \quad \dots\dots\dots (9.14)$$

## Gelombang

Interferensi antara kedua gelombang  $\vec{y}_1(t)$  dan  $\vec{y}_2(t)$  tersebut menghasilkan gelombang baru  $\vec{y}_3(t)$  yang berbeda dibandingkan dengan gelombang pembentuknya, baik gelombang  $\vec{y}_1(t)$  maupun  $\vec{y}_2(t)$ . Gelombang  $\vec{y}_3(t)$  ditentukan dengan prosedur **superposisi** antara gelombang  $\vec{y}_1(t)$  dan  $\vec{y}_2(t)$ , secara matematis dinyatakan:

$$\vec{y}_3(t) = \vec{y}_1(t) + \vec{y}_2(t) \quad \dots\dots\dots (9.15)$$

Substitusi variabel  $\vec{y}_1(t)$  dalam persamaan 9.13 dan variabel  $\vec{y}_2(t)$  dalam persamaan 9.14 pada variabel  $\vec{y}_1(t)$  dan  $\vec{y}_2(t)$  dalam persamaan 2.15 didapatkan:

$$\vec{y}_3(t) = A_1 \cos \omega t + A_2 \cos (\omega t + \emptyset)$$

$$\vec{y}_3(t) = A_1 \cos \omega t + A_2 \cos \omega t \sin \emptyset + A_2 \sin \omega t \cos \emptyset$$

$$\vec{y}_3(t) = (A_1 + A_2 \sin \emptyset) \cos \omega t + A_2 \sin \omega t \cos \emptyset$$

Dengan mensubstitusikan persamaan  $A_3 \sin \emptyset = A_1 + A_2 \sin \emptyset$  dan  $A_3 \cos \emptyset = A_2 \cos \emptyset$  ke dalam persamaan maka didapatkan:

$$\vec{y}_3(t) = A_3 \cos \omega t \sin \emptyset + A_3 \cos \emptyset \sin \omega t$$

$$\vec{y}_3(t) = A_3 \cos (\omega t + \emptyset) \quad \dots\dots\dots (9.16)$$

$A_3$  adalah amplitudo gelombang  $\vec{y}_3(t)$  hasil interferensi gelombang  $\vec{y}_1(t)$  dan  $\vec{y}_2(t)$ . Dapat dicermati, persamaan gelombang pada persamaan 9.16 sesuai juga dengan persamaan 2.51.

### 9.5.4. Absorpsi

Fenomena absorpsi (*absorbtion*) pada gelombang bergantung pada jenis gelombang dan karakteristik medium yang dilalui gelombang. Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya absorpsi pada masing-masing jenis gelombang dan medium juga tidak sama. Agar lebih jelas, absorpsi gelombang dibahas satu demi satu sebagai berikut.

Pada gelombang zat padat, sebagai misal adalah gelombang tali dan gempa bumi. Pada gelombang tali, absorpsi gelombang terjadi pada ujung-ujung tali/kawat yang diikatkan pada struktur tetap, misalnya tiang. Besar absorpsi tersebut dipengaruhi oleh kekakuan dan stabilitas tiang dalam meredam gelombang. Pada gelombang gempa bumi, berlainan dengan gelombang tali. Pada gempa bumi, absorpsi gelombang dapat terjadi karena perubahan ukuran kristal, porositas, kepadatan, keretakan, gesekan, dan perubahan suhu medium, yang dapat berupa tanah dan batuan di dalam tanah.

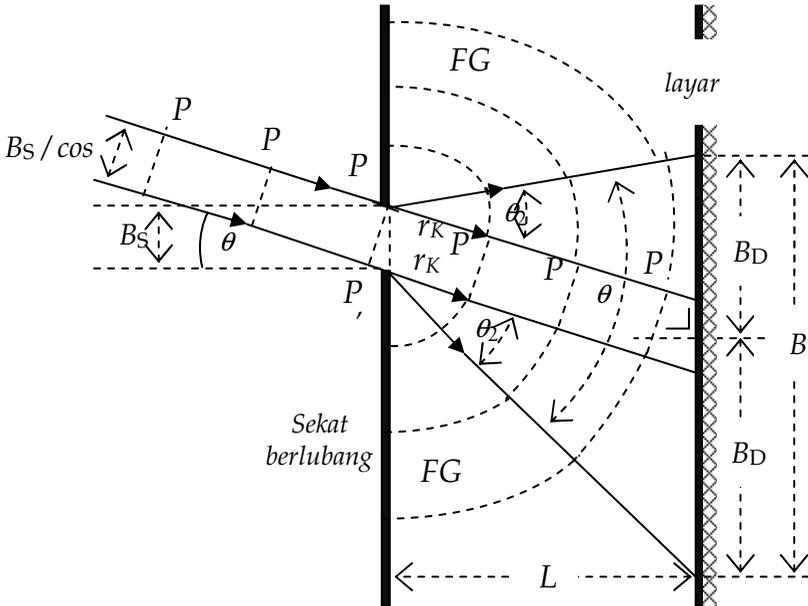
Pada gelombang zat cair, misalnya gelombang laut, absorpsi dipengaruhi oleh besar kemiringan permukaan benda padat yang berhadapan langsung dengan gelombang; di samping porositas, tinggi, ketebalan, dan kekakuan serta stabilitas benda padat yang diterjang gelombang.

Absorpsi pada gelombang bunyi, baik jenis gelombang bunyi akustik maupun elektromagnetik, dipengaruhi oleh porositas dan ketebalan benda yang diterobos oleh gelombang bunyi. Gelombang bunyi hanya dapat diabsorpsi oleh zat padat.

Absorpsi cahaya antara lain dipengaruhi oleh rapat massa, ketebalan, partikel, warna, dan indeks bias/refraksi medium (partikel atau komposisi partikel). Gelombang elektromagnetik selain bunyi dan cahaya dapat juga mengalami absorpsi dalam bentuk absorpsi fotoelektrik, Compton scattering, atau kombinasi kedua jenis absorpsi tersebut.

#### **9.5.5. Difraksi**

Difraksi adalah fenomena pembelokan gelombang ke belakang suatu benda yang tidak dapat ditembus oleh gelombang.



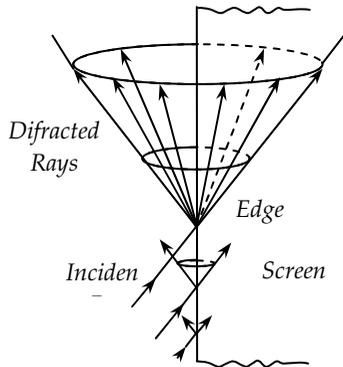
**Gambar 9.19** Difraksi Gelombang Kasus 2-D

Fenomena difraksi 2-D dimuat dalam Gambar 9.19, gelombang dengan tinggi, panjang, dan frekuensi gelombang berturutan  $H$ ,  $\lambda$ , dan  $f$  melewati lubang (slit) dengan lebar  $B_s$ . Gelombang datang menerobos lubang dengan sudut datang  $\theta_1$ , sehingga lebar slit nyata sebesar  $B_s \cos \theta_1$ . Titik  $P_1, P_2$ , dan  $P_3$  adalah front gelombang sebelum gelombang melalui lubang, sedangkan  $P_4, P_5$ , dan  $P_6$  adalah front gelombang setelah melalui lubang. Gelombang ditangkap selebar  $B_D$  pada layar yang berjarak  $L$  dari lubang. Cahaya yang menerobos lubang pada sekat didifraksikan di belakang sekat baik ke kiri maupun ke kanan sekat dengan besar sudut difraksi sama  $\theta_2$ ,

sehingga lebar sudut difraksi total dibelakang layar adalah  $\theta_3$  yang secara matematis diformulasikan:

$$\theta_3 = 2\theta_2 + B_S \quad \dots\dots\dots (9.12)$$

Fenomena difraksi 3-D dimuat Gambar 9.20, gelombang dengan tinggi, panjang, dan frekuensi gelombang berturut-turut  $H$ ,  $\lambda$ , dan  $f$  menyentuh permukaan benda *Edge*.



**Gambar 9.20** Difraksi Gelombang Kasus 3-D

### 9.5.6. Resonansi

Suatu gelombang mengalami resonansi (*resonance*) jika dibangkitkan pada frekuensi naturalnya sehingga terjadi simpangan gelombang yang makin besar. **Frekuensi natural** (*natural frequency*) benda adalah frekuensi yang terkandung pada jika benda tersebut mengalami gelombang, *oscilasi*, atau pun vibrasi. Setiap benda memiliki frekuensi natural, seperti tebing batuan, dawai, seruling, jembatan, gedung, dan antena. Vibrasi atau gelombang dapat dibangkitkan pada benda oleh energi alami maupun dengan gelombang lain yang memiliki frekuensi sama. Jembatan dapat mengalami resonansi oleh terpaan angin dari sisi jembatan jika

## *Gelombang*

terbangkitkan gelombang pada frekuensi naturalnya. Sebuah dawai gitar dapat digetarkan dengan menggetarkan dawai lainnya pada gitar bersangkut, yang memiliki frekuensi sama. Pada gelombang zat cair, resonansi dapat terjadi pada kolam atau danau yang disebut juga dengan fenomena *seiching*. *Seiching* dapat dibangkitkan oleh energi angin atau gempa bumi. Resonansi bunyi dapat terjadi di dalam gua, lubang dalam tanah, atau pun ruangan tertutup akibat udara dalam ruangan tergetarkan pada frekuensi naturalnya.

### **9.5.7. Harmoni**

Suatu resonansi dikatakan harmoni (*harmonic*) jika frekuensi natural benda secara alami atau dirancang berdasar ketentuan tertentu sehingga nyaman dilihat, didengar, dan dirasakan. Pendulum dapat dirancang agar bergerak harmoni dengan frekuensi naturalnya. Gelombang air dapat juga dirancang bergerak harmoni dengan frekuensi naturalnya oleh pengaruh usikan ke dalam air. Semua peralatan musik dirancang memenuhi kaidah frekuensi natural tertentu sehingga harmoni didengarkan.

### **9.5.8. Gelombang Berdiri**

Dua gelombang yang beresonansi atau berinterferensi dapat membentuk gelombang berdiri (*standing wave*) jika frekuensi dan sudut fasa kedua gelombang sama sehingga simpangan yang terbentuk sebesar superposisi kedua gelombang. Pada gelombang berdiri yang timbul karena resonansi, gelombang berdiri terjadi akibat interferensi antara gelombang resonansi dengan gelombang pembangkit pada dua benda berlainan. Adapun pada gelombang berdiri yang timbul oleh interferensi, umumnya dibangkitkan oleh interferensi gelombang datang dengan gelombang refleksi ketika kedua gelombang memiliki fasa sama.

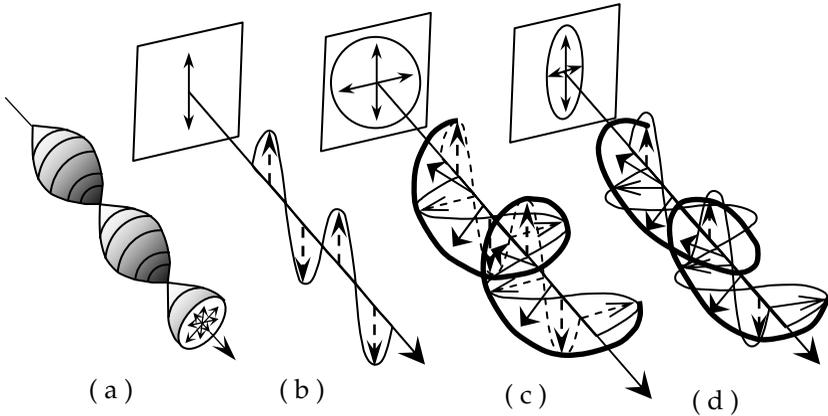
Gelombang berdiri menghasilkan energi dan daya kelipatan dari gelombang asal yang beresonansi. Pada suatu orkestra atau simphoni, gelombang berdiri menguntungkan karena menghasilkan suara harmoni yang penuh daya dan energi. Peralatan dalam orkestra atau simphoni memang dirancang untuk memadukan banyak frekuensi natural yang harmoni. Pada gelombang zat padat dan cair, energi gelombang berdiri dapat menimbulkan dampak negatif yang jauh lebih berbahaya daripada gelombang penyusunnya. Gelombang berdiri pada cahaya juga dapat menimbulkan dampak negatif yang jauh lebih berbahaya.

#### **9.5.9. Polarisasi**

Gelombang elektromagnetik (EM) merupakan jenis gelombang yang dapat mengalami polarisasi. Dengan demikian, cahaya dan bunyi yang bersifat elektromagnetik dapat mengalami polarisasi, meskipun cahaya dan bunyi alami umumnya tidak mengalami polarisasi dan menyebar dari sumbernya ke segala arah dalam ruang.

Fenomena **polarisasi** (*polarization*) adalah perubahan pola penjalaran gelombang akibat penyerapan (absorbpsi) sebagian energi gelombang. Polarisasi dilakukan dengan melewatkan sinar gelombang menerobos suatu filter sehingga sebagian energi gelombang diredam/ diserap oleh filter tersebut. Filter untuk polarisasi umumnya disebut *polalizer*, misalnya polaroid. Metode polarisasi digunakan untuk mempelajari penjalaran gelombang dalam bentuk sinar gelombang dan vibrasi partikel medium yang dilalui gelombang.

## Gelombang



Keterangan: (a) sinar cahaya dengan semua arah vibrasi, (b) sinar cahaya dengan polarisasi linier, (c) sinar cahaya dengan polarisasi lingkaran, dan (d) sinar cahaya dengan polarisasi elips

**Gambar 9.21** Polarisasi Gelombang EM

Polarisasi gelombang EM dapat dilakukan dalam 3 bentuk, yaitu: polarisasi linier, lingkaran, dan elips. **Polarisasi linier** (*linier polariation*) dibentuk memakai filter untuk melewatkan 1 arah vibrasi gelombang EM. **Polarisasi lingkaran** (*circular polariation*) dibentuk memakai filter untuk melewatkan 2 arah vibrasi gelombang EM dengan beda phase antar kedua gelombang  $\lambda/4$ . Sedangkan **polarisasi elips** (*elliptical polariation*) dibentuk menggunakan filter untuk melewatkan 2 arah vibrasi gelombang EM dengan beda phase antar kedua gelombang selain  $\lambda/4$ .

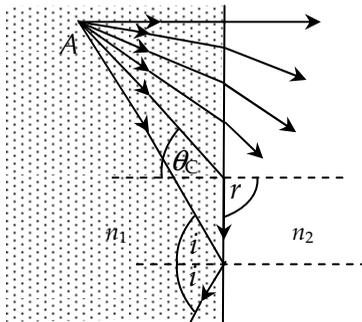
### 9.5.10. Refleksi Internal Total

Suatu gelombang dapat mengalami fenomena refleksi internal total (*total internal reflection*) jika sudut datang gelombang melebihi sudut kritis refraksi ( $\theta_c$ ) sehingga gelombang direfleksikan oleh lapis

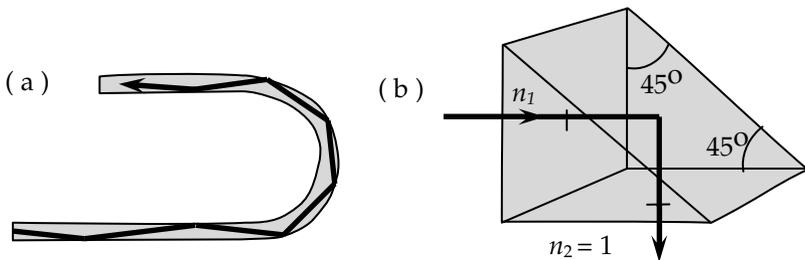
batas antara medium dengan indeks refraksi  $n_1$  dan  $n_2$ . Sebagaimana dalam Gambar 9.22, sudut kritis pada refraksi internal dengan  $n_1 > n_2$  dirumuskan:

$$\theta_c = \text{arc sin} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \quad \dots\dots\dots (9.13)$$

Kondisi itu menjadikan lapis batas medium berfungsi sebagaimana cermin. Contohnya, sudut kritis refraksi internal total cahaya dari kaca ( $n_2 = 1,55$ ) ke udara ( $n_2 = 1,000277$ ) adalah  $\theta_c = 40,1911722$ . Fenomena ini penting dalam pemakaian peralatan optis prisma dan fiber.



**Gambar 9.22** Refraksi Internal Total Cahaya



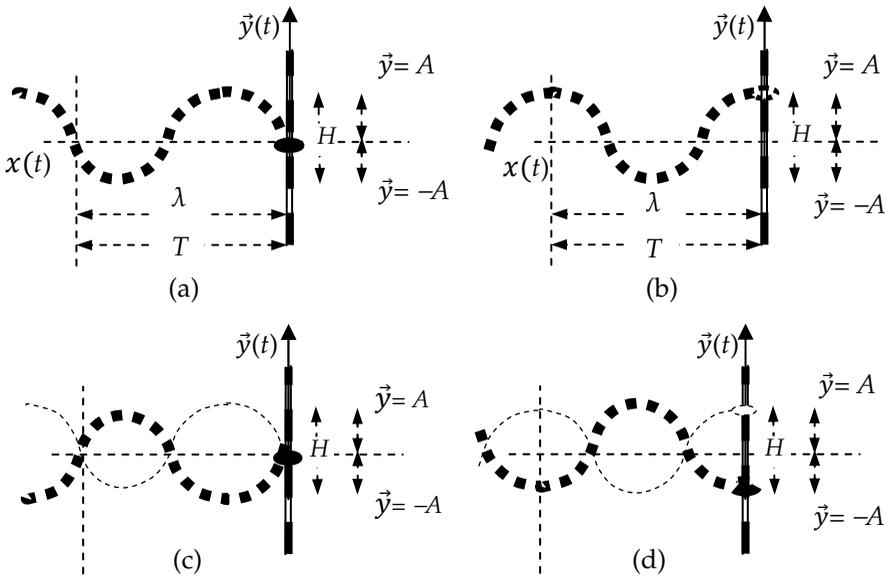
**Gambar 9.23** Refleksi Internal Total pada (a) Fiber Optik dan (b) Prisma

### **9.5.11. Amphidromi**

Suatu titik atau daerah berbentuk cekungan dapat terjadi di laut akibat gelombang pasang surut. Lokasi tersebut tepat pada pertemuan node pada lengkung gelombang pasang surut dari beberapa arah.

## **9.6 BATAS-BATAS DAERAH GELOMBANG**

Batas-batas daerah di mana gelombang menjalar tidak sama antara satu jenis gelombang dengan jenis gelombang lainnya. Pada gelombang tali, batas daerah gelombang terletak pada batas-batas antara tali sebagai medium zat padat dengan medium lain di sekitarnya. Batas-batas pada arah memanjang menyesuaikan dengan bentuk gelombang, yang dipengaruhi oleh tekanan, gaya, dan energi pada titik searah memanjang tali. Lihat Gambar 9.24, batas-batas pada ujung tali dapat berupa satu di antara 2 bentuk **kondisi batas** (*BC, boundary condition*). Bentuk pertama jika ujung tali diikat dengan simpul pada struktur yang tetap. Struktur tali umumnya dipasang dengan cara ini, dua ujung tali dipasang tetap pada tiang, misalnya kabel listrik dan telepon. Saat terjadi gelombang, Gambar 9.24(a) dan Gambar 9.24(c), ujung tali tetap berada pada posisinya, di mana diikatkan. Bentuk kedua jika ujung tali tidak diikat dengan simpul pada struktur yang tetap, tetapi diikatkan pada cincin yang dapat bergerak ke atas dan ke bawah pada struktur tetap. Ketika tali mengalami fenomena gelombang, maka ujung tali beserta cincin akan bergerak ke atas ke bawah dengan simpangan  $\vec{y}$  maksimal sebesar amplitudo gelombang  $A$ , tampak pada Gambar 9.24(b) dan Gambar 9.24(d).



**Gambar 9.24** Batas Ujung pada Gelombang Tali dan Gelombang Laut

Kondisi batas pada gelombang laut sedikit berlainan dibandingkan dengan gelombang tali. Pada gelombang laut, batas bawah adalah dasar laut dan batas atas adalah permukaan air laut yang bergelombang. Batas ujung-ujung daerah sebagai mana dalam Gambar 9.24(b) dan Gambar 9.24(d), dengan simpangan maksimal  $\vec{y}$  sebesar amplitudo gelombang  $A$ .

Gelombang bunyi dan cahaya memiliki batas-batas daerah berupa permukaan benda yang berhubungan dengan gelombang bersangkutan dengan simpangan maksimal  $\vec{y}$  sebesar amplitudo gelombang  $A$ , sebagai mana dalam Gambar 9.24(b) dan Gambar 9.24(d).

## **9.7 DAMPAK-DAMPAK GELOMBANG**

### **9.7.1. Likuifaksi**

Butiran tanah dan batuan pada bagian permukaan maupun dalam tanah mengalami vibrasi ketika gempa bumi. Vibrasi tersebut dapat merubah kondisi tanah dari bersifat padat menjadi cair yang disebut likuifaksi (*liquifaction*). Karena bersifat cair partikel-partikel tanah menjadi mudah berpindah sehingga tanah menjadi mudah longsor.

Likuifaksi dapat berdampak mereduksi daya dukung tanah dalam menahan beban di atas dan di sampingnya sehingga menimbulkan amblesan tanah dengan atau tanpa bangunan di atasnya.

### **9.7.2. Abrasi**

Abrasi (*abrasion*) adalah peristiwa defisit material dasar pada suatu sungai atau pantai akibat ketidakseimbangan transpor sedimen pantai, material yang masuk melebihi yang keluar. Arus dan gelombang merupakan agen gaya yang menghantam dasar dan tebing. Bersamaan proses itu terjadi transpor material yang dapat menimbulkan defisit material.

### **9.7.3. Sedimentasi Berlebihan**

Sedimentasi berlebihan (*over sedimentation*) adalah peristiwa surplus berlebihan material sungai atau pantai di suatu pantai akibat ketidakseimbangan transpor sedimen pantai. Material yang keluar melebihi yang masuk. Fenomena sedimentasi berlebihan demikian berkebalikan dengan abrasi.

#### **9.7.4. Metamerisme**

Warna suatu benda dapat dipengaruhi warna cahaya. Benda dapat memiliki warna yang berbeda apabila disinari dengan warna cahaya yang berbeda. Warna cahaya dipengaruhi oleh frekuensi gelombang cahaya yang lebih lanjut dapat dipengaruhi oleh waktu, arah datang gelombang, pantulan cahaya dari permukaan benda lain, cuaca, dan musim.

Tinjauan terhadap metamerisme penting dalam perencanaan warna elemen benda dan warna elemen ruangan, baik dalam tata ruang dalam maupun tata ruang luar. Selain itu, tinjauan metamerisme penting pula dilakukan dalam fabrikasi, di mana warna produk fabrikasi harus sama dengan warna sampel atau pun model.

#### **9.7.5. Fluorescence**

Suatu benda yang menyerap cahaya dengan panjang gelombang tertentu dan memantulkan cahaya dengan panjang gelombang tertentu lainnya. Fluorescence pertama kali dinyatakan oleh Sir George Stokes pada awal tahun 1800. Kata fluorescence diambil dari fluorite yaitu suatu jenis mineral yang tampak biru menyala (*fluoresce*) akibat terpaan sinar ultraviolet, sinar-X, atau cahaya. Kebanyakan mineral di alam tidak termasuk fluorescence. Sebagai contoh benda fluorescence adalah lampu fluorescent. Lampu ini dibuat dengan melapisi bagian dalam tabung kaca dengan serbuk mineral fluorescence atau phosphor.

#### **9.7.6. Efek Fotolistrik**

Fenomena efek fotolistrik (*photoelectric*) adalah emisi/pelepasan elektron dari permukaan materi baik menangkap maupun menyerap radiasi gelombang EM.

### **9.7.7. Insolasi**

Fenomena energi radiasi matahari yang sampai ke bumi disebut *insolasi* (*insolation, incoming solar radiation*). Energi tersebut dihantar oleh berbagai frekuensi gelombang elektromagnetik, terutama sinar inframerah dan ultraviolet. Besar insolasi dipengaruhi oleh fenomena refraksi, difraksi, interferensi, refleksi, absorpsi, dan pemencaran dalam transmisi energi radiasi oleh gelombang EM dari matahari ke bumi.

### **9.7.8. Kebisingan**

Kebisingan adalah semua suara yang tidak dikehendaki dan dapat menimbulkan gangguan yang pada tingkatan tertentu dapat merusak pendengaran. Kebisingan ditimbulkan oleh volume bunyi (*loudness*) yang melebihi batas toleransi atau nilai ambang volume bunyi. Volume bunyi bergantung pada intensitas dan amplitudo gelombang bunyi. Namun, dampak volume bunyi pada seseorang dapat dipengaruhi kondisi psikologis dan vitalitas orang bersangkutan.

Dalam konteks produktifitas kerja misalnya, nilai ambang volume bunyi (NAVB) di tempat kerja dapat diambil sebesar 85 dB yang dapat diterima pekerja tanpa mengakibatkan penyakit atau gangguan kesehatan untuk waktu kerja tidak melebihi 8 jam/hari atau 40 jam/minggu.

### **9.7.9. Efek Doppler**

Efek Doppler merupakan fenomena yang dialami oleh pengamat ketika mengamati bunyi suatu obyek yang bergerak, berupa peningkatan atau penurunan frekuensi gelombang bunyi yang ditimbulkan obyek tersebut sebagai dampak dari penambahan

atau pengurangan panjang gelombang. Fenomena efek tersebut dinyatakan oleh Christian Andreas Doppler pada tahun 1842.

Contoh soal 9.5

Tentukan cepat rambat gelombang radio yang memiliki frekuensi gelombang 480 siklus/s dan panjang gelombang 32 cm.

Jawab:

$$f = 480 \text{ siklus/s}$$

$$\lambda = 32 \text{ cm} = 0,32 \text{ m}$$

$$v = f\lambda = 480 \cdot 0,32 = 1,536 \times 10^2 \text{ m/s}$$

Contoh soal 9.6

Suatu gelombang radio dipancarkan dengan panjang gelombang 0,290 km dan cepat rambat gelombang  $3 \times 10^8$  m/s. Tentukan frekuensi gelombangnya.

Jawab:

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

$$\lambda = 0,29 \text{ km} = 290 \text{ m}$$

$$v = f\lambda \text{ maka:}$$

$$f = v/\lambda = 3 \times 10^8 / 290 = 967741,9355 \text{ Hz} = 967,7 \text{ kHz}$$

Contoh soal 9.7

Seorang berada di atas sampan di sekitar pantai dan mengukur sampan yang dinaikinya naik turun 4 kali dalam 5 sekon serta memprediksi jarak antar puncak ke puncak gelombang sebesar 0,6 m. Tentukan cepat rambat gelombang setempat.

Jawab:

$$f = 4 / 5 = 0,8 \text{ Hz}$$

$$\lambda = 0,60 \text{ m}$$

$$v = f\lambda = 0,8 \cdot 0,6 = 0,48 \text{ m/s}$$

### **9.8 SOAL-SOAL**

Kerjakan soal-soal berikut dalam bahasa Inggris.

1. A primary earthquake wave travels at  $8.0 \text{ kms}^{-1}$  and has a period of 0.20 seconds. Find how long it would take to travel 160 km, its wavelength and its frequency.

$$(t = 20 \text{ s}, \lambda = 1600 \text{ m}, f = 5.0 \text{ Hz})$$

2. What is the frequency of microwave radiation with a wavelength of 3 cm?

$$(f = 1 \times 10^{10} \text{ Hz})$$

3. Water waves hit a sandbank at 0.45 metres per second and are estimated to be 9 metres apart. Calculate the frequency of the water waves and their period.

$$(f = 0.05 \text{ Hz}, T = 20 \text{ s})$$

4. Green light has a frequency of  $5.5 \times 10^{14} \text{ MHz}$ . Calculate the wavelength of green light.

$$(\lambda = 5.45 \times 10^{-7} \text{ m} \approx 550 \text{ nm})$$

5. What are the wavelengths of FM radio waves emitted by a radio station at a frequency of 105.7 MHz if the speed of radio waves is  $3.0 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ?

$$(\lambda = 2.84 \text{ m})$$

6. Water waves are generated in a shallow ripple tank and measurements show that the distance between successive crests is 25 mm. If the waves travel 200 mm in 8 seconds, calculate the speed of the waves, their wavelength and frequency.

$$(v = 0.025 \text{ ms}^{-1}, \lambda = 0.025 \text{ m}, f = 1 \text{ Hz (1 cycle per second)})$$

7. Electrical wires in the home contain alternating currents of frequency at 50 cycles per second. They behave as aerials and generate electromagnetic radiation. Calculate the wavelength of the electromagnetic radiation generated.

$$(\lambda = 6 \times 10^6 \text{ m or } 6000 \text{ km})$$

Kerjakan soal-soal berikut dalam bahasa Indonesia.

8. Sebutkan klasifikasi gelombang beserta jenis-jenis gelombang dalam klasifikasi yang Saudara sampaikan.
9. Jelaskan secara singkat 5 fenomena di antara fenomena-fenomena umum pada gelombang, masing-masing penjelasan fenomena maksimal 5 baris.
10. Jelaskan dampak-dampak yang dapat ditimbulkan gelombang dan sebutkan jenis gelombang yang berkaitan dengan dampak tersebut.
11. Jelaskan fenomena refleksi internal total.
12. Jelaskan fenomena polarisasi.
13. Sebutkan karakteristik gelombang bunyi akustik dan gelombang bunyi elektromagnetik.
14. Dua gelombang merambat pada medium zat cair dengan persamaan  $\vec{y}_1(t) = 1,4 \cos \omega t$  dan  $\vec{y}_2(t) = 1,4 \cos (\omega t + \emptyset)$ . Tentukan gelombang interferensi untuk  $\emptyset = \pi/2$  dan  $\emptyset = \pi$ .
15. Gelombang zat cair merambat dari lokasi A dengan persamaan  $\vec{y}_1(t) = 1,4 \cos \omega t$  dan periode  $2\pi$  sekon. Pada arah berlawanan merambat gelombang  $\vec{y}_2(t) = 0,8 \sin \omega t$  dari lokasi B dengan periode  $\pi$  sekon. Tentukan simpangan gelombang interferensi antara kedua gelombang saat 1 menit.



# BAB 10

## O P T I K

Sebelum masa awal abad ke-20, sebelum kajian cahaya ditekankan dalam lingkup mikroskopik dalam terminologi gelombang EM melalui fisika modern dan mekanika quantum, telah dikembangkan teori-teori tentang cahaya dalam kajian optik. Beberapa pokok kajian dalam optik antara lain: cahaya, pengelihatan, warna, cermin dan lensa. Teori-teori optik banyak diaplikasikan untuk mengembangkan peralatan di bidang astronomi, kedokteran, teknik, seni, dan bidang-bidang lainnya. Peralatan tersebut mendukung pula perkembangan ilmu di bidang tersebut.

Sesuai dengan pokok-pokok kajian dalam optik, istilah **optik** (*optics* atau *optiks*) yang diambil dari Bahasa Latin *optica* definisikan sebagai ilmu yang mengkaji cahaya dan pengelihatan. Ilmu cahaya yang dikaji dalam optik merupakan ilmu yang paling tua dalam mengkaji gelombang. **Banyak teori-teori gelombang selain cahaya yang didasarkan pada teori-teori cahaya dalam optik.** Oleh karena itu, dalam mempelajari gelombang, pemahaman tentang cahaya dalam optik merupakan suatu hal yang fundamental.

Setelah dicanangkan fisika modern dan mekanika quantum pada tahun 1905 dan 1923, di mana cahaya merupakan bagian dari gelombang EM, ilmu optik dikembangkan lebih lanjut melalui ilmu optika quantum (*quantum optics*). Dalam optika quantum, dikembangkan teori-teori optika elektromagnetik (*electromagnetic optics*). Dalam optik elektromagnetik dikaji gelombang EM, termasuk gelombang dan sinar cahaya.

## Optik

Sejalan dengan perkembangan mekanika quantum, khususnya optika quantum dan optika elektromagnetik, makin banyak peralatan elektronik dan optik elektrik dapat diciptakan. Benda-benda yang telah dibuat dengan mengaplikasikan sistem optik sejak awal abad ke-20 hingga kini, termasuk peralatan elektronik dan optik elektrik, dapat dikelompokkan berdasar fungsinya dalam 5 kelas dalam Tabel 10.1, yaitu:

1. pembangkit (*generator*)
2. penangkap, pemfokus, pemantul (*reflector*)
3. transmisi (*transmitter*)
4. penyerap (*absorber, filter*)
5. penghambur (*dissipator*)

**Tabel 10.1** Benda-benda Optik dan Fungsinya

Kelas Fungsi	Peralatan Optik
Pembangkit	<i>Optic 1 (HOTs, Holographic Optical Tweezing), satelit, laser</i>
Penangkap, pemfokus, atau pemantul	cermin, cermin cekung, kaca pembesar, reflektor lampu, <i>soflens</i> , kornea, kamera, lensa kamera, mikroskop, mikroskop elektron, mikroskop fasa-kontras, mikroskop atom, cermin <i>vigilance</i> , peralatan kedokteran gigi ( <i>illuminating examination mirror, optical loupes, fiber optic drill tool, fibre optics confocal instrument, binocular loupes, ophthalmoscope</i> ), teodolith, <i>waterpass</i> , GPS <i>reciever</i> , spion kendaraan, <i>radar, ultrasonography (USG)</i>

Lanjutan Tabel 10.1 Benda-benda . . .

Kelas Fungsi	Peralatan Optik
Transmisi	kacamata, 6 tipe lensa, teleskop, spektroskop, refractometers, <i>inferometer</i> , <i>compact disk</i> , pemanas <i>microwave</i> , fiber optik, <i>OHP</i> , <i>viewer</i> , <i>pointer</i> , cetakan, <i>printer</i> , <i>radio</i> , <i>TV</i> , <i>wilreless LAN</i> , <i>internet</i> , telepon genggam, <i>bluetooth</i> , digitalisasi domain, diskretisasi domain, jendela, <i>glassblock</i>
Penyerap	<i>solarcells</i> , film camera, pengukur radiasi EM, <i>filter cahaya</i> , <i>polaroid</i>
Penghambur	cermin cembung, penghambur elektrostatik

Benda-benda dengan sistem optik dalam Tabel 10.1 dapat juga dikelompokkan berdasar bidang ilmu di mana benda tersebut diterapkan sebagaimana dalam tabel berikut.

**Tabel 10.2** Benda-benda Optik dan Bidang Aplikasinya

Bidang ilmu	Peralatan Optik
Semua bidang ilmu	<i>reflektor</i> lampu, cermin, cermin cekung, cermin cembung, 6 tipe lensa, kaca pembesar, <i>binocular loupes</i> , <i>compact disk</i> , pemanas <i>microwave</i> , fiber optik, satelit, <i>Optic 1 (HOTs, holographic optical tweezing)</i>

Lanjutan Tabel 10.2 Benda-benda dan Bidang . . .

Bidang ilmu	Peralatan Optik
Pers dan Komunikasi	<i>OHP, viewer, pointer, cetakan, printer, radio, TV, radar, wireless LAN, internet, telepon genggam, bluetooth</i>
Astronomi	teleskop, spektroskop
Kedokteran	mikroskop, mikroskop phasa-kontras, kacamata, kornea, <i>soflens</i> , peralatan kedokteran gigi ( <i>illuminating examination mirror, optical loupes, fiber optic drill tool, fibre optics confocal instrument, ophthalmoscope</i> ), <i>ultrasonography (USG)</i>
Teknik <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sipil</li> <li>• Arsitektur</li> <li>• Geodesi</li> <li>• Mesin</li> <li>• Elektrik &amp; elektronik</li> </ul>	digitalisasi domain, diskretisasi domain, cermin <i>vigilance</i> (utilitas keamanan trafik pada tikungan jalan raya) jendela dan <i>glassblock</i> (pencahayaan ruang <i>green building</i> , estetika interior dan eksterior), cermin <i>vigilance</i> (keamanan supermarket, tangga, koridor, dan jalan) <i>teodolith, waterpass, GPS reciever</i> spion kendaraan layar fluoresen, refractometers, <i>inferometer</i> , spektroskop, peralatan optik magnetik, mikroskop, mikroskop elektron, mikroskop phasa-kontras, mikroskop atom, <i>radar, laser, solarcells</i> , penghambur elektrostatik, pengukur radiasi EM

Lanjutan Tabel 10.2 Benda-benda dan Bidang . . .

Bidang ilmu	Peralatan Optik
Teknik <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kimia</li> </ul>	mikroskop, mikroskop elektron, mikroskop fasa-kontras, mikroskop atom, refractometers,
Seni fotografi	<i>camera</i> , lensa camera, film camera, <i>filter</i> cahaya, <i>polaroid</i>

Hampir seluruh peralatan yang dirincikan dalam kedua tabel terdahulu memiliki komponen peralatan berupa cermin, lensa, prisma, atau kombinasi ketiganya. Karena itu, peralatan cermin, lensa, dan prisma merupakan pokok penting dalam kajian optik, sehingga perlu pula dijabarkan pada bab ini. Namun demikian, sebelum jabaran tentang cermin, lensa, dan prisma disampaikan, perlu terlebih dahulu dijabarkan hukum-hukum dan teori-teori yang berlaku pada cahaya. Selain itu, kajian mengenai pengelihatian dan warna perlu juga disampaikan terlebih dahulu guna memberikan wawasan dasar yang menyeluruh dalam mengkaji optik.

## 10.1 CAHAYA, WARNA, DAN PENGEЛИHATAN

Fenomena cahaya, warna, dan pengelihatian berkaitan sangat erat antara satu dan lainnya. **Cahaya** merupakan gelombang yang mentransformasikan energi yang dipancarkan atau dipantulkan oleh benda. Banyak energi yang ditranspor umumnya dengan sesuai warna permukaan benda. Pancaran atau pun pantulan cahaya dengan warna sesuai warna permukaan benda tersebut ditangkap oleh manusia melalui indera pengelihatian.

### 10.1.1. Cahaya

Teori cahaya sangat penting dikaji karena cahaya merupakan pokok kajian dalam optik dan banyak teori-teori gelombang selain cahaya didasarkan teori-teori cahaya dalam optik.

**Cahaya** adalah gelombang yang memiliki ciri khas merambat dengan bentuk garis lurus (*strickelline rectilinear propagation*). Cahaya merambat ke segala arah atau menyebar (*surounding*). Namun demikian, perambatan cahaya sering ditinjau pada satu arah saja dengan bentuk garis lurus yang disebut dengan **sinar** (*ray*), antara lain dalam kajian laser.

Cahaya merupakan jenis gelombang elektromagnetik. Istilah cahaya khusus digunakan untuk menyebutkan cahaya alami dari matahari atau **cahaya tampak** (*veasible light*). Dalam spektrum gelombang EM, hampir semua gelombang EM bersifat mirip cahaya, kecuali gelombang mikro dan radio. Guna membedakan dengan cahaya, jenis-jenis gelombang tersebut disebut dengan istilah sinar. Teori sinar berkembang sangat pesat terutama dalam kajian gelombang EM. Hingga kini telah dikenal 4 jenis gelombang dalam kelas ini, yaitu: sinar- $\gamma$ , sinar-X, sinar ultraungu, dan sinar inframerah. Berlainan dengan cahaya, keempat jenis gelombang mirip cahaya tersebut tidak dapat diindera manusia tanpa alat bantu.

Cepat rambat gelombang EM di ruang vakum adalah 299.792.458 m/s sebagaimana cahaya. Pada medium, cepat rambat cahaya dan gelombang EM dipengaruhi indeks refraksi medium.

Cahaya dapat mengalami fenomena refraksi, refleksi, difraksi, interferensi, absorpsi, resonansi, harmoni, gelombang berdiri, polarisasi, dispersi, dan penghamburan. Fenomena-fenomena tersebut telah dibahas dalam bab terdahulu, dipersilakan membaca kembali pokok-pokok tersebut bilamana diperlukan.

### 10.1.2. Warna

Keberadaan **cahaya** pada suatu ruang menyebabkan ruangan menjadi terang dengan warna alami putih. Cahaya putih dan terang tersebut dapat mengalami dispersi ketika menembus permukaan benda dengan indeks refraksi tertentu. Sebagai misal, cahaya putih akan terdispersi dalam 7 grup frekuensi atau panjang gelombang warna merah, jingga, hijau, kuning, biru, nila, dan ungu (mejikuhibiniu, MJHKBNU) jika menembus prisma kaca, sebagaimana ditunjukkan oleh Sir Issac Newton. Tujuh grup frekuensi tersebut telah diuraikan dalam bab terdahulu.

**Warna** (*colour*) benda merupakan ekspresi cahaya dengan frekuensi tertentu yang dipancarkan oleh benda. Pancaran cahaya oleh benda tersebut merupakan konsekuensi logis dari imbalanced energi yang dikandung oleh benda. Setiap benda memiliki kapasitas tertentu untuk menyimpan energi dalam jumlah tertentu. Kandungan energi dalam benda erat kaitannya dengan temperatur benda, radiasi energi dari benda, serta refleksi, absorpsi, dan transmisi energi pada benda oleh cahaya di lingkungan luar benda. Benda hitam sekalipun memancarkan cahaya, sesuai radiasi (Max Plank). Dalam hubungannya dengan pengelihat manusia, dalam kondisi gelap sekalipun, mata manusia mampu mengidentifikasi benda dalam warna hitam putih.

**Teori warna** dikembangkan pertama kali pada tahun 1810 oleh Johann Wolfgang von Goethe di Germany melalui publikasi *Zur Farbenlehre (Theory of Colors)*. Warna diperoleh dari dispersi cahaya mamakai prisma kaca sebagaimana dilakukan oleh Issac Newton. Warna dari hasil penguraian cahaya disebut **warna aditif** (*additive colours*), yang oleh Issac Newton diperkenalkan dengan sebutan **hue**. Tiga di antara warna aditif disebut **warna primer**, yaitu **merah, kuning, dan hijau** (RGB, *Red Green Blue*). Warna sekunder dan tertier dibentuk dengan penggabungan warna primer.

Di industri percetakan, di mana pewarnaan juga didasarkan pada pigmen untuk bahan tinta di samping cahaya, maka dipakai model pewarnaan didasarkan pada **warna subtraktif** (*subtractive colour*) dari percampuran pigmen warna tinta cetak. Metode pencampuran warna didasarkan 3 warna primer yaitu **cian, magenta, dan kuning** (CMY(K), *Cyan Magenta Yellow black*).

Warna dapat diklasifikasikan dalam 4 kelas fundamental yaitu: warna material, warna radiasi, warna tampak, dan warna konseptual.

**Warna material** (*material color*) adalah pigmen (*pigment*) pada makhluk hidup (organisme) atau benda mati, benda transparan (*filter*), dan sumber cahaya. Sebagai misal adalah warna hijau klorofil tumbuhan, warna biru kaca filter, dan warna biru angkasa/ atmosfer.

**Warna radiasi** (*radian color*) adalah warna yang dipancarkan oleh suatu sumber cahaya atau benda dan warna yang ditransmisikan oleh benda transparan. Contoh warna radiasi adalah warna hijau dari LED, warna merah cat dinding, dan merah dari LED yang ditransmisikan melalui kaca jendela berwarna biru.

**Warna tampak** (*visual color*) merupakan persepsi warna radiasi dalam konteks spesifik, umumnya suatu permukaan benda spesifik pada intensitas dan kecerahan tertentu.

**Warna konseptual** (*consptual color*) adalah warna psikologis, dalam konsepsi abstrak, dan ingatan. Warna konseptual dinyatakan dengan bahasa tanpa disertai visualisasi fisik benda. Sebagai contoh warna konseptual adalah warna merah bermakna atau berdampak psikologis suhu panas dan jarak dekat. Contoh lainnya, susunan warna dalam imaginasi otak dalam merancang campuran warna.

CIE (*Commission Internationale de L'Eclairage*) pada 1931 mengenalkan pentingnya **rentang warna** (*gamut*) dengan sistem pengukuran dan identifikasi warna CIE-XYZ. *Hue* dinyatakan

dengan angka 0 hingga 360. Warna merah mulai angka 0, kuning mulai angka 60, hijau mulai angka 120, *cyan* mulai angka 180, biru mulai angka 240, dan magenta mulai angka 300. *Gamut* dipresentasikan oleh *CIE* dalam diagram warna kromatik RGB, misalnya warna magenta gelap (RGB 80,10,20). *Gamut* penting untuk perancangan, operasional, dan perawatan peralatan layar, *scanner*, dan *printer*. Pada tahun 1998, Adobe RGB mempublikasikan gamut melalui program aplikasi komputer untuk pengolahan citra.

Model pewarnaan dengan percampuran warna dianalisis memakai **lingkaran warna** (*colour wheel*), yang disampaikan pertama kali oleh Rudolf Arnheim pada tahun 1954 dalam publikasinya *Art and Visual Perception*. Dalam metode lingkaran warna, beberapa warna yang akan dicampur bersama diplotkan dengan rasio sudut dibagi merata sesuai jumlah warna yang akan dicampur. Lingkaran tersebut kemudian diputar sehingga tampak menjadi warna baru sebagai warna campuran. Untuk campuran warna-warna aditif, lingkaran warna efektif disimulasikan dengan komputer. Namun, campuran warna-warna subtraktif, lingkaran warna harus dibuat secara fisik dengan model lingkaran warna.

Sejalan perkembangan teknik komputasi, pewarnaan pada layar komputer PC, *scanner*, dan *printer* telah berkembang pesat. Pada akhir abad ke-20, Model 256 warna pada sistem memori PC 8-bit (*byte*) yang digunakan, telah dikembangkan menjadi 16-bit (*word*) dalam jutaan warna berbasis RGB. Kini di awal abad ke-21, telah dikembangkan Model 32-bit (*double word*) dalam milyaran warna. Identitas warna campuran dapat dinyatakan makin detil sehingga makin banyak warna campuran dapat diaplikasikan.

*Gamut* milyaran warna makin membuka peluang diterapkannya **kualitas warna** dan **respon tekstur permukaan benda terhadap pencahayaan** dalam penciptaan komposisi **warna harmoni**. Pengertian warna harmomy (*colour harmony*) untuk

pertama kalinya disampaikan oleh Issac Newton dengan teori warna diatonik. Kualitas warna disampaikan pertama kali oleh Albert Munsell pada tahun 1915 dengan terminologi  **Saturasi** (*chroma* or *saturation*). Sedangkan respon tekstur permukaan benda terhadap pencahayaan disampaikan pertama kali oleh Michel Wilcox dan Eugène Chevreul dalam terminologi  **luminansi** (*luminance*) dan kontras (*luminance and contrast*) pada tahun 1839.

Penerapan kualitas warna dan respon tekstur terhadap pencahayaan memunculkan model-model pewarnaan baru, di samping Model RGB yang berbasis *hue* dan CMY(K) yang berbasis *pigment*. Model HSB (*Hue, Saturation, Brightness*) identik dengan Model HSV (*Hue, Saturation, Value*), dibuat dengan besar saturasi dari 0% hingga 100% mendekati warna abu-abu dan besar intensitas cahaya dari 0% hingga 100%. Model HSL (*Hue, Saturation, Luminance*) tidak didasarkan intensitas cahaya, tetapi luminansi dengan besar luminansi 0% hingga 100%. Luminansi adalah pancaran radiasi oleh refleksi permukaan benda akibat cahaya yang menerpa benda. Model-model tersebut memungkinkan penyajian warna harmoni hingga tingkat warna gradasi /nuansa (*nuance*) dan efek tekstur (bayangan) pada permukaan benda sebagai hasil kombinasi warna, pencahayaan, dan kualitas warna (*hue, lightness, and chroma*)

### 10.1.3. Pengelihatan

Pengelihatan merupakan satu di antara indera yang dimiliki manusia untuk berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya. **Pengelihatan** (*vision*) adalah indera manusia untuk menangkap informasi cahaya dan obyek visual melalui organ tubuh mata. Baik informasi cahaya maupun obyek visual ditransformasikan ke otak untuk diolah dan disimpan di memori.

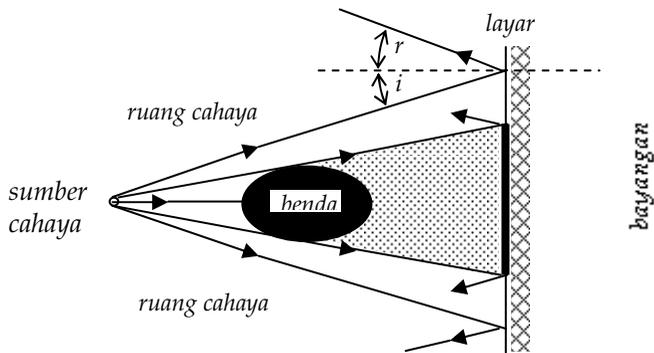
Setiap manusia normal dikaruniai 2 buah mata (*eyes*), karena itu sistem pengelihatannya pada manusia disebut **binokular** (*binocular*). Kata tersebut diambil dari Bahasa Yunani “*bini*” untuk ganda dan “*oculus*” untuk mata. Sistem *binocular* memungkinkan menangkap stereotipe obyek visual 3 dimensi. Banyak alat optik dirancang binokular, antara lain kacamata, teropong bumi, dan. Beberapa alat optik lainnya dirancang dengan sistem **onikular** (*onocular*), misalnya mikroskop, door view, camera foto, camera video, dan teropong bintang.

Beberapa pokok penting yang perlu dikaji berkaitan dengan proses penangkapan informasi cahaya maupun obyek visual menjadi image oleh mata, antara lain meliputi:

- (1) obyek,
- (2) bayangan,
- (3) image,
- (4) organ-organ mata untuk penangkapan image,
- (5) lokus pandang,
- (6) sudut pandang,
- (7) ruang pandang,
- (8) perspektif, dan
- (9) problem-problem pengelihatannya.

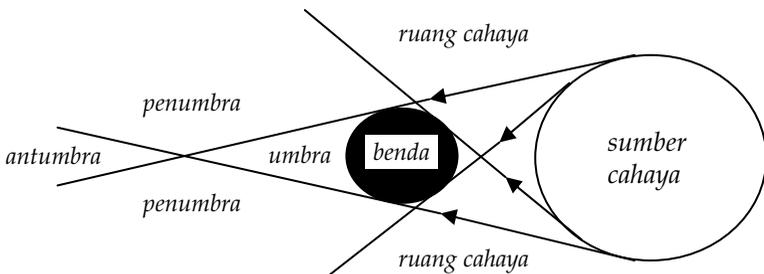
**Obyek** (*object*) merupakan berbagai bentuk informasi visual yang dapat bewujud benda, gambar, tulisan, atau titik. Obyek ditangkap oleh mata manusia dalam bentuk geometri dan atributnya antara lain: cahaya lingkungan, transparansi, tekstur permukaan, dan warna. Identifikasi dan interpretasi seseorang terhadap warna tidak selalu bersifat obyektif, tetapi dapat bersifat subyektif karena faktor genetik, latihan, umur, pengalaman, dan kesehatan.

**Bayangan** (*shadow*) adalah luasan berwarna gelap di belakang obyek yang seluruh luasannya mungkin tidak dapat dijangkau oleh cahaya karena intensitas cahaya kurang atau bagian luasan di belakang obyek tersembunyi atau pun terisolasi. Sebagian atau seluruh luasan bayangan mungkin berwarna hitam dan bersifat transparan karena diterpa cahaya yang didifraksikan di belakang obyek. Bagian luasan yang tidak terjangkau oleh cahaya difraksi karena terisolasi atau pun tersembunyi berwarna hitam pekat.



**Gambar 10.1** Sumber Cahaya, Obyek, dan Bayangan

Pada fenomena gerhana matahari dan bulan, lihat Gambar 10.2, sensasi bayangan obyek dapat dirasakan pada wilayah umbra, penumbra, dan antumbra.



**Gambar 10.2** Fenomena Obyek dan Bayangan dalam Gerhana

**Image** (*image*) adalah miniatur obyek yang dihasilkan peralatan optik umumnya cermin, lensa, prisma, atau kombinasi antara ketiganya. Image dapat bersifat real atau virtual (maya) dan tegak atau terbalik. Image disebut real apabila cahaya eksis pada image. Image yang bersifat real dapat ditangkap dengan layar. Image disebut bersifat virtual apabila tidak terdapat cahaya pada image sehingga hanya ada di ingatan dan tidak dapat diproyeksikan pada layar. Image disebut tegak apabila bentuknya tidak berbalikan dengan obyek bersangkutan. Image bersifat terbalik jika memiliki bentuk berbalikan dengan obyek bersangkutan.

Proses penangkapan image oleh mata berhubungan erat dengan sistem pengelihatian pada mata. **Sistem pengelihatian pada mata manusia** yang berkaitan langsung dengan penangkapan image suatu obyek meliputi beberapa bagian atau organ yaitu: kornea, sklera, *aqueus humor*, pupil, iris, lensa, retina, sistem saraf optik. Fungsi dari organ-organ tersebut dalam proses pembentukan image adalah sebagai berikut:

- (1) **Kornea** merupakan organ mata paling luar yang langsung menangkap dan menerima rangsangan cahaya dan obyek pada mata. Kornea bersifat bening dan terletak pada bagian depan sklera.
- (2) **Sklela** berwarna putih pada mata dan umum disebut dengan bola mata. Sklera berhubungan dengan otot-otot penggerak bola mata sehingga memungkinkan mata berputar untuk merubah pandangan ke atas bawah dan kanan kiri.
- (3) **Pupil** terletak pada bagian depan lensa mata dan dikelilingi oleh selaput iris. Rangsangan cahaya dan informasi obyek dalam bentuk sinar ditransmisikan dari kornea ke lensa mata melalui pupil.
- (4) **Iris** berfungsi membesarkan dan mengecilkan ukuran (*diagfragma*) pupil untuk menyesuaikan rangsangan cahaya

yang masuk ke bagian dalam mata. Berdasar hasil riset, lebar pupil orang dewasa dalam berbagai kondisi cahaya ditunjukkan dalam Tabel 10.3.

**Tabel 10.3** Lebar Pupil Mata Cahaya

0 mm	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm
Cahaya terang		Siang hari		Sore hari		Malam hari	

- (5) **Lensa** mata merupakan jenis bikonveks dengan kedua sisi cembung. Informasi visual obyek diakomodasikan oleh lensa ke retina
- (6) **Retina** merupakan organ mata yang berfungsi untuk menangkap image. Image bersifat real dan terbalik pada retina.
- (7) Sel-sel batang dan sel-sel kerucut yang berada disekitar belakang retina berfungsi mengidentifikasi sinar yang masuk ke dalam mata, termasuk image dari suatu obyek.
  - a) **Sel-sel batang** (*rods*) berfungsi untuk mengidentifikasi image dari obyek dalam kondisi ruangan gelap.
  - b) **Sel-sel kerucut** (*cones*) berfungsi untuk mengidentifikasi image dari obyek dalam keadaan ruangan terang.

Informasi hasil identifikasi sel-sel batang dan sel-sel kerucut tersebut kemudian ditransformasikan ke otak melalui jaringan saraf.

Mata adalah **sistem optik kedua**, di samping sistem optik lain yang umum dibuat oleh manusia (*manmade*) guna memudahkan, mendukung, atau meningkatkan daya penglihatan mata. Mata manusia berukuran 16 hingga 19,5 mm ketika berusia di bawah 5 tahun dan berkembang menjadi 24 mm hingga 25 mm setelah dewasa.

Mata seorang dalam keadaan normal berfungsi secara rileks (tanpa berkonstraksi berat) untuk mengamati obyek yang memenuhi ketentuan sebagai berikut:

1. berada pada jarak tak berhingga. Obyek demikian misalnya *horizon* pada cakrawala atau bintang di langit.
2. berada tepat pada fokus (*focal point*) kaca pembesar atau loop (*loupe*) karena obyek tampak sebagaimana berada pada jarak tak berhingga;
3. berada pada jarak terdekat (*near point*) kurang lebih 25 cm di depan mata. Sebagai misal jarak ideal buku/ teks terhadap mata ketika membaca dalam kisaran 25 cm hingga 30 cm.

Dalam penangkapan informasi obyek, mata harus beberapa kali merubah sudut pandang untuk menyesuaikan fokus pandangan mata terhadap bagian-bagian obyek atau untuk merubah obyek pandangan. Misalnya, seorang pengendara kendaraan secara berangsur menggeser keatas fokus pandangan ketika akan melalui tanjakan dan kembali menggeser kebawah ketika sampai pada ujung tanjakan dengan obyek pandangan pada setiap fokus pandangan berlainan. Demikian halnya, pada setiap pergeseran fokus pandangan mata ketika pengendara berbelok kekanan atau kekiri pada tikungan, obyek pandangan akan berlainan.

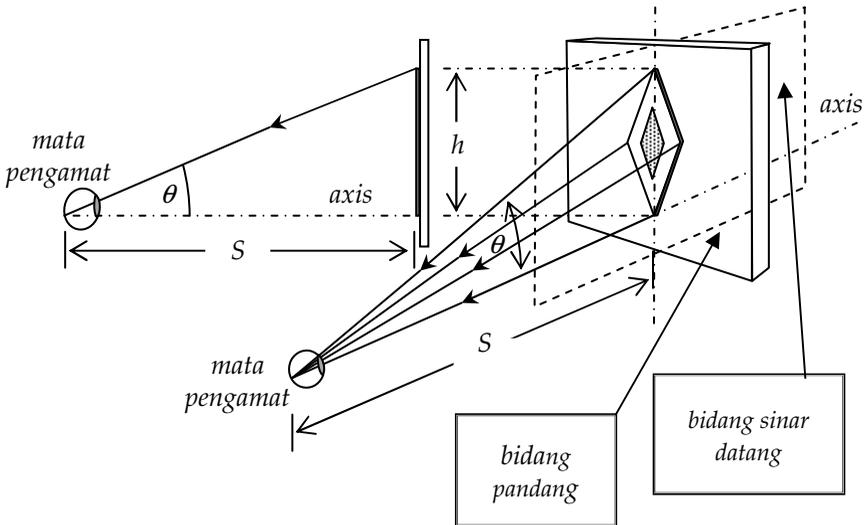
Lihat diagram sinar dalam Gambar 10.3, bentuk geometri obyek dinyatakan sederhana dengan besaran jarak obyek dari mata dan tinggi obyek. **Sudut pandang** ( $\theta$ , *angle of view*) adalah sudut antara sinar datang dari ujung obyek, baik ujung atas, bawah, kanan,

## Optik

atau kiri obyek, terhadap sumbu pandang dituliskan secara matematis:

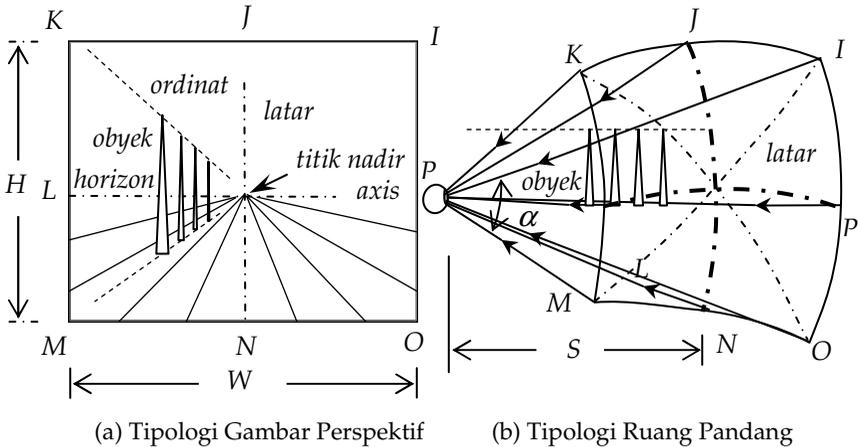
$$\theta = \text{arc tg } \frac{h}{S} \quad \dots \dots \quad (10.1)$$

dengan  $\theta$  adalah sudut pandang ( $^\circ$ ),  $S$  adalah jarak obyek dari mata (m) dan  $h$  adalah tinggi obyek (m). **Sumbu pandangan** dapat diambil **axis** (*horizon sight line*) atau **ordinat** (*vertical sight line*).



**Gambar 10.3** Diagram Sinar untuk Obyek dalam Pengelihatan Mata

Pengelihatan memiliki jangkauan sudut pandang 2 kali lebih lebar daripada sudut pandang maksimal. Pada arah vertikal, sudut pandang maksimal mata manusia kurang lebih adalah  $135^\circ$ , jumlahan dari sudut pandang maksimal keatas  $45^\circ$  dan kebawah  $90^\circ$ . Pada arah horizontal sudut pandang maksimal mata kurang lebih adalah  $200^\circ$ . Jangkauan  $120^\circ$  pada kawasan depan mata dapat digunakan secara *binocular*. Selebar  $40^\circ$  pada bagian kanan dan kiri sisanya digunakan secara *unicular*.



**Gambar 10.4** Perspektif dan Ruang Pandang

Untuk keperluan teknik, antara lain tata *landscape*, tampilan bangunan, fotografi, lukis, pertunjukan TV dan panggung seni, ruang pengelihatan efektif disebut **ruang pandang** (*FOV, field of view*). Dalam bidang fotografi, jangkauan sudut pandang vertikal *FOV* ( $H$ ) hingga  $60^\circ$  dan jangkauan sudut pandang horisontal ( $W$ ) untuk lensa standar berdiameter 28 mm hingga 50 mm adalah  $24^\circ$  hingga  $90^\circ$ . Lensa terkini untuk kamera telepon bergerak dengan diameter 2,2 mm dapat menangkap obyek dengan sudut pandang normal  $62^\circ$  dan dapat diperlebar hingga  $180^\circ$ . Jangkauan ruang pandang dapat juga dinyatakan dengan  $\alpha$  yaitu jangkauan sudut pandang diagonal *FOV*.

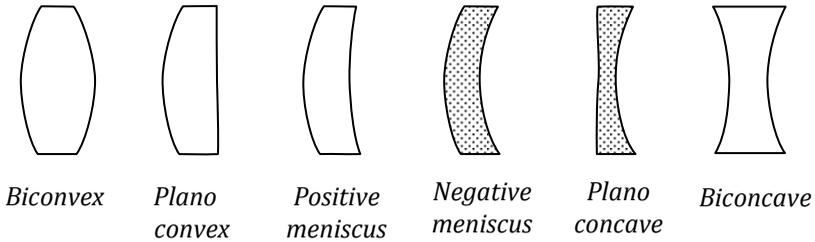
Dalam ruang pandang harus tercakup obyek-obyek yang dipandang penting. Kajian dalam optika cermin dan lensa umumnya difokuskan pada obyek dan sinar datang cukup digambarkan dari ujung obyek. Namun, latar belakang obyek merupakan pokok yang juga penting, terutama dalam pemakaian optika cermin dan lensa untuk siaran TV, digitasi, *scanning*, fotografi, seni, dan percetakan.

Bagian dari ruang pandang yang tidak termasuk obyek disebut **latar (belakang) obyek**, tampak dalam Gambar 10.4(b). Obyek beserta latarnya pada ruang pandang dalam Gambar 10.4(b) diproyeksikan pada gambar perspektif sebagaimana dimuat dalam Gambar 10.4(a).

Implementasi obyek dan latar telah dikembangkan sejak zaman Renaissance dalam lukisan panorama dan peristiwa-peristiwa bersejarah. Filippo Brunelleschi pada masa tersebut membangun teori **perspektif linier** (*linear perspective*) bagi para pelukis untuk pembuatan lukisan bertema tersebut di Eropa. Namun teori tersebut baru berkembang setelah dipublikasikan oleh Leon Battista Alberti melalui bukunya berjudul *On Painting* pada tahun 1435. Dalam teori perspektif linier, setiap obyek digambar sesuai dengan jaraknya dari pengamat (pelukis). Obyek yang berukuran sama dengan jarak lebih jauh dari pengamat digambar lebih kecil sesuai pola 2 garis lurus (*linear*) putus-putus, lihat Gambar 10.4(a). Ujung jauh kedua garis tersebut berpotongan pada **titik terjauh** (*vanishing point*), yaitu titik di mana 2 garis parallel bertemu, Bandingkan antara kedua garis tersebut dalam Gambar 10.4(a) dan Gambar 10.4(b).

Pengelihatan manusia dapat bersifat unik, tidak normal sebagaimana pengelihatan manusia pada umumnya. Keunikan pengelihatan tersebut dapat disebabkan oleh faktor genetika, latihan, atau penyakit. Penyakit yang menimbulkan kelainan pengelihatan manusia, dan dapat diatasi dengan metode optik antara lain miyopi, hipermyopi, dan astigmatisma. Mata pada penderita **miyopi** tidak dapat dipakai untuk melihat obyek dalam jarak jauh dengan jelas. Miyopi diatasi memakai lensa negatif, concave lens. Berkebalikan dengan miyopi, mata penderita **hipermetropi** tidak dapat dengan jelas melihat obyek dalam jarak dekat. Kelainan tersebut diatasi memakai lensa positif. **Astigmatisma** merupakan suatu di antara jenis kelainan mata aberasi (*coma, astigmatism, dan chromatic aberration*). Penderita astigmatisma tidak dapat secara jelas

membedakan bentuk geometri, misalnya beda antara garis miring dengan garis datar atau pun garis tegak. Kelainan mata aberasi diatasi menggunakan lensa silindris, misal lensa *plano-concave* atau *convexo-concave* (bentuk lensa yang diarsir dalam Gambar) untuk jenis lensa selain *biconcave*.



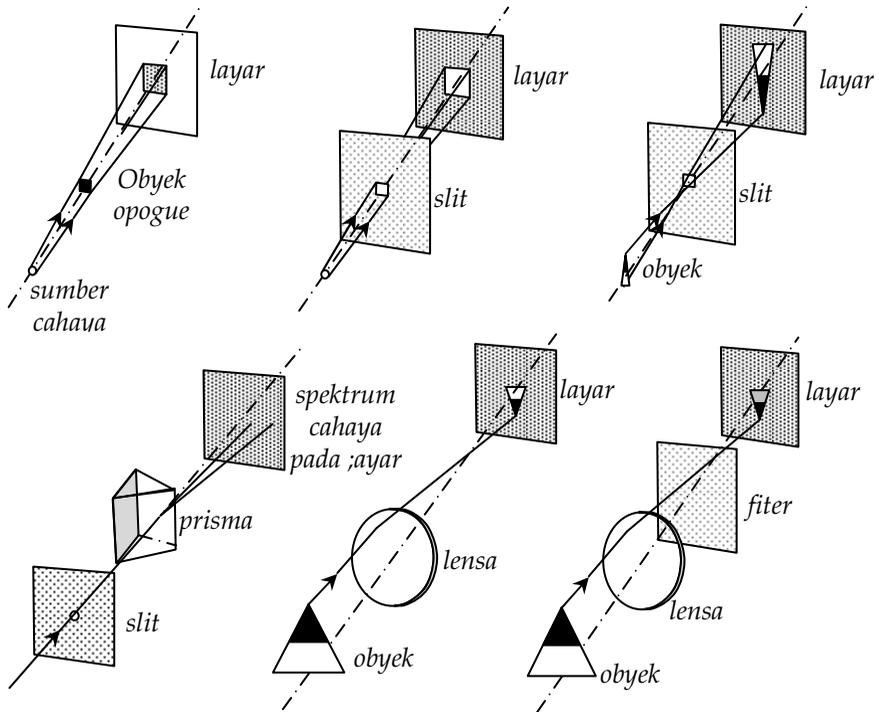
Gambar 10.5 Lensa Silindris

## 10.2 PERALATAN OPTIK

**Sistem optik** (*optical system*) merupakan sistem yang terdiri dari rangkaian satu atau lebih peralatan dasar optik yang difungsikan sebagai suatu peralatan optik untuk mendukung dalam melakukan tugas tertentu. Sebagai contoh adalah kacamata, reflektor lampu, cermin *vigilance*, camera, *overhead projector*, *viewer*, teleskop, mikroskop, dan spektroskop. Mata pengamat adalah sistem optik kedua, di samping sistem optik tersebut.

Lihat Gambar 10.6, **peralatan dasar optik** dalam sistem optik antara lain adalah layar, *filter*, dan *diagfragma* (*slit or stop*), di samping cermin, lensa, dan prisma. Layar digunakan untuk menangkap image proyeksi obyek. Filter dipakai untuk memodifikasi transmisi sinar. Slit dipakai untuk mentransmisikan beberapa sinar dan menghalau beberapa sinar lainnya. Prisma dipakai untuk mendispersikan sinar cahaya.

## Optik



**Gambar 10.6** Peralatan Dasar Optik dan Sistem Optik

Image yang dihasilkan dari suatu peralatan optik memiliki empat atribut utama yang perlu ditentukan untuk dapat dimanfaatkan lebih lanjut. Keempat atribut tersebut adalah:

1. Posisi image terhadap peralatan optik
2. Sifat image, real atau virtual
3. Sifat tegakan image, tegak atau terbalik terhadap obyeknya
4. Nilai pembesaran atau pengecilan image terhadap obyek

Untuk suatu sistem optik, identifikasi keempat atribut tersebut harus dilakukan dengan menghitung secara bertahap dan berurutan dari setiap peralatan optik yang digunakan (*image tracer*).

Posisi image suatu obyek oleh suatu alat optik speris (cermin atau lensa lengkung) dikemukakan oleh Euclid dengan persamaan:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \quad \dots\dots (10.2)$$

dengan  $f$  adalah jarak fokus alat optik (m) dengan  $1/f$  adalah daya alat optik,  $S$  adalah jarak obyek dari alat optik (m), dan  $S'$  adalah jarak image dari alat optik (m).

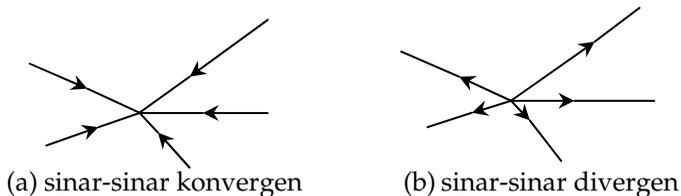
Pembesaran lensa ( $M$ , *magnifying*) yang dihasilkan alat optik speris dalam persamaan 10.2 dihitung dengan formula berikut:

$$M = \frac{s'}{s} = \frac{h'}{h} \quad \dots\dots (10.3)$$

dengan  $M$  adalah nilai pembesaran atau pengecilan ukuran image terhadap obyek,  $h$  adalah tinggi obyek terhadap axis peralatan optik (m), dan  $h'$  adalah tinggi image terhadap axis peralatan optik. Persamaan 10.3 dapat untuk menentukan lebar image dengan mensubstitusi tinggi obyek ( $h$ ) dengan lebar obyek ( $l$ ) dan tinggi image ( $h'$ ) dengan lebar image ( $l'$ ).

### 10.3 KONVERGENSI

Konvergensi sinar cahaya sesuai dengan hukum konvergensi vektor (*vector convergence*) dalam aljabar vektor. Lihat Gambar 10.7, dua atau lebih sinar disebut **konvergen** (*converge*) jika menuju satu titik. Sebaliknya, **divergen** (*diverge*) jika meninggalkan satu titik.



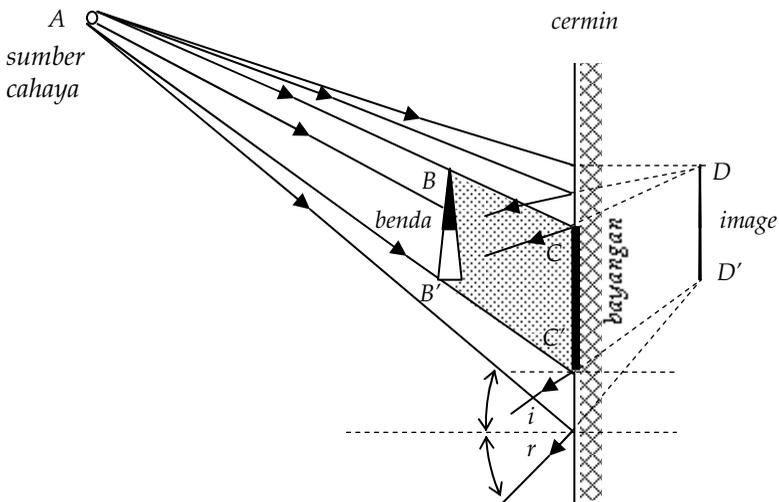
**Gambar 10.7** Konvergensi Sinar-sinar Cahaya

## 10.4 CERMIN

Cermin (*mirror*) merupakan suatu alat optik yang berfungsi untuk memantulkan, menangkap, memfokuskan, atau pun memencarkan cahaya. Cermin dapat dibuat sesuai dengan kebutuhan dalam 3 jenis/ tipe, yaitu: cermin datar, cekung, dan cembung (*plan, concave, and convex mirror*).

### 10.4.1. Cermin datar

Cermin datar (*plan mirror*) adalah cermin yang permukaannya dibuat datar, rata, dan halus digunakan untuk melihat image dengan posisi dan ukuran sama dengan posisi dan ukuran obyek. Cermin jenis ini dapat dibuat dengan berbagai bentuk dan ukuran, dipasang vertikal, horizontal, atau miring, serta paling banyak digunakan sesuai dengan kebutuhan.



**Gambar 10.8** Obyek, Bayangan, dan Image pada Cermin Datar

Hubungan obyek, bayangan, dan image pada kasus cermin datar dapat dicermati dalam Gambar 10.8. Image bersifat virtual (di dalam/belakang) cermin dan tegak (pada arah vertikal), tetapi terbalik pada arah horizontal. Akibat cahaya dari sumber cahaya A timbul bayangan setinggi garis  $\overline{CC'}$  pada permukaan cermin dan image setinggi garis  $\overline{DD'}$  di dalam/ belakang cermin dari obyek setinggi  $BB'$ . Dalam **diagram sinar** (*rays diagram*), bayangan dan image merupakan proyeksi sehingga dilihat dari pandangan samping digambar sebagai garis. Sinar cahaya direfleksikan oleh cermin dengan sudut datang  $i$  dan sudut refleksi  $r$  sesuai dengan Hukum Snell tentang refleksi cahaya. Garis putus-putus di belakang cermin menunjukkan garis proyeksi sinar cahaya, bukan sinar cahaya, karena tidak terdapat cahaya di dalam cermin. Image di belakang cermin dengan posisi dan atributnya hanya ada dalam ingatan/memori otak, seakan image terproyeksi pada layar jika diletakkan layar pada posisi image di ingatan otak. Namun, jika benar diletakkan layar pada posisi tersebut, maka tidak ada proyeksi image pada layar karena tidak terdapat cahaya di dalam cermin. Image yang hanya ada dalam ingatan disebut dengan **image virtual** (*virtual image*).

#### 10.4.2. Cermin Cekung

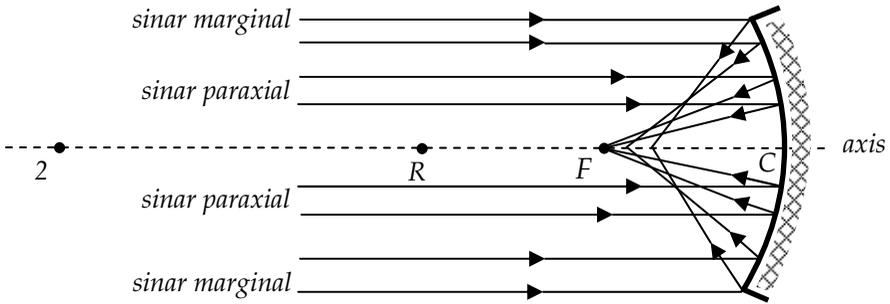
Cermin cekung (*convective mirror*) adalah cermin yang dibuat dengan bagian tengah cermin lebih masuk ke dalam dari pada bagian tepi cermin sehingga membentuk lengkung dengan jari-jari kelengkungan  $R$  berada di bagian luar cermin. Cermin cekung merupakan satu di antara jenis cermin sferis (*spherical mirror*).

Pada sistem optik sferis lihat Gambar 10.9, termasuk cermin sferis, pusat cermin cekung  $C$  terletak tepat pada garis **sumbu datar**

Optik

(axis) cermin. **Titik fokus cermin** ( $F$ , focal point) adalah titik yang berada pada jarak  $f$  dari posisi titik pusat cermin ( $C$ , center of mirror). Besar  $f$  menurut Euclid dapat diformulasikan dengan jari-jari kelengkungan  $r$ , yaitu:

$$f = \frac{r}{2} \quad \dots\dots (10.4)$$



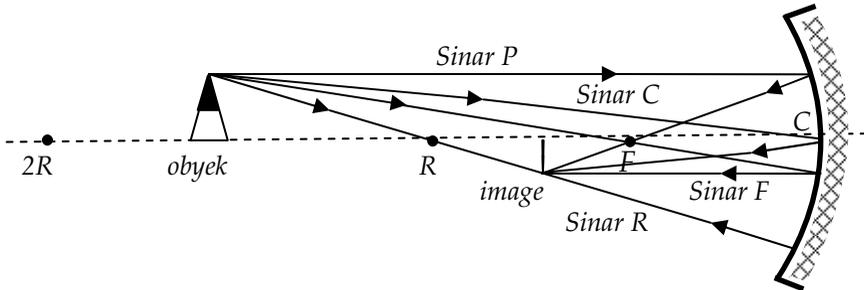
**Gambar 10.9** Sinar Paraxial dan Sinar Marginal pada Cermin Sferis

Sinar cahaya datang (*incident light rays*) dengan sudut  $i$  terdiri dari 2 jenis sinar, yaitu sinar paraxial dan sinar marginal. Sinar cahaya disebut **sinar paraxial** (*paraxial rays*) jika sudut datang  $i$  sangat kecil sedemikian sehingga memenuhi ketentuan:

$$\sin i = \tan i = i \quad \dots\dots (10.5)$$

Dengan kalimat lain, sinar datang disebut sinar paraxial jika berada dekat sumbu datar/axis sistem optik sferis. Sinar-sinar paraxial dipantulkan oleh cermin tepat melalui titik fokus sesuai persamaan 10.5. Berlainan dengan sinar paraxial, **sinar-sinar marginal** (*marginal rays*) yang datang secara paralel terhadap axis tetapi berada relatif jauh dari posisi axis cermin tidak dapat dipantulkan tepat melalui

titik fokus, tetapi pada posisi di antara titik fokus dan cermin pada axis cermin, lihat Gambar 10.10.



**Gambar 10.10** Obyek dan Image pada Cermin Cekung

Lihat Gambar 10.10, posisi ( $S'$ ) dan ukuran ( $h'$ ) image dari suatu obyek dengan posisi ( $S$ ) dan ukuran ( $h$ ) di dekat suatu cermin cekung dapat di tentukan memakai **diagram sinar** (*rays diagram*) dari titik potong 2 di antara sinar paraxial yang memenuhi ketentuan:

- (1) Sinar datang parallel axis dipantulkan melalui titik fokus cermin dan disebut *Sinar P*;
- (2) Sinar datang melalui titik fokus cermin dipantulkan parallel axis dan disebut *Sinar F*;
- (3) Sinar datang menuju titik pusat cermin dipantulkan dengan besar sudut pantul sama dengan sudut datang tetapi berlawanan arah terhadap sumbu axis dan disebut *Sinar C*; dan
- (4) Sinar datang melalui pusat kelengkungan cermin dipantulkan melalui pusat kelengkungan cermin dan disebut *Sinar R*.

Ketentuan ini dapat digunakan secara efektif untuk menyajikan sketsa dalam mendeteksi posisi image terhadap posisi obyek dan cermin.

## Optik

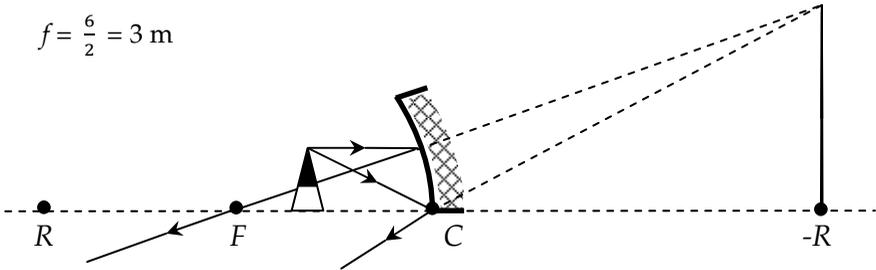
### Contoh soal 10.1

Tentukan sifat-sifat dan tinggi image suatu mesin setinggi 1,5 m pada cermin cekung yang dibuat setinggi 2,5 m dan kelengkungan cermin 6 m jika orang tersebut berdiri pada jarak 2 m dari cermin.

Jawab:

$r = 6 \text{ m}$ ;  $S = 2 \text{ m}$ ;  $hc = 2,5 \text{ m}$ ; dan  $h = 1,5 \text{ m}$ .

$$f = \frac{r}{2} = 3 \text{ m}$$



**Gambar 10.11** Obyek dan Image pada Cermin Cekung

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \text{ sehingga } \frac{1}{3} = \frac{1}{2} + \frac{1}{s'} \text{ maka } \frac{1}{s'} = \frac{2-3}{6} = -\frac{1}{6} \text{ maka } s' = -6 \text{ m.}$$

$$M = \frac{h'}{h} = \frac{s'}{s} \text{ maka } M = \frac{s'}{s} = \frac{-6}{2} = -3$$

Jadi, image yang terbentuk:

- (1) Posisi image 6 m di belakang cermin cekung,
- (2) Image bersifat virtual,
- (3) Image bersifat tegak, dan
- (4) Nilai pembesaran adalah  $-3$ .

$$M = \frac{h'}{h} = -3 \text{ maka } h' = -3 \cdot h = -3 \cdot 1,5 = -4,5 \text{ m}$$

### Contoh soal 10.2

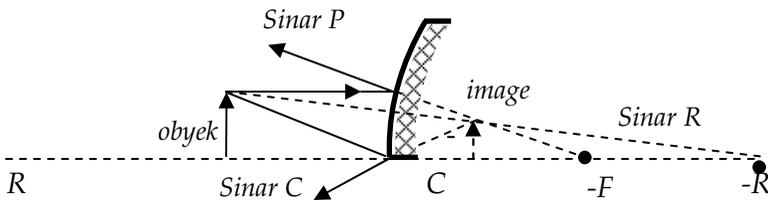
Tentukan daya cermin cekung dalam soal nomor 10.1.

Jawab:

$$f = 3 \text{ m, } P = \frac{1}{f} = -\frac{1}{3} \text{ dioptri}$$

### 10.4.3. Cermin Cembung

Cermin cembung (*convergen mirror*) adalah cermin yang dibuat dengan bagian tengah cermin lebih ke luar daripada bagian tepi cermin sehingga membentuk lengkung dengan jari-jari kelengkungan  $R$  ke arah luar cermin. Agar sesuai dengan ketentuan bahwa jarak image terhadap cermin yang berada di dalam/belakang cermin ( $S'$ ) bertanda negatif, maka posisi titik pusat kelengkungan cermin ( $R$ ) dan titik fokus ( $F$ ) yang berada di belakang cermin juga disepakati bertanda negatif.



**Gambar 10.12** Obyek dan Image pada Cermin Cembung

Diagram sinar untuk cermin cembung dibuat dengan ketentuan penggambaran sinar paraxial sebagaimana untuk cermin cekung. Diagram tersebut dapat digunakan secara efektif untuk mendeteksi posisi image terhadap posisi obyek dan cermin. Lihat Gambar 10.12, sinar paraxial digambarkan untuk mencari titik perpotongan di antara 2 sinar paraxial. Satu di antara ujung atas atau bawah obyek diletakkan pada axis sistem optik. Dengan demikian, image dengan posisi ( $S'$ ) dan ukurannya ( $h'$ ) dari suatu obyek dengan posisi ( $S$ ) dan ukuran ( $h$ ) cukup digambarkan dari sinar radiasi yang melalui satu ujung lainnya dari obyek. Bilamana perlu, dengan cara sama, digambarkan pula satu di antara ujung kanan atau kiri obyek dengan diletakkan pada axis sistem optik. Sinar radiasi yang melalui ujung lainnya dari kanan atau kiri obyek kemudian digambarkan untuk mengetahui lebar image ( $l'$ ).

## Optik

### Contoh soal 10.3

Tentukan kondisi image suatu tripod lampu setinggi 1,5 m pada cermin cembung yang dibuat setinggi 3 m dan kelengkungan cermin 6 m jika orang tersebut berdiri pada jarak 2 m dari cermin.

Jawab:

Lihat sketsa sistem optik dalam Gambar 10.12.

$r = -6$  m;  $S = 2$  m;  $hc = 3$  m; dan  $h = 1,5$  m.

$$f = \frac{6}{2} = -3 \text{ m}$$

$$P = \frac{1}{f} = -\frac{1}{3} \text{ dioptri}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \text{ maka } \frac{1}{-3} = \frac{1}{2} + \frac{1}{s'} \text{ maka } \frac{1}{s'} = \frac{-2-3}{6} = -\frac{5}{6}, S' = -1,2 \text{ m.}$$

$$M = \frac{h'}{h} = \frac{S'}{S} \text{ maka } M = \frac{h'}{h} = \frac{-1,2}{2} = -0,6$$

$$h' = -0,6 \cdot h = -0,6 \cdot 1,5 = -0,9 \text{ m}$$

Jadi, kondisi image yang terbentuk:

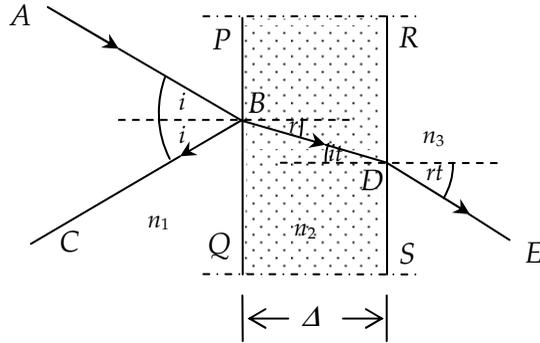
- (1) Posisi image 1,2 m di belakang cermin cekung
- (2) Image bersifat virtual
- (3) Image bersifat tegak
- (4) Nilai pembesaran adalah  $-0,6$  dan tinggi image 0,9 m

## 10.5 LENSA

Pada bagian terdahulu telah dibahas bahwa umumnya lensa dibuat dalam 6 bentuk varian geometri, 3 varian di antaranya lensa tersebut dibuat dengan satu sisi cembung (*convex*) dan 3 varian lainnya dibuat dengan satu sisi cekung (*concave*). Dua atau lebih dari lensa tersebut dapat digunakan secara bersama-sama atau kombinasikan untuk menghasilkan image yang lebih berkualitas.

### 10.5.1. Kaca

Proses refleksi, refraksi, absorpsi, dan disipasi cahaya pada kaca merupakan suatu contoh proses optik paling sederhana. Proses tersebut perlu dipahami untuk fundamen dalam memahami fenomena sejenis yang lebih kompleks dalam optika lensa.



**Gambar 10.13** Cahaya Menembus Kaca

Sebuah sinar cahaya yang membentur sebuah kaca jendela transparan, sebagian energinya direfleksikan dan sebagian lainnya ditransmisikan melalui kaca. Energi cahaya yang ditransmisikan sebagian diabsorpsi oleh kaca dan sebagian lain sisanya ditransmisikan lebih lanjut keluar kaca. Fenomena cahaya menembus kaca setebal  $\Delta$  mm dengan indeks bias  $n_2$  ditunjukkan dalam Gambar 10.13. Cahaya dari luar ruangan dengan indeks bias udara  $n_1$ , menembus kaca sehingga mencapai dalam ruangan dengan indeks bias udara dalam ruangan  $n_3$ . Cahaya datang sesuai garis  $\overline{AB}$  dengan sudut  $i$  direfleksikan pada permukaan kaca  $PQ$  sesuai garis  $\overline{BC}$  dengan sudut  $i$  dan ditransmisikan kedalam kaca sesuai kurva  $\overline{BD}$  dengan sudut refraksi  $r$ . Sesuai Hukum Snell, besar sudut refraksi  $r$ :

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin i}{\sin r} \quad \dots\dots (10.6)$$

Cahaya ditransmisikan lebih lanjut keluar kaca sesuai garis  $\overline{DE}$  dengan sudut  $rt$ . Sesuai dengan Hukum Snell, besar sudut refraksi  $rt$ :

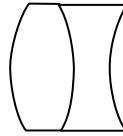
$$\frac{n_2}{n_3} = \frac{\sin it}{\sin rt} \quad \dots\dots\dots (10.7)$$

Absorpsi energi cahaya yang ditransmisikan pada kaca menyebabkan suhu kaca meningkat, sedangkan transmisi energi yang mencapai dalam ruangan meningkatkan suhu ruangan. Karena itu, sesuai kurva  $\overline{DE}$  sudut datang setelah cahaya ditransmisikan  $it$  (*incident transmitted angle*) lebih kecil daripada sudut refraksi ketika cahaya masuk ke dalam kaca ( $it < r$ ). Hal itu menghasilkan garis  $\overline{DE}$  tidak paralel terhadap garis  $\overline{AB}$ .

Fenomena refraksi dan absorpsi cahaya pada kaca setebal  $\Delta$  mm merubah nilai parameter-parameter gelombang dalam medium kaca baik cepat rambat, panjang, dan frekuensi gelombang. Dalam praktek, banyak kaca dirancang dengan tebal relatif tipis terhadap panjang gelombang, sehingga proses refraksi dan absorpsi cahaya dalam kaca dapat diabaikan kurva  $\overline{BD}$  diasumsi sebagai garis lurus sehingga garis  $\overline{DE}$  paralel terhadap garis  $\overline{AB}$ .

### 10.5.2. Lensa Cembung

Pada bagian terdahulu telah dibahas bahwa umumnya lensa dibuat dalam 6 bentuk varian geometri, 3 varian di antaranya lensa tersebut dibuat dengan satu sisi cembung (*convex*) dan 3 varian lainnya dibuat dengan satu sisi cekung (*concave*). Dua atau lebih dari lensa tersebut dapat digunakan bersama-sama atau kombinasikan untuk menghasilkan image yang lebih berkualitas. Pada bagian ini dibahas lebih lanjut 2 jenis di antara 6 tipe lensa tersebut, yaitu lensa dengan kedua sisi cembung (*biconvex*) dan lensa dengan kedua sisi cekung (*biconcave*). Kedua jenis lensa dapat juga dikombinasikan sebagaimana dalam gambar berikut.



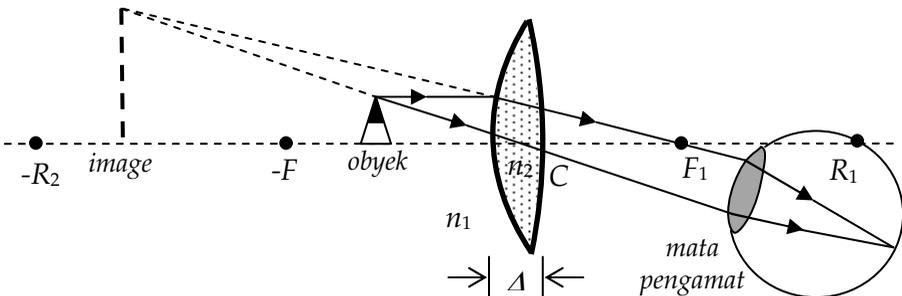
*Biconvex Biconcave*

**Gambar 10.14** Kombinasi Lensa *Biconvex* dan *Biconcave*

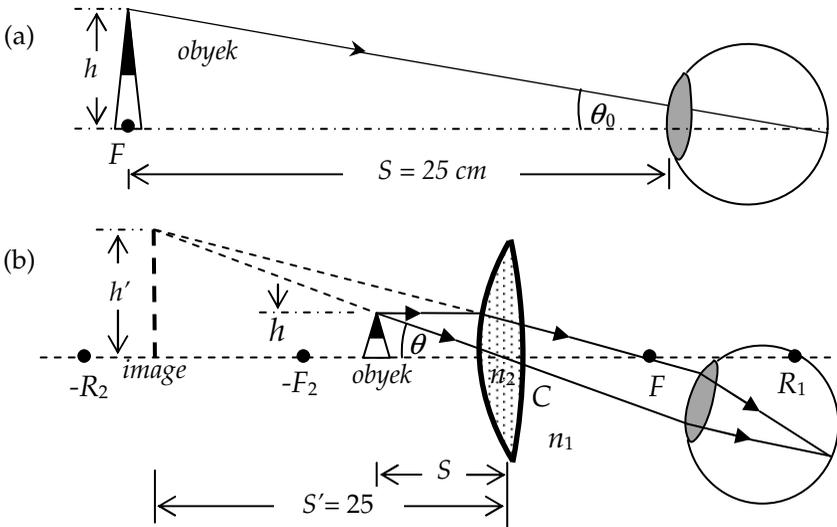
Kombinasi lensa *biconvex* dan *biconcave* menghasilkan suatu bentuk lensa yang mirip dengan lensa *negatif meniscus*, bandingkan antara Gambar 10.14 dengan Gambar 10.5.

Lensa dengan kedua sisi lensa berbentuk cembung disebut dengan lensa *biconvex*. Lensa jenis ini umum digunakan sebagai kaca pembesar atau loop untuk memperbesar image yang terbentuk di belakang lensa. Lensa dapat juga dipakai dengan memfokuskan sinar radiasi yang datang dari matahari untuk menghasilkan api.

Tampak dalam Gambar 10.15, lensa cembung dibuat dengan indeks refraksi  $n_2$  dan tebal  $\Delta$  mm relatif tipis sehingga termasuk kelompok lensa-lensa tipis (*thin lens*). Sinar datang dari ujung obyek ke lensa bersifat divergen kemudian sinar tersebut kembali konvergen setelah menembus lensa mata. Semua sinar marginal yang datang langsung direfleksikan oleh permukaan lensa.



**Gambar 10.15** Obyek dan Image pada Lensa Cembung



**Gambar 10.16** Obyek, Bayangan, dan Image pada Cermin Datar

Pembesaran angular berkaitan langsung dengan penggunaan lensa sebagai **sistem optik tambahan** untuk **meningkatkan daya pengelihatan** mata manusia. Lihat perbedaan Gambar 10.16(a) dengan Gambar 10.16(b), **pembesaran angular lensa** ( $m$ , *len angular magnification*) adalah rasio antara sudut pandang pada jarak obyek tertentu ke tepi lensa ( $\theta$ ) dengan sudut pandang pada jarak obyek terdekat ke mata ( $\theta_0$ ). Dari Gambar 10.16(a), mata rileks menatap obyek pada jarak obyek terdekat  $S = f = 25 \text{ cm}$ , dengan besar sudut  $\theta_0$ :

$$\text{tg } \theta_0 \approx \theta_0 \approx \frac{h}{S} \approx \frac{h}{25} \text{ (cm)} \quad \dots\dots\dots (10.8)$$

Lihat Gambar 10.16(b), besar sudut  $\theta$ :

$$\text{tg } \theta \approx \theta \approx \frac{h}{-S} \approx \frac{h'}{-S'} \approx \frac{h'}{-25 \text{ cm}}$$

$$\text{tg } \theta \approx \theta \approx \frac{h}{S} \approx \frac{h'}{25 \text{ cm}} \quad \dots\dots\dots (10.9)$$

Maka, pembesaran angular dinyatakan secara matematis:

$$m = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{\frac{h'}{25}}{\frac{h}{25}} = \frac{h'}{h} \quad \dots\dots (10.10)$$

Berdasar persamaan sinus pada perbandingan panjang di depan sudut  $\theta$  dalam Gambar 10.16(b), maka persamaan 10.8 dapat dinyatakan:

$$m = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{h'}{h} = \frac{S'}{S} = -\frac{25}{S} \quad \dots\dots (10.11)$$

Jika obyek diletakkan tepat pada fokus  $S = f = 25$  cm, dengan syarat  $r_1 = r_2$  sehingga  $f_1 = f_2 = f$  maka:

$$m = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{h'}{h} = \frac{S'}{S} = -\frac{25}{f} \text{ (cm)} \quad \dots\dots (10.12)$$

Tanda minus menunjukkan image bersifat virtual dan berada di dalam/ belakang lensa, di mana garis perpanjangan sinar digambar dengan garis putus-putus dalam diagram sinar.

Persamaan 10.11 dapat juga dipakai untuk menentukan lebar image dengan mensubstitusi tinggi obyek ( $h$ ) dengan lebar obyek ( $l$ ) dan tinggi image ( $h'$ ) dengan lebar image ( $l'$ ), semua besaran tersebut dalam satuan panjang.

Untuk lensa cembung, persamaan Euclid pada persamaan 10.2 harus dimodifikasi guna mengakomodasikan jari-jari kelengkungan permukaan lensa  $r_1$  dan  $r_2$  serta indeks refraksi bahan lensa  $n$  sebagai berikut:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad \dots\dots (10.13)$$

di mana  $n$  adalah indeks refraksi dari bahan lensa di udara. Untuk  $(n_2 - n_1)/n_1$  diambil indeks refraksi udara  $n_1 = 1$ , maka didapat persamaan lensa:

$$\left( \frac{1}{S} + \frac{1}{S'} \right) = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad \dots\dots (10.14)$$

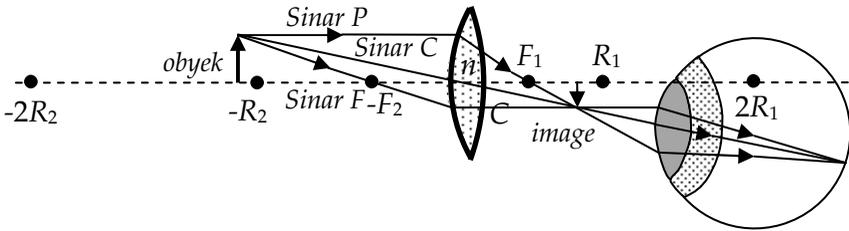
## Optik

dengan  $f$  adalah jarak fokus lensa (m),  $1/f$  adalah daya alat optik,  $S$  adalah posisi obyek dari lensa (m),  $S'$  adalah posisi image dari lensa (m),  $r_1$  adalah radius 1 permukaan lensa di mana obyek berada (m), dan  $r_2$  adalah radius 2 permukaan lensa  $r_2$  (m), dan  $n$  adalah indeks refraksi bahan lensa.

Penggambaran sinar paraxial pada diagram sinar untuk lensa spheris tidak sama dengan untuk cermin spheris, baik cermin cekung atau pun cembung. Diagram sinar untuk lensa penting untuk mendeteksi posisi ( $S'$ ) dan ukuran ( $h'$ ) image dari suatu obyek dengan posisi ( $S$ ) dan ukuran ( $h$ ) di dekat suatu lensa. Posisi image ditentukan dari titik potong 2 di antara sinar paraxial yang memenuhi ketentuan berikut:

- (1) Sinar datang parallel axis direfraksikan melalui titik fokus lensa dan disebut *Sinar P*;
- (2) Sinar datang melalui titik fokus lensa direfraksikan parallel axis dan disebut *Sinar F*; dan
- (3) Sinar datang melalui titik pusat lensa diteruskan dan disebut *Sinar C*;

Obyek dan image di sekitar lensa konvergen divisualisasikan dengan diagram sinar dalam Gambar 10.17. Tampak sebuah lensa cembung di depan mata pengamat dengan 2 jari-jari kelengkungan permukaan yaitu  $r_1$  antara  $r_2$  dengan  $r_1$  lebih kecil daripada  $r_2$  ( $r_1 < r_2$ ). Berdasar persamaan 10.14, lensa memiliki 2 fokus, yaitu  $F_1$  dan  $F_2$  pada jarak terhadap lensa berturut-turut adalah  $f_1$  antara  $f_2$  dengan  $f_1$  lebih kecil daripada  $f_2$  ( $f_1 < f_2$ ). Baik jari-jari kelengkungan maupun fokus bertanda positif pada posisi di depan lensa atau negatif pada posisi di belakang lensa. Untuk posisi obyek pada ruang antara  $-2R_2$  antara  $-R_2$  dihasilkan image pada perpotongan sinar  $P$ , sinar  $F$ , dan sinar  $C$  pada posisi antara  $F_1$  antara  $R_1$ . Image bersifat real, terbalik, dan diperkecil.



**Gambar 10.17** Obyek dan Image pada Lensa *Biconvex*

Contoh soal 10.4

Tentukan sifat-sifat dan tinggi image suatu huruf setinggi 2 cm di depan sebuah lensa cembung berdiameter 40 mm dengan jari-jari kelengkungan sama yaitu 80 mm dan indeks refraksi 1,55, jika huruf berada pada jarak 4 cm dari lensa.

Jawab:

$r = -80 \text{ mm} = -0,08 \text{ m}$ ;  $S = -4 \text{ cm} = -0,04 \text{ m}$ ; dan  $h = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$ .

$$f = -\frac{r}{2} = -\frac{0,08}{2} = -0,04 \text{ m}$$

Dengan demikian obyek berada pada fokus lensa sehingga image berada pada jarak tak berhingga, real, terbalik, dan berukuran sama tinggi -2 cm.

Contoh soal 10.5

Tentukan sifat-sifat dan tinggi image dalam soal nomor 10.4 jika huruf berada pada jarak 5 cm dari lensa.

Jawab:

$r = -80 \text{ mm} = -0,08 \text{ m}$ ;  $S = -5 \text{ cm} = -0,05 \text{ m}$ ; dan  $h = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$ .

$$f = -\frac{r}{2} = -\frac{-0,08}{2} = -0,04 \text{ m}$$

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{-0,04} = -25 \text{ dioptri}$$

## Optik

Oleh karena  $r = r_1 = r_2$  dalam persamaan 10.13 maka daya lensa tidak dipengaruhi jari-jari kelengkungan permukaan lensa dan indeks refraksi bahan lensa  $n$ .

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \text{ sehingga } \frac{1}{-0,04} = \frac{1}{-0,05} + \frac{1}{s'} \text{ maka } \frac{1}{s'} = \frac{-(0,05+0,04)}{-0,0020} = \frac{0,01}{0,0020}$$

maka  $s' = 0,2 \text{ m}$ .

$$M = \frac{h'}{h} = \frac{s'}{s} \text{ maka } M = \frac{s'}{s} = \frac{0,2}{-0,05} = -4$$

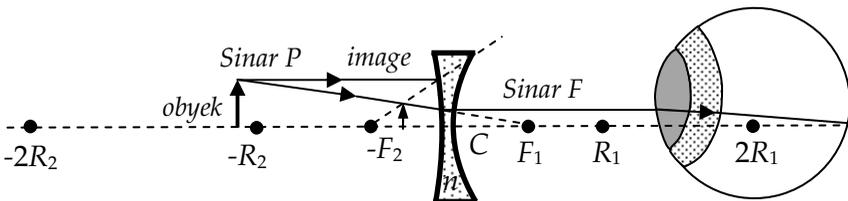
$$M = \frac{h'}{h} = -4 \text{ maka } h' = -4 \cdot h = -4 \cdot 0,02 = -0,08 \text{ m}$$

Jadi, image yang terbentuk:

- (1) Posisi image 6 m di belakang cermin cekung,
- (2) Image bersifat real,
- (3) Image bersifat terbalik, dan
- (4) Nilai pembesaran adalah  $-4$  dengan  $h' = -0,08 \text{ m}$ .

### 10.5.3. Lensa Cekung

Lensa cekung memiliki fungsi berkebalikan dengan lensa cembung. Lensa *biconcave* adalah lensa dengan kedua sisi lensa berbentuk cekung. Lensa jenis ini digunakan untuk memperkecil image yang terbentuk di belakang lensa dengan melebarkan sinar radiasi yang datang dari obyek, misal pengcilan obyek dalam Gambar 10.18.



**Gambar 10.18** Obyek dan Image pada Lensa *Biconcave*

**10.6 SOAL-SOAL**

1. Jelaskan yang dimaksud:
  - a) sinar cahaya
  - b) obyek
  - c) bayangan
  - d) image
  - e) spektrum warna
  - f) dioptri
  - g) konvergensi
2. Berikan sketsa dan keterangan untuk pokok-pokok berikut:
  - a) Organ-organ mata
  - b) pembesaran linier
  - c) pembesaran angular
  - d) gambar perspektif
  - e) ruang pandang
3. Jelaskan jenis-jenis peralatan dasar optik.
4. Sebutkan jenis-jenis aberrasi yang mungkin pada suatu lensa dan berikan sketa pada jawaban Anda.
5. Pada saat mengamati obyek, mata melakukan kontraksi. Kondisi bagaimanakah yang memungkinkan mata dapat menatap obyek secara rileks.
6. Sebutkan benda-benda yang Saudara ketahui dibuat dengan sistem optik dan diaplikasikan di bidang teknik sipil dan arsitektur, jelaskan pula fungsi dari masing-masing benda yang Saudara sebutkan itu.
7. Tuliskan persamaan optik untuk
  - a) cermin
  - b) lensa
  - c) pembesaran linier
  - d) pembesaran angular

## Optik

8. Sebuah tongkat dibuat dari bahan kayu jati memiliki tinggi 1,0 m. Tongkat tersebut ditegakkan pada jarak 2,0 m di depan sebuah cermin cekung yang dibuat setinggi 2,0 m dan kelengkungan cermin 6,0 m. Tentukan:
  - a) keadaan/sifat image tongkat yang terbentuk,
  - b) tinggi image tongkat,
  - c) daya cermin cekung.
9. Sebuah tongkat dibuat dari bahan kayu jati memiliki tinggi 1,0 m. Tongkat tersebut ditegakkan pada jarak 3 m di depan sebuah cermin cekung yang dibuat setinggi 2 m dan jari-jari kelengkungan cermin 6 m. Tentukan keadaan image:
  - a) Sifat-sifat image tongkat,
  - b) tinggi image tongkat,
  - c) daya cermin cekung.
10. Apabila jarak tongkat dari cermin adalah 2, 6, 8, 10, 12, 14, dan 16 m di depan sebuah cermin cekung dalam soal nomor 5. Tentukan keadaan image dan tinggi image untuk masing-masing posisi obyek tersebut.
11. Jika posisi obyek pada soal nomor 6 ditempatkan di depan cermin cekung dengan radius 3 m, tentukan keadaan image dan daya cermin.
12. Suatu lensa memiliki dua sisi cembung dengan radius sama sebesar 80 cm dan diameter 50 mm. Buat diagram sinar untuk masing-masing obyek dan image yang terbentuk jika tinggi obyek adalah 36 mm dan jarak obyek 30, 40, 50, 80, 100, dan 1000 cm.
13. Buat diagram sinar untuk masing-masing obyek setinggi 30 mm dan image pada suatu lensa cekung dengan radius sama sebesar 80 cm dan diameter 50 mm jika jarak obyek 30, 40, 50, 80, 100, dan 1000 cm.

14. Dua lensa cembung diletakan dengan jarak 60 cm. Lensa pertama dan kedua memiliki permukaan dengan radius sama sebesar 80 cm dan diameter 50 mm. Tentukan kondisi image yang dibentuk oleh kedua lensa jika obyek berada pada jarak 200 mm di sebelah kiri lensa pertama.

# Daftar Pustaka

- BIPM Editors. 2006. *The International System of Units (SI)*. 8th Ed. Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures (BIPM).
- Einstein , T.A. dan L. Infeld. 1938. *The Evolution of Physics*. London: Cambridge university press.
- Halliday, David, Robert Resnick, dan Kenneth S. Krane. 2002. *Physics*, Vol.II Extended, 5th Ed. NewYork: John Wiley & Sons Inc.
- Louis de Broglie. 1990. *An Introduction to the Study of Wave Mechanics*. London: Phillips Press.
- Modi, P.N. dan S.M. Seth. 1991. *Hydraulic and Fluid Mechanics (Including Hydraulic Machines)*. Edisi kesepuluh. Delhi: Rajinder Kumar Jain Standart Book House.
- René, Dugas. 1955. *A History of Mechanics*. Translated from French in to English by J. Maddox. London: Routledge & Kegan Paul Ltd.
- Serway, Raymond A., Jewett Jr., dan John W. 2004. *Physics for Scientist and Engineers with Modern Physics*. 6th Ed. Brooks/Cole. Singapore: Thomson Learning Asian Edition.
- Suhendro, Bambang. 2000. *Mekanika Kontinum*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Suriasumantri, Jujun S. 2001. *Filsafat Ilmu Sebuah Pengantar Populer*. Cetakan Keempatbelas. Jakarta: Pustaka Sinar Harapan.
- Taylor, Barry N. dan Ambler Thompson. 2001. *NIST Special Publication 330 2001 Edition: The International System of Units (SI)*. Gaithersburg,: NIST Special Publication.
- Taylor, Barry N. dan Ambler Thompson. 2008. *NIST Special Publication 811 2008 Edition: Guide for the Use of the International System of Units (SI)*. Gaithersburg,: NIST Special Publication.

- Utomo, K. Satrijo dan Endah Kanti Pangestuti. 2011. "Perilaku Lentur Dorpel Kusen Beton Bertulang". *Jurnal TERAS*, Tahun 8 Ed.II hlm. 15-72.
- Utomo, K. Satrijo, Dinar Catur Istiyanto, Suranto, Radiana Triatmadja, dan Nur Yuwono. 2004(a). "Karakteristik Hidraulik Hutan Bakau dalam Meredam Energi Tsunami". *Seminar: Perkembangan Riset untuk Penanggulangan Bencana Tsunami di Indonesia*. 9 Maret 2004.
- Utomo, K. Satrijo, Radiana Triatmadja, dan Nur yuwono. 2004(b). "Rhizophora Forest as a Tsunami Damper". *TEKNOSAINS*, No.1 Vol.17 (1) hlm. 131-147.
- Utomo, K. Satrijo. 1999. "Penggambaran Jaring Aliran (Flownet) dengan Metoda Beda Hingga". *Jurnal TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN*, No.2 Vol.1 hlm. 120-134.
- Utomo, K. Satrijo. 2014. "Redefinisi Besaran Kerja, Daya, dan Energi sebagai Besaran Vektor". *Jurnal TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN*, No.1 Vol.16 hlm. 39-50.
- Young, H.D. dan Freedman, R. A. 2000. *Unversity Physics*. 10th Ed., Singapore: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Yuwono, Nur, 1994, *Perencanaan Model Hidraulik*, Yogyakarta: Laboratorium Hidraulik dan Hidrologi PAU-IT-UGM.

# Indeks

## A

Abrasi 238  
Absorpsi 228  
Acuan inersial 80  
Aksi 22  
Aksial 87  
Akustik 206  
Alir 48  
Amphidromi 236  
Amplitudo 19  
Angguk 47  
Angka gelombang 70  
Arah kerja 78  
Asumsi 16

## B

Beban satuan 175  
Beban terbagi rata 175  
Beban terpusat/ titik 176  
Benda kaku 163, 164  
Benda kontinum 163  
Benda padat 5, 125  
Berat 80, 93  
Besaran 21, 22, 29  
Besaran dasar 22  
Besaran pelengkap 22  
Besaran pokok 22  
Besaran skalar 22, 29  
Besaran standar 21

Besaran tambahan 22,  
Besaran turunan 22,  
Besaran vektor 22, 29

## C

Cahaya 250  
Cepat rambat gelombang 69,  
212  
Cermin 266  
*Collinear* 88  
*Concurrent* 88  
*Coplanar* 88

## D

Daya 116, 117  
Debit 192  
Diam 80  
Difraksi 228  
Dilatasi 46  
Dimensi 22, 31, 34  
Dinamika 18, 77

## E

Efek Doppler 240  
Efek fotolistrik 240  
Efisiensi energi 122  
Eksentrisitas 88  
Ekspansi thermal 153  
Elemen 42  
Energi 10, 11, 118

Energi diam 122  
 Energi gesek 121  
 Energi kinetik 118  
 Energi mekanis 120  
 Energi potensial 120  
 Energi relativistik 122

## F

Fenomena siklik/periodik 61,  
 199  
*Fluorescence* 239  
 Frekuensi 63, 68  
 Frekuensi gelombang 200, 201,  
 212,  
 Frekuensi natural 229, 230,  
*Front* gelombang 207

## G

Gas 5, 42  
 Gas sempurna 159  
 Gaya 78, 80, 81, 82, 84, 86  
 Gaya aksi 86  
 Gaya apung 189  
 Gaya bentur 137  
 Gaya eksentris 88  
 Gaya external 86  
 Gaya gesek dinamik 100  
 Gaya gesek eksternal 121  
 Gaya gesek internal 121  
 Gaya gesek statik 99  
 Gaya geser 98, 182, 184  
 Gaya gravitasi 78  
 Gaya impulsif 130

Gaya inersia 82  
 Gaya internal 86  
 Gaya konservatif 119  
 Gaya normal 93  
 Gaya parallel 90  
 Gaya pegas 104  
 Gaya reaksi 86  
 Gaya sebangun 89  
 Gaya sebidang 89  
 Gaya segaris 89  
 Gaya sentrifugal 102  
 Gaya sentripetal 102  
 Gaya tahanan 137  
 Gaya tarik 97  
 Gaya tekan 95  
 Gaya terpusat/ titik 176  
 Gaya tunggal 88  
 Gelinding 46, 181  
 Gelombang berdiri 230  
 Gelombang bunyi 206, 209  
 Gelombang datang 227  
 Gelombang elektromagnetik  
 200, 209  
 Gelombang longitudinal 200  
 Gelombang mekanik 200, 202  
 Gelombang refleksi 227  
 Gelombang transversal 200  
 Gelombang zat air 204  
 Gelombang zat gas 205  
 Gelombang zat padat 202  
 Gerak 44, 54, 125  
 Gerak Brown 48  
 Gerak lurus beraturan GLB 54

## Indeks

Gerak lurus berubah  
beraturan GLBB 55  
Gerak melingkar beraturan  
GMB 61  
Gerak melingkar berubah  
beraturan GMBB 65  
Gerak relatif 75  
Geser 46, 181  
Goyang 47

## H

Harmoni 232  
*Heat* 122, 143, 144  
*Heat* molar 148  
*Heat* spesifik 144  
Hidraudinamika 182  
Hidraulika 18  
Hidraustatika 182  
Hipersonik 208  
Hipotesa 16  
Hukum 16

## I

Impuls 130  
Indeks refraksi 214, 223  
Infrasonik 208  
Insolasi 240  
Intensitas bunyi 219  
Intensitas gelombang 219  
Interferensi 227

## J

Jarak 54, 69

## K

Kaca 273  
Kalor/ kalori 143  
Kapasitas *heat* 148  
Kapasitas *heat* molar pada  
tekanan konstan 149  
Kapasitas *heat* molar pada  
volume konstan 149  
Kapilaritas 185  
Karakteristik fisik 173  
Kebisingan 240  
Kecepatan 52, 192  
Kecepatan sesaat 52  
Kecepatan sudut 63, 70  
Kecepatan tangensial 64  
Kekekalan energi 120  
Kekentalan absolut 185  
Kekentalan dinamik 185  
Kekentalan kinematik 184  
Kekentalan/ viskositas 184  
Kekerasan bunyi 220  
Kerja 112, 113  
Kerja dalam 128  
Kerja oleh gaya berubah 115  
Kerja oleh gaya tetap 114  
Kerja-energi 119  
Keselarasan massa energi 122  
Keuntungan mekanik 107  
Kinematika 18, 199  
Kinetika 10, 77  
Koefisien ekspansi linier 154  
Koefisien ekspansi luas/area  
154

Koefisien ekspansi volume  
154  
Koefisien gesek dinamik 100  
Koefisien gesek statis 99  
Koefisien konduktivitas  
thermal 150  
Koefisien refleksi 227  
Kondensasi 156  
Konduksi 150  
Konsep 17  
Konstanta pegas 104  
Kontinuitas aliran 193  
Konveksi 152

## L

Lateral 88  
Lengan momen 106  
Lengan torsi 106  
Lensa 258  
Likuifaksi 238  
Longitudinal 88

## M

Massa 10, 11  
Massa molar 148  
Mekanika fluida 18  
Mekanika gelombang 18  
Mekanika klasik 43  
Mekanika kontinum 18  
Mekanika quantum 43  
Metamerisme 239  
Metode analitis 38  
Metode eksperimen 9, 14

Metode empirik 37  
Metode Eulerian 50  
Metode ilmiah 15  
Metode Lagrangian 49  
Metode parallelogram 92  
Metode proyeksi 92  
Metode superposisi 92  
Metode teoritis 9, 14  
Metode terapan 9, 14  
Metrologi 21  
Model fisik 32, 174  
Momen 106  
Momen kopel 107  
Momen statis 174, 176  
Momentum 125  
Momentum linier 129

## N

Noise 218

## O

Optika quantum 245  
Osilasi 47, 204

## P

Pancaran / radiasi 152  
Panjang Gelombang 68, 69,  
214  
Parameter-parameter tanpa/  
non dimensi 31  
Partikel 42  
Pemuaian 154  
Pengukuran 21

## Indeks

- Penjalaran/ propagasi 68, 69  
Penyusutan 154  
Percepatan 53  
Percepatan gravitasi bumi 79, 81  
Percepatan radial 102  
Percepatan rata-rata 53  
Percepatan sentripetal 102  
Percepatan sesaat 53  
Percepatan sudut 65  
Percepatan tangensial 66  
Periode 62  
Periode gelombang 68, 202  
Perspektif 262  
Perubahan momentum 129  
*Photon* 213  
Plasma 5  
Polarisasi 233  
Postulat 17  
Potensial energi gesekan 121  
Prinsip 17  
Propagasi / penjalaran 68, 199  
Prototipe 32, 35  
Pulsa 217  
Pusat berat 81, 176  
Pusat massa 43, 126, 176  
Putar 47
- R**
- Radial 47  
Radiasi/ pancaran 152  
Rasio kapasitas *heat* molar pada tekanan konstan terhadap volume konstan 149  
Redaman 138  
Refleksi 226  
Refleksi internal total 234  
Refraksi 223  
Refraksi eksternal 225  
Refraksi internal 225  
Regangan 98  
Resonansi 231  
Respon impuls 130  
Resultan 80, 90  
Revolusi 46  
Revolvi 46  
Rotasi 46  
Ruang pandang 261
- S**
- Satuan 26, 30  
Satuan SI 28  
Sebangun dinamik 33  
Sebangun geometrik 32  
Sebangun kinematik 33  
Sebar 47, 152  
Sedimentasi berlebihan 238  
Simbol awalan 28  
Simbol besaran 22  
Simbol satuan 22  
Simpangan 63, 69  
Simpangan sudut 60  
Sinyal 216  
Sistem 37, 120  
Sistem gaya 88

Sistem kotak hitam 37  
Sistem partikel kontinyu 126,  
127, 128, 163  
Skala model 32  
Skalar 29  
Sonik 208  
Stabilitas dinamik 163  
Stabilitas statis 163  
Statika 18, 77  
Sudut arah 61, 63  
Sudut datang 223  
Sudut pandang 259  
Sudut phasa 61  
Sudut refleksi 226  
Sudut refraksi 224  
Suhu/ temperatur 142  
Susutan 96

**T**

Tahanan 138  
Tegangan gesek 185  
Tegangan geser 98, 164  
Tegangan permukaan 183  
Tegangan tarik 97, 164  
Tekanan 95, 164, 186  
Temperatur/ suhu 142

Teori 16  
Timbre 218  
Titik asal 44, 49  
Torsi 106  
Translasi 45  
Transversal 88  
Tumbukan 128, 133  
Tumbukan lenting 134

**U**

Ultrasonik 208

**V**

Vektor 29  
Viskositas/ kekentalan 184  
Voli 46

**W**

Warna 251  
Warna suara 218

**Z**

Zat alir 181, 192  
Zat cair 6, 181, 125

# Glosarium

**Analisis dimensi** adalah analisis terhadap dimensi besaran-besaran yang akan digunakan sebagai parameter dalam uji laboratorium memakai model fisik.

**Asumsi** adalah pernyataan syarat yang diyakini kebenarannya tanpa perlu diuji.

**Berat benda** adalah gaya yang disebabkan oleh gravitasi terhadap benda.

**Besaran** adalah suatu yang dikenai pengukuran.

**Daya** adalah hasil bagi kerja per satuan waktu. 1. Laju pencapaian kerja. 2. Batas minimal kekuatan gaya kerja yang disyaratkan.

**Energi/ tenaga** adalah potensi yang dikandung pada massa benda baik dalam keadaan diam maupun bergerak.

**Fenomena siklik/ periodik** merupakan fenomena yang terjadi secara berulang-ulang atau periodik dalam siklus waktu tertentu.

**Gaya** adalah perkalian antara massa dengan percepatan benda.

**Gelombang** (*wave*) adalah gerak energi.

**Gerak** (*motion*) adalah perubahan posisi di mana partikel dari lokasi mula-mula partikel.

**Gerak relatif** adalah gerak suatu partikel yang bersifat relatif terhadap partikel lainnya, dapat dinyatakan dalam 4 opsi keadaan keadaan, yaitu: diam, terkejar, mendekati, dan menjauhi.

**Heat** adalah jumlah energi thermal yang ditransfer dari satu lokasi ke lokasi lain yang memiliki suhu lebih rendah.

**Hipotesa** adalah suatu dugaan yang belum diyakini kebenarannya dan perlu dibuktikan kebenarannya karena belum terbukti, dapat juga diartikan sebagai simpulan sementara yang masih perlu diuji kebenarannya.

**Ilmu teknik** (*technology*) atau teknologi/ rekayasa (*engineering*) adalah bidang ilmu yang mempelajari cara untuk memudahkan manusia dalam melakukan proses tertentu.

**Ilmu/ sains** (*science*) adalah kumpulan pengetahuan yang disusun secara konsisten dan kebenarannya telah teruji secara empiris, merupakan bagian dari pengetahuan, di samping pengetahuan lainnya seperti humaniora (seni, filsafat, agama, bahasa, dan sejarah) dan matematika.

**Kerja** adalah perkalian vektor antara gaya dan gerak. 1. Kemampuan gaya. 2. Jumlah energi yang ditransformasikan. 3. Energi yang dihasil oleh gaya.

**Kinematika** adalah cabang fisika yang mempelajari fenomena-fenomena pada benda diam maupun bergerak tanpa meninjau gaya yang bekerja pada benda.

**Kinetika** adalah cabang fisika yang mempelajari fenomena-fenomena pada benda diam maupun bergerak dengan meninjau gaya yang bekerja pada benda.

**Konsep** merupakan deskripsi dari **ide/ gagasan** yang dikembangkan secara kronologis dan utuh berdasar logika ilmiah.

**Metode eksperimen** adalah cara pendekatan dalam fisika dengan menguji kebenaran hasil-hasil fisika teoritis yang dapat direalisasikan.

**Metode ilmiah** adalah gabungan metode teoritis dan eksperimen.

**Metode teoritis** adalah cara pendekatan dalam fisika dengan keleluasaan, kebebasan, dan ketajaman berfikir serta ciri khas bersifat ilmiah deduktif, analitis, dan idealis.

**Metode terapan** adalah cara pendekatan dalam fisika dengan mencari kemungkinan pemanfaatan/ penerapan suatu produk/ proses hasil fisika teori yang telah teruji kebenarannya untuk kesejahteraan manusia serta ciri khas bersifat ilmiah praktis.

**Metrologi** adalah ilmu yang mempelajari seluk beluk pengukuran.

**Partikel** adalah bagian terkecil dari suatu benda/ zat yang masih memiliki bentuk, massa, dan energi.

**Pengetahuan** (*knowledge*) adalah segenap apa yang telah diketahui manusia tentang suatu objek tertentu.

**Pengukuran** adalah proses perbandingan suatu besaran dengan besaran standarnya.

**Pusat massa** adalah titik di mana massa kumpulan partikel terpusat, memiliki koordinat  $x_{CM}$ ,  $y_{CM}$ , dan  $z_{CM}$ .

**Sistem** (*system*) adalah suatu rangkaian beberapa fenomena/ peristiwa/ kejadian/ proses (*process*) tertentu guna mendapatkan hasil/keluaran (*output*) tertentu dari berbagai masukan (*input*) yang juga tertentu.

**Sistim kotak hitam** adalah suatu bentuk sistem di mana kajian tidak difokuskan pada proses yang terjadi, tetapi pada kondisi dan obyek pada sistem.