

PENGANTAR FISIKA DASAR I

Dr. Bahtiar., M.Pd.Si.

PENGANTAR FISIKA DASAR I

LP2M UIN MATARAM

Perpustakaan Nasional RI. Katalog dalam Terbitan (KDT)

Bahtiar

PENGANTAR FISIKA DASAR I
LP2M UIN Mataram, 2017
xxiv +242 hlm.; 14,8 x 21 cm
ISBN: **978-602-6223-64-7**

I. Pendidikan Sains II. Judul

Pengantar Fisika Dasar I

Penulis : Dr. Bahtiar., M.Pd.Si.
Editor : Dr. Jumarim
Layout & Desain Sampul : Muhammad Amalahanif

Cetakan I, September 2017

Penerbit:

LP2M UIN Mataram

Jln. Pendidikan No. 35 Mataram, Nusa Tenggara Barat 83125
Telp. 0370-621298, 625337. Fax: 625337

Hak Cipta ©2017 pada penerbit

Hak cipta dilindungi oleh Undang-undang.

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, tanpa izin tertulis dari penulis.

SAMBUTAN REKTOR UIN MATARAM

Segala puji hanya milik Allah SWT, Shalawat serta salam kita curahkan kepada Nabi Mulia, Muhammad SAW.

Ekstensi dari idealisme akademis civitas akademika UIN Mataram, khusus para dosen, tampaknya mulai menampakkan dirinya melalui karya-karya tulis mereka. Karya tulis yang difasilitasi oleh LP2M, seperti beberapa buah buku dalam berbagai disiplin keilmuan semakin mempertegas idealisme tersebut. Kami sangat menghargai dan mengapresiasinya.

Dalam konteks bangunan intelektual yang sedang dan terus dikembangkan di UIN Mataram melalui “Horizon Ilmu” juga menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari karya-karya para dosen tersebut, terutama dalam bentangan keilmuan yang saling mendukung dan terkait (*intellectual connecting*). Bagaimanapun, problem kehidupan tidaklah tunggal dan variatif. Karena itu, berbagai judul maupun tema yang ditulis oleh para dosen tersebut adalah bagian dari faktualitas “kemampuan” para dosen dalam merespon berbagai problem tersebut.

Hadirnya beberapa buku tersebut harus diakui sebagai langkah maju dalam percaturan akademis UIN Mataram, yang mungkin, dan secara formal memang belum terjadi di UIN Mataram. Kami sangat berharap tradisi akademis seperti ini akan terus kita kembangkan secara bersama-sama dalam rangka dan upaya mengembangkan UIN Mataram menuju satu tahapan kelembagaan yang lebih maju.

Terima kasih kepada Dr. M. Sobry, M.Pd (Selaku Ketua LP2M) yang telah memfasilitasi para dosen, dan kepada para penulis buku-buku tersebut.

Rektor UIN Mataram

Dr. H. Mutawali, M.Ag

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT karena berkat rahmat, taufik serta hidayah-Nya, sehingga penulisan buku ajar yang berjudul: “**Pengantar Fisika Dasar 1**” ini dapat diselesaikan. Shalawat serta salam semoga dilimpahkan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW yang telah membawa umat manusia ke jalan yang benar.

Penulis menyadari bahwa penyelesaian buku ajar ini adalah berkat bantuan dan kerjasama yang baik dari berbagai pihak, dan penulis menyadari sepenuhnya tanpa adanya bantuan dan dukungan tersebut penulisan buku ajar ini mungkin tidak akan terselesaikan tepat pada waktunya.

Penulis menyadari, apa yang disajikan dalam penulisan buku ajar ini bukanlah suatu yang sempurna dan mutlak kebenarannya. Kritik dan saran yang bersifat membangun dan menyempurnakan, sangat diharapkan. Semoga bahan ajar ini dapat bermanfaat untuk semuanya. Amiin.

Mataram, Agustus 2017

Penulis

DAFTAR ISI

Sambutan Rektor UIN Mataram	v
Kata Pengantar	vi
Daftar Isi	xxi
BAB I BESARAN, SATUAN, DAN DIMENSI	1
1. Besaran-Besaran Fisika	1
2. Satuan Besaran Fisis	3
4. Konversi Satuan	5
6. Notasi Ilmiah	12
7. Angka Penting	13
8. Dimensi Besaran	14
9. Analisis Dimensi	15
BAB II VEKTOR	19
1. Vektor Satuan	19
2. Perkalian Titik dan Perkalian Silang	20
3. Penjumlahan Vektor	27
4. Menentukan Resultan Vektor	31
BAB III KINEMATIKA GERAK	41
1. Pendahuluan	41
2. Vektor Posisi	41
3. Perpindahan	41
4. Kecepatan rata-rata dan kecepatan sesaat	43
6. Hubungan antar posisi, kecepatan dan percepatan	49
8. Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB)	57
9. Gerak Vertikal	59

BAB IV DINAMIKA GERAK	79
1. Pendahuluan	79
2. Gaya dan Interaksinya	80
3. Hukum Pertama Newton	81
4. Hukum Ke dua Newton	83
5. Hukum Ke tiga Newton	85
6. Gaya Normal dan Gaya Gesekan	86
BAB V USAHA DAN ENERGI	98
1. Pendahuluan	98
2. Usaha	99
3. Energi kinetik dan Energi potensial	101
4. Hukum Kekekalan Energi Mekanik	107
5. Daya dan Efisiensi	111
BAB VI MOMENTUM DAN TUMBUKAN	116
1. Momentum dan Impuls	116
2. Hukum Kekekalan Momentum	118
3. Tumbukan	119
BAB VII KESETIMBANGAN BENDA TEGAR	128
1. Pendahuluan	128
2. Syarat Kesetimbangan	128
3. Momen Gaya	129
4. Gaya-Gaya Sebidang	133
5. Pusat Massa	135
6. Titik Berat	139
BAB VIII ELASTISITAS DAN GERAK HARMONIK SEDERHANA	149
1. Pendahuluan	149
2. Elastisitas	149
3. Hukum Hooke Pada Pegas	150
4. Elastisitas	151
5. Gerak Harmonik Sederhana	152

6. Pendulum Sederhana	157
7. Persamaan Posisi, Kecepatan dan Percepatan pada GHS	161
BAB IX FLUIDA	168
1. Pendahuluan	168
2. Massa Jenis (Kerapatan) dan Berat jenis	168
3. Hidrostatika	170
4. Hukum Pascal	173
5. Hukum Archimedes	175
6. Syarat Tenggelam, Melayang, dan Terapung	177
7. Dinamika Fluida	179
8. Persamaan Bernoulli	180
9. Penerapan Hukum Bernoulli	184
BAB X SUHU DAN KALOR	196
1. Suhu	196
2. Pemuaiian Zat	199
3. Kalor	204
4. Azas Black dan Kalorimeter	206
5. Kalor Pada Perubahan Wujud	208
6. Perpindahan Kalor	211
BAB XI TEORI KINETIK GAS DAN TERMODINAMIKA	216
1. Teori Kinetik Gas	216
2. Beberapa hukum tentang gas	216
3. Persamaan Gas Ideal	218
4. Tekanan Gas Dalam Ruang Tertutup	220
5. Suhu Gas Ideal	223
6. Kecepatan Efektif Gas Ideal	224
7. Teorema Ekipartisi Energi	226
8. Hukum Pertama Termodinamika	227
9. Kerja Yang Dilakukan Sistem Selama Perubahan Volume	229
10. Penerapan Hukum Pertama Termodinamika	231
11. Hukum Kedua Termodinamika	235
12. Entropi	237

13. Menghitung Perubahan Entropi dalam Proses Reversibel	237
14. Perubahan Entropi Dalam Proses Tak-Terbalikkan	238
15. Pernyataan Clausius dan Kelvin Planck tentang Hukum kedua	239
Riwayat Hidup	242

BAB I

BESARAN, SATUAN, DAN DIMENSI

1. Besaran-Besaran Fisika

Besaran merupakan segala sesuatu yang dapat diukur dan dinyatakan dengan angka, misalnya panjang, massa, waktu, luas, berat, volume, kecepatan, dll. Warna, indah, cantik, bukan merupakan besaran karena tidak dapat diukur dan dinyatakan dengan angka. Besaran dibagi menjadi dua yaitu besaran pokok dan besaran turunan¹.

a. Besaran Pokok

Besaran Pokok adalah besaran yang satuannya telah ditetapkan terlebih dahulu dan tidak diturunkan dari besaran lain. Ada tujuh besaran pokok dalam sistem Satuan Internasional yaitu *Panjang, Massa, Waktu, Suhu, Kuat Arus, Jumlah molekul, Intensitas Cahaya*².

Panjang adalah dimensi suatu benda yang menyatakan jarak antar ujung. Panjang dapat dibagi menjadi tinggi, yaitu jarak vertikal, serta lebar, yaitu jarak dari satu sisi ke sisi yang lain, diukur pada sudut tegak lurus terhadap panjang benda. Dalam ilmu fisika dan teknik, kata “panjang” biasanya digunakan secara sinonim dengan “jarak”, dengan simbol “l” atau “L” (singkatan dari bahasa Inggris *length*).

Massa adalah sifat fisika dari suatu benda, yang secara umum dapat digunakan untuk mengukur banyaknya materi yang terdapat dalam suatu benda. Massa merupakan konsep utama dalam mekanika klasik dan subyek lain yang berhubungan.

Waktu menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (1997) adalah seluruh rangkaian saat ketika proses, perbuatan atau keadaan berada atau berlangsung. Dalam hal ini, skala waktu merupakan interval antara dua buah keadaan/kejadian, atau bisa merupakan lama berlangsungnya suatu kejadian. Tiap masyarakat memiliki pandangan yang relatif berbeda tentang waktu yang mereka jalani. Sebagai contoh: masyarakat Barat melihat waktu sebagai sebuah garis lurus (linier). Konsep garis lurus tentang waktu diikuti dengan terbentuknya konsep tentang urutan kejadian. Dengan kata lain sejarah manusia dilihat sebagai sebuah proses perjalanan dalam sebuah

¹ Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

² Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid 1* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

garis waktu sejak zaman dulu, zaman sekarang dan zaman yang akan datang. Berbeda dengan masyarakat Barat, masyarakat Hindu melihat waktu sebagai sebuah siklus yang terus berulang tanpa akhir.

Suhu menunjukkan derajat panas benda. Mudah-mudahan, semakin tinggi suhu suatu benda, semakin panas benda tersebut. Secara mikroskopis, suhu menunjukkan energi yang dimiliki oleh suatu benda. Setiap atom dalam suatu benda masing-masing bergerak, baik itu dalam bentuk perpindahan maupun gerakan di tempat berupa getaran. Makin tingginya energi atom-atom penyusun benda, makin tinggi suhu benda tersebut.

Arus listrik adalah banyaknya muatan listrik yang mengalir tiap satuan waktu. Muatan listrik bisa mengalir melalui kabel atau penghantar listrik lainnya. Pada zaman dulu, Arus konvensional didefinisikan sebagai aliran muatan positif, sekalipun kita sekarang tahu bahwa arus listrik itu dihasilkan dari aliran elektron yang bermuatan negatif ke arah yang sebaliknya.

Jumlah molekul. Satuan jumlah zat adalah "mole" (disingkat n). Jumlah molekul adalah jumlah dari zat - zat yang saling berinteraksi pada tempat tertentu di suatu wadah.

Intensitas Cahaya adalah intensitas cahaya suatu sumber cahaya yang memancarkan radiasi monokromatik pada frekuensi 540×10^{12} hertz dengan intensitas radiasi sebesar $1/683$ watt per steradian dalam arah tersebut (CGPM ke-16, 1979).

b. Besaran Turunan

Besaran turunan adalah besaran yang satuannya diturunkan dari besaran pokok atau besaran yang didapat dari penggabungan besaran-besaran pokok. Contoh besaran turunan adalah Berat, Luas, Volume, Kecepatan, Percepatan, Massa Jenis, Berat jenis, Gaya, Usaha, Daya, Tekanan, Energi Kinetik, Energi Potensial, Momentum, Impuls, Momen inersia, dll. Dalam fisika, selain tujuh besaran pokok yang disebutkan di atas, lainnya merupakan besaran turunan³.

Besaran Turunan selengkapnya akan dipelajari pada masing-masing pokok bahasan dalam pelajaran fisika. Untuk lebih memperjelas pengertian besaran turunan, perhatikan beberapa besaran turunan yang satuannya diturunkan dari satuan besaran pokok berikut ini.

Volume = panjang x lebar x tinggi

= besaran panjang x besaran panjang x besaran Panjang

³ Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid 1* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

$$= m \times m \times m$$
$$= m^3$$

Kecepatan = jarak/waktu

$$= \text{besaran panjang/besaran waktu}$$

$$= m/s$$

2. Satuan Besaran Fisis

Untuk mencapai suatu tujuan tertentu di dalam fisika, kita biasanya melakukan pengamatan yang disertai dengan pengukuran. Pengamatan suatu gejala secara umum tidak lengkap apabila tidak disertai data kuantitatif yang didapat dari hasil pengukuran. Lord Kelvin, seorang ahli fisika berkata, bila kita dapat mengukur yang sedang kita bicarakan dan menyatakannya dengan angka-angka, berarti kita mengetahui apa yang sedang kita bicarakan itu.

Apa yang Anda lakukan sewaktu melakukan pengukuran? Misalnya anda mengukur panjang meja belajar dengan menggunakan jengkal, dan mendapatkan bahwa panjang meja adalah 6 jengkal. Jadi, mengukur adalah membandingkan sesuatu yang diukur dengan sesuatu lain yang sejenis yang ditetapkan sebagai satuan. Dalam pengukuran di atas Anda telah mengambil jengkal sebagai satuan panjang.

Sebelum adanya standar internasional, hampir tiap negara menetapkan sistem satuannya sendiri. Penggunaan bermacam-macam satuan untuk suatu besaran ini menimbulkan kesukaran. Kesukaran pertama adalah diperlukannya bermacam-macam alat ukur yang sesuai dengan satuan yang digunakan. Kesukaran kedua adalah kerumitan konversi dari satu satuan ke satuan lainnya, misalnya dari jengkal ke kaki. Ini disebabkan tidak adanya keteraturan yang mengatur konversi satuan-satuan tersebut.

Akibat kesukaran yang ditimbulkan oleh penggunaan sistem satuan yang berbeda maka muncul gagasan untuk menggunakan hanya satu jenis satuan saja untuk besaran-besaran dalam ilmu pengetahuan alam dan teknologi. Suatu perjanjian internasional telah menetapkan satuan sistem internasional (*Internasional System of Units*) disingkat satuan SI. Satuan SI ini diambil dari sistem metrik yang telah digunakan di Perancis. Selain Sistem Internasional (SI), terdapat juga Sistem Satuan Britania (*British System*) yang juga sering digunakan dalam kehidupan sehari-hari.

3. Sistem Internasional (SI)

Satuan pengukuran dalam Sistem Internasional (SI), dibedakan atas statis dan dinamis. Sistem dinamis terdiri dari dua jenis yaitu sistem satuan dinamis besar dan dinamis kecil. Sistem dinamis besar biasa disebut

“MKS” atau “sistem praktis” atau “sistem Giorgie”, sedangkan sistem dinamis kecil biasa kita sebut “CGS” atau “sistem Gauss”⁴.

a. Satuan Besaran Pokok (Sistem Internasional/SI)

Karena hanya ada tujuh besaran pokok maka hanya terdapat tujuh satuan pokok yang dapat anda dilihat pada tabel di bawah ini :

Besaran Pokok	Lambang	Satuan MKS dan Singkatan	Satuan CGS dan Singkatan
Panjang	l (length)	Meter (m)	Centimeter (cm)
massa	m (mass)	Kilogram (Kg)	Gram (gr)
Waktu	t (time)	Detik/Sekon (s)	Sekon (s)
Suhu	T	Kelvin (K)	
Kuat Arus	I	Ampere (A)	
Jumlah Molekul	N	Mole (Mol)	
Intensitas Cahaya	J	Candela (Cd)	

b. Penetapan Satuan/Definisi Satuan

Penetapan satuan SI dilakukan oleh CGPM, yaitu suatu badan yang bernaung di bawah organisasi Internasional Timbangan dan Ukuran (*OIPM-Organisation Internationale des Poids et Measures*). Tugas badan ini adalah mengadakan konferensi sedikitnya satu kali dalam enam tahun dan mengesahkan ketentuan baru dalam bidang metrologi dasar.

1) Meter

Definisi lama : Satu meter adalah 1.650.763,73 kali panjang gelombang cahaya merah jingga yang dipancarkan isotop krypton 86. Definisi baru (yang digunakan saat ini): satu meter adalah jarak yang ditempuh cahaya (dalam vakum) dalam selang waktu 1/299792458 sekon.

2) Kilogram

Satu kilogram (kg) adalah massa sebuah kilogram standar (silinder platina iridium) yang aslinya disimpan di lembaga Timbangan dan Ukuran Internasional (CGPM ke-1, 1899) di Serves, Perancis.

3) Sekon (Detik)

Satu sekon (s) adalah selang waktu yang diperlukan oleh atom sesium-133 untuk melakukan getaran sebanyak 9.192.631.770 kali dalam transisi antara dua tingkat energi di tingkat energi dasarnya (CGPM ke-13; 1967).

⁴ Mark W. Zemansky. 1994. *Fisika untuk Universitas (Mekanika, Panas, Bunyi)*. Jakarta: Bina Cipta.

4) Kelvin

Satu Kelvin (K) adalah $1/273,16$ kali suhu termodinamika titik tripel air (CGPM ke-13, 1967). Dengan demikian, suhu termodinamika titik tripel air adalah 273,16 K. Titik tripel air adalah suhu dimana air murni berada dalam keadaan seimbang dengan es dan uap jenuhnya.

5) Ampere

Satu Ampere (A) adalah kuat arus tetap yang jika dialirkan melalui dua buah kawat yang sejajar dan sangat panjang, dengan tebal yang dapat diabaikan dan diletakkan pada jarak pisah 1 meter dalam vakum, menghasilkan gaya 2×10^{-7} newton pada setiap meter kawat.

6) Candela

Satu Candela (Cd) adalah intensitas cahaya suatu sumber cahaya yang memancarkan radiasi monokromatik pada frekuensi 540×10^{12} hertz dengan intensitas radiasi sebesar $1/683$ watt per steradian dalam arah tersebut (CGPM ke-16, 1979)

7) Mol

Satu mol zat terdiri atas $6,025 \times 10^{23}$ buah partikel. ($6,025 \times 10^{23}$ disebut dengan bilangan avogadro)⁵.

c. Satuan Besaran Turunan (Sistem Internasional/SI)

Contoh satuan-satuan besaran turunan dapat anda lihat pada tabel di bawah ini. Penjelasan mengenai bagaimana memperoleh satuan Besaran Turunan akan dipelajari pada pembahasan tentang dimensi besaran.

Besaran Turunan	Lambang	Satuan dan Singkatan
Luas	L	Meter kuadrat (m^2)
Volume	V (volume)	Meter kubik (m^3)
Kecepatan	v (velocity)	“Meter per sekon” (m/s)
Percepatan	A (acceleration)	Meter “per sekon kuadrat” (m/s^2)
Massa Jenis		

4. Konversi Satuan

Besaran apapun yang kita ukur, seperti panjang, massa atau kecepatan, terdiri dari angka dan satuan. Sering kita diberikan besaran dalam satuan tertentu dan kita ingin menyatakannya dalam satuan lain. Misalnya kita mengetahui jarak dua kota dalam satuan kilometer dan kita ingin mengetahui berapa jaraknya dalam satuan meter. Demikian pula dengan massa benda. Misalnya kita mengukur massa tepung terigu dalam satuan kg dan kita ingin mengetahui massa tepung terigu dalam satuan ons

⁵ Sears dan Zemansky. 2000. *Fisika Universitas Edisi Kespuluh Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

atau pon. Untuk itu kita harus mengkonversi satuan tersebut. Konversi berarti mengubah. Untuk mengkonversi satuan, terlebih dahulu harus diketahui beberapa hal yang penting, antara lain awalan-awalan metrik yang digunakan dalam satuan dan faktor konversi⁶.

Awalan-awalan satuan yang sering digunakan dapat anda lihat pada Tabel berikut ini.

Awalan	Simbol	Nilai
Exa	E	10^{18}
Peta	P	10^{15}
Tera	T	10^{12}
Giga	G	10^9
Mega	M	10^6
Kilo	k	10^3
Hecto	h	10^2
Deka	da	10^1
Deci	d	10^{-1}
Centi	C	10^{-2}
Milli	m	10^{-3}
Mikro	μ	10^{-6}
Nano	n	10^{-9}
Piko	p	10^{-12}
Femco	f	10^{-15}
atto	a	10^{-18}

a. Konversi Satuan Sistem Internasional (SI)

Kelebihan sistem Satuan Internasional (SI) adalah kemudahan dalam pemakaiannya karena menggunakan sistem desimal (kelipatan 10) dan hanya ada satu satuan pokok untuk setiap besaran dengan penambahan awalan untuk satuan yang lebih besar atau lebih kecil. Misalnya, 1 centimeter sama dengan 0,01 meter atau 1 kilogram sama dengan 1000 gram. Untuk kemudahan mengubah suatu satuan ke satuan lain dapat dilakukan dengan menggunakan bantuan tangga konversi⁷ seperti yang terlihat pada gambar di bawah ini.

⁶ Tipler, P.A.1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penebit Erlangga

⁷ Anonim. 1999. *Belajar Fisika Lebih Mudah dan Menyenangkan*. <http://www.edukasi.net/>. Diakses tanggal 30 Juni 2009.

Tangga konversi satuan panjang

						km
					hm	10
				dam	10	100
			m	10	100	1000
		dm	10	100	1000	10.000
	cm	10	100	1000	10.000	100.000
mm	10	100	1000	10.000	100.000	1.000.000

- km = kilometer
- hm = hektometer
- dam = dekameter
- m = meter
- dm = desimeter
- cm = centimeter
- mm = milimeter

Tangga konversi satuan massa

						kg
					hg	10
				dag	10	100
			g	10	100	1000
		dg	10	100	1000	10.000
	cg	10	100	1000	10.000	100.000
mg	10	100	1000	10.000	100.000	1.000.000

- kg = kilogram
- hg = hektogram
- dag = dekagram
- g = gram
- dg = desigram
- cg = centigram
- mg = miligram

Cara mengkonversi satuan-satuan SI dengan tangga konversi :

- a. Letakkan satuan asal yang akan dikonversi dan satuan baru yang akan dicari pada tangga sesuai dengan urutan tangga konversi.
- b. Hitung jumlah tangga yang harus ditempuh dari satuan asal ke satuan baru.
- c. Jika satuan baru berada di bawah satuan asal (menuruni tangga), maka :
 - 1) Setiap turun satu tangga, bilangan asal dikali 10.
 - 2) Setiap turun dua tangga, bilangan asal dikali 100.
 - 3) Setiap turun tiga tangga, bilangan asal dikali 1000, dan seterusnya.
- d. Jika satuan baru berada di atas satuan asal (menaiki tangga), maka :
 - 1) Setiap naik satu tangga, bilangan asal dibagi 10.
 - 2) Setiap naik dua tangga, bilangan asal dibagi 100.
 - 3) Setiap naik tiga tangga, bilangan asal dibagi 1000, dan seterusnya.

Contoh Soal 1.1

Ubahlah satuan berikut ini :

- a. 10 km = cm ?

Jawaban:

Perhatikan Tangga Konversi Satuan Panjang.

Dari km (kilometer) ke cm (centimeter), kita menuruni 5 anak tangga. Dengan demikian kita mengalikannya dengan 100.000 (5 nol). Jadi $10 \text{ km} = 10 \times 100000 = 1000.000 \text{ cm}$.

b. Faktor Konversi

Selain mengkonversi satuan dalam sistem internasional, kita juga harus mengetahui konversi satuan dalam sistem yang berbeda, antara lain dari satuan Sistem Internasional ke Sistem British atau sebaliknya. Sebagai contoh, kita mengukur panjang sebuah meja dalam satuan inchi dan kita ingin menyatakannya dalam centimeter. Untuk itu kita perlu mengetahui faktor konversi⁸. Faktor konversi dapat anda lihat pada tabel di bawah ini.

Faktor Konversi Panjang

1 inchi	=	2,54 cm		
1 cm	=	0,394 inchi		
1 foot	=	30,5 cm		
1 m	=	39,37 inchi	=	3,28 foot
1 mil	=	5280 foot	=	1,61 km
1 km	=	0,621 mil		
1 mil laut (US)	=	1,15 mil	=	6076 foot = 1,852 km
1 fermi	=	1femtometer (fm)	=	10^{-15} m
1 Angstrom	=	10^{-10} m		
1 tahun cahaya	=	$9,46 \times 10^{15} \text{ m}$		
1 parsec	=	3,26 tahun cahaya	=	$3,09 \times 10^{16} \text{ m}$

1 lb	=	4,45 N		
1 N	=	10^5 dyne	=	0,225 lb

Energi dan Kerja

1 kkal (kilokalori)	=	$4,18 \times 10^3 \text{ Joule}$		
1 eV	=	$1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$		
1 kWh	=	$3,60 \times 10^6 \text{ J}$	=	860 kkal

Tekanan

1 mil/jam	=	1,47 foot/s	=	1,609 km/jam = 0,447 m/s
1 km/jam	=	0,278 m/s	=	0,621 mil/jam
1 foot/s	=	0,305 m/s	=	0,682 mil/jam
1 knot	=	1,151 mil/jam	=	0,5144 m/s

⁸ Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

Volume

1 liter (L)	= 1000 mL	= 1000 cm ³	= 1,0 x 10 ⁻³ m ³
	= 1,057 quart (US)	= 54,6 inchi ³	
1 gallon (US)	= 231 inchi ³	= 3,78 L	
1 m ³	= 35,31 ft ³		

Kelajuan

1 mil/jam	= 1,47 foot/s	= 1,609 km/jam	= 0,447 m/s
1 km/jam	= 0,278 m/s	= 0,621 mil/jam	
1 foot/s	= 0,305 m/s	= 0,682 mil/jam	
1 knot	= 1,151 mil/jam	= 0,5144 m/s	

Massa

1 satuan massa atom (u)	= 1,6505 x 10 ⁻²⁷ kg
1 kg	= 0,0585 slug
1 Ton	= 1000 kg

Contoh Soal 1.2:

1. Ubahlah satuan panjang berikut ini :

$$100 \text{ mil} = \dots \text{ cm} ?$$

Jawaban:

Perhatikan Faktor Konversi Panjang.

1 mil = 1,61 km. — 1 km = 100.000 cm (*lihat tangga konversi panjang*)

$$\text{Jadi, } 100 \text{ mil} = 100 \times 1,61 \text{ km} = 161 \text{ km} \text{ — } 161 \text{ km} = 161 \times 100.000 \text{ cm} \\ = 16.100.000 \text{ cm.}$$

5. Pengukuran

Untuk mencapai suatu tujuan tertentu di dalam fisika, kita biasanya melakukan pengamatan yang disertai dengan pengukuran. Pengamatan suatu gejala secara umum tidak lengkap apabila tidak ada data yang didapat dari hasil pengukuran. Lord Kelvin, seorang ahli fisika berkata, bila kita dapat mengukur yang sedang kita bicarakan dan menyatakannya dengan angka-angka⁹, berarti kita mengetahui apa yang sedang kita bicarakan itu.

Apa yang Anda lakukan sewaktu melakukan pengukuran? Misalnya anda mengukur panjang meja belajar dengan menggunakan jengkal, dan mendapatkan bahwa panjang meja adalah 7 jengkal. Dalam pengukuran di atas Anda telah mengambil jengkal sebagai satuan panjang.

⁹ Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid 1* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

Kenyataan dalam kehidupan sehari-hari, kita sering melakukan pengukuran terhadap besaran tertentu menggunakan alat ukur yang telah ditetapkan. Misalnya, kita menggunakan mistar untuk mengukur panjang. Pengukuran sebenarnya merupakan proses perbandingan nilai besaran yang belum diketahui dengan nilai standar yang sudah ditetapkan.

a. Alat Ukur Besaran Pokok

Beberapa-beberapa alat ukur besaran pokok

Besaran Pokok	Alat Ukur
Panjang	Mistar, Jangka sorong, mikrometer sekrup
Massa	Neraca (timbangan)
Waktu	Stop Watch
Suhu	Termometer
Kuat Arus	Amperemete
Jumlah molekul	Tidak diukur secara langsung *
Intensitas Cahaya	Light meter

*Jumlah zat tidak diukur secara langsung seperti anda mengukur panjang dengan mistar. Untuk mengetahui jumlah zat, terlebih dahulu diukur massa zat tersebut. selengkapnya dapat anda pelajari pada bidang studi Kimia.

b. Istilah Dalam Pengukuran

Ketelitian adalah suatu ukuran yang menyatakan tingkat pendekatan dari nilai yang diukur terhadap nilai benar x_0 . *Kepekaan* adalah ukuran minimal yang masih dapat dikenal oleh instrumen/alat ukur. *Ketepatan (akurasi)* adalah suatu ukuran kemampuan untuk mendapatkan hasil pengukuran yang sama. Dengan memberikan suatu nilai tertentu pada besaran fisis, ketepatan merupakan suatu ukuran yang menunjukkan perbedaan hasil-hasil pengukuran pada pengukuran berulang¹⁰.

1) Akurasi/Ketelitian Hasil Pengukuran

Pengukuran yang akurat merupakan bagian penting dari fisika, walaupun demikian tidak ada pengukuran yang benar-benar tepat. Ada ketidakpastian yang berhubungan dengan setiap pengukuran. Ketidakpastian muncul dari sumber yang berbeda. Di antara yang paling penting, selain kesalahan, adalah keterbatasan ketepatan setiap alat pengukur dan ketidakmampuan membaca sebuah alat ukur di luar batas bagian terkecil yang ditunjukkan. Misalnya anda memakai sebuah penggaris centimeter untuk mengukur lebar sebuah papan, hasilnya dapat dipastikan akurat sampai 0,1 cm, yaitu bagian terkecil pada penggaris

¹⁰ Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

tersebut. Alasannya, adalah sulit untuk memastikan suatu nilai di antara garis pembagi terkecil tersebut, dan penggaris itu sendiri mungkin tidak dibuat atau dikalibrasi sampai ketepatan yang lebih baik dari ini.

Ketika menyatakan hasil pengukuran, penting juga untuk menyatakan ketepatan, atau perkiraan ketidakpastian, pada pengukuran tersebut. Sebagai contoh, lebar sebuah papan yang diukur dapat ditulis $5,2 \pm 0,1$ cm (“kurang lebih 0,1 cm”) menyatakan perkiraan ketidakpastian pada pengukuran itu, sehingga lebar sebenarnya paling mungkin berada di antara 5,1 cm dan 5,3 cm. Persentase ketidakpastian merupakan perbandingan antara ketidakpastian dan nilai yang terukur, dikalikan dengan 100. Misalnya, jika pengukuran adalah 5,2 cm dan ketidakpastian 0,1 cm, persen ketidakpastian adalah:

$$\frac{0,1}{5,2} \times 100 = 2 \%$$

Seringkali, ketidakpastian pada suatu nilai terukur tidak dinyatakan secara eksplisit. Pada kasus seperti ini, ketidakpastian biasanya dianggap sebesar satu atau dua satuan (atau bahkan tiga) dari angka terakhir yang diberikan. Sebagai contoh, jika panjang sebuah benda dinyatakan sebagai 5,2 cm, ketidakpastian dianggap sebesar 0,1 cm (atau mungkin 0,2 cm). Dalam hal ini, penting untuk tidak menulis 5,20 cm, karena hal itu menyatakan ketidakpastian sebesar 0,01 cm; dianggap bahwa panjang benda tersebut mungkin antara 5,19 dan 5,21 cm, sementara sebenarnya anda menyangka nilainya antara 5,1 dan 5,3 cm.

2) *Ketidakpastian Mutlak dan Relatif*

Hasil pengukuran selalu dilaporkan sebagai $x = x \pm \Delta x$ merupakan $\frac{1}{2}$ skala terkecil instrum (pengukuran tunggal) atau berupa simpangan baku nilai rata-rata sampel (pengukuran berulang). Δx dinamai ketidakpastian mutlak. Ketidakpastian mutlak berhubungan dengan ketepatan pengukuran, di mana makin kecil ketidakpastian mutlak yang dicapai, makin tepat pengukuran tersebut. Misalnya pengukuran panjang dengan mikrometer skrup $L = (4,900 \pm 0,005)$ cm; nilai 0,005 merupakan ketidakpastian mutlak yang diperoleh dari setengah skala terkecil mikrometer dan 4,9 merupakan angka pasti/eksak¹¹.

¹¹ Mark W. Zemansky. 1994. *Fisika untuk Universitas (Mekanika, Panas, Bunyi)*. Jakarta: Bina Cipta.

6. Notasi Ilmiah

Pengukuran dalam fisika terbentang mulai dari ukuran partikel yang sangat kecil, seperti massa elektron, sampai dengan ukuran yang sangat besar, seperti massa bumi. Penulisan hasil pengukuran benda sangat besar, misalnya massa bumi kira-kira 6.000.000.000 000.000.000.000.000 kg atau hasil pengukuran partikel sangat kecil, misalnya massa sebuah elektron kira-kira 0,000.000.000.000.000.000.000.000.000.911 kilogram memerlukan tempat yang lebar dan sering salah dalam penulisannya. Untuk mengatasi masalah tersebut, kita dapat menggunakan notasi ilmiah atau notasi baku. Dalam notasi ilmiah, hasil pengukuran dinyatakan sebagai:

$$a, \dots \times 10^n$$

Keterangan :

a adalah bilangan penting mulai dari 1 - 9 (angka penting)

n disebut eksponen dan merupakan bilangan bulat dalam persamaan

10^n disebut orde besar

Tiga aturan untuk menulis hasil pengukuran dalam notasi ilmiah:

1. Pindahkan koma desimal sampai hanya tersisa satu angka di depan koma. Contoh:

$$75400 \text{ m} = 7,5400 \text{ m} \quad (4 \text{ angka ke kiri})$$

$$\longleftarrow = 7,5400 \times 10^4 \text{ m} \quad (\text{pangkat bulat positif})$$

$$\text{Jadi: } a = 7,5400 \text{ m} \quad \text{dan} \quad \text{orde} = 10^4$$

$$0,000570 \text{ kg} = 0,0005,70 \text{ kg} \quad (4 \text{ angka ke kiri})$$

$$\longrightarrow = 5,70 \times 10^{-4} \text{ kg} \quad (\text{pangkat bulat negatif})$$

$$\text{Jadi: } a = 5,70 \text{ kg} \quad \text{dan} \quad \text{orde} = 10^{-4}$$

2. Jika koma desimal dipindahkan ke kiri, berarti n bulat positif, sebaliknya, jika koma desimal dipindahkan ke kanan, berarti n bulat negatif.
3. Nilai n sama dengan banyaknya angka yang dilewati sewaktu memindahkan koma desimal.

Contoh :

$$\text{Massa bumi} = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}, \text{ Jadi: } a = 5,98 \text{ kg} \quad \text{dan} \quad \text{orde} = 10^{24}$$

$$\text{Massa elektron} = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}, \text{ Jadi: } a = 9,1 \text{ kg} \quad \text{dan} \quad \text{orde} = 10^{-31}$$

7. Angka Penting

Semua angka yang diperoleh dari hasil pengukuran disebut angka penting, terdiri atas angka-angka pasti dan angka-angka terakhir yang ditaksir (angka taksiran)¹². Hasil pengukuran dalam fisika tidak pernah eksak, selalu terjadi kesalahan pada waktu mengukurnya. Kesalahan ini dapat diperkecil dengan menggunakan alat ukur yang lebih teliti.

Aturan-aturan dalam menentukan angka penting adalah sebagai berikut:

1. Semua angka yang bukan nol adalah angka penting.
Contoh : 14,256 (5 angka penting).
2. Semua angka nol yang terletak di antara angka-angka bukan nol adalah angka penting.
Contoh : 7000,2003 (8 angka penting).
3. Semua angka nol yang terletak di belakang angka bukan nol yang terakhir, tetapi terletak di depan tanda desimal adalah angka penting.
Contoh : 70000, (5 angka penting).
4. Angka nol yang terletak di belakang angka bukan nol yang terakhir dan di belakang tanda desimal adalah angka penting.
Contoh : 23,50000 (7 angka penting).
5. Angka nol yang terletak di belakang angka bukan nol yang terakhir dan tidak dengan tanda desimal adalah bukan angka penting.
Contoh : 3500000 (2 angka penting).
6. Angka nol yang terletak di depan angka bukan nol yang pertama adalah bukan angka penting. Contoh : 0,0000352 (3 angka penting).

Ketentuan-ketentuan pada operasi angka penting adalah:

1. Hasil operasi penjumlahan dan pengurangan dengan angka-angka penting hanya boleh terdapat satu angka taksiran saja.

Penjumlahan

Contoh : $2,34$ (angka 4 taksiran)

$$\begin{array}{r} 0,345 \\ \hline 2,685 \end{array} + \text{(angka 5 taksiran)}$$

maka ditulis : $2,69$ (angka 8 dan 5 (dua angka terakhir) taksiran).

¹² Sears dan Zemansky. 2000. *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh Jilid I* (terjemahan). Jakarta: PenerbitErlangga.

Pengurangan

13,46 (angka 6 taksiran)
2,2347 (angka 7 taksiran)
 $\overline{11,2253}$ - angka 2, 5 dan 3 (tiga angka terakhir) taksiran
maka dituli : **11,23**

2. Angka penting pada hasil perkalian dan pembagian, sama banyaknya dengan angka penting yang paling sedikit.

Perkalian

Contoh : 8,141 (empat angka penting)
 $\frac{0,22}{1,79102} \times$ (dua angka penting)

Penulisannya : 1,79102 ditulis **1,8** (dua angka penting)

Pembagian

1,432 (empat angka penting)
 $\frac{2,68}{0,53432} :$ (tiga angka penting)

Penulisannya : 0,53432 di tulis **0,534** (tiga angka penting)

3. Untuk angka 5 atau lebih dibulatkan ke atas, sedangkan angka kurang dari 5 dihilangkan.

8. Dimensi Besaran

Dimensi besaran diwakili dengan simbol, misalnya [M], [L], [T] yang mewakili massa (*mass*), panjang (*length*) dan waktu (*time*). Ada dua macam dimensi yaitu Dimensi Primer dan Dimensi Sekunder¹³. **Dimensi primer** meliputi M (untuk satuan massa), L (untuk satuan panjang) dan T (untuk satuan waktu). **Dimensi sekunder** adalah dimensi dari semua Besaran Turunan yang dinyatakan dalam Dimensi Primer. Contoh: Dimensi Gaya: [M] [L] [T]⁻² atau dimensi Percepatan: [L] [T]⁻².

Berikut adalah Tabel yang menunjukkan dimensi dan satuan tujuh besaran dasar dalam sistem SI.

¹³ Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

Besaran	Dimensi	Satuan (SI)
Panjang	L	m
Massa	M	Kg
Waktu	T	s
Suhu	Θ	K
Arus Listrik	E	A
Intensitas Cahaya	I	cd
Jumlah zat	A	Mol

Manfaat dimensi dalam fisika antara lain: (1) dapat digunakan untuk membuktikan dua besaran sama atau tidak. Dua besaran sama jika keduanya memiliki dimensi yang sama atau keduanya termasuk besaran vektor atau skalar, (2) dapat digunakan untuk menentukan persamaan yang pasti salah atau mungkin benar, (3) dapat digunakan untuk menurunkan persamaan suatu besaran fisis jika kesebandingan besaran fisis tersebut dengan besaran-besaran fisis lainnya diketahui.

Satuan dan dimensi suatu variabel fisika adalah dua hal berbeda. Satuan besaran fisis didefinisikan dengan perjanjian, berhubungan dengan standar tertentu (contohnya, besaran panjang dapat memiliki satuan meter, kaki, inci, mil, atau mikrometer), namun dimensi besaran panjang hanya satu, yaitu L . Dua satuan yang berbeda dapat dikonversikan satu sama lain (contohnya: $1 \text{ m} = 39,37 \text{ inci}$; angka $39,37$ ini disebut sebagai *faktor konversi*), sementara tidak ada faktor konversi antarlambang dimensi.

9. Analisis Dimensi

Analisis dimensi adalah cara yang sering dipakai dalam fisika, kimia dan teknik untuk memahami keadaan fisis yang melibatkan besaran yang berbeda-beda. Analisis dimensi selalu digunakan untuk memeriksa ketepatan penurunan persamaan. Misalnya, jika suatu besaran fisis memiliki satuan massa dibagi satuan volume namun persamaan hasil penurunan hanya memuat satuan massa, persamaan tersebut tidak tepat. Hanya besaran-besaran berdimensi sama yang dapat saling ditambahkan, dikurangkan atau disamakan. Jika besaran-besaran berbeda dimensi terdapat di dalam persamaan dan satu sama lain dibatasi tanda “+” atau “-” atau “=”, persamaan tersebut harus dikoreksi terlebih dahulu sebelum digunakan. Jika besaran-besaran berdimensi sama maupun berbeda dikalikan atau dibagi, dimensi besaran-besaran tersebut juga terkalikan atau terbagi. Jika besaran berdimensi dipangkatkan, dimensi besaran tersebut juga dipangkatkan.

Seringkali kita dapat menentukan bahwa suatu rumus salah hanya dengan melihat dimensi atau satuan dari kedua ruas persamaan. Sebagai contoh, ketika kita menggunakan rumus $A = 2 \cdot \pi \cdot r$ untuk menghitung luas. Dengan melihat dimensi kedua ruas persamaan, yaitu $[A] = [L]^2$ dan $[2 \cdot \pi \cdot r] = [L]$ kita dengan cepat dapat menyatakan bahwa rumus tersebut salah karena dimensi kedua ruasnya tidak sama. Tetapi perlu diingat, jika kedua ruas memiliki dimensi yang sama, itu tidak berarti bahwa rumus tersebut benar. Hal ini disebabkan pada rumus tersebut mungkin terdapat suatu angka atau konstanta yang tidak memiliki dimensi, misalnya $E_k = 1/2 mv^2$, di mana $1/2$ tidak bisa diperoleh dari analisis dimensi. Anda harus ingat karena dalam suatu persamaan mungkin muncul angka tanpa dimensi, maka angka tersebut diwakili dengan suatu konstanta tanpa dimensi, misalnya konstanta k .

Contoh Soal 1.3:

Tentukan dimensi dari besaran-besaran berikut ini : (a) volum, (b) massa jenis, (c) usaha

Jawab:

Petunjuk: anda harus menulis rumus dari besaran turunan yang akan ditentukan dimensinya terlebih dahulu. Selanjutnya rumus tersebut diuraikan sampai hanya terdiri dari besaran pokok.

- a) Persamaan Volum adalah hasil kali panjang, lebar dan tinggi di mana ketiganya memiliki dimensi panjang, yakni $[L]$. Dengan demikian, Dimensi Volum :

$$[\text{volume}] = [\text{panjang}] [\text{lebar}] [\text{tinggi}] \\ = [L] [L] [L] = [L]^3$$

- b) Persamaan Massa Jenis adalah hasil bagi massa dan volum. Massa memiliki dimensi $[M]$ dan volum memiliki dimensi $[L]^3$. Dengan demikian Dimensi massa jenis :

$$[\text{massa jenis}] = \frac{[\text{massa}]}{[\text{volume}]} = \frac{[M]}{[L]^3} = [M] [L]^{-3}$$

- c) Persamaan Usaha adalah hasil kali Gaya (besaran Turunan) dan Perpindahan (dimensi = $[L]$), sedang Gaya adalah hasil kali massa (dimensi = $[M]$) dengan percepatan (besaran turunan). Karena itu tentukan dahulu dimensi Percepatan, kemudian dimensi Gaya dan terakhir dimensi Usaha.

$$[\text{gaya}] = [\text{massa}] [\text{percepatan}] = [M] [L] [T]^{-2} \\ [\text{usaha}] = [\text{gaya}] [\text{perpindahan}] = [M] [L] [T]^{-2} [L] = [M] [L]^2 [T]^{-2}$$

LATIHAN SOAL 1.1

1. Tuliskan bilangan-bilangan di bawah ini dalam notasi ilmiah, kemudian tentukan nilai bilangan penting (a) dan orde:
 - a. 2500 m
 - b. $7\underline{2}00$ m
 - c. $672\underline{0}0$ m
 - d. $5\underline{0}00$ m
 - e. 0,002210 kg
2. Ubahlah satuan-satuan di bawah ini, ditulis dalam bentuk baku.
 - a. $27,5 \text{ m}^3 = \dots\dots\dots\text{cm}^3$
 - b. $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ kg} = \dots\dots\dots\text{mg}$
 - c. $10 \text{ m/det} = \dots\dots\dots\text{km/jam}$
 - d. $72 \text{ km/jam} = \dots\dots\dots\text{m/det}$
 - e. $2,7 \text{ newton} = \dots\dots\dots\text{dyne}$
 - f. $5,8 \text{ joule} = \dots\dots\dots\text{erg}$
 - g. $3 \cdot 10^5 \text{ kg/m}^3 = \dots\dots\dots\text{g/cm}^3$
 - h. $2,5 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2 = \dots\dots\dots\text{dyne/cm}^2$
 - i. $7,9 \text{ dyne/cm}^3 = \dots\dots\dots\text{N/m}^3$
 - j. $0,7 \cdot 10^{-8} \text{ m} = \dots\dots\dots \mu\text{m}$
3. Hitunglah dan tentukan angka penting.
 - a. $2,731 + 8,65 = \dots\dots$
 - b. $567,4 - 387,67 = \dots\dots$
 - c. $32,6 + 43,76 - 32,456 = \dots\dots$
 - d. $43,54 : 2,3 = \dots\dots$
 - e. $2,731 \times 0,52 = \dots\dots$
 - g. $3,4 + 435,5467 + 43,5 = \dots\dots$
 - h. $1,32 \times 1,235 + 6,77 = \dots\dots$
 - i. $57800 : 1133 = \dots\dots$
4. Selidiki dengan analisis dimensi, apakah persamaan berikut benar atau salah.
 - a. $x = \frac{v}{2a}$, dengan x adalah jarak, v adalah kecepatan benda, dan a adalah percepatan.
 - b. $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, dengan T adalah perio de, l adalah panjang tali, dan g adalah percepatan gravitasi bumi.
 - c. $P = \rho \cdot g \cdot h$, dengan P adalah tekanan, ρ adalah massa jenis, g adalah percepatan gravitasi bumi, dan h adalah ketinggian tabung.

5. Tuliskan dimensi dari persamaan berikut:
 - a. Dari persamaan ini $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$. Tentukan dimensi dari c , jika Q menyatakan kalor, m adalah massa benda, dan ΔT adalah perubahan suhu..
 - b. Dari persamaan ini $P V = n R T$. Tentukan dimensi dari R , jika P menyatakan tekanan, V adalah volume benda, n adalah jumlah zat, R adalah konstanta gas umum, dan T adalah suhu mutlak.
 - c. Dari persamaan ini $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$. Tentukan dimensi dari G , jika F menyatakan gaya tarik-menarik, m_1 dan m_2 adalah massa benda 1 dan benda 2, r adalah jarak antara dua benda, dan G adalah tetapan gaya gravitasi umum.
 - d. Dari persamaan ini $F = 6\pi \cdot \zeta \cdot r \cdot v$. Tentukan dimensi dari ζ , jika F menyatakan gaya, r adalah jari-jari, v adalah kecepatan bola, dan ζ adalah koefisien viskositas.
6. Daya pancar benda hitam dengan luas permukaan A dan suhu mutlak T dinyatakan dengan persamaan: $P = e \sigma^1 T^m A^n$, dengan e tetapan tanpa dimensi dan σ tetapan dengan dimensi $[M][T]^{-3}[\theta]^{-4}$. Tentukan nilai l , m , dan n dan nyatakan kembali persamaan di atas dengan memasukkan nilai l , m , dan n .

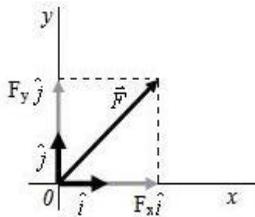
Daftar Pustaka

- Anonim. 1999. *Belajar Fisika Lebih Mudah dan Menyenangkan*. <http://www.e-dukasi.net/>. Diakses tanggal 30 Juni 2009.
- Bob Poster. 1997. *Fisika SMU kelas 3 Semester I*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Mark W. Zemansky. 1994. *Fisika untuk Universitas (Mekanika, Panas, Bunyi)*. Jakarta: Bina Cipta.
- Sears dan Zemansky. 2000. *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Tipler, P.A. 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik - Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

BAB II VEKTOR

1. Vektor Satuan

Sebelum kita belajar mengenai perkalian vektor, terlebih dahulu kita berkenalan dengan vektor-vektor satuan. Vektor satuan (unit vektor) merupakan suatu vektor yang besarnya = 1. Vektor satuan tidak mempunyai satuan. Vektor satuan berfungsi untuk menunjukkan suatu arah dalam ruang. Untuk membedakan vektor satuan dari vektor biasa maka di atas vektor satuan disisipkan tanda $\hat{}$ pada sistem koordinat xy kita menggunakan vektor satuan untuk menunjukkan arah sumbu x positif dan vektor satuan untuk menunjukkan arah sumbu y positif¹⁴. Perhatikan contoh berikut ini. Misalnya terdapat sebuah vektor \mathbf{F} sebagaimana tampak pada gambar di bawah.



Pada gambar tampak bahwa vektor satuan \hat{i} menunjukkan arah sumbu x positif dan vektor satuan \hat{j} menunjukkan arah sumbu y positif. Hubungan antara vektor komponen dan komponennya masing-masing, sebagai berikut:

$$F_x = F_x \hat{i}$$

$$F_y = F_y \hat{j}$$

Vektor F dalam komponen-komponennya adalah:

$$F = F_x \hat{i} + F_y \hat{j}$$

Misalnya terdapat dua vektor, \hat{A} dan \hat{B} pada sistem koordinat xy , di mana kedua vektor ini dinyatakan dalam komponen-komponennya, sebagaimana tampak di bawah:

$$\hat{A} = A_x \hat{i} + A_y \hat{j}$$

¹⁴ Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

$$\begin{aligned}
\widehat{B} &= B_x \widehat{i} + B_y \widehat{j} \\
R &= \widehat{A} + \widehat{B} = (A_x \widehat{i} + A_y \widehat{j}) + (B_x \widehat{i} + B_y \widehat{j}) \\
R &= (A_x \widehat{i} + B_x \widehat{i}) + (A_y \widehat{j} + B_y \widehat{j}) \\
R &= (A_x + B_x) \widehat{i} + (A_y + B_y) \widehat{j} \\
R &= R_x \widehat{i} + R_y \widehat{j}
\end{aligned} \tag{2.1}$$

Jika pada sistem koordinat xyz , diperoleh:

$$\begin{aligned}
\widehat{A} &= A_x \widehat{i} + A_y \widehat{j} + A_z \widehat{k} \\
\widehat{B} &= B_x \widehat{i} + B_y \widehat{j} + B_z \widehat{k} \\
R &= (A_x \widehat{i} + A_y \widehat{j} + A_z \widehat{k}) + (B_x \widehat{i} + B_y \widehat{j} + B_z \widehat{k}) \\
R &= R_x \widehat{i} + R_y \widehat{j} + R_z \widehat{k}
\end{aligned} \tag{2.2}$$

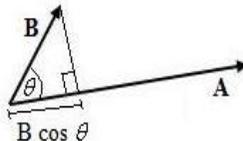
2. Perkalian Titik dan Perkalian Silang

Perkalian vektor terdiri dari dua jenis, yaitu perkalian titik dan perkalian silang. Perkalian titik disebut juga perkalian skalar karena menghasilkan besaran skalar. Perkalian silang disebut juga perkalian vektor karena perkalian tersebut menghasilkan besaran vektor. Misalnya terdapat dua vektor, yakni \widehat{A} dan \widehat{B} . Perkalian skalar dari vektor \widehat{A} dan \widehat{B} dinyatakan dengan $\widehat{A} \cdot \widehat{B}$ (karena digunakan notasi titik maka perkalian ini dinamakan perkalian titik). Perkalian vektor dari \widehat{A} dan \widehat{B} dinyatakan dengan $\widehat{A} \times \widehat{B}$. Karena digunakan notasi \times , maka perkalian ini disebut perkalian silang¹⁵.

1. Perkalian titik (dot product)

Misalnya diketahui vektor \widehat{A} dan \widehat{B} sebagaimana tampak pada gambar di bawah. Perkalian titik antara vektor \widehat{A} dan \widehat{B} dituliskan sebagai $\widehat{A} \cdot \widehat{B}$ (\widehat{A} titik \widehat{B}).

Untuk mendefinisikan perkalian titik dari vektor \widehat{A} dan \widehat{B} ($\widehat{A} \cdot \widehat{B}$), digambarkan vektor \widehat{A} dan vektor \widehat{B} yang membentuk sudut teta (sambil lihat gambar di bawah). Selanjutnya kita gambarkan proyeksi dari vektor \widehat{B} terhadap arah vektor \widehat{A} . Proyeksi ini adalah komponen dari vektor \widehat{B} yang sejajar dengan vektor \widehat{A} , yang besarnya sama dengan $\widehat{B} \cos \theta$.

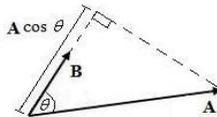


¹⁵ Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid 1* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

Dengan demikian, kita definisikan $\hat{A} \cdot \hat{B}$ sebagai besar vektor \hat{A} yang dikalikan dengan komponen vektor \hat{B} yang sejajar dengan \hat{A} . Secara matematis dapat kita tulis sebagai berikut :

$$\hat{A} \cdot \hat{B} = \hat{A} \hat{B} \cos \theta \quad (\theta \text{ bernilai antara } 0^0 \text{ sampai } 180^0) \quad (2.3)$$

$\hat{A} \cdot \hat{B} = \hat{A} \hat{B} \cos \theta$ merupakan bilangan biasa (skalar). Karenanya perkalian titik disebut juga perkalian skalar. Bagaimana jika perkalian titik antara vektor \hat{A} dan \hat{B} dibalik menjadi $\hat{B} \cdot \hat{A}$? sebelum kita definisikan $\hat{B} \cdot \hat{A}$, terlebih dahulu kita gambarkan proyeksi dari vektor \hat{A} terhadap vektor \hat{B} (lihat gambar di bawah).



Berdasarkan gambar ini, kita dapat mendefinisikan $\hat{B} \cdot \hat{A}$ sebagai besar vektor \hat{B} yang dikalikan dengan komponen vektor \hat{A} yang sejajar dengan \hat{B} . Secara matematis dapat kita tulis sebagai berikut :

$$\hat{B} \cdot \hat{A} = \hat{B} \hat{A} \cos \theta \quad (\theta \text{ bernilai antara } 0^0 \text{ sampai } 180^0) \quad (2.4)$$

Hasil perkalian $\hat{A} \cdot \hat{B} = \hat{A} \hat{B} \cos \theta$ dan $\hat{B} \cdot \hat{A} = \hat{B} \hat{A} \cos \theta$. Karena: $\hat{A} \cdot \hat{B} \cos \theta = \hat{B} \hat{A} \cos \theta$, maka berlaku:

$$\hat{A} \cdot \hat{B} = \hat{B} \cdot \hat{A} \quad (2.5)$$

Jadi besar sudut apit antara dua buah vektor adalah:

$$\begin{aligned} |\hat{A} \cdot \hat{B}| &= |\hat{A}| \cdot |\hat{B}| \cos \theta \\ \cos \theta &= \frac{|\hat{A} \cdot \hat{B}|}{|\hat{A}| \cdot |\hat{B}|} \\ \theta &= \cos^{-1} \frac{|\hat{A} \cdot \hat{B}|}{|\hat{A}| \cdot |\hat{B}|} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Beberapa hal dalam perkalian titik yang perlu anda ketahui :

- Perkalian titik memenuhi hukum komutatif. $\hat{A} \cdot \hat{B} = \hat{B} \cdot \hat{A}$
- Perkalian titik memenuhi hukum distributif. $\hat{A} \cdot (\hat{B} + \hat{C}) = \hat{A} \cdot \hat{B} + \hat{A} \cdot \hat{C}$
- Jika vektor \hat{A} dan \hat{B} saling tegak lurus, maka hasil perkalian titik $\hat{A} \cdot \hat{B} = 0$

Ketika vektor \hat{A} dan \hat{B} saling tegak lurus, maka sudut yang dibentuk adalah 90^0 ($\cos 90^0 = 0$). Dengan demikian $\hat{A} \cdot \hat{B} = \hat{A} \hat{B} \cos \theta = \hat{A} \hat{B} \cos 90^0 = 0$. Sebaliknya $\hat{B} \cdot \hat{A} = \hat{B} \hat{A} \cos \theta = 0$

- Jika vektor \hat{A} dan vektor \hat{B} searah, maka $\hat{A} \cdot \hat{B} = \hat{A} \hat{B} \cos 0^0 = \hat{A} \hat{B}$

Ketika vektor \hat{A} dan \hat{B} searah, maka sudut yang dibentuk adalah 0° ($\cos 0^\circ = 1$). Dengan demikian $\hat{A} \cdot \hat{B} = \hat{A}\hat{B} \cos \theta = \hat{A}\hat{B} \cos 0^\circ = \hat{A}\hat{B}$. Sebaliknya $\hat{B} \cdot \hat{A} = \hat{B}\hat{A} \cos \theta = \hat{B}\hat{A}$. (Besarnya $\hat{A}\hat{B}$ = besarnya $\hat{B}\hat{A}$). Misalnya besar vektor $\hat{A} = 2$, besar vektor $\hat{B} = 3$, maka $\hat{A} \cdot \hat{B} = 2 \cdot 3 = 6$; ini sama saja dengan $\hat{B} \cdot \hat{A} = 3 \cdot 2 = 6$). Syarat lain dari dua vektor yang searah, jika $\hat{A} = \hat{B}$ maka diperoleh $\hat{A} \cdot \hat{A} = \hat{A}^2$ atau $\hat{B} \cdot \hat{B} = \hat{B}^2$

- e. Jika kedua vektor \hat{A} dan \hat{B} berlawanan arah (ketika dua vektor berlawanan arah maka sudut yang dibentuk adalah 180°), maka hasil perkalian $\hat{A} \cdot \hat{B} = \hat{A}\hat{B} \cos 180^\circ = \hat{A}\hat{B}(-1) = -\hat{A}\hat{B}$. $\cos 180^\circ = -1$. Untuk dapat menghitung perkalian skalar secara langsung jika kita

mengetahui komponen x, y dan z dari vektor \hat{A} dan \hat{B} (vektor yang diketahui). Untuk melakukan perkalian titik dengan cara ini, terlebih dahulu kita lakukan perkalian titik dari vektor satuan, setelah itu kita nyatakan vektor \hat{A} dan \hat{B} dalam komponen-komponennya, menguraikan perkaliannya dan menggunakan perkalian dari vektor-vektor satuannya.

Vektor satuan \hat{i}, \hat{j} , dan \hat{k} , saling tegak lurus satu sama lain. Diperoleh perkalian titik atau perkalian skalar adalah:

$$\hat{A} \cdot \hat{B} = \hat{A} \cdot \hat{B} \cos \theta$$

$$\hat{i} \cdot \hat{i} = \hat{j} \cdot \hat{j} = \hat{k} \cdot \hat{k} = (1)(1) \cos 0^\circ = 1$$

$$\hat{i} \cdot \hat{j} = \hat{k} \cdot \hat{i} = \hat{j} \cdot \hat{k} = (1)(1) \cos 90^\circ = 0$$

Nyatakan vektor \hat{A} dan \hat{B} dalam komponen-komponennya, menguraikan perkaliannya dan menggunakan perkalian dari vektor-vektor satuannya.

$$\hat{A} \cdot \hat{B} = (A_x \hat{i} + A_y \hat{j} + A_z \hat{k}) \cdot (B_x \hat{i} + B_y \hat{j} + B_z \hat{k})$$

$$\hat{A} \cdot \hat{B} = (A_x \hat{i} \cdot B_x \hat{i} + A_x \hat{i} \cdot B_y \hat{j} + A_x \hat{i} \cdot B_z \hat{k}) + (A_y \hat{j} \cdot B_x \hat{i} + A_y \hat{j} \cdot B_y \hat{j} + A_y \hat{j} \cdot B_z \hat{k}) +$$

$$(A_z \hat{k} \cdot B_x \hat{i} + A_z \hat{k} \cdot B_y \hat{j} + A_z \hat{k} \cdot B_z \hat{k})$$

$$\hat{A} \cdot \hat{B} = (A_x \cdot B_x + 0 + 0) \cdot (0 + A_y \cdot B_y + 0) \cdot (0 + 0 + A_z \cdot B_z)$$

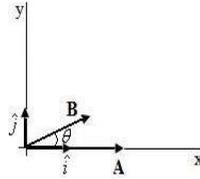
$$\hat{A} \cdot \hat{B} = (A_x \cdot B_x + A_y \cdot B_y + A_z \cdot B_z) \quad (2.7)$$

Berdasarkan hasil analisis di atas dapat disimpulkan bahwa perkalian skalar atau perkalian titik dari dua vektor adalah jumlah dari perkalian komponen-komponennya masing-masing.

Contoh Soal 2.1:

1. Besar vektor \hat{A} dan \hat{B} berturut-turut adalah 5 dan 4, sebagaimana tampak pada gambar di bawah. Hitunglah perkalian titik kedua vektor tersebut, jika sudut yang terbentuk adalah 30° .

Jawab:



Sebelum kita menghitung perkalian titik vektor \hat{A} dan \hat{B} , terlebih dahulu kita ketahui komponen vektor kedua tersebut.

$$A_x = (5) \cos 0^\circ = (5) (1) = 5$$

$$A_y = (5) \sin 0^\circ = (5) (0) = 0$$

$$A_z = 0$$

$$B_x = (4) \cos 30^\circ = (4) \left(\frac{1}{2}\sqrt{3}\right) = 2\sqrt{3}$$

$$B_y = (4) \sin 30^\circ = (4) \left(\frac{1}{2}\right) = 2$$

$$B_z = 0$$

Komponen z bernilai nol karena vektor \hat{A} dan \hat{B} berada pada bidang xy. Hitung perkalian titik antara vektor \hat{A} dan \hat{B} menggunakan persamaan perkalian titik dengan vektor komponen :

$$\hat{A} \cdot \hat{B} = (A_x \cdot B_x + A_y \cdot B_y + A_z \cdot B_z)$$

$$\hat{A} \cdot \hat{B} = (5 \cdot 2\sqrt{3} + 0 \cdot 2 + 0 \cdot 0)$$

$$\hat{A} \cdot \hat{B} = (10\sqrt{3} + 0 + 0)$$

$$\hat{A} \cdot \hat{B} = 10\sqrt{3}$$

Coba kita bandingkan dengan cara:

$$\hat{A} \cdot \hat{B} = A B \cos \theta$$

$$\hat{A} \cdot \hat{B} = (5) (4) \cos 30^\circ$$

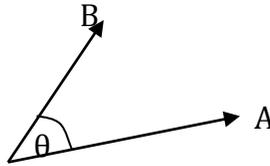
$$\hat{A} \cdot \hat{B} = 20 \left(\frac{1}{2}\sqrt{3}\right)$$

$$\hat{A} \cdot \hat{B} = 10\sqrt{3}$$

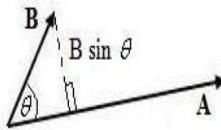
2. Perkalian Silang (*cross product*)

Perkalian silang dari dua vektor, misalnya vektor \hat{A} dan \hat{B} ditulis sebagai $\hat{A} \times \hat{B}$ (\hat{A} silang \hat{B}). Perkalian silang dikenal dengan perkalian

vektor, karena hasil perkalian ini menghasilkan besaran vektor. Misalnya vektor \hat{A} dan vektor \hat{B} tampak seperti gambar di bawah¹⁶.



Untuk mendefinisikan perkalian silang antara vektor \hat{A} dan \hat{B} ($\hat{A} \times \hat{B}$), kita gambarkan vektor \hat{A} dan \hat{B} seperti gambar di atas, dan digambarkan juga komponen vektor \hat{B} yang tegak lurus pada \hat{A} (lihat gambar di bawah), yang besarnya sama dengan $\hat{B} \sin \theta$.



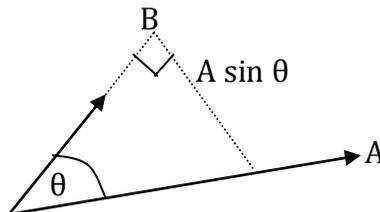
Dengan demikian, kita dapat mendefinisikan besar perkalian silang vektor \hat{A} dan \hat{B} ($A \times B$) sebagai hasil kali besar vektor \hat{A} dengan komponen vektor \hat{B} yang tegak lurus pada vektor \hat{A} .

Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$\hat{A} \times \hat{B} = \hat{A} (\hat{B} \sin \theta) \quad (2.8)$$

(θ bernilai antara 0° sampai 180°)

Bagaimana jika perkalian silang antara vektor \hat{A} dan \hat{B} ($\hat{A} \times \hat{B}$) kita balik menjadi $\hat{B} \times \hat{A}$? Terlebih dahulu kita gambarkan vektor \hat{B} dan \hat{A} serta komponen vektor \hat{A} yang tegak lurus pada \hat{B} (lihat gambar di bawah).



¹⁶ Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

Berdasarkan gambar ini, kita dapat mendefinisikan perkalian silang antara vektor \hat{B} dan \hat{A} ($\hat{B} \times \hat{A}$) sebagai hasil kali besar vektor \hat{B} dengan komponen vektor \hat{A} yang tegak lurus pada vektor \hat{B} . Secara matematis ditulis :

$$\hat{A} \times \hat{B} = \hat{B} (\hat{A} \sin \theta) = \hat{B} \hat{A} \sin \theta \quad (2.9)$$

$(\theta \text{ bernilai antara } 0^0 \text{ sampai } 180^0)$

Jadi besar sudut apit antara dua buah vektor adalah:

$$|\hat{A} \times \hat{B}| = |\hat{A}| \times |\hat{B}| \sin \theta$$

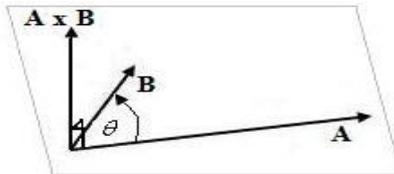
$$\sin \theta = \frac{|\hat{A} \times \hat{B}|}{|\hat{A}| \times |\hat{B}|}$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{|\hat{A} \times \hat{B}|}{|\hat{A}| \times |\hat{B}|} \quad (2.10)$$

Bagaimana dengan arah vektor $\hat{A} \times \hat{B}$ dan arah vektor $\hat{B} \times \hat{A}$?

a. Arah Perkalian Silang $\hat{A} \times \hat{B}$

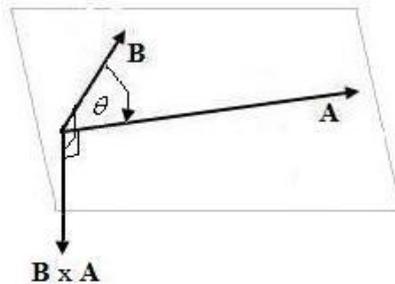
Perkalian silang adalah perkalian vektor, sehingga selain hasil perkaliannya memiliki besar atau nilai dan arah. Besar hasil perkalian vektor telah kita turunkan di atas, sekarang kita menentukan arahnya. Untuk menentukan arah $\hat{A} \times \hat{B}$, terlebih dahulu kita gambarkan vektor \hat{A} dan \hat{B} seperti gambar di bawah. Kedua vektor ini kita letakan pada suatu bidang (lihat gambar di bawah).



Kita definisikan perkalian silang $\hat{A} \times \hat{B}$ sebagai suatu vektor yang tegak lurus bidang di mana vektor \hat{A} dan \hat{B} berada. Besarnya sama dengan $\hat{A}\hat{B} \sin \theta$. Jika $\hat{C} = \hat{A} \times \hat{B}$ maka $\hat{C} = \hat{A} \hat{B} \sin \theta$. Arah \hat{C} tegak lurus bidang di mana vektor \hat{A} dan \hat{B} berada. Kita dapat menggunakan kaidah tangan kanan untuk menentukan arah \hat{C} . Jika kita menggenggam jari tangan di mana arahnya berlawanan dengan arah putaran jarum jam, maka arah \hat{C} searah dengan arah ibu jari menuju ke atas.

b. Arah perkalian silang $\hat{B} \times \hat{A}$

Untuk menentukan arah $\hat{B} \times \hat{A}$, terlebih dahulu kita gambarkan vektor \hat{B} dan \hat{A} seperti gambar di bawah. Kedua vektor ini kita letakan pada suatu bidang (lihat gambar di bawah).



Jika $\hat{C} = \hat{B} \times \hat{A}$ maka $|\hat{C}| = \hat{B}\hat{A} \sin \theta$. Arah \hat{C} tegak lurus bidang di mana vektor \hat{B} dan \hat{A} berada. Kita dapat menggunakan kaidah tangan kanan untuk menentukan arah \hat{C} . Jika kita menggenggam jari tangan di mana arahnya searah dengan arah putaran jarum jam, maka arah \hat{C} sama dengan arah ibu jari menuju ke bawah.

$\hat{A} \times \hat{B}$ tidak sama dengan $\hat{B} \times \hat{A}$. Hasil perkalian silang menghasilkan besaran vektor, di mana selain mempunyai besar, juga mempunyai arah. Pada penurunan di atas, arah $\hat{A} \times \hat{B}$ berlawanan arah dengan $\hat{B} \times \hat{A}$.

Beberapa hal dalam perkalian silang yang perlu anda ketahui :

- 1) Perkalian silang bersifat anti komutatif. $\hat{A} \times \hat{B} = - \hat{B} \times \hat{A}$. Tanda negatif menunjukkan bahwa arah hasil perkalian silang $\hat{B} \times \hat{A}$ berlawanan arah dengan $\hat{A} \times \hat{B}$.

- 2) Jika kedua vektor saling tegak lurus maka sudut yang dibentuk adalah 90° ($\sin 90^\circ = 1$). Dengan demikian, besar hasil perkalian silang antara vektor \hat{A} dan \hat{B} akan tampak sebagai berikut.

$$\hat{A} \times \hat{B} = \hat{A} \hat{B} \sin \theta = \hat{A} \hat{B} \sin 90^\circ = \hat{A} \hat{B}$$

$$\hat{B} \times \hat{A} = \hat{B} \hat{A} \sin \theta = \hat{B} \hat{A} \sin 90^\circ = \hat{B} \hat{A}$$

- 3) Jika kedua vektor searah, maka sudut yang dibentuk adalah 0° . ($\sin 0^\circ = 0$). Dengan demikian, nilai alias besar hasil perkalian silang antara vektor \hat{A} dan \hat{B} akan tampak sebagai berikut.

$$\hat{A} \times \hat{B} = \hat{A} \hat{B} \sin \theta = \hat{A} \hat{B} \sin 0^\circ = 0$$

$$\hat{B} \times \hat{A} = \hat{B} \hat{A} \sin \theta = \hat{B} \hat{A} \sin 0^\circ = 0$$

Hasil perkalian silang antara dua vektor yang searah alias segaris kerja sama dengan nol. Untuk menghitung perkalian silang secara langsung

jika kita mengetahui komponen vektor yang diketahui. Urutannya sama dengan perkalian titik. Pertama-tama, kita lakukan perkalian antara vektor-vektor satuan \hat{i} , \hat{j} , dan \hat{k} , hasil perkalian vektor antara vektor satuan yang sama adalah nol.

$$\hat{i} \times \hat{i} = \hat{j} \times \hat{j} = \hat{k} \times \hat{k} = \mathbf{0}$$

Dengan berpedoman pada persamaan perkalian vektor yang telah diturunkan sebelumnya ($\hat{A} \times \hat{B} = \hat{A}\hat{B} \sin \theta$) dan sifat anti komutatif dari perkalian vektor ($\hat{A} \times \hat{B} = -\hat{B} \times \hat{A}$), maka kita peroleh :

$$\hat{i} \times \hat{j} = +\hat{k} \quad \text{dan} \quad \hat{j} \times \hat{i} = -\hat{k}$$

$$\hat{j} \times \hat{k} = +\hat{i} \quad \text{dan} \quad \hat{k} \times \hat{j} = -\hat{i}$$

$$\hat{k} \times \hat{i} = +\hat{j} \quad \text{dan} \quad \hat{i} \times \hat{k} = -\hat{j}$$

Nyatakan vektor \hat{A} dan \hat{B} dalam komponen-komponennya, menguraikan perkaliannya dan menggunakan perkalian dari vektor-vektor satuannya.

$$\hat{A} \times \hat{B} = (A_x \hat{i} + A_y \hat{j} + A_z \hat{k}) \times (B_x \hat{i} + B_y \hat{j} + B_z \hat{k})$$

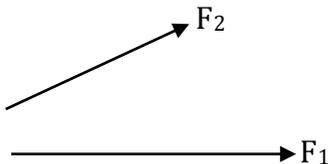
$$\hat{A} \times \hat{B} = (A_x \hat{i} \times B_x \hat{i} + A_x \hat{i} \times B_y \hat{j} + A_x \hat{i} \times B_z \hat{k}) + (A_y \hat{j} \times B_x \hat{i} + A_y \hat{j} \times B_y \hat{j} + A_y \hat{j} \times B_z \hat{k}) + (A_z \hat{k} \times B_x \hat{i} + A_z \hat{k} \times B_y \hat{j} + A_z \hat{k} \times B_z \hat{k})$$

$$\hat{A} \times \hat{B} = (A_y B_z - A_z B_y) \hat{i} + (A_z B_x - A_x B_z) \hat{j} + (A_x B_y - A_y B_x) \hat{k} \quad (2.11)$$

3. Penjumlahan Vektor

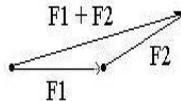
a. Menggambar penjumlahan atau selisih dua buah vektor dengan metode segitiga

Misalkan dua orang anak mendorong sebuah benda dengan vektor gaya masing-masing sebesar F_1 dan F_2 , seperti ditunjukkan diagram di bawah. Ke arah mana benda itu akan pindah ? tentu saja benda tersebut tidak berpindah searah F_1 atau F_2 . dalam kasus seperti itu, maka benda tersebut berpindah searah dengan $F_1 + F_2$. Operasi ini disebut jumlah vektor¹⁷.



¹⁷ Sears dan Zemansky. 2000. *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga

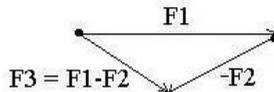
Cara menggambar jumlah dua buah vektor adalah dengan metode segitiga. Pertama, gambar vektor F_1 berupa tanda panah. kedua, gambar vektor kedua, F_2 , dengan pangkalnya berhimpitan dengan ujung vektor pertama, F_1 . ketiga, jumlahkan kedua vektor, dengan menggambar vektor resultan ($F_1 + F_2$), dari pangkal vektor F_1 menuju ujung vektor F_2 . Proses ini ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Cara menggambar selisih vektor pada dasarnya sama dengan menggambar penjumlahan dua vektor. Sebagai contoh, sebuah vektor F_1 dan vektor F_2 nilainya seperti tampak pada diagram di bawah. Berapa selisih kedua vektor tersebut ? misalnya F_3 adalah selisih vektor F_1 dan F_2 , maka dapat kita tulis $F_3 = F_1 - F_2$ atau $F_3 = F_1 + (-F_2)$. Hal ini menunjukkan bahwa selisih antara vektor F_1 dan F_2 sama saja dengan penjumlahan vektor F_1 dan vektor $-F_2$. Tanda minus hanya menunjukkan bahwa arah $-F_2$ berlawanan dengan F_2 .

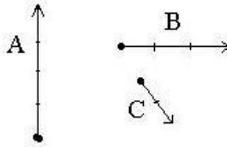
Bagaimana menggambar selisih vektor F_1 dan F_2 ?

- Gambar terlebih dahulu tanda panah yang melambangkan vektor F_1 .
- Gambar vektor $-F_2$. vektor $-F_2$ besarnya sama dengan F_2 , hanya arahnya berlawanan. (Lihat dan bandingkan gambar di bawah dan di atas).
- Gambar tanda panah vektor resultan F_3 , di mana pangkal vektor F_3 berimpit dengan pangkal vektor F_1 dan ujung vektor F_3 berimpit dengan ujung vektor $-F_2$. Berimpit itu artinya menempel.

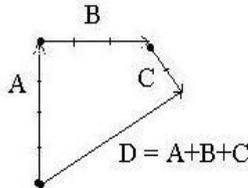


b. Menggambar penjumlahan lebih dari 2 vektor dengan metode poligon

Poligon itu artinya segi banyak/banyak segi. Sebelumnya, kita belajar menggambar 2 vektor dengan cara segitiga. Misalnya kamu berpindah sejauh 4 meter, vektor \hat{A} (lihat gambar di bawah), lalu kamu berpindah lagi sejauh 3 meter, vektor \hat{B} . Karena hobimu jalan-jalan, maka kamu pindah lagi sejauh 2 meter, vektor C .



Untuk menggambar vektor resultan atau hasil penjumlahan lebih dari dua vektor, maka tidak bisa menggunakan metode atau cara segitiga. Kenapa?. Kamu harus menggunakan metode poligon atau segi banyak. Caranya, pertama, gambar vektor \hat{A} . kedua, gambar vektor \hat{B} , di mana pangkal vektor \hat{B} berimpit atau nempel dengan ujung vektor \hat{A} (lihat gambar di bawah). Ketiga, gambar vektor \hat{C} di ujung vektor \hat{B} . caranya seperti menggambar vektor \hat{B} . terakhir, gambar vektor \hat{D} sebagai vektor resultan atau hasil, dimana pangkal vektor \hat{D} nempel dengan pangkal vektor \hat{A} dan ujung vektor \hat{B} nempel dengan ujung vektor \hat{C} .

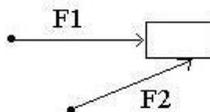


c. Menggambar penjumlahan dua atau lebih vektor dengan metode Jajaran Genjang

Selain menggambar penjumlahan vektor dengan metode atau cara segitiga dan poligon, kita juga bisa menggunakan metode jajaran genjang. Kalau metode segitiga khusus untuk dua vektor dan metode poligon khusus untuk lebih dari dua vektor, maka metode jajaran genjang untuk menggambar penjumlahan dua vektor atau lebih. Bagaimana menggambar penjumlahan dua vektor atau lebih menggunakan cara jajaran genjang?

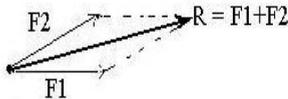
a. *Menggambar penjumlahan dua vektor menggunakan metode jajaran genjang.*

Misalkan dua orang anak mendorong sebuah benda dengan vektor Gaya masing-masing sebesar F_1 dan F_2 , seperti ditunjukkan diagram di bawah. Ke arah mana benda itu akan pindah ?



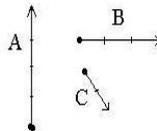
Untuk menggambar penjumlahan dua vektor, lakukan sesuai langkah-langkah di bawah ini. Pertama, gambar vektor F_1

menggunakan tandah panah (lihat gambar di bawah). Kedua, gambar vektor F_2 , di mana pangkal berimpit/nempel dengan pangkal vektor F_1 . ketiga, gambar vektor resultan, F_3 ($F_1 + F_2$), di mana pangkal vektor F_3 nempel dengan pangkal vektor F_1 dan F_2 , sedangkan ujung vektor F_3 nempel dengan titik temu garis putus-putus dari kedua ujung vektor F_1 dan vektor F_2 .

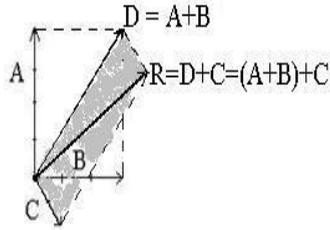


- b. *Menggambar penjumlahan lebih dari dua vektor menggunakan metode jajaran genjang.*

Misalnya kamu berpindah sejauh 4 meter seperti vektor \hat{A} (lihat gambar di bawah), lalu kamu berpindah lagi sejauh 3 meter seperti vektor \hat{B} . Kamu pindah lagi sejauh 2 meter seperti vektor \hat{C} .



Untuk menggambar penjumlahan lebih dari dua vektor, lihat petunjuk berikut ini. Pertama, gambar vektor \hat{A} menggunakan tandah panah (lihat gambar di bawah). Kedua, gambar vektor \hat{B} , di mana pangkalnya berimpit/nempel dengan pangkal vektor \hat{A} . ketiga, gambar vektor \hat{C} , di mana pangkalnya berhimpit dengan pangkal vektor \hat{A} dan \hat{B} . keempat, buat garis putus-putus tegak lurus dari ujung vektor \hat{A} dan \hat{B} sampai kedua garis putus-putus tersebut bertemu, Vektor \hat{D} . Kelima, tarik garis dari pangkal vektor \hat{A} , \hat{B} , dan \hat{C} menuju titik temu garis putus-putus yang sudah kamu buat tadi. Keenam, buat lagi garis putus-putus tegak lurus dari titik temu vektor \hat{A} dan \hat{B} dan dari ujung vektor \hat{C} sampai kedua garis putus-putus tersebut bertemu. Sekarang tarik garis lurus dari pangkal vektor \hat{A} , \hat{B} dan \hat{C} menuju titik temu garis putus-putus yang baru saja kamu buat, vektor Resultan (R). Garis terakhir tersebut adalah vektor resultannya.



4. Menentukan Resultan Vektor

Ada dua cara yang dapat dilakukan untuk menentukan nilai dan arah vektor resultan, yaitu dengan metode grafis dan metode analitis¹⁸.

1. Menentukan vektor resultan dengan metode grafis

Dengan menggunakan metode segitiga dan poligon, kita dapat melukis vektor resultan dari dua buah vektor atau lebih. Dari gambar vektor resultan tersebut, kita dapat menentukan besar dan arah vektor resultan dengan melakukan pengukuran (bukan menghitung). Cara menentukan vektor resultan seperti ini disebut metode grafis.

Langkah-langkah menentukan besar dan arah vektor resultan dengan metode grafis, adalah sebagai berikut :

- a. Tetapkan sumbu x positif sebagai acuan menentukan arah. Ingat, sudut positif diukur dengan arah berlawanan arah jarum jam, sedangkan sudut negatif diukur dengan arah searah jarum jam.
- b. Gambar setiap vektor yang akan dijumlahkan (lihat kembali menggambar penjumlahan vektor menggunakan jajaran genjang) .
- c. Arah vektor digambar terhadap sumbu x positif dengan menggunakan busur derajat.
- d. Gambar vektor resultan dengan metode segitiga (untuk 2 vektor) dan metode poligon (lebih dari 2 vektor).
- e. Ukur panjang vektor resultan dengan mistar, sedangkan arah vektor Resultan diukur terhadap sumbu x positif dengan busur derajat.
- f. Tentukan besar dan arah vektor resultan :
 - 1) Besar vektor resultan sama dengan hasil kali panjang vektor resultan (langkah 4) dengan skala panjang (langkah 2b)
 - 2) Arah vektor resultan sama dengan sudut yang dibentuk oleh vektor resultan terhadap sumbu x positif yang telah diukur dengan busur derajat.

¹⁸ Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid 1* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

Contoh Soal 2.2:

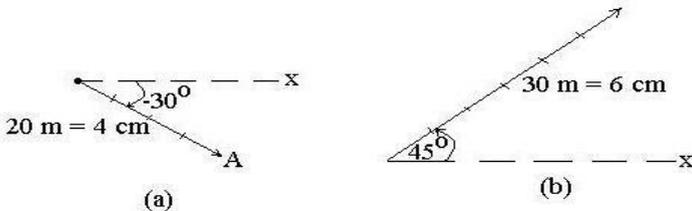
1. Tentukan besar dan arah vektor resultan dari vektor perpindahan \hat{A} sepanjang 20 m dengan arah -30° terhadap sumbu x positif (arah mendatar ke kanan) dan vektor perpindahan \hat{B} sepanjang 30 m dengan arah $+45^\circ$ terhadap sumbu x positif.

Jawab:

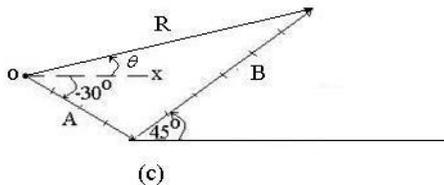
Kita harus menetapkan skala panjang terlebih dahulu. Setelah itu, gambar vektor \hat{A} dan \hat{B} secara terpisah. Terakhir, gambar vektor resultan $R=A+B$ dengan metode segitiga atau poligon, lalu kita menentukan besar dan arahnya

Langkah 1, misalnya kita menetapkan skala panjang vektor perpindahan $5\text{m} = 1\text{cm}$ (catatan : anda dapat menetapkan skala sesuai dengan kemauan anda, penetapan skala di atas hanya sebagai contoh). Dengan demikian, besar perpindahan 20 m digambar dengan panjang vektor 4 cm (ingat, $20:5=4$), dengan arah -30° terhadap sumbu x positif (gambar a).

Langkah 2, gambar vektor perpindahan \hat{B} (besarnya 30 m) dengan panjang tanda panahnya 6 cm (ingat, skala yang kita tetapkan $5\text{m} = 1\text{cm}$, jadi $30\text{m} = 6\text{cm}$) dan arahnya sebesar 45° terhadap sumbu x positif. (gambar b).



Langkah 3, gambar vektor resultan $R = \hat{A} + \hat{B}$ (gambar c)



Langkah 4, ukur panjang vektor R dengan mistar dan arah vektor R dengan bujur sangkar. Besar vektor R diperoleh dengan mengalikan panjang vektor R dengan skala panjang vektor.

Catatan: menentukan besar dan arah vektor resultan dengan metode grafis merupakan salah satu pendekatan. Ketelitian hasil yang diperoleh juga

sangat bergantung pada skala gambar, ketelitian mistar, busur derajat serta ketepatan anda dalam menggambar dan membaca skala. Jika anda ingin menentukan besar dan arah vektor resultan secara lebih tepat, dapat digunakan perhitungan matematis (bukan dengan pengukuran), yakni menggunakan metode analitis.

2. Menentukan vektor resultan dengan metode analitis

Dalam menentukan besar dan arah vektor resultan dengan metode analitis, kita dapat menggunakan dua (2) cara yaitu menggunakan rumus cosinus dan menggunakan vektor komponen.

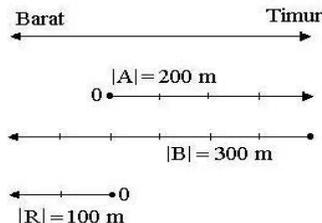
a. Menentukan vektor resultan segaris kerja

Di SMA kita telah belajar tentang vektor resultan untuk dua vektor gaya yang segaris kerja (searah atau berlawanan arah). Kali ini kita ulangi kembali, sebagai dasar sebelum menghitung vektor resultan dengan rumus Cosinus. Kita meninjau vektor perpindahan yang segaris kerja. Misalnya kamu berpindah sejauh 200 m ke arah timur (vektor \hat{A}), lalu berjalan kembali arah barat sejauh 300 m (vektor \hat{B}). Berapakah perpindahan total yang kamu lakukan dihitung dari kedudukan awalmu?

Jawab:

Untuk vektor-vektor yang segaris kerja, arahnya dapat dibedakan dengan memberi tanda + dan -. Jika kita tetapkan arah timur bertanda +, maka arah barat bertanda -. Berdasarkan ketetapan kita tadi, maka besar vektor $\hat{A} = +200$ m dan besar vektor $\hat{B} = -300$ m. Dengan demikian besar vektor Resultannya adalah : $R = \hat{A} + \hat{B} = (+200 \text{ m}) + (-300 \text{ m}) = 200 \text{ m} - 300 \text{ m} = -100 \text{ m}$ (tanda - hanya menunjukkan bahwa arah vektor Resultan ke barat atau sesuai dengan arah vektor \hat{B}).

(pada gambar ditetapkan skala 50 m = 1 cm)



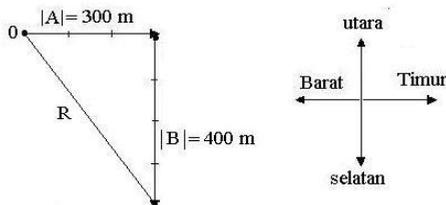
Melalui contoh di atas, diketahui bahwa operasi penjumlahan dalam berhitung berlaku untuk resultan dari dua vektor yang berlawanan arah. Demikian juga dua vektor yang searah.

b. Menentukan vektor resultan pada segitiga siku-siku

Apakah hitungan vektor tetap memenuhi hukum berhitung jika perpindahan berlaku untuk dua dimensi? untuk menjawabnya, perhatikan contoh berikut ini. Dari kedudukan awalmu, kamu berjalan ke timur sejauh 300 m (vektor \hat{A}), lalu berbelok ke selatan sejauh 400 meter (vektor \hat{B}). Apakah perpindahan totalmu 700 m ? atau 100 m ?

Jawab:

Terlebih dahulu kita tetapkan skala perpindahan, misalnya 100 m = 1 cm. dengan demikian, perpindahan ke timur sejauh 300 m digambar dengan panjang vektor 3 cm, sedangkan perpindahan ke selatan sejauh 400 m digambar 4 cm. Lihat gambar di bawah.



Untuk menentukan vektor resultan di atas, kita tidak bisa menggunakan hukum berhitung seperti pada dua atau lebih vektor yang segaris, karena dua vektor tersebut tidak segaris kerja. Vektor resultan dapat kita tentukan besarnya menggunakan rumus Pythagoras dalam segitiga siku-siku.

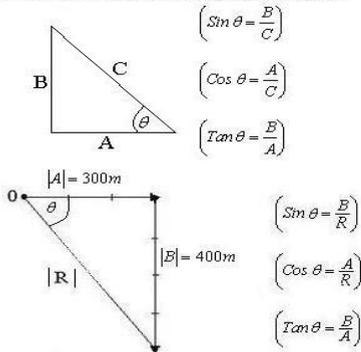
$$\begin{aligned} |R^2| &= |A^2| + |B^2| \\ |R^2| &= |300^2| + |400^2| \\ |R^2| &= |90000| + |160000| \\ |R^2| &= |250000| \\ R &= \sqrt{250000} \\ R &= 500 \text{ m} \end{aligned}$$

Jadi, besar vektor Resultan = 500 m

3. Menentukan arah vektor resultan

Untuk menentukan arah vektor Resultan terhadap salah satu vektor komponennya, kita menggunakan rumus sinus, cosinus dan tangen pada segitiga. Perhatikan gambar di bawah ini.

Rumus Sinus, Cosinus dan Tangen pada Segitiga



Karena diketahui besar vektor komponen \hat{A} (300 m) dan besar vektor komponen \hat{B} (400 m), maka dalam menentukan arah vektor Resultan, kita menggunakan rumus tangen.

$$\tan \theta = \frac{400 \text{ m}}{300 \text{ m}}$$

$$\tan \theta = 1,33$$

$$\theta = \tan^{-1} 1,33 = 53^\circ$$

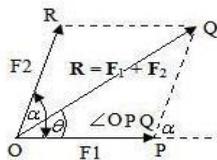
Jadi arah vektor resultan = 53° terhadap sumbu x positif

a. Menentukan vektor resultan dengan rumus cosinus

Kita telah menghitung vektor resultan dari dua vektor yang segaris kerja dan dua vektor yang saling tegak lurus. Bagaimana-kah menghitung vektor resultan untuk dua vektor yang tidak segaris kerja dan tidak saling tegak lurus?

Kita bisa menghitung vektor resultan dari dua vektor yang berarah sembarang dengan menggunakan rumus cosinus. Rumus cosinus yang digunakan untuk menghitung resultan besar dua vektor yang arahnya sembarang adalah:

Misalnya terdapat dua vektor, F_1 dan F_2 sebagaimana tampak pada gambar di bawah.



$$\angle OPQ = (180^\circ - \alpha)$$

Berdasarkan gambar di atas, dapat diturunkan persamaan sebagai berikut:

$$OQ^2 = OP^2 + PQ^2 - 2OP \cdot PQ \cos \angle OAC$$

$$= OP^2 + PQ^2 - 2OP \cdot PQ \cos (180^\circ - \alpha)$$

$$= OP^2 + PQ^2 - 2OP \cdot PQ (-\cos \alpha)$$

$$= OP^2 + PQ^2 + 2OP \cdot PQ \cos \alpha$$

Misalkan $OQ = R$, $OP = F_1$, dan $PQ = F_2$, maka persamaan di atas menjadi:
 $R^2 = F_1^2 + F_2^2 + 2 F_1 F_2 \cos \alpha$

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2 F_1 F_2 \cos \alpha} \quad (2.12)$$

Jika besar vektor resultan dihitung dengan rumus cosinus, bagaimana dengan arahnya? Kita menggunakan rumus sinus.

b. Menentukan arah vektor dengan rumus sinus

Perhatikan kembali gambar di atas. Arah vektor Resultan dapat dihitung menggunakan sinus pada segitiga OPQ.

$$\frac{R}{\sin \theta} = \frac{F_2}{\sin \alpha}$$

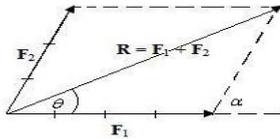
$$\frac{R}{\sin(180^\circ - \alpha)} = \frac{F_2}{\sin \theta}$$

$$\frac{R}{\sin \alpha} = \frac{F_2}{\sin \theta}$$

$$\sin \theta = \frac{F_2}{R} \sin \alpha \quad (2.13)$$

Contoh Soal 2.3:

Dua vektor F_1 dan F_2 memiliki pangkal berhimpit, di mana besar $F_1 = 4 \text{ N}$ dan besar $F_2 = 3 \text{ N}$. jika sudut yang dibentuk kedua vektor adalah 60° , berapakah besar dan arah vektor resultan ?



Jawaban :

Besar vektor resultan kita hitung menggunakan persamaan:

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2 F_1 F_2 \cos \alpha}$$

$$R = \sqrt{(4\text{N})^2 + (3\text{N})^2 + 2 (4\text{N})(3\text{N}) \cos 60^\circ}$$

$$R = \sqrt{(16 \text{ N}) + (9 \text{ N}) + 24 \text{ N} (0,5)}$$

$$R = \sqrt{(25 + 12)}$$

$$R = \sqrt{37 \text{ N}}$$

$$R = 6,08 \text{ N}$$

$$\text{Arah vektor resultan} = \sin \theta = \frac{F_2}{R} \sin \alpha$$

$$\sin \theta = \frac{3}{6,08} \sin 60^\circ$$

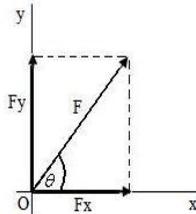
$$\sin \theta = (0,49)(0,87)$$

$$\theta = \sin^{-1} 0,43$$

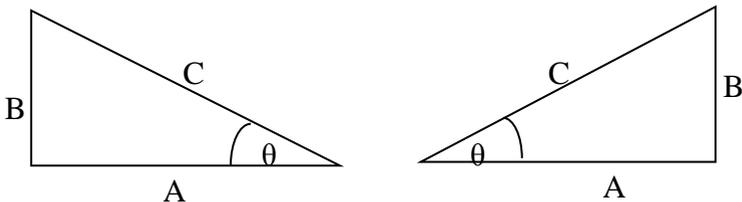
$$\theta = 25,5^\circ$$

c. *Menentukan vektor resultan dengan vektor komponen*

Dalam menggambarkan sesuatu, kita selalu menggunakan koordinat x dan y (untuk dua dimensi) atau koordinat xyz (untuk tiga dimensi). Nah, apabila sebuah vektor membentuk sudut terhadap sumbu x positif, pada bidang koordinat xy, maka kita bisa menguraikan vektor tersebut ke dalam komponen sumbu x atau komponen sumbu y. kedua vektor komponen tersebut biasanya saling tegak lurus. Untuk memudahkan pemahaman anda, kita gambarkan sebuah vektor pada bidang koordinat xy, sebagaimana tampak pada gambar di bawah.



Vektor **F** yang membentuk sudut teta terhadap sumbu x positif, diuraikan menjadi komponen sumbu x, yaitu F_x dan dan komponen pada sumbu y, yakni F_y . Ini merupakan contoh vektor komponen. Jika vektor **F** mempunyai nilai/besar, bagaimanakah dengan vektor komponennya, yakni F_x dan F_y ? bagaimana menghitung besar F_x dan F_y ? Pahami terlebih dahulu rumus sinus, cosinus dan tangen di bawah ini.



$$\sin \theta = \frac{B}{C}$$

$$\cos \theta = \frac{A}{C}$$

$$\tan \theta = \frac{B}{A}$$

Besar vektor komponen $F_x = F \cos \theta$

Besar vektor komponen $F_y = F \sin \theta$

$$\text{Besarnya vektor resultan } F = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2} \quad (2.14)$$

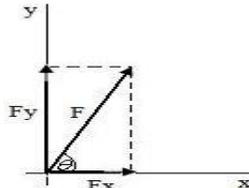
Bagaimana dengan arah F ? Untuk menentukan arah vektor resultan, kita menggunakan rumus tangen. Kita menggunakan rumus tangen karena komponen F_x dan F_y diketahui.

$$\tan \theta = \frac{F_y}{F_x}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{F_y}{F_x} \quad (2.15)$$

Contoh Soal 2.4:

1. Tentukanlah komponen-komponen vektor gaya (F) yang besarnya 40 N dan membentuk sudut 60° terhadap sumbu x positif (lihat gambar di bawah).



Jawab:

Yang ditanyakan pada soal di atas adalah komponen vektor F pada sumbu x dan y (F_x dan F_y).

$$F_x = F \cos \theta = (40) (\cos 60^\circ) = (40) (0,5) = 20 \text{ N}$$

$$F_y = F \sin \theta = (40) (\sin 60^\circ) = (40) \left(\frac{1}{2} \sqrt{3}\right) = (40) (0,87) = 43,8 \text{ N}$$

Latihan Soal 2.1

1. Diketahui 3 buah vektor yaitu:

$$\hat{A} = 2\hat{i} + 2\hat{j} - \hat{k}$$

$$\hat{B} = 3\hat{i} - \hat{j} + 3\hat{k}$$

$$\hat{C} = -\hat{i} - 3\hat{j} + 2\hat{k}$$

Tentukan :

a. $\hat{A} + \hat{B} + \hat{C}$

b. $\hat{A} - \hat{B} - \hat{C}$

c. $\hat{A} - (\hat{B} + \hat{C})$

d. $(\hat{A} + \hat{B}) - \hat{C}$

e. $2\hat{A} - (\hat{B} + 3\hat{C})$

f. $(\hat{A} \cdot \hat{B}) + (\hat{A} \cdot \hat{C})$

g. $(\hat{B} \cdot \hat{C}) - (\hat{A} \cdot \hat{B})$

h. $(\hat{A} \times \hat{C}) \cdot (\hat{A} + \hat{B})$

i. $(\hat{A} - \hat{B}) \cdot (\hat{B} + \hat{C})$

j. $(\hat{A} \times \hat{B}) \times (\hat{A} - \hat{C})$

2. Hasil perkalian vektor antara dua vektor sama dengan $\sqrt{3}$ kali perkalian skalar kedua vektor tersebut. Berapakah sudut yang dibentuk oleh kedua vektor tersebut.
3. Dua buah vektor masing-masing besarnya 3 dan 4 satuan. Tunjukkan bahwa kombinasi kedua vektor tersebut dapat menghasilkan vektor resultan sebesar:
 - a. 7 satuan
 - b. 1 satuan
 - c. 5 satuan
4. Dua buah vektor memiliki besar yang sama. Berapakah sudut apit antara vektor tersebut jika hasil bagi selisih vektor dengan penjumlahan vektor adalah $\frac{1}{3}\sqrt{3}$.
5. Dua buah vektor gaya F_1 dan F_2 bertitik tangkap sama saling mengapit sudut α . Jika $|\widehat{F}_1 + \widehat{F}_2| = \sqrt{3} |\widehat{F}_1 - \widehat{F}_2|$ dan $|\widehat{F}_1| = 2 |\widehat{F}_2|$. Hitunglah α ?
6. Sebuah pesawat terbang menempuh 40 km dalam arah 60° utara dari timur, kemudian 10 km ke timur, dan akhirnya bergerak $10\sqrt{3}$ km ke utara. Tentukan besar dan arah perpindahan pesawat terbang dihitung dari titik awal berangkat.
7. Seekor merpati terbang 100 meter ke arah timur, tiba-tiba angin datang yang membuat arah terbang ke timur laut. Setelah menempuh jarak 80 meter, merpati berpindah 25 meter ke utara dan berhenti sebentar lalu terbang ke barat dengan jarak 10 meter, setelah itu terbang ke arah selatan dengan jarak 20 meter. Berapakah resultan perpindahan dan ke manakah arah merpati.

Latihan Soal 2.2

1. Apa yang anda ketahui tentang vektor satuan ?
2. Apakah vektor satuan memiliki satuan ? Jelaskan !
3. Sebuah mobil mainan ditarik menggunakan tali dengan gaya sebesar 10 N. Tali membentuk sudut 60° terhadap permukaan tanah. Nyatakanlah vektor gaya (\mathbf{F}) dalam komponen-komponennya
4. Jika $\widehat{A} = 2i + 4j + 6k$ dan $\widehat{B} = -3i + 2j - 4k$. Berapakah resultannya jika $\widehat{A} + \widehat{B}$ dan $\widehat{B} - \widehat{A}$
5. Jika $\widehat{A} = 4j + 5k$ dan $\widehat{B} = -3i + 2j$, tentukan resultan dari $\widehat{A} - \widehat{B}$

Daftar Pustaka

- Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Sears dan Zemansky. 2000. *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

BAB III

KINEMATIKA GERAK

1. Pendahuluan

Bagian ilmu fisika yang mempelajari gerak benda dan pengaruh lingkungan terhadap gerak benda disebut mekanika. Kinematika adalah bagian dari mekanika yang mempelajari gerak suatu benda tanpa memandang gaya yang bekerja pada benda tersebut (massa benda diabaikan). Jadi jarak yang ditempuh benda selama geraknya hanya ditentukan oleh kecepatan v dan atau percepatan a . Bagian yang mempelajari bagaimana pengaruh lingkungan terhadap gerak disebut dinamika. Dalam bab ini kita akan membahas kinematika secara umum: besaran-besaran yang terlibat, gerak benda dalam satu dimensi dan dua dimensi.

2. Vektor Posisi

Posisi titik materi yang bergerak dalam dua atau tiga dimensi ditulis dalam vektor, yang disebut vektor posisi. Vektor posisi adalah suatu vektor yang menyatakan posisi suatu titik bidang atau suatu ruang¹⁹. Posisi suatu partikel dalam ruang dapat dinyatakan dalam vektor \hat{i} , \hat{j} , dan \hat{k} :

$$\mathbf{r} = r_x \hat{i} + r_y \hat{j} + r_z \hat{k} = x \hat{i} + y \hat{j} + z \hat{k} \quad (3.3)$$

Posisi suatu partikel dalam bidang dapat dinyatakan dalam vektor \hat{i} dan \hat{j} :

$$\mathbf{r} = r_x \hat{i} + r_y \hat{j} = x \hat{i} + y \hat{j} \quad (3.4)$$

Dengan (x,y,z) adalah koordinat partikel.

Bila partikel bergerak, posisinya berubah terus terhadap waktu. Jadi partikel yang bergerak memiliki vektor posisi yang merupakan fungsi waktu, demikian juga komponen-komponennya:

$$\mathbf{r}(t) = x(t)\hat{i} + y(t)\hat{j} + z(t)\hat{k} \quad (3.5)$$

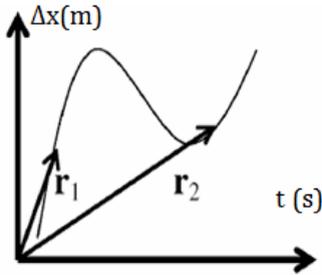
3. Perpindahan

Perpindahan adalah sebagai perubahan posisi suatu titik materi pada waktu tertentu²⁰.

¹⁹ Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

²⁰ Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

Misalkan pada saat t_1 partikel berada di titik 1 dengan vektor posisi $r_1 = r(t_1)$, dan pada saat t_2 benda di titik 2 dengan vektor posisi $r_2 = r(t_2)$. Perpindahan partikel dalam selang waktu ini dinyatakan dengan vektor Δr dari titik 1 ke titik 2. Vektor Δr ini disebut vektor perpindahan:



$$r_2 = r_1 + \Delta r$$

$$\Delta r = r_2 - r_1$$

(3.6)

Dalam bentuk komponen:

$$\Delta r = (x_2 \hat{i} + y_2 \hat{j}) - (x_1 \hat{i} + y_1 \hat{j})$$

$$\Delta r = (x_2 \hat{i} - x_1 \hat{i}) + (y_2 \hat{j} - y_1 \hat{j})$$

$$\Delta r = (x_2 - x_1) \hat{i} + (y_2 - y_1) \hat{j}$$

$$\Delta r = \Delta x \hat{i} + \Delta y \hat{j} \quad (3.7)$$

Keterangan:

Δr = perpindahan posisi dari titik 1 ke titik 2

r_2 = vektor posisi di titik 2

r_1 = vektor posisi di titik 1

Contoh Soal 3.1

1. Vektor posisi suatu benda diberikan oleh $r = (4t^2)\hat{i} - (6t^2 + 2t)\hat{j}$, t dalam sekon dan r dalam meter. Tentukan besar dan arah perpindahan dari $t_2 = 2$ sekon dan $t_1 = 1$ sekon.

Jawab :

$$\text{Untuk } t_1 = 1 \text{ s} \longrightarrow r_1 = (4(1)^2)\hat{i} - (6(1)^2 + 2(1))\hat{j} \\ = 4\hat{i} - 8\hat{j}$$

$$\text{Untuk } t_2 = 2 \text{ s} \longrightarrow r_2 = (4(2)^2)\hat{i} - (6(2)^2 + 2(2))\hat{j} \\ = 16\hat{i} - 28\hat{j}$$

$$\text{Vektor perpindahan : } \Delta r = r_2 - r_1 = (16\hat{i} - 28\hat{j}) - (4\hat{i} - 8\hat{j}) \\ = (16\hat{i} - 28\hat{j}) - 4\hat{i} + 8\hat{j} \\ = (12\hat{i} - 20\hat{j})$$

Besar perpindahannya: $|\Delta r| = \sqrt{(12)^2 + (-20)^2} = \sqrt{544} = 23,33$ meter

Arah perpindahan : $\theta = \tan^{-1} \frac{-20}{12} = \tan^{-1} -1,67 = 59,08^\circ$

4. Kecepatan rata-rata dan kecepatan sesaat

a. Kecepatan rata-rata

Kecepatan merupakan ukuran yang menyatakan besar perubahan posisi terhadap waktu²¹. Kecepatan termasuk besaran vektor. Kecepatan rata-rata adalah hasil bagi antara perpindahan dengan selang waktu, maka secara matematis dapat di tulis:

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1}{t_2 - t_1} \quad (3.8)$$

Kecepatan ini disebut kecepatan rata-rata karena tidak menggambarkan kecepatan benda yang sesungguhnya, melainkan hanya kecepatan rata-rata selama selang waktu tersebut. Kecepatan rata-rata adalah besaran vektor.

Dengan memperhatikan persamaan (3.7), maka untuk gerak titik materi pada bidang adalah:

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta x \hat{\mathbf{i}} + \Delta y \hat{\mathbf{j}}}{\Delta t} = \frac{\Delta x \hat{\mathbf{i}}}{\Delta t} + \frac{\Delta y \hat{\mathbf{j}}}{\Delta t}$$

Jika dituliskan menjadi:

$$\bar{\mathbf{v}}_x = \frac{\Delta x \hat{\mathbf{i}}}{\Delta t} \quad \text{dan} \quad \bar{\mathbf{v}}_y = \frac{\Delta y \hat{\mathbf{j}}}{\Delta t}$$
$$\bar{\mathbf{v}} = \bar{\mathbf{v}}_x \hat{\mathbf{i}} + \bar{\mathbf{v}}_y \hat{\mathbf{j}} \quad (3.9)$$

Keterangan:

$\bar{\mathbf{v}}$ = vektor kecepatan rata-rata (m/s)

$\bar{\mathbf{v}}_x$ = komponen kecepatan rata-rata pada sumbu x (m/s)

$\bar{\mathbf{v}}_y$ = komponen kecepatan rata-rata pada sumbu y (m/s)

Untuk gerak pada suatu bidang. Besar dan arah kecepatan rata-rata dapat dihitung:

$$|\bar{\mathbf{v}}| = \sqrt{\bar{\mathbf{v}}_x^2 + \bar{\mathbf{v}}_y^2} \quad (3.10)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\bar{\mathbf{v}}_y}{\bar{\mathbf{v}}_x} \quad (3.11)$$

Contoh Soal 3.2

1. Seekor kelinci memiliki koordinat (2 m, 6 m) pada waktu $t_1 = 0$ dan koordinat (6 m, 8m) pada waktu $t_2 = 2$ sekon. Untuk selang waktu ini, tentukan:

a. Komponen kecepatan rata-rata

²¹ Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid 1* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

b. Besar dan arah kecepatan rata-rata

Jawab:

Diketahui : $x_1 = 2 \text{ m}$ dan $y_1 = 6 \text{ m}$
 $x_2 = 6 \text{ m}$ dan $y_2 = 8 \text{ m}$
 $t_1 = 0$ dan $t_2 = 2 \text{ sekon}$

Ditanyakan:

- \bar{v}_x dan \bar{v}_y
- $|\bar{v}|$ dan θ

Jawab :

a. $\bar{v}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{(6-2)}{(2-0)} = 2 \text{ m/s}$

$$\bar{v}_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} = \frac{(8-6)}{(2-0)} = 1 \text{ m/s}$$

b. $\bar{v} = \bar{v}_x \hat{i} + \bar{v}_y \hat{j} = 2\hat{i} + \hat{j}$

Besar kecepatan rata-rata: $|\bar{v}| = \sqrt{\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2} = \sqrt{(2)^2 + (1)^2} = 2,24 \text{ m/s}$

Arah kecepatan rata-rata: $\theta = \tan^{-1} \frac{1}{2} = \tan^{-1} 0,5 = 26,57^\circ$

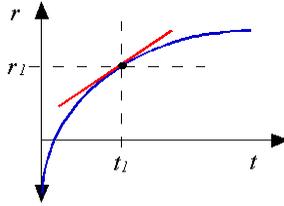
b. Kecepatan sesaat

Dalam perjalanan Mataram-Bima dengan mobil, kecepatan rata-rata 60 km/jam tidaklah berarti kecepatan mobil konstan. Pada kenyataannya kecepatan mobil tersebut berubah setiap saat. Kecepatan sesaat dari suatu benda yang sedang bergerak adalah kecepatan benda itu pada selang waktu yang sangat kecil (selang waktu mendekati nol)²². Dengan perkataan lain kecepatan sesaat adalah kecepatan rata-rata untuk selang waktu mendekati nol. Secara matematis dapat ditulis:

$$v = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \bar{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} \quad \text{(3.12)}$$

Untuk selang waktu yang sangat kecil, maka vektor perpindahan mendekati garis singgung lintasan seperti ditunjukkan dalam gambar 4. Kecepatan rata-rata menjadi kecepatan sesaat di titik 1 dan arahnya menyinggung kurva lintasan.

²² Mark W. Zemansky. 1994. *Fisika untuk Universitas (Mekanika, Panas, Bunyi)*. Jakarta: Bina Cipta.



Untuk gerak titik materi pada bidang, kecepatan sesaat suatu benda adalah:

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\mathbf{v}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x \hat{i} + \Delta y \hat{j}}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \hat{i} + \frac{dy}{dt} \hat{j}$$

$$v_x = \frac{dx}{dt} \quad \text{dan} \quad v_y = \frac{dy}{dt}$$

maka :

$$\mathbf{v}_x = v_x \hat{i} + v_y \hat{j} \quad (3.13)$$

Untuk gerak pada suatu bidang. Besar dan arah kecepatan sesaat dapat dihitung:

$$|\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (3.14)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{v_y}{v_x} \quad (3.15)$$

Contoh Soal 3.3

1. Diketahui persamaan:

$$x = (3 \text{ m}) + (2 \text{ m/s}^2) t^2$$

$$y = (10 \text{ m/s}) t + (0,25 \text{ m/s}^3) t^3$$

- Turunkan persamaan umum kecepatan mobil di atas
- Tentukan kecepatan mobil pada $t = 2$ sekon

Jawab:

$$\text{a. } v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{d(3+2t^2)}{dt} = 0 + 2(2t) = 4t$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{d(10t+0,25t^3)}{dt} = (10) + 0,25(3t^2) = 10 + 0,75t^2$$

Persamaan umum kecepatan sesaat adalah:

$$v_x = v_x \hat{i} + v_y \hat{j} = (4t) \hat{i} + (10 + 0,75t^2) \hat{j}$$

b. Vektor kecepatan pada $t = 2$ sekon

$$v_x = (4t) \hat{i} + (10 + 0,75t^2) \hat{j} = (4(2)) \hat{i} + (10 + 0,75(2)^2) \hat{j}$$

$$v_x = 8\hat{i} + 13\hat{j}$$

Besar kecepatan:

$$|v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{8^2 + 13^2} = \sqrt{233} = 15,2 \text{ m/s}$$

Arah kecepatan mobil:

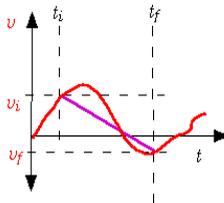
$$\theta = \tan^{-1} \frac{v_y}{v_x} = \tan^{-1} \frac{13}{8} = \tan^{-1} 1,63 = 58^\circ$$

5. Percepatan rata-rata dan percepatan sesaat

a. Percepatan rata-rata

Percepatan rata-rata Benda yang bergerak dengan kecepatan berubah disebut mengalami percepatan. Percepatan adalah ukuran cepat-lambatnya perubahan kecepatan. Percepatan rata-rata didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan vektor kecepatan terhadap selang waktu yang dipakai untuk perubahan tersebut²³. Secara matematis dapat ditulis:

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1}{t_2 - t_1} \quad (3.16)$$



Dengan memperhatikan persamaan (3.11), maka untuk gerak titik materi pada bidang adalah:

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{\Delta v_x \hat{i}}{\Delta t} + \frac{\Delta v_y \hat{j}}{\Delta t}$$

Jika dituliskan menjadi:

$$\bar{a}_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} \quad \text{dan} \quad \bar{a}_y = \frac{\Delta v_y}{\Delta t}$$

$$\bar{\mathbf{a}} = \bar{a}_x \hat{i} + \bar{a}_y \hat{j} \quad (3.17)$$

Keterangan:

$\bar{\mathbf{a}}$ = vektor percepatan rata-rata (m/s^2)

\bar{a}_x = komponen percepatan rata-rata pada sumbu x (m/s^2)

²³ Sears dan Zemansky. 2000. *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh Jilid 1* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

\bar{a}_y = komponen percepatan rata-rata pada sumbu y (m/s^2)

Untuk gerak pada suatu bidang. Besar dan arah percepatan rata-rata dapat dihitung:

$$|\bar{\mathbf{a}}| = \sqrt{\bar{a}_x^2 + \bar{a}_y^2} \quad (3.18)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\bar{a}_y}{\bar{a}_x} \quad (3.19)$$

Contoh Soal 3.4

1. Sebuah benda bergerak pada bidang xy. Pada saat awal benda koordinat (2m , 4m). Komponen-komponen kecepatan memenuhi persamaan $v_x = 4t$ dan $v_y = 10 + 0,75t^2$, untuk v_x dan v_y dalam meter/sekon, dan t dalam sekon, serta konstanta dalam satuan yang disesuaikan.
 - a. Tentukan percepatan rata-rata antara $t=0$ hingga $t=2$ s.
 - b. Besar dan arah vektor percepatan rata-rata

Jawab:

- a. Diketahui : $v_x = 4t$ dan $v_y = 10 + 0,75t^2$

- Pada saat $t=0$: $v_{x1} = 4t = 4(0) = 0$
 $v_{y1} = 10 + 0,75t^2 = 10 + 0,75(0)^2 = 10 \text{ m/s}$
- Pada saat $t=2$ s : $v_{x2} = 4t = 4(2) = 8$
 $v_{y2} = 10 + 0,75t^2 = 10 + 0,75(2)^2 = 13 \text{ m/s}$
- Komponen percepatan rata-rata:

$$\bar{a}_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{v_{x2} - v_{x1}}{t_2 - t_1} = \frac{8 - 0}{2 - 0} = 4 \text{ m/s}^2$$

$$\bar{a}_y = \frac{\Delta v_y}{\Delta t} = \frac{v_{y2} - v_{y1}}{t_2 - t_1} = \frac{13 - 10}{2 - 0} = \frac{3}{2} \text{ m/s}^2$$

- b. Vektor percepatan rata-rata:

$$|\bar{\mathbf{a}}| = \sqrt{\bar{a}_x^2 + \bar{a}_y^2} = \sqrt{(4)^2 + \left(\frac{3}{2}\right)^2} = \sqrt{16 + \left(\frac{9}{4}\right)} = 4,3 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Arah vektor: } \theta = \tan^{-1} \frac{\bar{a}_y}{\bar{a}_x} = \tan^{-1} \frac{1,5}{4} = \tan^{-1} 0,38 = 20,8^\circ$$

b. Percepatan sesaat

Percepatan sesaat adalah percepatan rata-rata untuk selang waktu yang sangat kecil (mendekati nol),²⁴ yaitu:

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \quad (3.20)$$

Untuk gerak titik materi pada bidang, kecepatan sesaat suatu benda adalah:

$$a = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \bar{a} = \frac{dv_x}{dt} \hat{i} + \frac{dv_y}{dt} \hat{j}$$
$$a_x = \frac{dv_x}{dt} \quad \text{dan} \quad a_y = \frac{dv_y}{dt}$$

maka :

$$\mathbf{a} = a_x \hat{i} + a_y \hat{j} \quad (3.21)$$

Selain itu, karena setiap komponen kecepatan adalah turunan dari setiap koordinat terkaitnya, kita dapat menyatakan komponen a_x dan a_y dari vektor percepatan \mathbf{a} sebagai:

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} \quad \text{dan} \quad a_y = \frac{d^2y}{dt^2}$$

dan vektor percepatan \mathbf{a} sebagai

$$\mathbf{a} = \frac{d^2x}{dt^2} \hat{i} + \frac{d^2y}{dt^2} \hat{j}$$

Untuk gerak pada suatu bidang. Besar dan arah percepatan sesaat dapat dihitung:

$$|\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \quad (3.22)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{a_y}{a_x} \quad (3.23)$$

Contoh Soal 3.5

1. Posisi x suatu roket percobaan yang sedang bergerak sepanjang suatu rel dinyatakan oleh:

$$x(t) = 5t + 8t^2 + 4t^3 - 0,25t^4$$

selama 10 sekon dari gerakannya, dengan t dalam sekon, dan x dalam meter. Tentukan:

- Persamaan percepatan roket
- Percepatan awal roket

²⁴ Tipler, P.A.1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penebit Erlangga.

c. Percepatan roket pada $t= 2$ s.

Jawab:

$$a. \quad v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{d(5t+8t^2 + 4t^3 - 0,25 t^4)}{dt} = 5 + 16 t + 12t^2 - t^3$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d(5 + 16t + 12t^2 - t^3)}{dt} = 16 + 24t - 3t^2$$

$$b. \quad a(t=0) = 16 + 24(0) - 3(0)^2 = 16 \text{ m/s}^2$$

$$c. \quad a(t=2 \text{ s}) = 16 + 24(2) - 3(2)^2 = 52 \text{ m/s}^2$$

6. Hubungan antar posisi, kecepatan dan percepatan

a. Menentukan kecepatan dan posisi dengan integrasi

Kecepatan dapat diturunkan dari fungsi posisi, dan juga posisi akan dapat pula diperoleh dari fungsi kecepatan dengan metode integrasi, yaitu:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} & \text{dan} & & v_y &= \frac{dy}{dt} \\ \int_{x_0}^x dx &= \int_0^t v_x dt & & & \int_{y_0}^y dy &= \int_0^t v_y dt \\ x - x_0 &= \int_0^t v_x dt & & & y - y_0 &= \int_0^t v_y dt \\ \mathbf{x} &= \mathbf{x}_0 + \int_0^t \mathbf{v}_x dt & & & \mathbf{y} &= \mathbf{y}_0 + \int_0^t \mathbf{v}_y dt \end{aligned} \quad (3.24)$$

Keterangan:

x_0, y_0 = koordinat posisi awal titik materi (meter)

v_x, v_y = komponen-komponen kecepatan pada sumbu x dan y (m/s)

Contoh Soal 3.6

1. Sebuah benda bergerak pada bidang xy. Pada saat awal benda koordinat (2m , 4m). Komponen-komponen kecepatan memenuhi persamaan $v_x= 5t$ dan $v_y= 4 + 3t^2$, untuk v_x dan v_y dalam meter/sekon, dan t dalam sekon, serta konstanta dalam satuan yang disesuaikan.

a. Tuliskan persamaan umum vektor posisi benda

b. Tentukan posisi pada saat $t=3$ s.

Jawab:

a. Posisi awal benda (2m , 4m), berarti $x_0= 2$ m dan $y_0= 4$ m. Jadi:

$$x = x_0 + \int_0^t v_x dt = 2 + \int_0^t 5t dt = 2 + 5 \left(\frac{1}{2} t^2\right) = (2 + 2,5 t^2) \text{ meter}$$

$$y = y_0 + \int_0^t v_y dt = 4 + \int_0^t (4 + 3t^2) dt = 4 + 4t + 3 \left(\frac{1}{3} t^3\right) = (4+4t+t^3)$$

meter

Vektor posisi benda:

$$r = x\hat{i} + y\hat{j} = (2 + 2,5t^2)\hat{i} + (4+4t+t^3)\hat{j} \text{ meter}$$

b. Posisi benda pada saat $t = 3$ sekon adalah:

$$r = (2 + 2,5t^2)\hat{i} + (4 + 4t + t^3)\hat{j} = (2 + 2,5(3)^2)\hat{i} + (4 + 4(3) + (3)^3)\hat{j}$$

$$r = (24\hat{i} + 43\hat{j}) \text{ meter}$$

b. Menentukan kecepatan dari fungsi percepatan

Fungsi kecepatan dapat diturunkan dari fungsi percepatan, dan juga percepatan akan dapat pula diperoleh dari fungsi kecepatan dengan metode integrasi, yaitu:²⁵

$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$\int_{v_0}^v dv = \int_0^t a dt$$

$$v - v_0 = \int_0^t a dt$$

$$v = v_0 + \int_0^t a dt \quad (3.25)$$

Contoh Soal 3.6

1. Sebuah benda bergerak pada bidang xoy dengan percepatan $a = (2\hat{i} + 4\hat{j})$ m/s² diketahui kecepatan awal dan posisi awal berturut-turut $v_0 = (4\hat{i} + 0\hat{j})$ m/s, dan $r_0 = (10\hat{i} + 10\hat{j})$. Tentukan:
 - a. Persamaan kecepatan
 - b. Persamaan posisi

Jawab:

Diketahui : $a = (2\hat{i} + 4\hat{j})$, $v_0 = (4\hat{i} + 0\hat{j})$, $r_0 = (10\hat{i} + 10\hat{j})$

$$a. \quad v = v_0 + \int_0^t a dt$$

$$v = (4\hat{i} + 0\hat{j}) + \int_0^t (2\hat{i} + 4\hat{j}) dt$$

$$v = 4\hat{i} + 0\hat{j} + 2t\hat{i} + 4t\hat{j}$$

$$v = (2t + 4)\hat{i} + 4t\hat{j}$$

$$v = \{ (2t + 4)\hat{i} + 4t\hat{j} \} \text{ m/s}$$

²⁵ Anonim. 1999. *Belajar Fisika Lebih Mudah dan Menyenangkan*. <http://www.edukasi.net/>. Diakses tanggal 30 Juni 2009.

$$\begin{aligned}
 \text{b. } r &= r_0 + \int_0^t v \, dt \\
 r &= (10\hat{i} + 10\hat{j}) + \int_0^t \{(2t + 4)\hat{i} + 4t\hat{j}\} \, dt \\
 r &= (10\hat{i} + 10\hat{j}) + (t^2 + 4t)\hat{i} + (2t^2)\hat{j} \\
 r &= (t^2 + 4t + 10)\hat{i} + (2t^2 + 10)\hat{j} \text{ meter}
 \end{aligned}$$

Latihan Soal 3.1

Soal Tentang Jarak, Kecepatan, Kelajuan, dan Percepatan

- Vektor posisi suatu benda diberikan oleh $r = (t^3 - 2t^2)\hat{i} + (3t^2)\hat{j}$, t dalam sekon dan r dalam meter. Tentukan besar dan arah perpindahan dari $t_2 = 3$ sekon dan $t_1 = 2$ sekon.
- Seekor tikus mempunyai koordinat $(-2\text{m}, 3\text{m})$ pada waktu $t_1 = 0$ dan koordinat $(6\text{m}, 5\text{m})$ pada waktu $t_2 = 1$ sekon. Untuk selang waktu ini, tentukan:
 - Komponen-komponen kecepatan rata-rata.
 - Besar dan arah kecepatan rata-rata.
- Vektor posisi suatu partikel adalah $r(t) = x(t)\hat{i} + y(t)\hat{j}$, dengan $x(t) = at + b$ dan $y(t) = ct^2 + d$, dimana $a = 1 \text{ m/s}$, $b = 1 \text{ meter}$, $c = \frac{1}{8} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, dan $d = 1 \text{ meter}$. Hitunglah kecepatan rata-rata selama selang waktu $t = 2$ sekon hingga $t = 4$ sekon, dan tentukan besar kecepatan rata-rata.
- Posisi sebuah partikel diberikan oleh; $r(t) = x(t)\hat{i} + y(t)\hat{j}$ dengan $x(t) = 2t + 1$ dan $y(t) = 4t^2 + 2$, untuk r , x , dan y dalam meter, t dalam sekon, dan konstanta dalam satuan yang sesuai.
 - Tentukan vektor posisi dan jarak partikel dari titik asal pada saat $t = 2$ s.
 - Tentukan perpindahan dan kecepatan rata-rata partikel didalam selang waktu $t = 2$ s hingga $t = 5$ s.
 - Turunkan persamaan umum kecepatan partikel
 - Tentukan kecepatan partikel pada $t = 2$ s.
- Sebuah mobil mainan bergerak pada sebuah lapangan yang terletak pada bidang xy . Posisi awal adalah koordinat $(3\text{m}, 0\text{m})$. Komponen-komponen kecepatan mobil dapat dinyatakan oleh fungsi:

$$v_x = \left(4 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)t \text{ dan } v_y = \left(10 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) + \left(0,75 \frac{\text{m}}{\text{s}^3}\right)t^2$$
 - Nyatakan persamaan umum posisi mobil.
 - Tentukan posisi mobil pada $t = 2$ sekon.
- Seekor burung terbang pada bidang xy dengan vektor kecepatan yang dinyatakan oleh: $v = (\alpha - \beta t^2)\hat{i} + (\gamma t)\hat{j}$, dengan $\alpha = 2,1 \text{ m/s}$, $\beta = 3,6 \text{ m/s}^3$,

dan $\gamma = 5 \text{ m/s}^2$ dan arah y positif adalah vertikal ke atas. Pada saat $t=0$ burung berada pada titik asal.

- a. Turunkan vektor posisi burung sebagai fungsi waktu
 - b. Tentukan posisi burung pada $t=2$ sekon
7. Sebuah mobil mainan bergerak pada sebuah lapangan yang terletak pada bidang xy . Posisi awal adalah koordinat $(3\text{m}, 0\text{m})$. Komponen-komponen kecepatan mobil dapat dinyatakan oleh fungsi:
 $v_x = (2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}})t$ dan $v_y = (2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})t + (4 \frac{\text{m}}{\text{s}^3})t^2$, dengan t dalam sekon dan v_x dan v_y dalam meter/sekon.
- a. Tentukan percepatan rata-rata antara $t=0$ dan $t=2$ sekon
 - b. Tentukan arah percepatan rata-rata.
8. Sebuah roket mainan pada bidang xy . Percepatan roket memiliki komponen $a_x = (3t^2) \text{ m/s}^2$ dan $a_y = (10 - 4t) \text{ m/s}^2$, dengan t dalam sekon. Pada saat $t=0$ roket berada di pusat koordinat $(0,0)$ dengan komponen kecepatan awal $v_{ox} = 3 \text{ m/s}$ dan $v_{oy} = 4 \text{ m/s}$, sehingga secara vektor dituliskan $v_o = (3\hat{i} + 4\hat{j}) \text{ m/s}$.
- a. Nyatakan vektor kecepatan dan posisi sebagai fungsi waktu
 - b. Berapa ketinggian maksimum yang dicapai roket
 - c. Tentukanlah perpindahan horizontal roket ketika roket kembali ke $y=0$.
9. Persamaan gerak suatu partikel dinyatakan oleh fungsi $x = \frac{1}{10} t^3$, dengan x dalam meter dan t dalam sekon.
- a. Hitunglah kecepatan rata-rata dalam selang waktu $t=3 \text{ s}$ hingga $t=4 \text{ s}$.
 - b. Hitunglah kecepatan sesaat pada $t=5 \text{ s}$.
 - c. Hitunglah percepatan rata-rata dalam selang waktu $t=3 \text{ s}$ hingga $t=4 \text{ s}$.
 - d. Hitunglah percepatan sesaat pada $t=5 \text{ s}$.
10. Sebuah benda bergerak dengan percepatan yang bergantung pada waktu sebagai $a = -4\sqrt{t} \text{ m/s}^2$. Kecepatan pada saat $t=0$ sekon adalah 9 m/s . Berapa jauhkah perpindahan yang ditempuh benda sebelum berhenti.

7. Gerak Lurus Beraturan (GLB)

Gerak lurus beraturan adalah gerak benda pada lintasan lurus dengan kecepatan tetap. Artinya kecepatan tetap adalah sebuah benda yang bergerak lurus beraturan dalam menempuh jarak yang sama untuk selang

waktu yang sama pula²⁶. Misalnya, jika dua sekon pertama menempuh jarak 10 meter, maka dua sekon berikutnya akan menempuh jarak 10 meter.

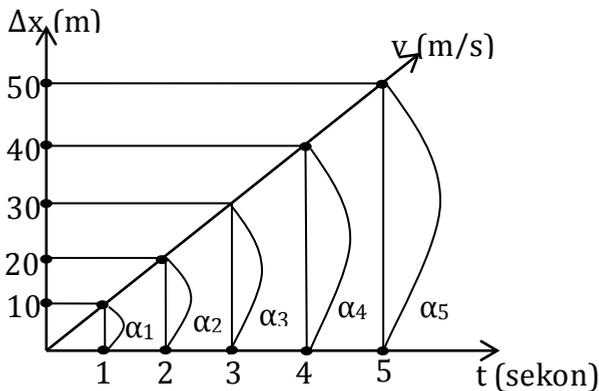
Percepatan sebuah benda yang bergerak lurus beraturan adalah nol, karena kecepatan tetap maka perubahan kecepatan nol ($\Delta v = 0$).

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = 0$$

(3.26)

Grafik gerak lurus beraturan, hubungan antara perpindahan (Δx) dengan waktu (t) adalah:

Waktu (s)	0	1	2	3	4	5
Posisi (m)	0	10	20	30	40	50



Setelah mencari grafik hubungan antara perpindahan (Δx) terhadap waktu (t) seperti gambar di atas. Maka selanjutnya mencari kecepatan pada GLB adalah dengan menggunakan persamaan trigonometri, besar kemiringan grafik ternyata merupakan kecepatan gerak benda. Besar kecepatannya ditentukan dengan persamaan:

$$\tan \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{y}{x} = \frac{\Delta x}{t} = v$$

atau

$$v = \tan \alpha$$

$$v = \frac{\Delta x_1}{\Delta t_1} = \frac{\Delta x_2}{\Delta t_2} = \dots = \frac{\Delta x_t}{\Delta t}$$

$$v = \frac{x_1 - x_0}{t_1 - t_0} = \frac{x_2 - x_0}{t_2 - t_0} = \dots = \frac{x_t - x_0}{t}$$

²⁶ Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

$$v = \frac{x_t - x_0}{t} \quad (3.27)$$

$$x_t = x_0 + v \cdot t \quad (3.28)$$

Arah kecepatan merupakan garis singgung kurva $x-t$ berupa garis lurus, sehingga arah kecepatan sama dengan arah garis atau arah kurva tersebut.

Aplikasi dari Gerak Lurus Beraturan (GLB) dalam kehidupan sehari-hari agak sulit ditemukan, karena biasanya kecepatan gerak benda selalu berubah-ubah. Misalnya ketika kamu mengendarai sepeda motor atau mobil, laju mobilmu pasti selalu berubah-ubah. Ketika ada kendaraan di depanmu, pasti kecepatan kendaraanmu dikurangi. Ada beberapa pendekatan tentang aplikasi GLB dalam kehidupan sehari-hari.

- a. Kendaraan yang melewati jalan tol. Walaupun terdapat tikungan pada jalan tol, kendaraan beroda bisa melakukan GLB pada jalan tol. Pada jarak tertentu, lintasan jalan tol lurus. Kendaraan yang bergerak pada jalan tol juga kadang mempunyai kecepatan yang tetap. Tetapi ini hanya berlangsung sementara alias beberapa menit saja.
- b. Gerakan kereta api atau kereta listrik di atas rel. Lintasan rel kereta kadang lurus, walaupun jaraknya hanya beberapa kilometer. Kereta api melakukan GLB ketika bergerak di atas lintasan rel yang lurus tersebut dengan laju tetap.
- c. Kapal laut yang menyeberangi lautan atau samudera. Kamu pernah menumpang kapal laut? ketika melewati laut lepas, kapal laut biasanya bergerak pada lintasan yang lurus dengan kecepatan tetap. Ketika hendak tiba di pelabuhan tujuan, biasanya kapal baru merubah haluan dan mengurangi lajunya.

Contoh Soal 3.7:

1. Doni dan Dono akan menghadiri pesta pernikahan temannya di gedung A (posisi ditengah). Doni berangkat dari rumah pukul 08.00 WIB naik sepeda motor dengan laju 15 m/s. Dono berangkat dari rumah mengendarai mobil dengan laju 25 m/s. Dono berangkat 20 sekon setelah Doni berangkat. Jika jarak antara rumah Doni dan rumah Dono 4300 meter. Pukul berapakah keduanya sampai dipesta pernikahan.

Jawab:

Diketahui: $v_{\text{Doni}} = 15 \text{ m/s}$, $v_{\text{Dono}} = 25 \text{ m/s}$, $t_{\text{Doni}} = t_{\text{Dono}} + 20$

Ditanyakan= t ?

Jawab:

- Jarak yang ditempuh Doni:

$$x_{\text{Doni}} = v_{\text{Doni}} \cdot t_{\text{Doni}} = 15 (t_{\text{Dono}} + 20)$$

- Jarak yang ditempuh Dono:

$$x_{\text{Dono}} = v_{\text{Dono}} \cdot t_{\text{Dono}} = 25 \cdot t_{\text{Dono}}$$

- Jarak Rumah : $x = x_{\text{Doni}} + x_{\text{Dono}}$

Jika $x_{\text{Doni}} = x_{\text{Dono}}$ (syarat bertemu)

$$x_{\text{Doni}} + v_{\text{Doni}} \cdot t_{\text{Doni}} = x_{\text{Dono}} + v_{\text{Dono}} \cdot t_{\text{Dono}}$$

$$0 + 15 (t_{\text{Dono}} + 20) = 4300 - 25 t_{\text{Dono}}$$

$$15 t_{\text{Dono}} + 300 = 4300 - 25 t_{\text{Dono}}$$

$$15 t_{\text{Dono}} + 25 t_{\text{Dono}} = 4300 - 300$$

$$40 t_{\text{Dono}} = 4000$$

$$t_{\text{Dono}} = 100 \text{ sekon}$$

$$t_{\text{Doni}} = t_{\text{Dono}} + 20 = 100 + 20 = 120 \text{ sekon}$$

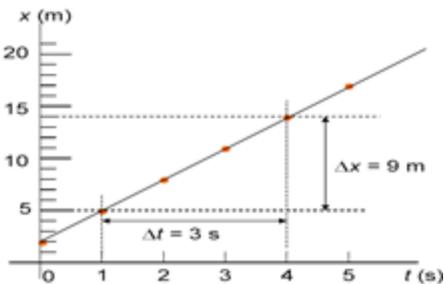
waktu perjalanan Doni 120 sekon atau 2 menit

$$08.00 + 2 \text{ menit} = 08.02$$

Mereka akan sampai pukul 08.02 WIB.

2. Perhatikan grafik di bawah ini. Tentukan kecepatan benda?

Waktu (s)	0	1	2	3	4	5
Posisi (m)	2	5	8	11	14	17



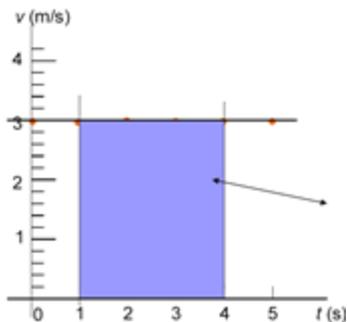
Tinjau gerak dari $t = 1 \text{ s}$ hingga $t = 4 \text{ s}$.

$$\text{Kemiringan grafik: } v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{9}{3} = 3 \text{ m/s}$$

Untuk gerak lurus beraturan kemiringan grafik posisi terhadap waktu adalah tetap.

3. Perhatikan grafik di bawah ini. Tentukan perpindahan benda?

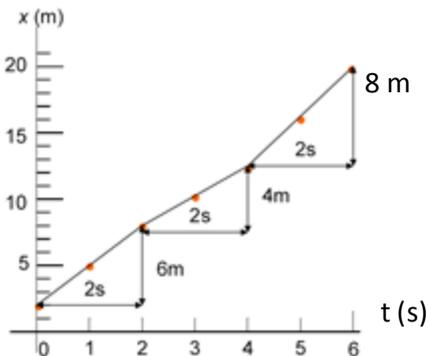
Waktu (s)	0	1	2	3	4	5
Posisi (m)	3	3	3	3	3	3



Tinjau gerak dari $t = 1$ s
 hingga $t = 4$ s.
 Perpindahan dari waktu $t = 1$ s
 hingga $t = 4$ s adalah luas
 bagian di bawah grafik v
 terhadap t .
 $\Delta x = x(4) - x(1) = 9$ meter

4. Perhatikan grafik di bawah ini. Tentukan kecepatan rata-rata benda?

Waktu (s)	0	1	2	3	4	5	6
Posisi (m)	2	5	8	10	12	16	20



Tinjau gerak dari $t = 0$ hingga $t = 2$ s.
 $v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{6}{2} = 3$ m/s
 Tinjau gerak dari $t = 2$ hingga $t = 4$ s.
 $v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{4}{2} = 2$ m/s
 Tinjau gerak dari $t = 4$ hingga $t = 6$ s.
 $v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{8}{2} = 4$ m/s

Kecepatan rata-rata dalam selang waktu $t = 0$ hingga $t = 5$ s adalah:

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x(5) - x(0)}{5} = \frac{(16) \text{ m} - (2) \text{ m}}{5}$$

$$\bar{v} = 2,8 \text{ m/s}$$

8. Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB)

Gerak lurus berubah beraturan (GLBB) adalah gerak benda pada lintasan garis lurus dengan jarak yang ditempuh setiap satuan waktu tidak sama besar sedangkan arah gerak tetap, dengan percepatan tetap. Jika $a = \text{konstan}$, artinya kecepatan benda tidak tetap lagi, tapi berubah secara beraturan²⁷. Ada dua jenis Gerak lurus berubah beraturan (GLBB) yaitu gerak lurus dipercepat jika kecepataannya bertambah terhadap waktu (percepatan a bertanda positif) dan gerak lurus diperlambat jika kecepataannya berkurang terhadap waktu (perlambatan a bertanda negatif).

Dari persamaan (3.25) diperoleh:

$$a = \frac{dv}{dt} = \text{konstan}$$

$$dv = a dt$$

$$\int_{v_0}^v dv = \int_{t_0}^t a dt$$

$$v - v_0 = a (t - t_0)$$

Untuk $t_0 = 0$, maka persamaan:

$$v = v_0 + a \cdot t$$

$$(3.29)$$

Maka posisi partikel/benda diperoleh sbb:

$$v = \frac{dx}{dt} = v_0 + a \cdot t$$

$$dx = v dt$$

$$\int_{x_0}^x dx = \int_{t_0}^t (v_0 + a \cdot t) dt$$

$$x - x_0 = \left[v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a t^2 \right]_{t_0}^t$$

$$x - x_0 = \left[v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2 - \frac{1}{2} a \cdot t_0^2 - v_0 \cdot t_0 \right]$$

Untuk $t_0 = 0$, maka persamaan:

$$\Delta x = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (3.30)$$

Dari persamaan (3.29) dan (3.30) diperoleh hubungan:

$$v = v_0 + a \cdot t$$

$$t = \frac{v - v_0}{a}$$

$$\Delta x = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a t^2$$

²⁷ Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

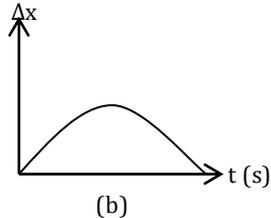
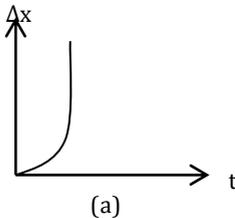
Masukkan nilai t

$$\Delta x = v_0 \cdot \left(\frac{v-v_0}{a}\right) + \frac{1}{2} a \left(\frac{v-v_0}{a}\right)^2$$

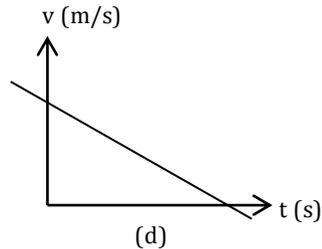
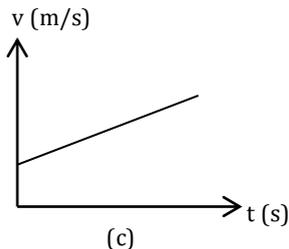
$$\Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

$$v^2 = v_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta x \quad (3.31)$$

Kedudukan Δx adalah fungsi kuadrat dalam t . Menurut matematika $\Delta x - t$ adalah berbentuk parabola. Pada gambar (a) percepatan positif ($a > 0$) yaitu kecepatan makin lama makin besar, grafik ini berbentuk parabola terbuka ke atas. Pada gambar (b) percepatan negatif ($a < 0$) atau perlambatan yaitu kecepatan makin lama makin kecil, grafik ini berbentuk parabola terbuka ke bawah.



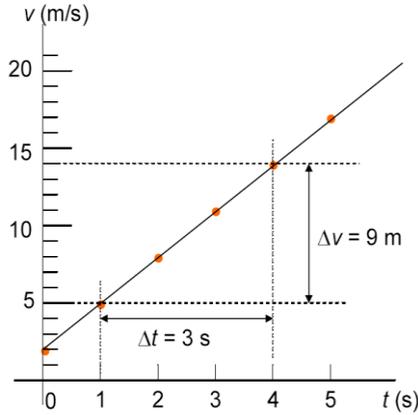
Pada gambar (c) percepatannya positif yang tetap, artinya percepatan yang searah dengan kecepatannya, sehingga menyebabkan kecepatan makin lama makin bertambah. Pada gambar (d) percepatannya negatif, artinya percepatan yang berlawanan arah dengan kecepatannya, sehingga menyebabkan kecepatan makin lama makin berkurang dan suatu saat kecepatannya menjadi nol (benda berhenti).



Contoh Soal 3.8:

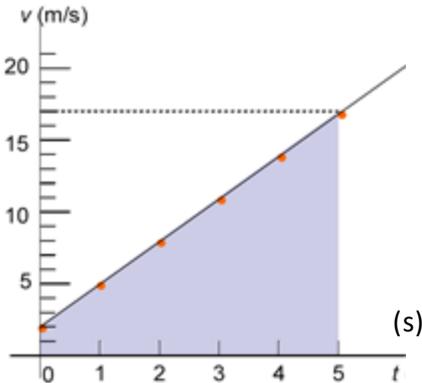
1. Perhatikan grafik di bawah ini. Tentukan percepatan benda?

Waktu (s)	0	1	2	3	4	5
Posisi (m)	2	5	8	11	14	17



2. Perhatikan grafik di bawah ini. Tentukan jarak yang ditempuh benda?

Waktu (s)	0	1	2	3	4	5
Posisi (m)	2	5	8	11	14	17



Tinjau gerak dari $t = 0$ hingga $t = 5$ s.

Jarak yang ditempuh adalah luas bagian di bawah grafik kecepatan v terhadap waktu t .

$$\Delta x = \frac{1}{2} (2 + 17) \frac{m}{s} (5) s = 47,5 \text{ m}$$

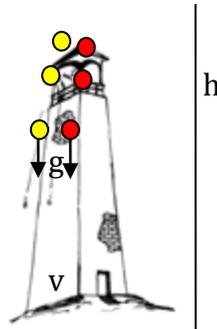
9. Gerak Vertikal

Gerak vertikal adalah gerak suatu benda pada arah vertikal pada arah vertikal terhadap bumi, yang selama geraknya benda dipengaruhi oleh gaya gravitasi bumi. Gerak vertikal termasuk gerak lurus berubah beraturan (GLBB).

a. Gerak jatuh bebas (GJB)

Gerak jatuh bebas adalah gerak vertikal suatu benda yang dijatuhkan dari suatu ketinggian tertentu tanpa kecepatan awal ($v_0=0$). Berdasarkan pendapat Aristoteles menyatakan bahwa pada gerak ke bawah, sebuah benda yang memiliki berat lebih besar akan dipercepat sebanding dengan beratnya, misalnya menjatuhkan selembar kertas dengan sebuah batu dalam waktu yang bersamaan, diperoleh bahwa batu akan lebih cepat sampai ke bumi dibandingkan dengan kertas. Teori Aristoteles hanya mampu bertahan beberapa abad saja.

Teori Aristoteles dibantah oleh Galileo Galilei menyatakan bahwa setiap benda yang dijatuhkan ke bawah (efek dari udara dapat diabaikan) akan mengalami percepatan yang sama besar, sehingga jika dua benda berbeda dijatuhkan bersamaan, keduanya akan sampai di bumi dalam waktu yang bersamaan. Perhatikan gambar berikut:



Pada gerak vertikal ke bawah berlaku persamaan (3.29) dan (3.30) yaitu: $v = v_0 + a \cdot t$ dan $\Delta x = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a t^2$, jika kecepatan awal sama dengan nol ($v_0=0$), percepatan a sama dengan percepatan gravitasi bumi g , dan perpindahan Δx sama dengan ketinggian h , maka diperoleh kecepatan benda sampai bumi adalah:

$$v = g \cdot t \quad (3.32)$$

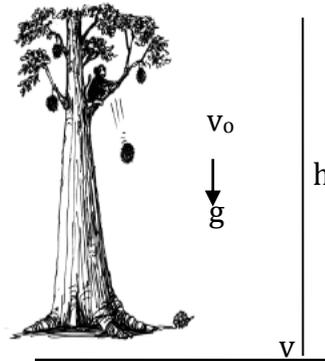
Jarak benda dari titik awal pertama kali di jatuhkan sampai di bumi disebut dengan ketinggian h yang besarnya:

$$h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (3.33)$$

b. Gerak vertikal ke bawah (GVB)

Gerak vertikal ke bawah adalah gerak vertikal suatu benda yang dijatuhkan dari suatu ketinggian tertentu dengan kecepatan awal v_0 dan

percepatan gravitasi bumi g . Untuk gerak vertikal ke bawah g positif. Perhatikan gambar berikut:



Pada gerak vertikal ke bawah berlaku persamaan (3.29) dan (3.30) yaitu: $v = v_0 + a \cdot t$ dan $\Delta x = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a t^2$, jika kecepatan awal sama dengan v_0 , percepatan a sama dengan percepatan gravitasi bumi g , dan perpindahan Δx sama dengan ketinggian h , maka diperoleh kecepatan benda sampai bumi adalah:

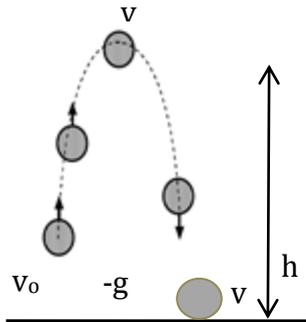
$$v = v_0 + g \cdot t \quad (3.34)$$

Jarak benda dari titik awal pertama kali di jatuhkan sampai di bumi disebut dengan ketinggian h yang besarnya:

$$h = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (3.35)$$

c. Gerak vertikal ke atas (GVA)

Gerak vertikal ke atas adalah gerak vertikal suatu benda yang dilemparkan ke atas dengan kecepatan awal v_0 dan percepatan gravitasi bumi g . Untuk gerak vertikal ke atas g negatif (benda menjauhi bumi). Perhatikan gambar berikut:



Pada gerak vertikal ke atas berlaku persamaan (3.29) dan (3.30) yaitu: $v = v_0 + a \cdot t$ dan $\Delta x = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a t^2$, jika kecepatan awal sama dengan v_0 , percepatan a sama dengan percepatan gravitasi bumi g ($a = -g$), dan perpindahan Δx sama dengan ketinggian h , maka diperoleh kecepatan benda sampai bumi adalah:

$$v = v_0 - g \cdot t \quad (3.36)$$

Jarak benda dari titik awal pertama kali di jatuhkan sampai di bumi disebut dengan ketinggian h yang besarnya:

$$h = v_0 \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (3.37)$$

Dari persamaan (3.36) dan (3.37), diperoleh persamaan:

$$v^2 = v_0^2 - 2 \cdot g \cdot h \quad (3.38)$$

Perpindahan bola dari bawah ke atas di sebut ketinggian maksimum (h_{\max}) dengan persamaan (3.38), jika bola sampai di atas (maksimum) bola akan diam sejenak maka $v=0$, lalu turun kembali keposisi awal. Maka persamaan ketinggian maksimum:

$$h_{\max} = \frac{v_0^2}{2g} \quad (3.39)$$

Latihan Soal 3.2:

Soal Tentang GLB, GLBB, GJB, GVB, dan GVA

- Mobil A dan B yang terpisah sejauh 5 km bergerak berlawanan arah saling mendekat. Mobil A bergerak dengan kecepatan 80 km/jam, sedangkan mobil B bergerak dengan kecepatan 70 km/jam. Kapan dan di mana kedua mobil berpasasan.
- Tejo dan Surti terpisah sejauh 120 meter satu sama lain. Tejo dan Surti masing-masing bergerak dengan kecepatan 8m/s dan 4 m/s. Kapan dan di mana mereka berpelukan jika Tejo dan Surti bergerak:
 - Saling berhadapan dan berangkat bersamaan
 - Searah dan berangkat bersamaan
 - Saling berhadapan, tetapi Surti berangkat 12 detik lebih awal dari Tejo.
 - searah, tetapi Tejo berangkat 8 detik lebih awal dari Surti.
- Sebuah mobil sedang bergerak di jalan lurus dengan kecepatan 86,4 km/jam. Pengemudi melihat rintangan di depannya, dan ia memerlukan waktu 0,5 detik untuk bereaksi menginjak rem. Jika

perlambatan yang dihasilkan akibat pengereman 6 m/s. hitunglah jarak henti minimum yang diperlukan mulai saat pengemudi melihat rintangan.

4. Sebuah batu dijatuhkan ke dalam sumur dengan kecepatan awal 6 m/s. Setelah 3 sekon bunyi batu tersebut mengenai air. Berapakah:
 - a. Kecepatan batu mengenai permukaan air sumur
 - b. Kedalaman sumur
5. Bola volly dipukul ke atas sehingga naik, kemudian turun kembali ketangan selama 4 sekon. Tentukan:
 - a. Kecepatan bola volly mula-mula saat naik (lepas dari tangan)
 - b. Tinggi maksimum bola volly.
6. Anak panah putih dilepaskan dari busurnya dengan kecepatan 20 m/s. satu sekon kemudian, anak panah merah dilepaskan dari busurnya vertikal ke atas dengan kecepatan 15 m/s. Tentukan kapan dan di mana kedua anak panah bertemu.

Latihan Soal 3.3:

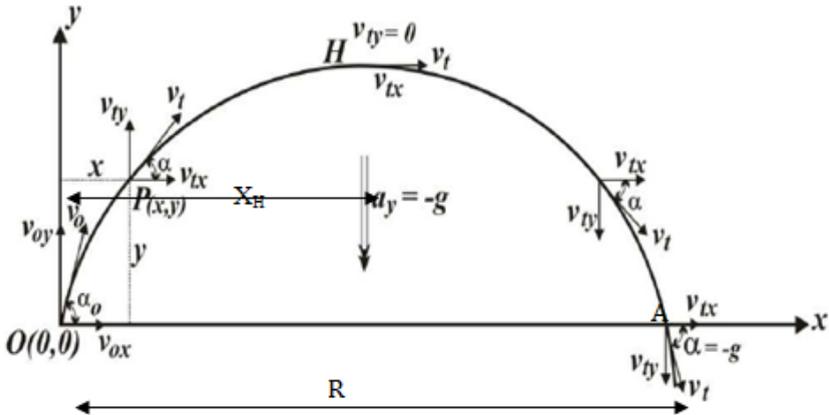
1. Anda sedang diam dipinggir jalan sementara teman Anda sedang berada di dalam mobil yang dipercepat. Anda dan teman anda sama-sama menyaksikan orang yang melempar batu dari atap rumah. Apakah kecepatan, percepatan, dan posisi batu pada suatu waktu tertentu adalah sama untuk Anda dan teman Anda? Untuk kasus ini, dapatkah teman Anda (yang naik mobil) menggunakan perhitungan GLB dan GLBB biasa? Jelaskan jawaban Anda.
2. Anda berlari mengitari lapangan segi empat dengan panjang 100 m dan lebar 50 meter hingga sampai ke tempat semula. Berapa panjang lintasan yang anda tempuh? Berapa perpindahan yang Anda lakukan? Jika Anda menempuh satu keliling lapangan tersebut dalam waktu 20 menit, berapa kelajuan dan kecepatan rata-rata Anda? Apakah sama?
3. Anda sedang mengendarai motor dengan kecepatan 72 km/jam. Tiba-tiba Anda mengerem motor Anda. Jika perlambatan maksimum motor Anda adalah 10 m/s dapatkah Anda berhenti sebelum 5 sekon? Masih untuk kasus yang sama, berapa jarak yang Anda tempuh mulai dari pengereman hingga berhenti?
4. Anda mengitari jalan lurus ke utara kemudian berbelok $\frac{1}{4}$ lingkaran ke barat dengan kelajuan tetap, apakah kecepatan Anda berubah? Untuk kasus ini, apakah Anda mengalami percepatan?
5. Seseorang mengendarai kano dapat melaju dengan kecepatan tetap 10 km/jam dalam air yang tenang. Ketika dia melawan arus air yang

memiliki kecepatan 8 km/jam, berapakah kecepatannya? Berapakah kecepatannya jika arus airnya searah dengan arah geraknya?

10. Gerak Parabola

a. Persamaan kedudukan dan kecepatan pada sumbu X dan Y

Gerak parabola dapat dianalisis dengan meninjau gerak lurus beraturan (GLB) pada sumbu x dan gerak lurus berubah beraturan (GLBB) pada sumbu y secara terpisah²⁸.



Kecepatan awal v_0 dan sudut α_0 terhadap sumbu x positif. Dalam besaran-besaran ini, komponen kecepatan awal v_{0x} dan v_{0y} dapat diperoleh dari perbandingan trigonometri.

$$\cos \alpha_0 = \frac{v_{0x}}{v_0} \quad \text{atau} \quad v_{0x} = v_0 \cos \alpha \quad (3.40)$$

$$\sin \alpha_0 = \frac{v_{0y}}{v_0} \quad \text{atau} \quad v_{0y} = v_0 \sin \alpha \quad (3.41)$$

Pada sumbu x berlaku persamaan gerak lurus beraturan:

$$v_t = v_0 = \text{tetap} \quad \text{dan} \quad x = v_0 \cdot t$$

Jika pada sumbu x kecepatan awal adalah v_{0x} , kecepatan pada saat t adalah v_{tx} , dan perpindahan adalah x. Maka persamaan menjadi:

$$v_{tx} = v_{0x} \quad (3.42)$$

$$x = v_{0x} \cdot t \quad (3.43)$$

²⁸ Mark W. Zemansky. 1994. *Fisika untuk Universitas (Mekanika, Panas, Bunyi)*. Jakarta: Bina Cipta.

Pada sumbu y berlaku persamaan umum gerak lurus berubah beraturan (GLBB) pada persamaan (3.29) dan persamaan (3.30), diperoleh:

$$v_t = v_o + a \cdot t \quad \text{dan} \quad x = v_o \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2 \quad (3.44)$$

Jika pada sumbu y kecepatan awal adalah v_{oy} , kecepatan pada saat t adalah v_{ty} , percepatan $a = -g$ (berarah ke bawah) dan perpindahan adalah x. Maka persamaan menjadi:

$$v_{ty} = v_{oy} - g \cdot t \quad (3.45)$$

$$y = v_{oy} \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \quad (3.46)$$

a. Titik tertinggi dan titik terendah

Pada titik tertinggi (H), kecepatan pada sumbu y sama dengan nol, sehingga kecepatan pada titik tertinggi sama dengan kecepatan pada sumbu x. Jadi titik tertinggi berlaku syarat:

$$v_{ty} = 0 \quad (3.47)$$

$$v_t = v_{tx} = v_{ox} \quad (3.48)$$

b. Koordinat titik tertinggi H (x_H , y_H)

Dengan menggunakan syarat titik tertinggi pada persamaan (3.47) dan menggabungkan dengan persamaan-persamaan umum gerak parabola.

1. Gabungkan persamaan (3.47) dengan persamaan (3.45) diperoleh:

$$v_{ty} = 0$$

$$v_{oy} - g \cdot t = 0$$

$$v_{oy} = g \cdot t$$

$$t = \frac{v_{oy}}{g} = \frac{v_o \sin \alpha_o}{g}$$

Jadi waktu yang dibutuhkan sampai pada titik H adalah:

$$t_H = \frac{v_{oy}}{g} = \frac{v_o \sin \alpha_o}{g} \quad (3.49)$$

2. Gunakan persamaan (3.43) untuk menentukan koordinat x_H , diperoleh:

$$x = v_{ox} \cdot t$$

$$x = (v_o \cos \alpha) \left(\frac{v_o \sin \alpha_o}{g} \right)$$

$$\left[x = \frac{v_o^2 (\sin \alpha_o \cdot \cos \alpha_o)}{g} \right] \text{ semua dikali 2}$$

$$\begin{aligned}
2x &= \frac{2v_0^2(\sin\alpha_0 \cdot \cos\alpha_0)}{g} \\
x &= \frac{v_0^2(2\sin\alpha_0 \cdot \cos\alpha_0)}{2g} \\
x &= \frac{v_0^2(\sin 2\alpha_0)}{2g} \\
\text{atau} \\
x_H &= \frac{v_0^2(\sin 2\alpha_0)}{2g} \tag{3.50}
\end{aligned}$$

3. Gunakan persamaan (3.46) untuk menghitung koordinat y_H , diperoleh:

$$\begin{aligned}
y &= v_{0y} \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \\
y &= v_0 \sin \alpha \cdot \left(\frac{v_0 \sin \alpha_0}{g}\right) - \frac{1}{2} g \cdot \left(\frac{v_0 \sin \alpha_0}{g}\right)^2 \\
y &= \left(\frac{v_0^2 \sin^2 \alpha_0}{g}\right) - \frac{1}{2} g \cdot \left(\frac{v_0^2 \sin^2 \alpha_0}{g^2}\right) \\
y &= \left(\frac{v_0^2 \sin^2 \alpha_0}{g}\right) - \left(\frac{v_0^2 \sin^2 \alpha_0}{2g}\right), \text{ samakan penyebut} \\
y &= \left(\frac{2v_0^2 \sin^2 \alpha_0}{2g}\right) - \left(\frac{v_0^2 \sin^2 \alpha_0}{2g}\right) \\
y &= \left(\frac{v_0^2 \sin^2 \alpha_0}{2g}\right) \\
\text{atau} \\
y_H &= \left(\frac{v_0^2 \sin^2 \alpha_0}{2g}\right) \tag{3.51}
\end{aligned}$$

Koordinat titik tertinggi H adalah (x_H, y_H) yaitu:

$$\left[\frac{v_0^2(\sin 2\alpha_0)}{2g}, \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha_0}{2g} \right]$$

c. Jarak Terjauh (R)

Dengan adanya pengaruh gaya gravitasi bumi yang menarik benda ke bawah, maka benda yang sedang bergerak ke atas dengan lintasan parabola akhirnya akan tiba kembali pada sumbu horizontal x. Jika titik awal pelemparan adalah O dan titik tempat benda tiba di tanah adalah A (lihat gambar), maka jarak terjauh adalah OA (diberi simbol R). Syarat jarak terjauh R adalah:

$$y_A = 0 \tag{3.52}$$

dengan menggabungkan persamaan (3.52) dan persamaan (3.46), diperoleh waktunya:

$$y_A = 0$$

$$v_{0y} \cdot t - \frac{1}{2}g \cdot t^2 = 0$$

$$t [v_{0y} - \frac{1}{2}g \cdot t] = 0$$

$$v_{0y} - \frac{1}{2}g \cdot t = 0$$

$$v_{0y} = \frac{1}{2}g \cdot t$$

$$t = \frac{2 v_{0y}}{g} = \frac{2 v_0 \sin \alpha_0}{g}$$

atau

$$t_A = \frac{2 v_{0y}}{g} = \frac{2 v_0 \sin \alpha_0}{g} \quad (3.53)$$

dengan selang waktu t_A = selang waktu mencapai jarak terjauh, sehingga diperoleh:

$$t_A = 2 t_H \quad (3.54)$$

Jarak terjauh R adalah koordinat x_A , yang menurut persamaan (3.43) adalah:

$$R = x_A$$

$$R = v_{0x} \cdot t_A$$

$$R = (v_0 \cos \alpha) \cdot \left(\frac{2 v_0 \sin \alpha_0}{g} \right), \text{ semua dikalikan dengan 2}$$

$$2R = \frac{v_0^2 (4 \sin \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0)}{g}$$

$$R = \frac{v_0^2 (4 \sin \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0)}{2g}$$

$$R = \frac{v_0^2 (\sin \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0)}{g}$$

$$R = \frac{v_0^2 (\sin 2 \alpha_0)}{g} \quad (3.55)$$

Jarak terjauh R dihubungkan dengan koordinat x_H titik tertinggi:

$$R = 2 \left(\frac{v_0^2 (\sin 2 \alpha_0)}{2g} \right)$$

$$R = 2 \cdot x_H$$

Jarak terjauh R bergantung pada nilai $\sin 2\alpha_0$. Supaya R maksimum maka $\sin 2\alpha_0$ harus mencapai maksimum. Seperti kita ketahui, nilai maksimum fungsi sinus sama dengan satu. Jadi supaya R maksimum, maka:

$$\sin 2\alpha_0 = 1$$

$$\sin 2\alpha_0 = \sin 90^\circ$$

$$2\alpha_0 = 90^\circ$$

$$\alpha_0 = 45^\circ$$

Nilai R maksimum di dapat dengan memasukkan $\alpha_o = 45^0$ ke dalam persamaan:

$$\begin{aligned} R_{\max} &= \frac{v_o^2(\sin 2 \alpha_o)}{g} \\ R_{\max} &= \frac{v_o^2(\sin 2 (45^0))}{g}, \quad \sin 90^0 = 1 \\ R_{\max} &= \frac{v_o^2}{g} \end{aligned} \quad (3.56)$$

Contoh Soal 3.3:

Soal Tentang Gerak Parabola

1. Benarkah jika dikatakan bahwa pada ketinggian maksimum dari gerak parabola, kecepatan benda adalah nol? Jika ya, jelaskan, dan jika tidak, berilah satu contoh yang menyangkalnya.

Jawab:

Gerak parabola terbagi dalam dua jenis gerak, yaitu gerak lurus beraturan pada sumbu horizontal (x) dan gerak lurus berubah beraturan pada sumbu vertikal (y). Sewaktu benda bergerak naik, maka kecepatan (besar dan arah) pada sumbu x tetap, tetapi besar kecepatan (kelajuan) pada sumbu y berkurang beraturan dengan percepatan sama dengan percepatan gravitasi (g). Sehingga pada titik tertinggi, kecepatan pada sumbu y sama dengan nol dan kecepatan pada titik tertinggi sama dengan kecepatan pada sumbu x.

2. Sebutir peluru ditembakkan dengan kelajuan awal v_o pada sudut tertentu terhadap horisontal. (Abaikan gesekan udara).
 - a. Apakah komponen gerak pada arah vertikal merupakan gerak jatuh bebas?
 - b. Berapa besar komponen percepatan arah sumbu horisontal dan sumbu vertikal?

Jawab:

- a. Bukan, ketika peluru bergerak menuju titik tertinggi. Merupakan gerak jatuh bebas ketika peluru dari titik tertinggi menuju tanah.
 - b. Komponen horizontal percepatan $a_x = 0$, karena pada sumbu-X yang terjadi adalah GLB. Sedangkan $a_y = -g$, karena pada sumbu-Y terjadi GLBB, sehingga dipengaruhi gravitasi Bumi.
3. Sebuah pesawat yang terbang mendatar dengan kecepatan 40 m/s pada ketinggian 100 m di atas tanah. Dimanakah paket menyentuh tanah relatif terhadap titik mulai dijatuhkan? (Percepatan gravitasi 10 m/s^2).

Jawab:

$$y = v_{0y} \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

$$-100 = 0 - \frac{1}{2} (10) t^2$$

$$t^2 = \frac{100}{5} = 20$$

$$t = \sqrt{20} \text{ sekon}$$

Kemudian substitusikan waktu yang didapat ke rumus jarak:

$$x = v_{0x} \cdot t = (40) (\sqrt{20})$$

$$x = 80 \sqrt{5} \text{ meter}$$

4. Sebuah pohon mangga yang sedang berbuah berada pada jarak 10 meter dari seorang anak. Anak tersebut sedang mengincar sebuah mangga yang menggantung pada ketinggian 8 meter. Jika anak tersebut mengarahkan batu pada sudut 45^0 terhadap horizontal. Berapakah kecepatan lemparan supaya batu mengenai sasaran ($g=9,8 \text{ m/s}^2$).

Jawab:

- Pertama hitung komponen kecepatan awal pada arah sumbu x dan sumbu y:

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha = v_0 \cos 45^0 = \frac{1}{2} \sqrt{2} v_0$$

$$v_{0y} = v_0 \sin \alpha = v_0 \sin 45^0 = \frac{1}{2} \sqrt{2} v_0$$

- Kedua gunakan persamaan jarak horisontal untuk mencari waktu:

$$x = v_{0x} \cdot t$$

$$10 = \frac{1}{2} \sqrt{2} v_0 (t)$$

$$t = \frac{20}{\sqrt{2} v_0}$$

- Ketiga gunakan persamaan jarak vertikal untuk mencari v_0 :

$$y = \left(\frac{1}{2} \sqrt{2} v_0\right) \cdot \left(\frac{20}{\sqrt{2} v_0}\right) - \frac{1}{2} (10) \left(\frac{20}{\sqrt{2} v_0}\right)^2$$

$$8 = (10) - 5 \left(\frac{400}{2 v_0^2}\right)$$

$$-2 = -5 \left(\frac{200}{v_0^2}\right)$$

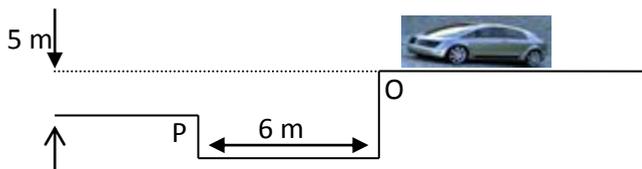
$$v_0^2 = \frac{1000}{2} = 500$$

$$v_0 = \sqrt{500} = 10 \sqrt{5} \text{ m/s}$$

Latihan Soal 3.4

Soal Tentang Gerak Parabola

1. Pada gerak parabola, di titik manakah kelajuan benda paling kecil dan paling besar?
2. Sebuah peluru ditembakkan pada sudut 30° terhadap horizontal dengan kelajuan awal tertentu. Jika peluru kedua ditembakkan dengan kelajuan awal yang sama, berapa sudut elevasi peluru kedua sehingga menghasilkan jarak tembakan yang sama? Abaikan gesekan udara!
3. Seorang anak melempar batu dengan kecepatan 10 m/s pada arah yang membentuk sudut 37° terhadap tanah ($\sin 37^\circ = 0,6$). Tentukan kecepatan dan kedudukan batu setelah $0,5$ sekon ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$).
4. Sebuah bola golf dipukul dengan kecepatan $6,5 \text{ m/s}$ berbentuk α terhadap horizontal ($\sin \alpha = 12/13$), dan percepatan gravitasi bumi $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.
 - a. Berapa lama waktu bola golf sampai di tanah lagi
 - b. Berapa ketinggian maksimum yang dicapai bola golf
 - c. Berapakah jarak terjauh yang dicapai bola golf
5. Sebuah peluru ditembakkan di bumi dengan kelajuan tertentu. Peluru lain ditembakkan di bulan dengan kelajuan awal yang sama. Abaikan gesekan udara.
 - a. Peluru mana yang jarak terjauhnya lebih besar?
 - b. Peluru mana yang ketinggian maksimumnya lebih besar?
6. Sebuah mobil hendak menyeberangi sebuah parit yang lebarnya 6 meter. Perbedaan tinggi antara ke dua sisi parit adalah 5 meter (lihat Gambar). Berapa kelajuan minimum mobil tersebut agar penyeberangan mobil itu dapat berlangsung.



7. Sebuah peluru ditembakkan dengan kecepatan 100 m/s dengan sudut elevasi 37° ($\sin 37^\circ = 0,6$). Tentukan:
 - a. Kecepatan awal horizontal dan vertikal
 - b. Waktu yang diperlukan untuk mencapai titik tertinggi dan kecepatan peluru di titik tersebut

- c. Kedudukan titik tertinggi H atau koordinat titik tertinggi (x_H, y_H)
- d. Lama peluru di udara
- e. Jarak terjauh yang dicapai peluru (R)
- f. Jarak terjauh maksimum (R_{max})

11. Gerak Melingkar

a. Perpindahan sudut

Perpindahan sudut (θ) biasanya dinyatakan dalam radian, derajat, atau putaran. Perhatikan gambar berikut:



Satu radian adalah sudut datar pada pusat lingkaran di antara dua buah jari-jari yang mencakup busur sepanjang jari-jari pada keliling lingkaran. Jadi sudut θ dalam radian dinyatakan panjang busur x yang ia cakup pada lingkaran dengan jari-jari R adalah:

$$\theta = \frac{x}{R} \qquad x = R \cdot \theta \qquad (3.57)$$

Karena keliling lingkaran 2π kali ($2\pi = 6,28\dots$), maka dalam satu putaran penuh 360° , terdapat 2π atau $6,28$ radian, jadi:

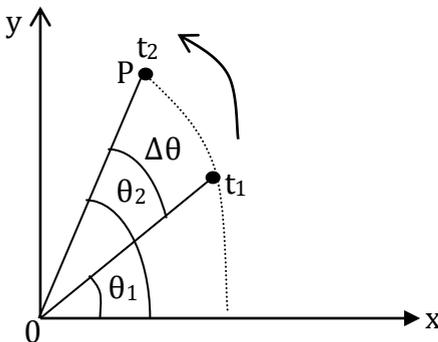
$$1 \text{ rad} = \frac{360^\circ}{2\pi} = 57,3^\circ$$

$$360^\circ = 2\pi \text{ rad} = 6,28 \text{ rad}$$

$$180^\circ = \pi \text{ rad} = 3,14 \text{ rad}$$

b. Kecepatan sudut

Pada saat titik t_1 garis patokan OP pada benda yang sedang berputar membuat sudut θ_1 dengan garis OX. Kemudian pada saat titik t_2 besar sudut bertambah menjadi θ_2 . Perhatikan gambar berikut:



Kecepatan sudut (ω) sebuah benda adalah perubahan koordinat sudut, yakni perpindahan sudut (θ) persatuan waktu t . Jika θ berubah dari θ_0 menjadi θ dalam selang waktu antara $t_1 = t_0$ hingga $t_2 = t$, maka kecepatan sudut rata-rata ($\bar{\omega}$):

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta - \theta_0}{t - t_0} \quad (3.58)$$

Kecepatan sudut sesaat ω didefinisikan sebagai harga limit yang didekati perbandingan ini bila Δt mendekati nol. Persamaan kecepatan sudut sesaat:

$$\dot{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad (3.59)$$

Dalam menentukan posisi sudut dari fungsi kecepatan sudut mirip dengan penurunan persamaan (3.24) pada gerak linier yaitu: $x = x_0 + \int_0^t v \cdot dt$. Untuk menentukan posisi sudut sesaat pada gerak melingkar dapat diturunkan dengan teknik integrasi:

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \frac{d\theta}{dt} \\ \int_{\theta_0}^{\theta} d\theta &= \int_0^t \omega(t) dt \\ \theta - \theta_0 &= \int_0^t \omega(t) dt \\ \theta &= \theta_0 + \int_0^t \omega(t) dt \end{aligned} \quad (3.60)$$

c. Percepatan sudut

Jika kecepatan sudut berubah sebesar $\Delta\omega$ dalam selang waktu Δt , dikatakan benda itu mempunyai percepatan sudut. Percepatan sudut rata-rata didefinisikan sebagai hasil bagi perubahan kecepatan sudut dengan selang waktu²⁹. Secara matematis dapat ditulis persamaan percepatan sudut rata-rata adalah:

$$\bar{a} = \frac{\Delta\dot{\theta}}{\Delta t} = \frac{\dot{\theta} - \dot{\theta}_0}{t - t_0} \quad (3.61)$$

Percepatan sudut sesaat α didefinisikan sebagai harga limit yang didekati perbandingan ini bila Δt mendekati nol. Persamaan percepatan sudut sesaat adalah:

$$\dot{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\dot{\theta}}{\Delta t} = \frac{d\dot{\theta}}{dt} \quad (3.62)$$

²⁹ Sears dan Zemansky. 2000. *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh Jilid 1* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

Satuan dari percepatan sudut adalah radian per sekon kuadrat (rad/s^2). Karena $\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$, maka percepatan sudut adalah turunan kedua dari perpindahan sudut (θ) yaitu:

$$\alpha = \frac{d}{dt} \frac{d\theta}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (3.63)$$

Dengan dalil rantai diperoleh, persamaan percepatan sudut yaitu:

$$\alpha = \frac{d\dot{\theta}}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta} \frac{d\dot{\theta}}{d\theta} \quad (3.64)$$

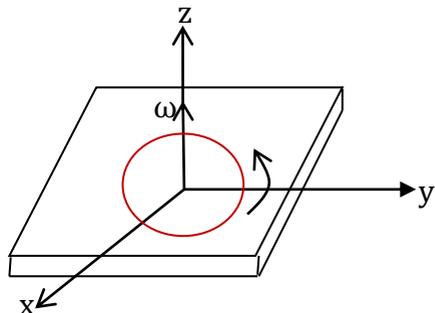
Dalam menentukan kecepatan sudut dari fungsi percepatan sudut mirip dengan penurunan persamaan (3.25) pada gerak linier yaitu: $v = v_0 + \int_0^t a \cdot dt$. Secara analogi pada gerak melingkar juga kita dapat menentukan kecepatan sudut dengan mengintegrasikan fungsi percepatan sudut, sehingga memberikan hasil:

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= \frac{d\omega}{dt} \\ \int_{\omega_0}^{\omega} d\omega &= \int_0^t \alpha(t) dt \\ \omega - \omega_0 &= \int_0^t \alpha(t) dt \\ \omega &= \omega_0 + \int_0^t \alpha(t) dt \end{aligned} \quad (3.65)$$

d. Gerak melingkar beraturan

Perhatikan sebuah meja putar (lihat gambar) yang sedang berputar dengan kecepatan sudut ω tetap atau sedang bergerak melingkar beraturan. Dari persamaan (3.59) diperoleh:

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt}$$



dengan mengintegrasikan persamaan (3.59) dengan batas awal $t=0$ hingga t , akan diperoleh θ sebagai fungsi waktu t .

$$\int_{\theta_0}^{\theta} d\theta = \int_0^t \omega(t) dt$$

$$\theta - \theta_0 = \int_0^t \omega(t) dt$$

$$\theta = \theta_0 + \omega \cdot t \quad (3.66)$$

e. Gerak melingkar berubah beraturan

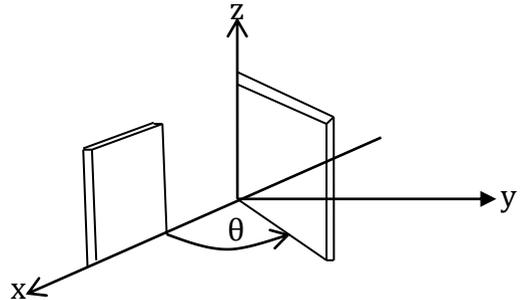
Misalkan pintu pada gambar di bawah ini berputar dengan percepatan sudut tetap semenjak di buka. Dari persamaan (3.62) diperoleh:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \text{konstan}$$

$$\int_{\omega_0}^{\omega} d\omega = \int_0^t \alpha(t) dt$$

$$\omega = \int_0^t \alpha(t) dt$$

$$\omega = \alpha \cdot t + C_1$$



Jika ω_0 merupakan kecepatan sudut awal ketika $t=0$, maka konstanta integrasi $C_1 = \omega_0$, adalah:

$$\omega = \omega_0 + \alpha \cdot t \quad (3.67)$$

karena $\omega(t) = \frac{d\theta}{dt}$, maka:

$$\int_{\theta_0}^{\theta} d\theta = \int_0^t \omega_0 dt + \int_0^t \alpha \cdot t dt$$

$$\theta = \omega_0 \cdot t + \frac{1}{2} \alpha \cdot t^2 + C_2$$

Konstanta integrasi C_2 ialah harga θ ketika $t=0$, misalkan $\theta_0 = 0$.

Maka:

$$\theta = \omega_0 \cdot t + \frac{1}{2} \alpha \cdot t^2 \quad (3.68)$$

Jika kita tulis $\alpha = \frac{d\omega}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \omega \frac{d\omega}{d\theta}$, maka:

$$\int_{\theta_0}^{\theta} \alpha d\theta = \int_{\omega_0}^{\omega} \omega \cdot d\omega + C_3$$

$$\alpha \cdot \theta = \frac{1}{2} \omega^2 + C_3$$

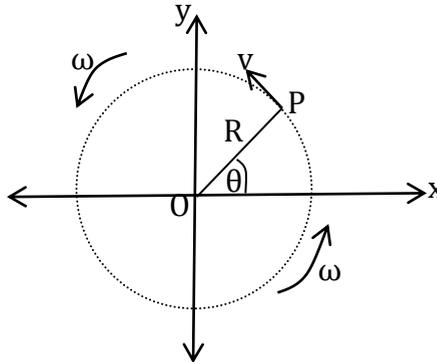
Jika sudut θ adalah nol, ketika $t=0$ dan kecepatan sudut awal ω_0 , maka $C_3 = -\frac{1}{2} \omega_0^2$, maka:

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2 \cdot \alpha \cdot \theta \quad (3.69)$$

f. Hubungan antara kecepatan sudut (ω), kecepatan linier (v), dan percepatan sudut (α)

Titik P berada pada jarak konstan R dari sumbu putar (rotasi), sehingga titik tersebut bergerak pada lingkaran dengan jari-jari R. Pada setiap saat, hubungan sudut θ (dalam radian) dan panjang busur x dinyatakan dengan: $x = R \cdot \theta$. Persamaan (3.57) tersebut dideferensialkan kedua ruasnya, maka:

$$\frac{dx}{dt} = R \frac{d\theta}{dt}$$



$\frac{dx}{dt}$ merupakan nilai dari laju perubahan panjang busur (laju linier = kecepatan linier) v dari partikel. Secara analogi, $\frac{d\theta}{dt}$ merupakan laju perubahan sudut (laju sudut=kecepatan sudut) ω , sehingga:

$$\mathbf{v} = \mathbf{R} \cdot \boldsymbol{\omega} \tag{3.70}$$

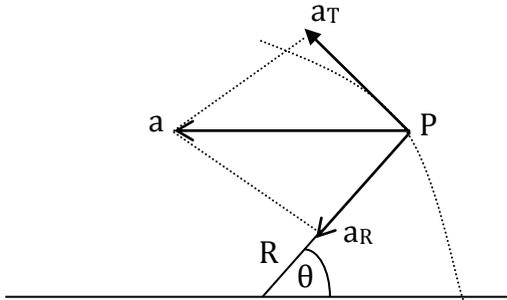
Semakin jauh letak titik dari sumbu, semakin besar laju linearnya. Arah vektor kecepatan linier adalah tangen terhadap lintasan lingkaran pada setiap titik (gambar a).

Persamaan (3.70) dideferensialkan kedua ruasnya terhadap t, di mana R konstan, maka:

$\frac{dv}{dt} = R \frac{d\omega}{dt}$ adalah kecepatan linier a_T titik P, dan $\frac{d\omega}{dt}$ adalah kecepatan sudut α benda yang berputar. Jadi hubungan antara percepatan sudut (α) dan percepatan tangensial (a_T) adalah:

$$\mathbf{a}_T = \mathbf{R} \cdot \boldsymbol{\alpha} \tag{3.71}$$

Perhatikan gambar (b) hubungan antara percepatan radial atau percepatan sentripetal (a_R) dan percepatan tangensial (a_T) adalah:



Untuk persamaan percepatan radial $a_R = \frac{v^2}{R}$ di titik P, maka hubungan antara kecepatan sudut (ω) dan kecepatan linear (v) dan percepatan radial adalah:

$$a_R = \omega^2 \cdot R = \omega \cdot v \quad (3.72)$$

Percepatan linier total dari partikel adalah resultan dari komponen percepatan yaitu: $a = a_T + a_R$, karena a_T tegak lurus dengan a_R , maka besar percepatan linier total partikel (titik P) pada benda tegar yang berputar terhadap sumbu poros tetap diberikan oleh:

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{a_T^2 + a_R^2} \\ a &= \sqrt{(R \cdot \alpha)^2 + (R \cdot \omega)^2} \\ a &= \sqrt{R^2 \alpha^2 + R^2 \omega^2} \\ a &= \sqrt{R^2(\alpha^2 + \omega^2)} \\ a &= R \sqrt{\alpha^2 + \omega^2} \end{aligned} \quad (3.73)$$

Gaya sentripetal adalah gaya (yang tidak mempunyai gaya reaksi) yang harus bekerja pada massa m yang bergerak melingkar, agar massa itu mengalami percepatan sentripetal $a_R = \frac{v^2}{R}$, maka persamaan gaya sentripetal diperoleh dari hubungan Hukum kedua Newton yaitu $F = m \cdot a$, yaitu:

$$\begin{aligned} F_s &= m \cdot a_R \\ F_s &= m \cdot \frac{v^2}{R} = m \cdot \omega^2 \cdot R = m \cdot \omega \cdot v \end{aligned} \quad (3.74)$$

Di mana: $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f$, jika f menyatakan frekuensi (Hz) dan T adalah periode (sekon).

Latihan Soal 3.5:

1. Posisi sudut titik pada roda dapat nyatakan sebagai $\theta = (5 + 10t + 2t^2)$ rad, dengan t dalam sekon. Tentukan:
 - a. Posisi sudut pada $t = 0$ dan $t = 3$ s
 - b. Kecepatan sudut rata-rata pada $t = 0$ dan $t = 3$ s.
 - c. Percepatan sudut pada $t = 0$ dan $t = 3$ s
2. Sebuah piringan hitam berputar pada poros z menurut persamaan: $\theta = 4,2 \text{ rad} - (2,9 \text{ rad/s}) t + (0,31 \text{ rad/s}^3) t^3$. Tentukan:
 - a. Kecepatan sudut sebagai fungsi waktu
 - b. Percepatan sudut sebagai fungsi waktu
 - c. Percepatan sudut awal
 - d. Percepatan sudut pada $t = 5$ sekon
3. Sebuah benda berputar pada suatu sumbu dengan perpindahan sudut yang besarnya dinyatakan dalam persamaan: $\theta = 8t^3 - 5t + 3$ (θ dalam radian dan t dalam sekon). Tentukan:
 - a. Berapa besar perpindahan sudut $t = 0$ dan $t = 3$ s
 - b. Berapa besar kecepatan sudut pada $t = 0$ dan $t = 3$ s
 - c. Berapa laju linier sebuah titik yang berjarak 20 cm dari sumbu putaran pada saat $t = 2$ s
 - d. Berapa percepatan sudut benda
 - e. Berapa percepatan tangensial yang berjarak 20 cm dari sumbu putaran pada saat $t = 2$ sekon
4. Sebuah benda yang awalnya diam dipercepat dalam suatu lintasan melingkar berjari-jari 3 m menurut persamaan: $\alpha = (12t^2 + 18t + 20) \text{ rad/s}^2$. Jika mulanya posisi sudut benda sama dengan nol. Berapakah posisi benda pada saat $t = 2$ sekon.
5. Sebuah benda berotasi dengan kecepatan sudut awal 8 rad/s pada percepatan sudut $(3t - 4) \text{ rad/s}^2$ (di mana t dalam sekon). Pada detik ke-2 dan ke-4 .
 - a. Tuliskan persamaan posisi kecepatan sudut
 - b. Hitunglah percepatan sudut rata-rata
6. Sebuah roda yang berotasi mengalami perlambatan $0,21 \text{ rad/s}^2$. Berapakah kecepatan sudut awalnya apabila roda berhenti tepat setelah berotasi satu putaran.
7. Sebuah batu bermassa 2 kg diikat pada seutas tali yang panjangnya 1,5 meter. Dengan ujung tali yang lain sebagai pusat. Tali diputar dalam bidang horizontal. Bila terjadi 6 putaran dalam 12 detik. Hitunglah:
 - a. Periode
 - b. Frekuensi
 - c. Kecepatan sudut
 - d. Kecepatan linier
 - e. Percepatan sentripetal

BAB IV

DINAMIKA GERAK

1. Pendahuluan

Pernahkah Anda berpikir; mengapa kita bisa begitu mudah berjalan di atas lantai keramik yang kering, tetapi akan begitu kesulitan jika lantai tersebut berubah menjadi basah? Mengapa diperlukan jarak yang jauh untuk menghentikan kapal laut begitu kapal tersebut berjalan? Mengapa kaki kita terasa lebih sakit manakala menendang batu besar daripada ketika menendang batu kerikil? Jawaban atas pertanyaan-pertanyaan tersebut menghantarkan kita pada kajian tentang dinamika, cabang mekanika yang mempelajari gerak dan gaya yang menyebabkannya. Pada bagian ini, akan menggunakan besaran-besaran dasar kinematika, yaitu jarak/perpindahan, kecepatan, dan percepatan yang dihubungkan dengan dua konsep baru, yaitu gaya dan massa.

Hukum tentang gerak dan penyebabnya sudah mulai dikaji sejak zaman Aristoteles (384-322 SM). Aristoteles menganggap bahwa suatu gaya, baik berupa tarikan maupun dorongan diperlukan untuk menjaga suatu benda bergerak. Pandangan ini meskipun agaknya logis dan sesuai dengan apa yang diamatai secara awam, namun pada saatnya nanti (ketika kita mempelajari Hukum Pertama Newton) kita akan melihat adanya kesalahan fatal pada pandangan Aristoteles tersebut. Pada generasi berikutnya lahir ilmuan seperti Copernicus, Brahe dan Kepler yang banyak menawarkan model analisis gerak benda-benda langit. Galileo bahkan telah memperkenalkan suatu besaran yang ia namai sebagai kuantitas gerak. Besaran inilah yang kini dikenal sebagai momentum. Pada tahun meninggalnya Galileo lahirlah Issac Newton yang kemudian menjadi orang pertama yang berhasil memberikan penjelasan secara mendasar tentang hukum-hukum gerak melalui ketiga hukumnya yang terkenal³⁰.

Hukum Newton, meskipun tampak sangat sempurna, kini kita juga mendapati bahwa hukum-hukum tersebut tidak berlaku universal, namun masih membutuhkan modifikasi untuk benda pada kecepatan sangat tinggi

³⁰ Anonim. 1999. *Belajar Fisika Lebih Mudah dan Menyenangkan*. <http://www.edukasi.net/>. Diakses tanggal 30 Juni 2009.

(mendekati kecepatan cahaya) dan untuk benda dengan ukuran yang sangat kecil (atom).

Mekanika klasik (mekanika newtonian) menyediakan cara untuk menganalisis gerak pada benda yang relatif besar dan berkecepatan tidak terlampau tinggi (jauh di bawah kecepatan cahaya), sedangkan untuk mempelajari gerak benda dengan kecepatan tinggi digunakan hukum-hukum relativitas. Adapun gerak yang dilakukan oleh benda-benda yang sangat kecil dipelajari melalui mekanika kuantum. Bagian ini hanya akan mengulas tentang mekanika klasik, artinya kita hanya akan bekerja dengan benda-benda yang berukuran relatif besar dan dengan kecepatan yang relatif kecil (jauh di bawah kecepatan cahaya).

2. Gaya dan Interaksinya

Gaya (*force*) dalam bahasa sehari-hari berarti dorongan atau tarikan. Konsep gaya memberikan gambaran kuantitatif tentang interaksi antara dua benda atau antara benda dengan lingkungannya. Tarikan atau dorongan tersebut dapat melalui suatu kontak langsung (gaya kontak/*contact force*) atau melalui suatu jarak tertentu (gaya jarak jauh/*long-range force*). Ketika kita mendorong meja, menarik balok dengan tali, dan gaya gesek yang dikerahkan oleh tanah pada kaki kita merupakan beberapa contoh gaya kontak. Sedangkan besi yang tertarik oleh magnet atau apel yang jatuh ke permukaan tanah merupakan contoh gaya jarak jauh³¹.

Gaya adalah besaran vektor, karena itu mempunyai besar dan arah serta memenuhi aturan-aturan operasi vektor. Satuan untuk gaya adalah newton, dan disingkat dengan N. Besar dan arah gaya bergantung kepada macam sistem dan lingkungan yang sedang ditinjau dan diungkapkan lewat hukum gaya. Hukum gaya ini mempunyai bentuk yang khas bagi sebuah sistem dan lingkungannya; sistem yang berbeda dan/atau lingkungan yang berbeda mempunyai hukum gaya yang berbeda. Contoh-contoh pasangan sistem dan lingkungan beserta hukum gaya yang berlaku :

- a. Pasangan dua benda titik sistem, pasangan satelit-bumi: Gaya gravitasi.
- b. Benda di dekat permukaan bumi: Gaya berat.
- c. Benda diikat dengan tali: Tegangan tali.

³¹ Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

- d. Benda bersentuhan dengan lantai: gaya kontak, gaya normal, gaya gesekan.
- e. Benda diikat pada pegas: gaya Hooke
- f. Benda terbenam dalam fluida: gaya apung Archimedes
- g. Benda bermuatan q bergerak dalam medan listrik E dan medan Magnet B : gaya Lorentz

3. Hukum Pertama Newton

Sebuah balok yang berada dalam keadaan diam, jika dibiarkan begitu saja (tidak diberi pengaruh luar) maka balok tersebut akan tetap diam. Balok dapat mengalami perubahan keadaan geraknya jika kepada balok tersebut bekerja suatu pengaruh luar yang disebut dengan gaya. Pada dasarnya setiap benda memiliki sifat inert (lembam), artinya bila tidak ada gangguan dari luar benda cenderung mempertahankan keadaan geraknya. Newton mengartikan keadaan gerak ini sebagai kecepatan benda. Bila resultan pengaruh luar sama dengan nol, maka kecepatan benda tetap dan benda bergerak lurus beraturan atau diam jika awalnya memang diam. Dengan demikian pernyataan Aristoteles bahwa gaya diperlukan untuk mempertahankan gerak tidaklah tepat. Benda bisa saja tetap bergerak lurus beraturan meskipun tidak ada gaya yang bekerja padanya.

Pernyataan terakhir seolah aneh. Barangkali selama ini kita menganggap bahwa benda akan bergerak jika kepadanya diberi gaya, dan jika gaya tersebut dihilangkan maka benda akan kembali berhenti. Kita tergoda menyimpulkan hal tersebut (sebagaimana yang dilakukan oleh Aristoteles) karena pengalaman sehari-hari yang tidak diobservasi secara menyeluruh. Misalnya, ketika kita mendorong sebuah kursi dan kursi tersebut berhasil bergerak ke suatu arah tertentu, lalu kita melepaskan kursi, maka kursi akan segera berhenti. Berdasarkan keadaan ini kita buru-buru menyimpulkan bahwa benda dapat bergerak terus-menerus jika dikenai gaya terus-menerus, dan akan segera berhenti jika tidak diberi gaya lagi. Sekarang bayangkan apa yang akan terjadi jika lantai cukup licin dan permukaan kursi juga licin, atau bayangkan apa yang akan terjadi jika lantai dan kursi super licin (benar-benar tidak terjadi gesekan)? Jika hal itu terpenuhi, maka kursi akan terus bergerak dengan kecepatan tetap pada lintasan lurus.

Karena kecepatan adalah besaran relatif, artinya kecepatan bergantung kepada kerangka acuan yang dipakai, maka pernyataan bahwa kecepatan benda tidak berubah juga bergantung kepada kerangka acuan. Kerangka acuan di mana penalaran Newton di atas berlaku disebut

kerangka acuan inersial, yaitu suatu kerangka acuan yang benar-benar diam atau benar-benar bergerak dengan kecepatan tetap.

Hukum pertama Newton dirumuskan sebagai berikut: Dalam kerangka inersial, setiap benda akan tetap dalam keadaan diam atau bergerak lurus beraturan, kecuali jika ia terpaksa mengubah keadaan tersebut oleh gaya-gaya dari lingkungan tempat benda berada³². Secara matematis, Hukum I Newton dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{0} \quad (4.1)$$

Dapat dikatakan bahwa hukum pertama Newton ini merupakan definisi bagi kerangka inersial. Kerangka acuan inersia yang digunakan untuk menganalisis gerak di atas permukaan bumi adalah bumi itu sendiri. Hukum pertama Newton lebih presisi dibanding dengan apa yang diusulkan Aristoteles. Tanpa adanya gaya luar, sebuah benda yang bergerak akan tetap terjaga bergerak. Dengan kata lain kecepatannya tidak akan berubah baik besar maupun arah. Ketahanan sebuah benda untuk merubah gerakan disebut inersia. Hukum pertama Newton ekuivalen dengan mengatakan sebuah benda mempunyai inersia³³.

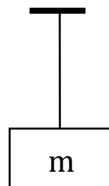
Hukum pertama Newton ini sebenarnya merupakan dasar dari konsep keseimbangan, sebab jika resultan semua gaya yang bekerja pada sebuah benda sama dengan nol, maka benda tersebut dikatakan dalam keadaan seimbang. Apabila menggunakan penguraian gaya-gaya, maka benda yang seimbang harus memenuhi syarat-syarat berikut:

$$\sum F_x = 0 \quad \text{dan} \quad \sum F_y = 0 \quad (4.2)$$

Dimana $\sum F_x$ menyatakan jumlah gaya yang bekerja pada suatu benda dalam arah sumbu x dan $\sum F_y$ menyatakan jumlah gaya yang bekerja pada suatu benda dalam arah sumbu y.

Contoh Soal:

1. Misalkan, sebuah balok digantungkan pada seutas tali, jika massa benda m dan percepatan gravitasi g. Berapakah tegangan tali ?

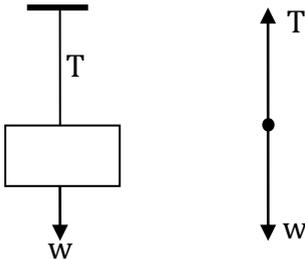


³² Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

³³ Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

Jawab:

Permasalahan ini dapat diselesaikan dengan menggunakan Hukum pertama Newton:



Dimisalkan gaya berat w dengan tegangan tali T maka:

$$\sum F_y = 0 \quad (\text{dalam hal ini hanya ada gaya yang bekerja pada sumbu } y)$$

$$T + (-w) = 0$$

Arah w berlawanan dengan T , arah T dianggap positif, jadi:

$$T - w = 0$$

$$T = w = m \cdot g$$

4. Hukum Ke dua Newton

Hukum pertama Newton merupakan kasus khusus untuk benda dengan resultan gaya nol. Apa yang terjadi jika terdapat gaya total yang bekerja pada suatu benda? Contoh: sebuah balok dilempar di atas permukaan lantai kasar. Selama balok bergerak, bekerja suatu gaya gesek yang menyebabkan kecepatan balok berkurang dan pada akhirnya berhenti. Ini adalah kasus yang umum terjadi pada peristiwa gerak. Akan ada gaya luar yang bekerja pada suatu benda yang menyebabkan kuantitas gerak suatu benda berubah. Pernyataan inilah yang menjadi dasar Hukum Kedua Newton³⁴.

Berbagai pengamatan menunjukkan bahwa untuk menghasilkan perubahan kecepatan yang sama, pada benda yang berbeda dibutuhkan besar pengaruh luar yang berbeda pula. Sebaliknya dengan besar pengaruh luar yang sama, perubahan kecepatan pada benda-benda ternyata berbeda-beda. Jadi ada suatu kuantitas intrinsik (diri) pada benda yang menentukan ukuran seberapa besar sebuah pengaruh luar dapat mengubah kondisi gerak

³⁴ Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid 1* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

benda tersebut. Kuantitas ini sebanding dengan jumlah dan jenis zat. Kuantitas intrinsik pada benda ini kemudian disebut sebagai massa inersia, disimbolkan dengan m . Massa inersia (atau sering disebut sebagai massa) memberikan ukuran derajat kelembaman atau derajat inersia sebuah benda. Makin besar massanya makin sulit untuk menghasilkan perubahan kondisi gerak pada benda tersebut³⁵.

Hukum Kedua Newton menyatakan hubungan antara gaya dan perubahan keadaan gerak secara kuantitatif. Newton menyebutkan bahwa: kecepatan perubahan kuantitas gerak suatu partikel sama dengan resultan gaya yang bekerja pada partikel tersebut.

Dalam bahasa kita sekarang kuantitas gerak yang dimaksudkan oleh Newton diartikan sebagai momentum p yang didefinisikan sebagai: $p=mv$ dengan m adalah massa partikel dan v adalah kecepatannya. Dalam mekanika klasik pada umumnya massa partikel adalah tetap. Hukum Kedua Newton dituliskan sbb:

$$\sum \mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d(m \cdot \mathbf{v})}{dt} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (4.3)$$

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{a} \quad (4.4)$$

Dari Hukum kedua Newton dapat disimpulkan bahwa gaya sebesar 1 newton dapat menyebabkan percepatan sebesar 1 m/s^2 pada benda bermassa 1 kilogram, atau gaya sebesar 2 newton dapat menyebabkan 1 m/s^2 pada benda bermassa 2 kilogram.

Berdasarkan Hukum kedua Newton dapat dijelaskan hubungan antara massa dengan berat. Konsep berat dan massa seringkali dicampuradukkan dalam percakapan sehari-hari. Misalnya, seorang menyatakan berat badannya 60 kg, padahal massanya 60 kg.

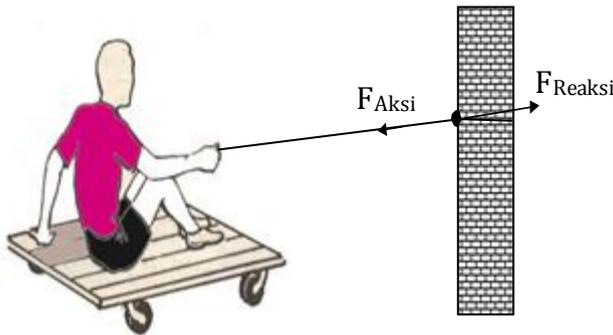
Massa merupakan ukuran inersia/kelembaman suatu benda (kemampuan mempertahankan keadaan suatu gerak). Makin besar massa suatu benda, makin sulit mengubah keadaan gerak benda tersebut. Semakin besar massa benda, semakin sulit menggerakannya dari keadaan diam, atau menghentikannya ketika sedang bergerak atau merubah gerakannya keluar dari lintasannya yang lurus. Kita dapat mengatakan bahwa semakin besar massa benda, semakin besar hambatan benda tersebut untuk dipercepat.

³⁵ Mark W. Zemansky. 1994. *Fisika untuk Universitas (Mekanika, Panas, Bunyi)*. Jakarta: Bina Cipta.

5. Hukum Ke tiga Newton

Pernahkah kalian saat menarik benda atau mendorong benda yang berat merasakan adanya tarikan benda tersebut. Jawabannya ada dua kemungkinan yaitu 99% mungkin tidak pernah perhatikan dan 1% mungkin perhatikan. Dalam peristiwa benda berat ditarik atau didorong tersebut ada gaya yang terlibat yaitu gaya aksi dan gaya reaksi.

Gambar di bawah ini menunjukkan seorang anak yang duduk di papan yang beroda menarik secara tidak langsung tali yang kuat pada sebuah dinding. Ia beserta papan yang didudukinya itu bergerak ke arah dinding, padahal ia memberikan gaya yang arahnya menjauhi dinding.



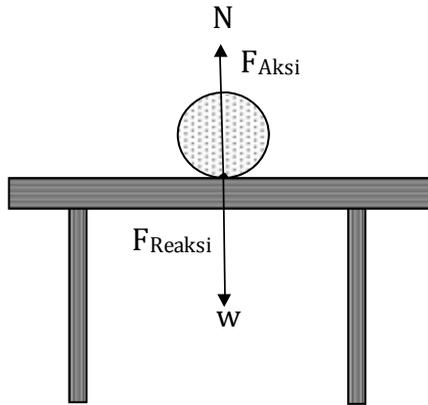
Hukum ketiga Newton: jika benda pertama mengerjakan gaya pada benda kedua, maka benda kedua akan mengerjakan gaya pada benda pertama yang sama besar, tetapi arahnya berlawanan. Hukum tersebut dapat diartikan bahwa gaya hanya hadir jika sedikitnya ada dua benda yang saling berinteraksi. Pada interaksi ini gaya-gaya selalu berpasangan. Misalnya benda A mengerjakan gaya pada benda B, maka benda B akan mengerjakan gaya pada benda A³⁶. pernyataan di atas dapat ditulis dalam persamaan:

$$\mathbf{F}_{\text{Aksi}} = - \mathbf{F}_{\text{Reaksi}} \quad (4.5)$$

Marilah kita tinjau beberapa keseimbangan. Dalam tinjauan ini kita membatasi diri pada gaya-gaya yang sebidang. Sebuah benda terletak di meja (lihat gambar). Jika massa buku 1 kg maka beratnya $w = 9,8$ newton. Karena ternyata buku itu terletak diam di meja, maka harus ada gaya lain yang bekerja pada buku itu yang segaris kerja, sama besarnya dan

³⁶ Mark W. Zemansky. 1994. *Fisika untuk Universitas (Mekanika, Panas, Bunyi)*. Jakarta: Bina Cipta..

berlawanan arahnya dengan w .



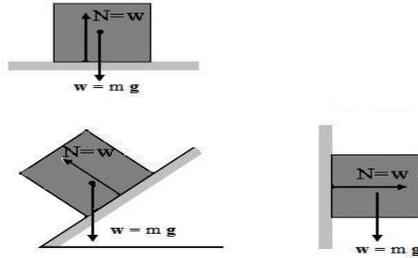
Gaya ini ditimbulkan oleh meja pada benda itu; gaya ini biasanya disebut gaya normal (N) karena tegak lurus bidang sentuh persekutuan. Jika w ditafsirkan sebagai gaya yang bekerja pada meja yang ditimbulkan oleh benda (aksi), maka N adalah gaya yang bekerja pada benda yang ditimbulkan oleh meja (reaksi).

6. Gaya Normal dan Gaya Gesekan

a. Gaya normal (N)

Gaya normal adalah gaya yang arahnya tegak lurus terhadap bidang. Vektor berat benda selalu digambarkan berarah tegak lurus ke bawah, di manapun posisi benda diletakan, baik pada bidang horisontal, bidang miring, atau pada bidang tegak³⁷. Perhatikan gambar di bawah.

³⁷ Sears dan Zemansky. 2000. *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.



b. Gaya gesekan

Gesekan biasanya terjadi di antara dua permukaan benda yang bersentuhan, baik terhadap udara, air, dan benda padat³⁸. Ketika sebuah benda bergerak di udara, permukaan benda tersebut akan bersentuhan dengan udara sehingga terjadi gesekan antara benda tersebut dengan udara. Demikian juga ketika bergerak di dalam air. Gaya gesekan juga selalu terjadi antara permukaan benda padat yang bersentuhan, sekalipun benda tersebut sangat licin. Permukaan benda yang sangat licin pun sebenarnya sangat kasar dalam skala mikroskopis.

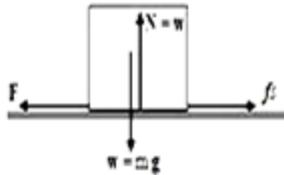
Gaya gesekan yang bekerja pada dua permukaan benda yang bersentuhan, ketika benda tersebut belum bergerak disebut **gaya gesek statik** (lambanganya f_s). Gaya gesek statis yang maksimum sama dengan gaya terkecil yang dibutuhkan agar benda mulai bergerak. Ketika benda telah bergerak, gaya gesekan antara dua permukaan biasanya berkurang sehingga diperlukan gaya yang lebih kecil agar benda bergerak dengan laju tetap. Ketika benda telah bergerak, gaya gesekan masih bekerja pada permukaan benda yang bersentuhan tersebut. Gaya gesekan yang bekerja ketika benda bergerak disebut **gaya gesekan kinetik** (lambanganya f_k). Ketika sebuah benda bergerak pada permukaan benda lain, gaya gesekan bekerja berlawanan arah terhadap kecepatan benda. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa pada permukaan benda yang kering tanpa pelumas, besar **gaya gesekan sebanding dengan Gaya Normal**.

Perbandingan antara besar gaya gesek statik maksimum dengan besar gaya normal (N) disebut koefisien gesekan statik (μ_s). Jika f_s menyatakan besar gaya gesekan statik, maka secara matematis dapat ditulis:

³⁸ Tipler, P.A.1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid 1* (terjemahan). Jakarta: Penebit Erlangga.

$$f_s \leq \mu_k \cdot N \quad (4.6)$$

Tanda \leq bisa diganti dengan tanda $=$ apabila f_s mencapai harga maksimum.



Benda telah ditarik tapi belum bergerak

Berdasarkan Hukum pertama Newton, besarnya gaya normal (gaya-gaya pada arah vertikal) pada gambar di atas adalah:

$$\begin{aligned} \sum F_y &= 0 \\ N - w &= 0 \\ N &= w = m \cdot g \end{aligned} \quad (4.7)$$

Sedangkan gaya-gaya yang bekerja pada arah mendatar adalah:

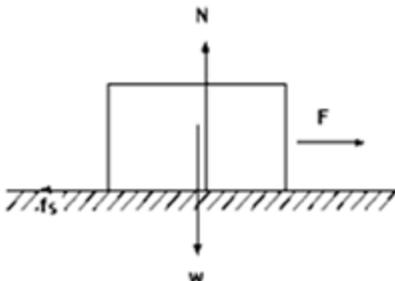
$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ F - f_s &= 0 \\ F &= f_s \end{aligned} \quad (4.8)$$

Benda akan diam jika $\mu_s \geq \mu_k$, maka $f_s \geq f_k$, percepatan benda nol.

Perbandingan antara besar gaya gesek kinetik dengan gaya normal disebut koefisien gesekan kinetik (μ_k). Jika f_k menyatakan besar gaya gesekan kinetik, maka secara matematis dapat ditulis:

$$f_k = \mu_k \cdot N \quad (4.9)$$

Nilai μ_k dan μ_s adalah konstanta yang tidak memiliki dimensi, di mana keduanya merupakan perbandingan antara besar dua buah gaya.



Berdasarkan Hukum pertama Newton, besarnya gaya normal (gaya-gaya pada arah vertikal) pada gambar di atas adalah:

$$\sum F_y = 0$$

$$N - w = 0$$

$$N = w = m \cdot g$$

Sedangkan gaya-gaya yang bekerja pada arah mendatar adalah dimana benda bergerak dengan percepatan a , maka berlaku Hukum kedua Newton:

$$\sum F_x = m \cdot a$$

$$F - f_k = m \cdot a$$

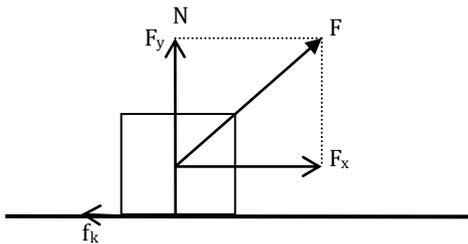
$$F - \mu_k \cdot N = m \cdot a \quad (4.10)$$

Benda akan bergerak jika $\mu_s > \mu_k$, maka $f_s > f_k$, percepatan a tidak sama dengan nol.

7. Penerapan Hukum-Hukum Newton

a. Gerak benda pada bidang datar

Sebuah benda ditarik dengan gaya F yang membentuk sudut α terhadap bidang datar yang kasar (lihat gambar):



Menurut Hukum kedua Newton berlaku gaya-gaya pada arah horizontal, yaitu:

$$\sum F_x = m \cdot a$$

$$F_x - f_k = m \cdot a \quad (4.11)$$

$$F \cos \alpha - \mu_k \cdot N = m \cdot a$$

$$F \cos \alpha - \mu_k \cdot m \cdot g = m \cdot a \quad (4.12)$$

Jika papan atau lantai licin berarti gaya gesekan sangat kecil atau nol ($f = 0$), maka persamaan (4.11) menjadi:

$$F \cos \alpha = m \cdot a$$

Menurut Hukum kesatu Newton berlaku gaya-gaya yang bekerja pada arah vertikal yaitu:

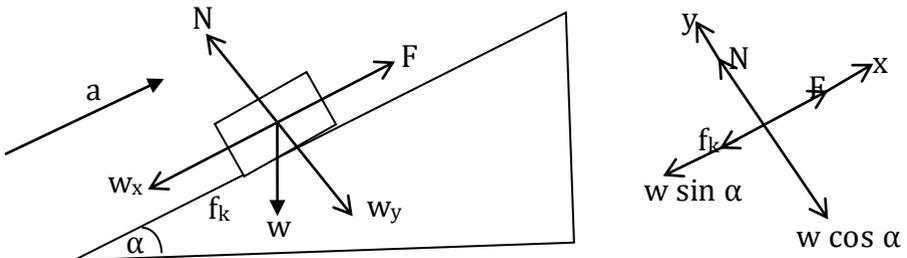
$$\sum F_y = 0$$

$$F_y + N - w = 0$$

$$F \sin \alpha + N - w = 0 \quad (4.13)$$

b. Gerak Benda pada bidang miring

- 1) Gerak benda di tarik atau di dorong pada bidang miring yang kasar dengan koefisien gesekan sehingga benda tersebut bergerak naik dengan percepatan tetap. Jadi benda melakukan GLBB naik, persamaan berlaku:



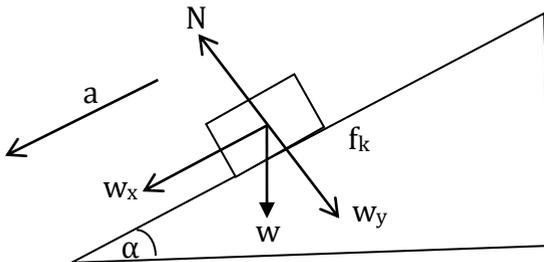
$$\sum F_x = m \cdot a$$

$$F - f_k - w_x = m \cdot a$$

$$F - f_k - w \sin \alpha = m \cdot a$$

$$\mathbf{F - \mu_k \cdot N - m \cdot g \sin \alpha = m \cdot a} \quad (4.14)$$

- 2) Benda diletakkan pada bidang miring yang kasar dengan koefisien gesekan sehingga benda tersebut bergerak turun dengan percepatan tetap. Jadi benda melakukan GLBB turun, persamaan berlaku:



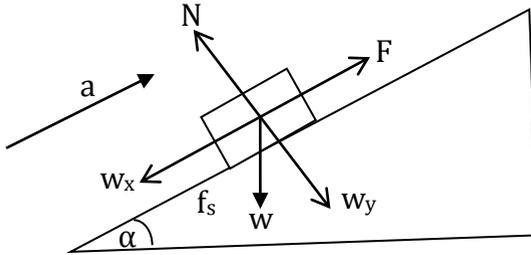
$$\sum F_x = m \cdot a$$

$$w_x - f_k = m \cdot a$$

$$w \sin \alpha - f_k = m \cdot a$$

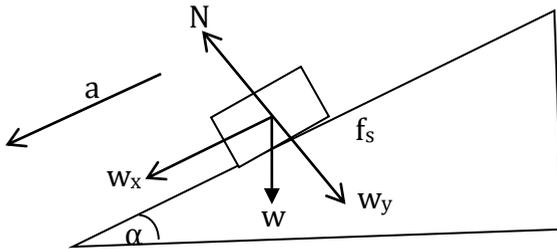
$$\mathbf{m \cdot g \sin \alpha - \mu_k \cdot N = m \cdot a} \quad (4.15)$$

- 3) Benda diletakkan pada bidang miring yang kasar dengan koefisien gesekan besar didorong ke atas maka benda diam. Sehingga ada dua kemungkinan yaitu: (1) benda diam, (2) benda bergerak lurus beraturan (GLB) naik ($a=0$, $v \neq 0$), persamaan berlaku:



$$\begin{aligned} \sum F_x &= m \cdot a \\ F - f_s - w_x &= 0 \\ F - f_s - w \sin \alpha &= 0 \\ \mathbf{F - \mu_s \cdot N - m \cdot g \sin \alpha = 0} & \quad (4.16) \end{aligned}$$

- 4) Benda diletakkan pada bidang miring yang kasar dengan koefisien gesekan besar didorong ke bawah. Sehingga ada dua kemungkinan yaitu: (1) benda diam, (2) benda bergerak lurus beraturan (GLB) ke bawah ($a=0, v \neq 0$), persamaan berlaku:



$$\begin{aligned} \sum F_x &= m \cdot a \\ w_x - f_s &= 0 \\ w \sin \alpha - f_s &= 0 \\ \mathbf{m \cdot g \sin \alpha - \mu_s \cdot N = 0} & \quad (4.17) \end{aligned}$$

Catatan penting:

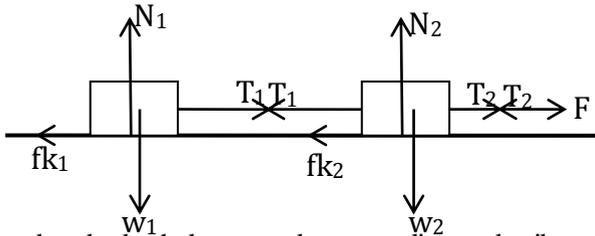
1. Pada bidang miring licin, gaya gesekan di abaikan ($f=0$), sehingga persamaan (4.14) dan (4.15) nilai f_x dan f_s adalah nol.
2. Hanya ada tiga kemungkinan yang mungkin terjadi yaitu gambar (1), (2) dan (3). Sedangkan gambar (4) tidak mungkin.
3. Semua keadaan pada gambar (1), (2), (3) dan 4, berlaku persamaan pada arah vertikal yaitu:

$$\begin{aligned} \sum F_y &= 0 \\ w_y - N &= 0 \\ \mathbf{N = w_y = m \cdot g \cos \alpha} & \quad (4.18) \end{aligned}$$

c. Gerak sistem benda

1) *Sistem benda yang dihubungkan dengan tali*

Perhatikan gambar di bawah ini:



Kedua benda berhubungan dengan tali memberikan tegangan (T), sehingga menurut Hukum kedua Newton pada sistem ini berlaku:

$$\sum F_x = m \cdot a$$

$$F - T_2 + T_2 - fk_2 - T_1 + T_1 - fk_1 = \sum m \cdot a$$

$$F - fk_2 - fk_1 = (m_1 + m_2) a$$

$$a = \frac{F - fk_2 - fk_1}{(m_1 + m_2)} \tag{4.19}$$

jika kedua benda bergesekan dengan bidang licin sempurna maka gaya gesekan sangat kecil ($fk=0$), maka persamaannya:

$$a = \frac{F}{(m_1 + m_2)} \tag{4.20}$$

menurut Hukum kedua Newton, besar tegangan tali T_1 pada benda 1 adalah:

$$\sum F_x = m \cdot a$$

$$T_1 - f_1 = m_1 \cdot a \tag{4.21}$$

Sedangkan untuk benda 2, berlaku persamaan adalah:

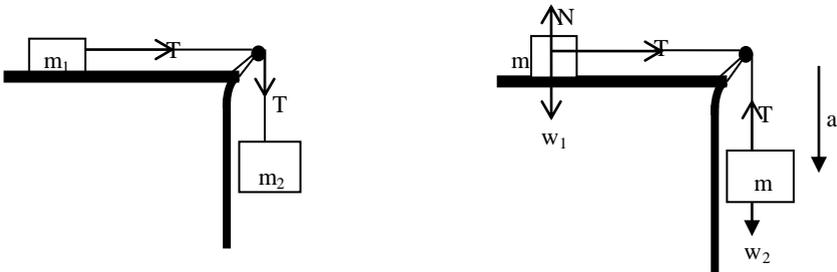
$$\sum F_x = m \cdot a$$

$$F - T_2 + T_2 - T_1 - f_2 = m_2 \cdot a$$

$$F - T_1 - f_2 = m_2 \cdot a \tag{4.22}$$

2) *Sistem benda yang dihubungkan dengan katrol*

Tentukan percepatan dan tegangan tali (T) ?



Menurut Hukum kedua Newton gerak benda pada gambar di atas memiliki percepatan:

$$\sum F = \sum m \cdot a$$

$$w_2 - \cancel{\mathcal{P}} + \cancel{\mathcal{P}} = (m_1 + m_2) a$$

$$m_2 \cdot g = (m_1 + m_2) a$$

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{m}_2}{(\mathbf{m}_1 + \mathbf{m}_2)} \mathbf{g} \quad (4.23)$$

Besar tegangan tali T pada sistem di atas adalah: (menggunakan benda m_1):

$$\sum F = m_1 \cdot a$$

$$T = m_1 \left(\frac{m_2}{(m_1 + m_2)} g \right)$$

$$\mathbf{T} = \left(\frac{\mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{m}_2}{\mathbf{m}_1 + \mathbf{m}_2} \mathbf{g} \right) \quad (4.24)$$

3) Berat benda dalam lift

a. Lift diam dengan percepatan konstan

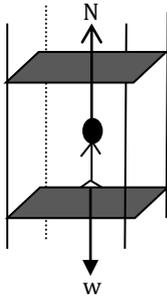
Dalam kasus ini, tidak ada perbedaan sama sekali dengan ketika orang berada di luar lift. Berarti orang tersebut menekan lantai lift dengan gaya sebesar berat badannya yaitu sebesar $\mathbf{m.g}$ newton. (perhatikan gambar a).

b. Lift bergerak ke atas dengan percepatan a

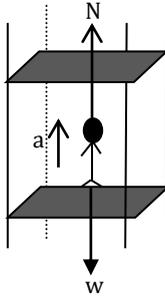
Jika lift bergerak ke atas dengan percepatan a, maka lift juga memberikan percepatan yang sama besarnya pada orang yang berada dalam lift. Dalam Hukum III newton, orang yang berada dalam lift akan memberikan gaya reaksi, yaitu gaya yang besarnya sama dengan $\mathbf{m.a}$, tetapi arah ke bawah. Akan tetapi, tetap saja gaya gravitasi bumi memberikan gaya berat kepada orang sebesar $\mathbf{m.g}$, sehingga gaya total yang dikerjakan orang pada lantai lift sebesar: (lihat gambar b).

c. Lift bergerak ke bawah dengan percepatan a

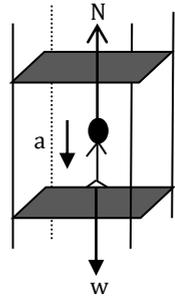
Karena lift tidak bias memberikan gaya ke bawah pada orang, maka sebagian dari gaya gravitasi bumi $\mathbf{m.g}$ digunakan untuk mempercepat orang tersebut ke bawah yaitu sebesar $\mathbf{m.a}$, maka berat orang yang berada dalam lift yang sedang dipercepat ke bawah adalah: (perhatikan gambar c).



Gambar a.



Gambar b.

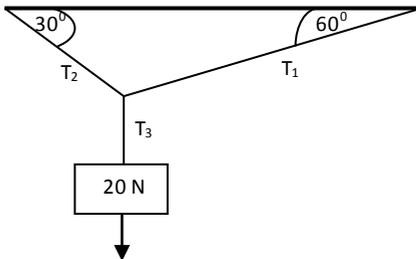


Gambar c.

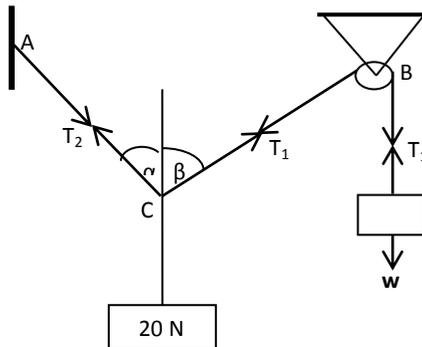
Latihan Soal 4.1

Soal Tentang Dinamika (Hukum-Hukum Newton)

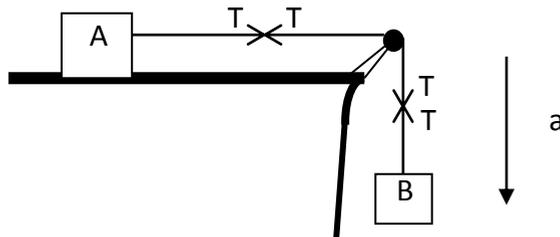
1. Sebuah balok digantung di langit-langit rumah (lihat gambar). Hitunglah T_1 , T_2 , dan T_3 .



2. Hitunglah tegangan tali AC dan besar w agar sistem seimbang. Jika $\tan \alpha = 3/4$ dan $\tan \beta = 4/3$.



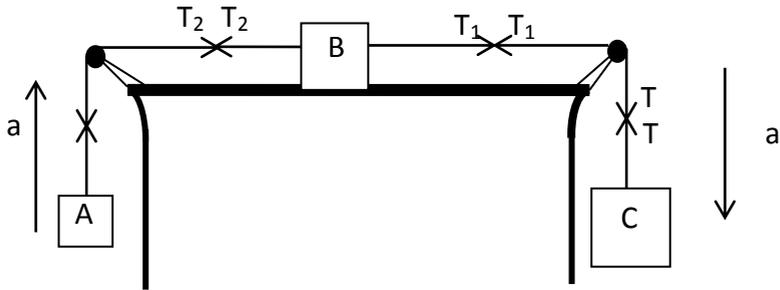
3. Kotak bermassa 3 kg bergerak pada permukaan horizontal dengan kecepatan awal v_0 pada saat $t=0$. Gaya sebesar 18 N dipasang pada benda dengan arah berlawanan arah gerak benda. Gaya itu memperlambat kotak menjadi setengah besar kecepatan semula ketika kotak itu bergerak sejauh 9 meter.
 - a. Berapa besar kecepatan awalnya
 - b. Berapa lama kejadian tersebut
4. Sebuah benda yang massanya m_1 diberi gaya yang membuatnya bergerak dengan percepatan 20 m/s^2 . Gaya yang sama diberikan pada benda yang massanya m_2 ternyata juga bergerak dengan percepatan 30 m/s^2 . Jika kedua benda digabungkan dengan cara diikat. Hitunglah percepatan gerak gabungan dua benda tersebut.
5. Perhatikan gambar dibawah ini. Jika koefisien gesekan antara balok A dengan meja 0,2, dengan $m_A=25 \text{ kg}$ dan $m_B=15 \text{ kg}$.
 - a. Berapa jauh balok B akan jatuh dalam 4 detik pertama setelah sistem dilepas.
 - b. Berapa percepatan benda dan tegangan talinya.



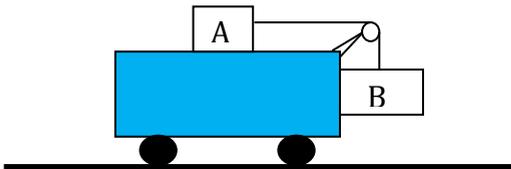
6. Perhatikan gambar di bawah ini. Jika koefisien gesekan antara benda A, B, dan C terhadap bidang datar masing-masing 0,1, 0,2, dan 0,3. Hitunglah percepatan dan tegangan tali antara AB dan BC selama geraknya, jika benda diberi gaya sebesar 120 N. ($m_A=10 \text{ kg}$, $m_B=15 \text{ kg}$, dan $m_C=10 \text{ kg}$).



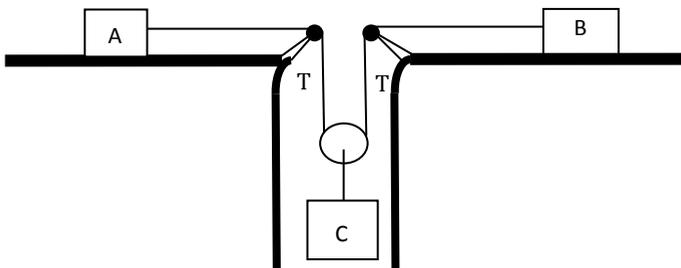
7. Perhatikan gambar di bawah ini. Pada sistem terjadi koefisien gesekan antara meja dengan balok adalah 0,2. Hitunglah percepatan sistem percepatan sistem dan tegangan tali. Jika $m_A=2 \text{ kg}$, $m_B=5 \text{ kg}$, dan $m_C=6 \text{ kg}$.



8. Perhatikan gambar di bawah ini. Massa benda A dan B masing-masing 2 kg dan 4 kg. Koefisien gesekan antara benda A dengan B terhadap bidang persinggungannya masing-masing 0,5 dan 0,25. Tentukan batas-batas percepatan kendaraan agar benda tidak terselip (mengeser) terhadap bidang kendaraan itu.

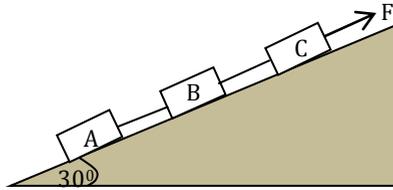


9. Perhatikan gambar di bawah ini. Benda A, B, dan C memiliki massa masing-masing 2 kg, 3 kg, dan 6 kg, massa katrol dan tali diabaikan. Koefisien gesekan antara benda A dan B terhadap bidang tumpunya masing-masing $1/4$ dan $1/5$. Hitunglah percepatan tiap massa dan tegangan tali.

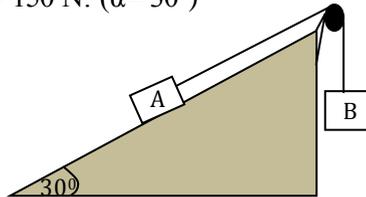


10. Tiga buah balok (lihat gambar). Mula-mula bergerak turun dengan kecepatan tetap 2 m/s. Ketiga benda kemudian ditarik dengan gaya 120 N. Massa benda A, B, dan C berturut-turut adalah 10 kg, 15 kg, dan 10 kg. Koefisien gesekan antara A, B, dan C terhadap bidang

miring masing-masing 0,1, 0,2, dan 0,3. Tentukan percepatan dan lama gaya F bekerja agar kecepatan benda menjadi 10 m/s.



11. Perhatikan gambar di bawah ini. Jika sistem benda dalam keadaan diam. Berapakah besar gaya gesekan yang bekerja pada bidang miring. Jika $w_A = 100\text{N}$, dan $w_B = 150\text{N}$. ($\alpha = 30^\circ$)



12. Sebuah benda bergerak, maka gaya gesekan statis berubah menjadi gaya gesekan kinetik. Buktikan bahwa koefisien gesekan kinetik :

$$\mu_k = \tan \alpha - \frac{a}{g \cos \alpha}$$
 (petunjuk: gunakan persamaan (4.15)).

Daftar Pustaka

- Anonim. 1999. *Belajar Fisika Lebih Mudah dan Menyenangkan*. <http://www.e-dukasi.net/>. Diakses tanggal 30 Juni 2009.
- Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Mark W. Zemansky. 1994. *Fisika untuk Universitas (Mekanika, Panas, Bunyi)*. Jakarta: Bina Cipta.
- Sears dan Zemansky. 2000. *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Tipler, P.A. 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik - Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

BAB V

USAHA DAN ENERGI

1. Pendahuluan

Dalam kehidupan sehari-hari anda pasti sering mendengar atau menggunakan kata usaha dan energi. Kata usaha yang sering kita gunakan dalam kehidupan sehari-hari memiliki makna yang berbeda dengan pengertian usaha dalam fisika. Usaha dan energi hanya memiliki besar dan tidak mempunyai arah karena termasuk besaran skalar, sehingga analisis kita menjadi lebih mudah dibandingkan dengan ketika kita mempelajari gaya. Walaupun gaya dan perpindahan termasuk besaran vektor tetapi usaha merupakan besaran skalar karena diperoleh dari perkalian skalar.

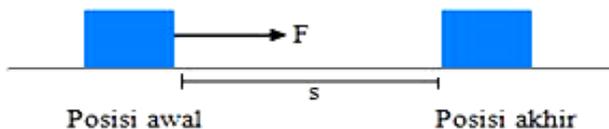
Segala sesuatu yang kita lakukan dalam kehidupan sehari-hari membutuhkan energi. Untuk bertahan hidup kita membutuhkan energi yang diperoleh dari makanan. Setiap kendaraan membutuhkan energi untuk bergerak dan energi itu diperoleh dari bahan bakar. Hewan juga membutuhkan energi untuk hidup, sebagaimana manusia dan tumbuhan. Energi merupakan salah satu konsep yang paling penting dalam fisika. Konsep yang sangat erat kaitannya dengan usaha adalah konsep energi. Secara sederhana, energi merupakan kemampuan melakukan usaha. Definisi yang sederhana ini sebenarnya kurang tepat atau kurang valid untuk beberapa jenis energi (misalnya energi panas atau energi cahaya tidak dapat melakukan kerja). Definisi tersebut hanya bersifat umum. Secara umum, tanpa energi kita tidak dapat melakukan kerja. Sebagai contoh, jika kita mendorong sepeda motor yang mogok, usaha atau kerja yang kita lakukan menggerakkan sepeda motor tersebut. Pada saat yang sama, energi kimia dalam tubuh kita menjadi berkurang, karena sebagian energi kimia dalam tubuh berubah menjadi energi kinetik sepeda motor. Usaha dilakukan ketika energi dipindahkan dari satu benda ke benda lain. Contoh ini juga menjelaskan salah satu konsep penting dalam sains, yakni kekekalan energi. Jumlah total energi pada sistem dan lingkungan bersifat kekal atau tetap. Energi tidak pernah hilang, tetapi hanya dapat berubah bentuk dari satu bentuk energi menjadi bentuk energi lain.

Dalam kehidupan sehari-hari terdapat banyak jenis energi. Energi kimia pada bahan bakar membantu kita menggerakkan kendaraan, demikian

juga energi kimia pada makanan membantu makhluk hidup bertahan hidup dan melakukan kerja. Dengan adanya energi listrik, kita bisa menonton TV atau menyalakan komputer sehingga bisa mengetik dan menghitung dan lain-lain. Ini hanya beberapa contoh dari sekian banyak jenis energi dalam kehidupan kita. Misalnya ketika kita menyalakan lampu neon, energi listrik berubah menjadi energi cahaya. Energi listrik juga bisa berubah menjadi energi panas (setrika listrik), energi gerak (kipas angin) dan sebagainya. Banyak sekali contoh dalam kehidupan kita, anda bisa memikirkan contoh lainnya. Secara umum, energi bermanfaat bagi kita ketika energi mengalami perubahan bentuk, misalnya energi listrik berubah menjadi energi gerak (kipas angin), atau energi kimia berubah menjadi energi gerak (mesin kendaraan).

2. Usaha

Usaha atau Kerja yang dilambangkan dengan huruf W (Work), digambarkan sebagai sesuatu yang dihasilkan oleh Gaya (F) ketika Gaya bekerja pada benda hingga benda bergerak dalam jarak tertentu. Hal yang paling sederhana adalah apabila gaya (F) bernilai konstan (baik besar maupun arahnya) dan benda yang dikenai gaya bergerak pada lintasan lurus dan searah dengan arah gaya tersebut³⁹. Secara matematis, usaha yang dilakukan oleh gaya yang konstan didefinisikan sebagai hasil kali perpindahan dengan gaya yang sejajar dengan perpindahan.



Persamaan matematisnya adalah :

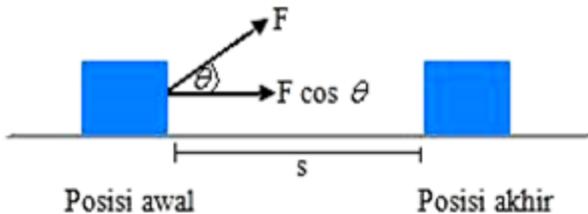
$$W = F \cdot s \quad (5.1)$$

W adalah usaha atau kerja (J atau Nm), F adalah gaya yang sejajar dengan perpindahan (N) dan s adalah perpindahan (m).

Apabila gaya konstan tidak searah dengan perpindahan, sebagaimana tampak pada gambar di bawah, maka usaha yang dilakukan oleh gaya pada benda didefinisikan sebagai perkalian antara perpindahan

³⁹ Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid 1 (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

dengan komponen gaya yang searah dengan perpindahan. Komponen gaya yang searah dengan perpindahan adalah $F \cos \theta$.

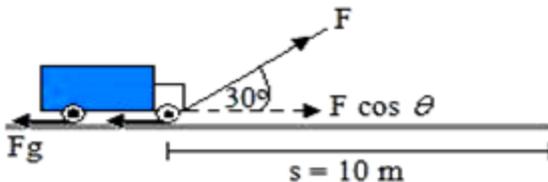


Secara

$$W = (F \cos \theta) \cdot s = F \cdot s \cos \theta \quad (5.2)$$

Contoh Soal 5.1 :

1. Seorang anak menarik mobil mainan menggunakan tali dengan gaya sebesar 20 N. Tali tersebut membentuk sudut 30° terhadap permukaan tanah dan besar gaya gesekan tanah dengan roda mobil mainan adalah 2 N. Jika mobil mainan berpindah sejauh 10 meter, berapakah usaha yang dilakukan anak tersebut ?



Jawab:

Untuk mengetahui usaha total, terlebih dahulu kita hitung besar usaha yang dilakukan masing-masing gaya : (A = anak, g = gesekan, w = berat dan N= gaya normal).

$$W_A = F_A \cdot s = (20 \cos 30^\circ) (10) = 100\sqrt{3} \text{ J}$$

- Usaha yang dilakukan oleh gaya gesekan :

$$W_g = F_g \cdot s = (-2 \text{ N}) (10) = -20 \text{ J}$$

- Usaha yang dilakukan oleh gaya berat :

$$W_w = F_w \cdot s = (mg) (2) \cos 90^\circ = 0$$

- Usaha yang dilakukan oleh gaya normal :

$$W_N = F_N \cdot s = (mg) (2) \cos 90^\circ = 0$$

- Usaha total :

$$W_{\text{Total}} = W_A + W_g + W_w + W_N = 100\sqrt{3} + (-20) + 0 + 0 = 153 \text{ J (N.m).}$$

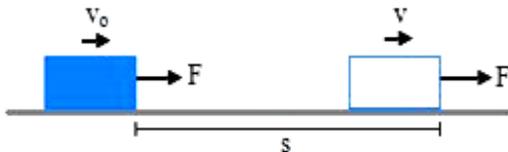
3. Energi kinetik dan Energi potensial

a. Energi kinetik

Setiap benda yang bergerak memiliki energi. Ketapel yang ditarik lalu dilepaskan sehingga batu yang berada di dalam ketapel meluncur dengan kecepatan tertentu. Batu yang bergerak tersebut memiliki energi. Pada contoh ini batu melakukan kerja pada ayam. Kendaraan beroda yang bergerak dengan laju tertentu di jalan raya juga memiliki energi kinetik. Ketika tukang bangunan memukul paku menggunakan martil, martil yang digerakan tukang bangunan melakukan kerja pada paku.

Setiap benda yang bergerak memberikan gaya pada benda lain dan memindahkannya sejauh jarak tertentu. Benda yang bergerak memiliki kemampuan untuk melakukan kerja, karenanya dapat dikatakan memiliki energi. Energi pada benda yang bergerak disebut **energi kinetik**⁴⁰. Kata kinetik berasal dari bahasa Yunani, kinetikos, yang artinya “gerak”. Ketika benda bergerak, benda pasti memiliki kecepatan. Dengan demikian, kita dapat menyimpulkan bahwa energi kinetik merupakan energi yang dimiliki benda karena gerakannya atau kecepatannya.

Untuk menurunkan persamaan energi kinetik, bayangkanlah sebuah benda bermassa m sedang bergerak pada lintasan lurus dengan laju awal v_0 .



Agar benda dipercepat beraturan sampai bergerak dengan laju v maka pada benda tersebut harus diberikan gaya total yang konstan dan searah dengan arah gerak benda sejauh s . Untuk itu dilakukan usaha atau kerja pada benda tersebut sebesar $W = F \cdot s$. Besar gaya $F = m \cdot a$. Karena benda memiliki laju awal v_0 , laju akhir v dan bergerak sejauh s , maka untuk menghitung nilai percepatan a , kita menggunakan persamaan

$$a = \frac{v^2 - v_0^2}{2s}$$

⁴⁰ Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid 1, Terjemahan*. Jakarta: Penerbit Erlangga

Substitusikan nilai percepatan a ke dalam persamaan gaya $F = m a$, untuk menentukan besar usaha :

$$W = F \cdot s = m \cdot a \cdot s = (m) \left(\frac{v^2 - v_0^2}{2s} \right) (s)$$

$$W = m \left(\frac{v^2 - v_0^2}{2} \right)$$

$$W = \frac{1}{2} m (v^2 - v_0^2)$$

$$W = \frac{1}{2} m \cdot v^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_0^2 \quad (5.3)$$

$$W = \frac{1}{2} m \cdot v^2, \text{ jika } v_0 = 0 \quad (5.4)$$

Persamaan (5.4) menjelaskan usaha total yang dikerjakan pada benda. Karena $W = EK$ maka kita dapat menyimpulkan bahwa besar energi kinetik translasi pada benda tersebut adalah :

$$W = EK = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (5.5)$$

Persamaan (5.3) di atas dapat kita tulis kembali menjadi:

$$W = EK_2 - EK_1 = \Delta EK \quad (5.6)$$

Contoh Soal 5.2:

1. Sebuah bola sepak bermassa 150 gram ditendang oleh Ronaldo dan bola tersebut bergerak lurus menuju gawang dengan laju 30 m/s. Hitunglah :
 - a. Energi kinetik bola tersebut
 - b. Berapa usaha yang dilakukan ronaldo pada bola untuk mencapai laju ini, jika bola mulai bergerak dari keadaan diam ?

Jawab:

- a. Energi Kinetik bola

$$EK = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} (0,15 \text{ kg}) (30 \text{ m/s}^2)^2 = 67,5 \text{ Joule}$$

- b. Usaha total

$$W = EK_2 - EK_1$$

$$EK_2 = 67,5 \text{ Joule}$$

$$EK_1 = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} m (0) = 0 \text{ — laju awal bola } (v_0) = 0$$

$$\text{Dengan demikian, usaha total : } W = 67,5 \text{ Joule} - 0 = 67,5 \text{ Joule}$$

b. Energi Potensial

1) Energi Potensial Gravitasi

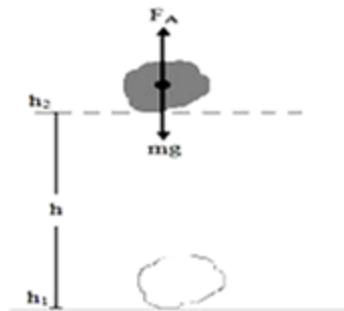
Energi potensial gravitasi dimiliki benda karena posisi relatifnya terhadap bumi. Setiap benda yang memiliki energi potensial gravitasi dapat

melakukan kerja apabila benda tersebut bergerak menuju permukaan bumi (misalnya buah mangga jatuh dari pohon)⁴¹.

Misalnya kita mengangkat sebuah batu bermassa m . gaya angkat yang kita berikan pada batu paling tidak sama dengan gaya berat yang bekerja pada batu tersebut, yakni mg (massa kali percepatan gravitasi). Untuk mengangkat batu dari permukaan tanah hingga mencapai ketinggian h , maka kita harus melakukan usaha yang besarnya sama dengan hasil kali gaya berat batu ($w = mg$) dengan ketinggian h . Ingat, arah gaya angkat kita sejajar dengan arah perpindahan batu, yakni ke atas $F_A =$ gaya angkat

$$W = F_A \cdot s = (\mathbf{m})(-\mathbf{g})(s) = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{g} (h_2 - h_1) \quad (5.7)$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa arah percepatan gravitasi menuju ke bawah.



Dengan demikian, energi potensial gravitasi sebuah benda merupakan hasil kali gaya berat benda (mg) dan ketinggiannya (h).

$$h = h_2 - h_1$$

$$EP = \mathbf{m} \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{h} \quad (5.8)$$

Berdasarkan persamaan EP di atas, tampak bahwa makin tinggi (h) benda di atas permukaan tanah, makin besar EP yang dimiliki benda tersebut. EP gravitasi bergantung pada jarak vertikal atau ketinggian benda di atas titik acuan tertentu. Biasanya kita tetapkan tanah sebagai titik acuan jika benda mulai bergerak dari permukaan tanah atau gerakan benda menuju permukaan tanah. Apabila kita memegang sebuah buku pada ketinggian tertentu di atas meja, kita bisa memilih meja sebagai titik acuan atau kita juga bisa menentukan permukaan lantai sebagai titik acuan. Jika kita tetapkan permukaan meja sebagai titik acuan maka h atau ketinggian buku kita ukur dari permukaan meja. Apabila kita tetapkan tanah sebagai

⁴¹ Young, Hugh D. & Freedman, Roger A. 2002. *Fisika Universitas (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

titik acuan maka ketinggian buku (h) kita ukur dari permukaan lantai. Jika kita gabungkan persamaan (5.7) dengan persamaan (5.8):

$$W = -m \cdot g (h_2 - h_1)$$

$$W = -m \cdot g \cdot h_2 + m \cdot g \cdot h_1$$

$$W = - (EP_2 - EP_1)$$

$$W = - \Delta EP \quad (5.9)$$

Persamaan (5.9) menyatakan bahwa usaha yang dilakukan oleh gaya yang menggerakkan benda dari h_1 ke h_2 (tanpa percepatan) sama dengan perubahan energi potensial benda antara h_1 dan h_2 . Setiap bentuk energi potensial memiliki hubungan dengan suatu gaya tertentu dan dapat dinyatakan sama dengan EP gravitasi. Secara umum, perubahan EP yang memiliki hubungan dengan suatu gaya tertentu, sama dengan usaha yang dilakukan gaya jika benda dipindahkan dari kedudukan pertama ke kedudukan kedua. Dalam makna yang lebih sempit, bisa dinyatakan bahwa perubahan EP merupakan usaha yang diperlukan oleh suatu gaya luar untuk memindahkan benda antara dua titik, tanpa percepatan.

Contoh Soal 5.3:

1. Seekor monyet bermassa 5 kg berayun dari satu dahan ke dahan lain yang lebih tinggi 2 meter. Berapakah perubahan energi potensial monyet tersebut ? ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

Jawab:

- Tetapkan dahan pertama sebagai titik acuan, di mana $h = 0$. Kita hanya perlu menghitung EP monyet ketika berada pada dahan kedua.

$$EP = m \cdot g \cdot h = (5 \text{ kg}) (10 \text{ m/s}^2) (2 \text{ m})$$

$$EP = 100 \text{ Joule}$$

Dengan demikian, perubahan energi potensial monyet = 100 Joule.

2. Seorang buruh pelabuhan yang tingginya 1,50 m mengangkat sekarung beras yang bermassa 50 kg dari permukaan tanah dan memberikan kepada seorang temannya yang berdiri di atas kapal. Jika orang tersebut tersebut berada 0,5 m tepat di atas kepala buruh pelabuhan. Hitunglah energi potensial karung berisi beras relatif terhadap :
 - a. permukaan tanah
 - b. kepala buruh pelabuhan

Jawab:

- a. EP karung berisi beras relatif terhadap permukaan tanah
Ketinggian total karung beras dari permukaan tanah = 1,5 m + 0,5 m = 2 meter.

Dengan demikian,

$$EP = mgh = (50 \text{ kg}) (10 \text{ m/s}^2) (2 \text{ m})$$

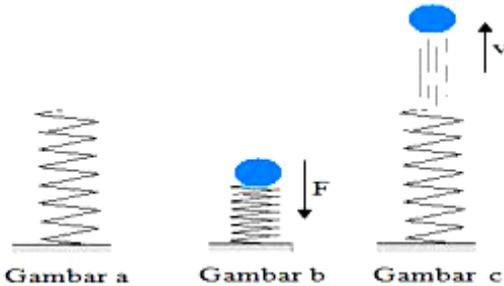
$$EP = 1000 \text{ Joule}$$

- b. EP karung berisi beras relatif terhadap kepala buruh pelabuhan
Kedudukan karung beras diukur dari kepala buruh pelabuhan adalah 0,5 meter.

$$EP = mgh = (50 \text{ kg}) (10 \text{ m/s}^2) (0,5 \text{ m}) = 250 \text{ J}$$

2) Energi Potensial Elastis

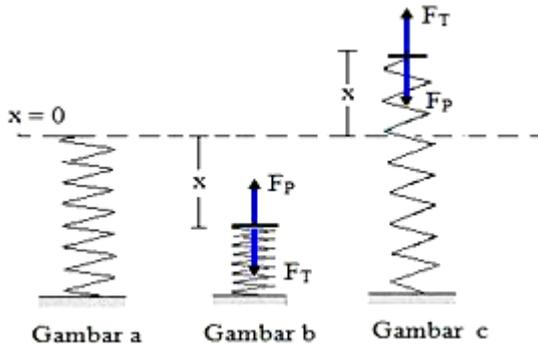
Energi Potensial elastis berhubungan dengan benda-benda yang elastis, misalnya pegas⁴². Misalnya sebuah pegas yang ditekan dengan tangan. Apabila kita melepaskan tekanan pada pegas, maka pegas tersebut melakukan usaha pada tangan kita. Efek yang dirasakan adalah tangan kita terasa seperti di dorong. Apabila kita menempelkan sebuah benda pada ujung pegas, kemudian pegas tersebut kita tekan, maka setelah dilepaskan benda yang berada di ujung pegas pasti terlempar. Perhatikan gambar di bawah ini.



Ketika berada dalam keadaan diam, setiap pegas memiliki panjang alami, seperti ditunjukkan gambar a. Jika pegas di tekan sejauh x dari panjang alami, diperlukan gaya sebesar F_T (gaya tekan) yang nilainya berbanding lurus dengan x , yakni :

$$F_T = k \cdot x \quad (5.10)$$

⁴² Tipler, P.A.1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid I (terjemahan)*. Jakarta: Penebit Erlangga



k adalah konstanta pegas (ukuran kelenturan/elastisitas pegas) dan besarnya tetap. Ketika ditekan, pegas memberikan gaya reaksi, yang besarnya sama dengan gaya tekan tetapi arahnya berlawanan. gaya reaksi pegas tersebut dikenal sebagai gaya pemulih. Besarnya gaya pemulih adalah:

$$F_P = - k \cdot x \quad (5.11)$$

Tanda minus menunjukkan bahwa arah gaya pemulih berlawanan arah dengan gaya tekan. Ini adalah persamaan hukum Hooke. Persamaan ini berlaku apabila pegas tidak ditekan sampai melewati batas elastisitasnya (x tidak sangat besar).

Untuk menghitung Energi Potensial pegas yang ditekan atau diregangkan, terlebih dahulu kita hitung gaya usaha yang diperlukan untuk menekan atau meregangkan pegas. Kita tidak bisa menggunakan persamaan $W = F \cdot s = F \cdot x$, karena gaya tekan atau gaya regang yang kita berikan pada pegas selalu berubah-ubah selama pegas ditekan. Ketika menekan pegas misalnya, semakin besar x , gaya tekan kita juga semakin besar. Gaya tekan atau gaya regang selalu berubah, dari $F = 0$ ketika $x = 0$ sampai $F = k \cdot x$ (ketika pegas tertekan atau teregang sejauh x). Besar gaya rata-rata adalah:

$$\bar{F} = \frac{1}{2} (0 + k \cdot x) = \frac{1}{2} k \cdot x$$

x merupakan jarak total pegas yang teregang atau pegas yang tertekan (bandingkan dengan gambar di atas). Usaha yang dilakukan adalah :

$$W = \bar{F}_T \cdot x = \left(\frac{1}{2} \cdot k \cdot x \right) (x)$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 \quad (5.12)$$

Jadi Persamaan Energi Potensial elastis (EP_{Pegas}) adalah:

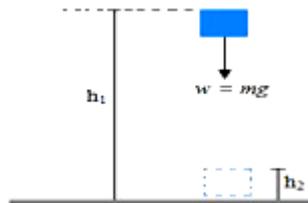
$$W = EP_{\text{Elastis}}$$

$$EP_{\text{Elastis}} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 \quad (5.13)$$

4. Hukum Kekekalan Energi Mekanik

Jumlah total Energi Kinetik dan Energi Potensial disebut Energi Mekanik. Ketika terjadi perubahan energi dari EP menjadi EK atau EK menjadi EP, walaupun salah satunya berkurang, bentuk energi lainnya bertambah. Misalnya ketika EP berkurang, besar EK bertambah. Demikian juga ketika EK berkurang, pada saat yang sama besar EP bertambah. Total energinya tetap sama, yakni Energi Mekanik. Jadi Energi Mekanik selalu tetap atau kekal selama terjadi perubahan energi antara EP dan EK. Karenanya kita menyebutnya Hukum Kekekalan Energi Mekanik⁴³.

Misalnya sebuah benda bermassa m berada pada kedudukan awal sejauh h_1 dari permukaan tanah (lihat gambar di bawah). Benda tersebut jatuh dan setelah beberapa saat benda berada pada kedudukan akhir (h_2). Benda jatuh karena pada benda bekerja gaya berat (gaya berat = gaya gravitasi yang bekerja pada benda, di mana arahnya tegak lurus menuju permukaan bumi).



Ketika berada pada kedudukan awal, benda memiliki Energi Potensial sebesar EP_1 ($EP_1 = mgh_1$). Ketika berada pada kedudukan akhir, benda memiliki Energi Potensial sebesar EP_2 ($EP_2 = mgh_2$). Usaha yang dilakukan oleh gaya berat dari kedudukan awal (h_1) menuju kedudukan akhir (h_2) sama dengan selisih EP_1 dan EP_2 . Secara matematis ditulis :

$$W = EP_1 - EP_2 = mgh_1 - mgh_2 \quad (5.14)$$

Misalnya kecepatan benda pada kedudukan awal = v_1 dan kecepatan benda pada kedudukan akhir = v_2 . Pada kedudukan awal, benda memiliki Energi Kinetik sebesar EK_1 ($EK_1 = \frac{1}{2} mv_1^2$). Pada kedudukan akhir, benda memiliki Energi Kinetik sebesar EK_2 ($EK_2 = \frac{1}{2} mv_2^2$). Usaha

⁴³ Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid 1 (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

yang dilakukan oleh gaya berat w untuk menggerakkan benda sama dengan perubahan energi kinetik. Secara matematis ditulis :

$$W = EK_2 - EK_1 = \frac{1}{2} mv_2^2 - \frac{1}{2} mv_1^2 \quad (5.15)$$

Kedua persamaan ini kita tulis kembali menjadi :

$$W = W$$

$$EP_1 - EP_2 = EK_2 - EK_1$$

$$mgh_1 - mgh_2 = \frac{1}{2} mv_2^2 - \frac{1}{2} mv_1^2$$

$$mgh_1 + \frac{1}{2} mv_1^2 = mgh_2 + \frac{1}{2} mv_2^2 \quad (5.16)$$

Jumlah total Energi Potensial (EP) dan Energi Kinetik (EK)= Energi Mekanik (EM). Secara matematis kita tulis :

$$EM = EP + EK \quad (5.17)$$

Ketika benda berada pada kedudukan awal (h_1), Energi Mekanik benda adalah :

$$EM_1 = EP_1 + EK_1 \quad (5.18)$$

Ketika benda berada pada kedudukan akhir (h_2), Energi Mekanik benda adalah :

$$EM_2 = EP_2 + EK_2 \quad (5.19)$$

Apabila tidak ada gaya tak-konservatif yang bekerja pada benda, maka Energi Mekanik benda pada posisi awal sama dengan Energi Mekanik benda pada posisi akhir. Secara matematis kita tulis :

$$EM_1 = EM_2 \quad (5.20)$$

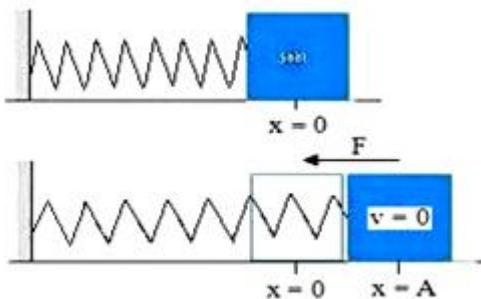
Jumlah Energi Mekanik benda ketika berada pada kedudukan awal= jumlah Energi Mekanik benda ketika berada pada kedudukan akhir. Dengan kata lain, apabila Energi Kinetik benda bertambah maka Energi Potensial harus berkurang dengan besar yang sama untuk mengimbangnya. Sebaliknya, jika Energi Kinetik benda berkurang, maka Energi Potensial harus bertambah dengan besar yang sama. Dengan demikian, jumlah total EP+EK (= Energi Mekanik) bernilai tetap/konstan. Ini adalah Hukum Kekekalan Energi Mekanik untuk gaya-gaya konservatif.

a. Gaya Konservatif

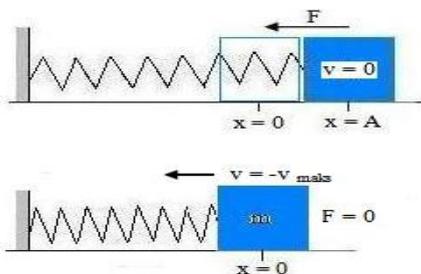
Gaya gravitasi yang mempengaruhi gerakan benda, baik ketika benda bergerak ke atas maupun ketika benda bergerak ke bawah dikatakan bersifat **konservatif** karena pengaruh gaya tersebut tidak bergantung pada lintasan yang dilalui benda, tetapi hanya bergantung pada posisi awal dan akhir benda. Contoh gaya konservatif lain adalah gaya elastik. Misalnya kita letakan sebuah pegas di atas permukaan meja percobaan. Salah satu ujung pegas telah diikat pada dinding, sehingga pegas tidak bergeser ketika

digerakan. Anggap saja permukaan meja sangat licin dan pegas yang kita gunakan adalah pegas ideal sehingga memenuhi hukum Hooke. Sekarang kita kaitkan sebuah benda pada salah satu ujung pegas.

Jika benda kita tarik ke kanan sehingga pegas teregang sejauh x , maka pada benda bekerja gaya pemulih pegas, yang arahnya berlawanan dengan arah tarikan kita. Ketika benda berada pada simpangan x , EP benda maksimum sedangkan EK benda nol (benda masih diam).

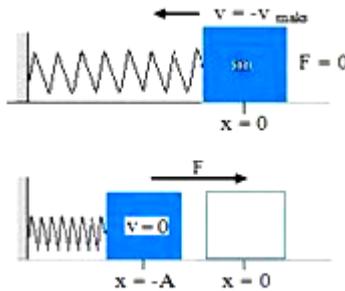


Ketika benda kita lepaskan, gaya pemulih pegas menggerakkan benda ke kiri, kembali ke posisi setimbangnya. EP benda menjadi berkurang dan menjadi nol ketika benda berada pada posisi setimbangnya. Selama bergerak menuju posisi setimbang, EP berubah menjadi EK. Ketika benda kembali ke posisi setimbangnya, gaya pemulih pegas bernilai nol tetapi pada titik ini kecepatan benda maksimum. Karena kecepatannya maksimum, maka ketika berada pada posisi setimbang, EK bernilai maksimum.



Benda masih terus bergerak ke kiri karena ketika berada pada posisi setimbang, kecepatan benda maksimum. Ketika bergerak ke kiri, Gaya pemulih pegas menarik benda kembali ke posisi setimbang, sehingga benda berhenti sesaat pada simpangan sejauh $-x$ dan bergerak kembali

menuju posisi setimbang. Ketika benda berada pada simpangan sejauh $-x$, EK benda = 0 karena kecepatan benda = 0. Pada posisi ini EP bernilai maksimum.



Proses perubahan energi antara EK dan EP berlangsung terus menerus selama benda bergerak bolak balik. Pada penjelasan di atas, tampak bahwa ketika bergerak dari posisi setimbang menuju ke kiri sejauh $x = -A$ ($A =$ amplitudo atau simpangan terjauh), kecepatan benda menjadi berkurang dan bernilai nol ketika benda tepat berada pada $x = -A$. Karena kecepatan benda berkurang, maka EK benda juga berkurang dan bernilai nol ketika benda berada pada $x = -A$. Karena adanya gaya pemulih pegas yang menarik benda kembali ke kanan (menuju posisi setimbang), benda memperoleh kecepatan dan Energi Kinetiknya lagi. EK benda bernilai maksimum ketika benda tepat berada pada $x = 0$, karena laju gerak benda pada posisi tersebut bernilai maksimum. Benda kehilangan EK pada salah satu bagian geraknya, tetapi memperoleh Energi Kinetiknya kembali pada bagian geraknya lain. Energi kinetik merupakan kemampuan melakukan usaha karena adanya gerak. setelah bergerak bolak balik, kemampuan melakukan usahanya tetap sama dan besarnya tetap alias kekal. Gaya elastis yang dilakukan pegas ini disebut bersifat **konservatif**⁴⁴.

Secara umum, sebuah gaya bersifat konservatif apabila usaha yang dilakukan oleh gaya pada sebuah benda yang melakukan gerakan menempuh lintasan tertentu hingga kembali ke posisi awalnya sama dengan nol. Sebuah gaya bersifat tak-konservatif apabila usaha yang dilakukan oleh gaya tersebut pada sebuah benda yang melakukan gerakan menempuh lintasan tertentu hingga kembali ke posisi semula tidak sama dengan nol.

⁴⁴ Tipler, P.A.1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid I (terjemahan)*. Jakarta: Penebit Erlangga

b. Gaya Tak Konservatif

Apabila pada suatu benda bekerja satu atau lebih gaya dan ketika benda bergerak kembali ke posisi semula, Energi Kinetiknya berubah (bertambah atau berkurang), maka kemampuan melakukan usahanya juga berubah. Dalam hal ini, kemampuan melakukan usahanya tidak kekal. Dapat dipastikan, salah satu gaya yang bekerja pada benda bersifat **tak - konservatif**. Untuk menambah pemahaman anda berkaitan dengan gaya tak konservatif, kita umpamakan permukaan meja tidak licin atau kasar, sehingga selain gaya pegas, pada benda bekerja juga gaya gesekan. Ketika benda bergerak akibat adanya gaya pemulih pegas, gaya gesekan menghambat gerakan benda/mengurangi kecepatan benda (gaya gesek berlawanan arah dengan gaya pemulih pegas). Akibat adanya gaya gesek, ketika kembali ke posisi semula kecepatan benda menjadi berkurang. Karena kecepatan benda berkurang maka Energi Kinetiknya juga berkurang. Karena Energi Kinetik benda berkurang maka kemampuan melakukan usaha juga berkurang. Dari penjelasan di atas kita tahu bahwa gaya pegas bersifat konservatif sehingga berkurangnya EK pasti disebabkan oleh gaya gesekan. Kita dapat menyatakan bahwa gaya yang berlaku demikian bersifat tak-konservatif. Perlu anda ketahui juga bahwa selain gaya pemulih pegas dan gaya gesekan, pada benda bekerja juga gaya berat dan gaya normal. Arah gaya berat dan gaya normal tegak lurus arah gerakan benda, sehingga bernilai nol.

5. Daya dan Efisiensi

a. Daya

Daya berkaitan dengan kapasitas suatu sistem yang diukur oleh laju waktu sistem itu melakukan kerja atau menghantarkan energi, dengan kata lain kapasitas suatu sistem dinilai oleh dayanya yang dinyatakan sebagai laju waktu melakukan kerja⁴⁵.

Daya (*Power*) simbol P yang ditimbulkan oleh sebuah gaya F yang melakukan kerja W adalah disebut daya rata-rata.

$$P = \frac{\text{Usaha yang dilakukan}}{\text{selang waktu}}$$
$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (5.21)$$

Daya sesaat yaitu harga limit hasil bagi usaha W jika selang waktu Δt mendekati nol.

⁴⁵ Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I, Terjemahan*. Jakarta: Penerbit Erlangga

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{dW}{dt} \quad (5.22)$$

Misalkan suatu gaya F dilakukan pada suatu partikel pada saat partikel itu bergerak sejauh Δs sepanjang lintasannya. Jika F adalah besar komponen gaya F yang menyinggung lintasan, maka usaha F diberikan adalah $\Delta W = F \cdot \Delta s$ dan daya rata-rata adalah:

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{F \cdot \Delta s}{\Delta t} = F \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

$$P = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} \quad (5.23)$$

Dalam satuan SI, daya (P) adalah watt (W) yakni: $1 W = 1 J/s$. Satuan lain daya yang sering digunakan adalah tenaga kuda (*horse power* = HP). $1 HP = 746 W$ dan $1 kWh$ (kilo watt hours) = $3,6 \times 10^6 J = 3,6 MJ$.

b. Efisiensi

Alat atau mesin tidak mungkin mengubah seluruh energi yang diterimanya menjadi energi yang bermanfaat, tetapi ada sebagian energi yang dibuang. Proses ini merupakan sifat alami sehingga dikemukakan konsep efisiensi (daya guna). Jika energi yang terima oleh alat pengubah energi disebut masukan (*input*) dan energi yang diubah ke bentuk yang bermanfaat disebut keluaran (*output*)⁴⁶.

Efisiensi (η) didefinisikan hasil bagi energi keluaran dengan energy masukan dikali seratus persen. Secara matematis dapat ditulis:

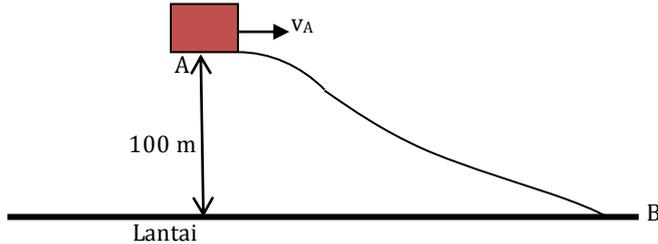
$$\eta = \frac{E_{keluaran}}{E_{masukan}} \times 100\% \quad (5.24)$$

Latihan Soal 5.1:

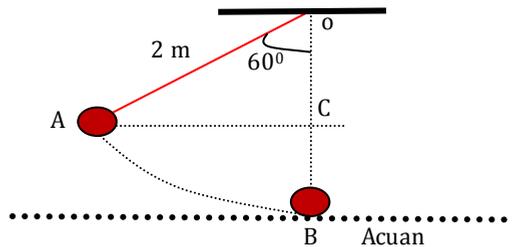
1. Gaya rata-rata yang dihasilkan oleh sabuk pengaman mobil kepada sopirnya yang bermassa 80 kg adalah 4000 N. Ketika mobil itu dihentikan dengan jarak 4 meter dari keadaan berjalan dengan kecepatan tertentu. Berapakah kecepatan mobil sebelum dihentikan.
2. Benda yang bermassa 2 kg dilempar vertikal ke atas dengan kecepatan awal 30 m/s. Pada saat ketinggian benda $\frac{3}{5}$ tinggi maksimum. Berapakah energi kinetik yang dimiliki benda tersebut. ($g=9,8 m/s^2$).
3. Sebuah benda dengan massa 5 kg bergerak dibidang mendatar dengan kecepatan awal 2 m/s, setelah menempuh jarak 10 meter benda henti. Hitunglah gaya gesekan yang bekerja pada benda tersebut.

⁴⁶ Young, Hugh D. & Freedman, Roger A. 2002. *Fisika Universitas (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

- Sebuah peluru ditembakkan vertikal ke atas pada saat mencapai ketinggian 20 meter kecepatan peluru 10 m/s. Berapakah kecepatan awal peluru.
- Sebuah benda bergerak melintasi lintasan tanpa gesekan seperti pada gambar. Bila laju di titik A adalah 4 m/s. Berapakah laju di titik B.



- Seorang pembalap naik sepeda melintasi bidang miring dengan sudut kemiringan 30° . Massa sepeda dengan anak 80 kg. Pada saat sepeda berkecepatan 2 m/s, sepeda mulai direm. Agar sepeda dapat berhenti dalam jarak 20 meter. Berapakah besar gaya pengeremannya.
- Panjang tali sebuah bandul 2 meter. Bandul disimpangkan 60° terhadap garis vertikal dan dilepaskan. Berapakah kecepatan bandul pada titik terendah (lihat gambar). ($g=9,8 \text{ m/s}^2$).



- Sebuah air terjun buatan yang terletak pada ketinggian 60 meter dapat mengalirkan air 100.000 kilogram tiap menit. Air itu digunakan untuk memutar turbin yang dihubungkan dengan generator. Daya listrik yang dihasilkan 500 kilowatt. Hitunglah efisiensi generator itu. ($g=9,8 \text{ m/s}^2$).
- Sebuah balok bermassa 4 kg dalam keadaan diam di sebuah bidang miring $\alpha= 30^\circ$. Balok itu mendapat gaya sebesar 40 N serah bidang miring ke atas. Ketika jarak 1 meter, berapakah daya yang diberikan oleh gaya tersebut.

10. Sebuah pusat pembangkit listrik tenaga air (PLTA) memanfaatkan air terjun setinggi 20 meter disebuah bukit yang mengalirkan air 10 m^3 setiap detiknya ($\rho_{\text{air}} = 1000 \text{ kg/m}^3$). Jika efisiensi generator yang digunakan 55%. Berapakah daya rata-rata yang dihasilkan. ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$).

Latihan Soal 5.2:

1. Bidang miring merupakan mesin sederhana yang memungkinkan kita untuk melakukan usaha dengan gaya yang lebih kecil daripada seharusnya. Apakah ini berarti menghemat usaha kita?
2. Usaha yang dilakukan gaya gesekan selalu negatif. Jelaskan! Usaha yang dilakukan gaya normal pada benda yang bergerak di atas sebuah bidang selalu nol. Jelaskan!
3. (a) Dapatkah kerja yang dilakukan gaya total berharga negatif? (b) Jika suatu benda mula-mula diam dikenai gaya total yang konstan. Apakah kerja yang dilakukan gaya tersebut dapat berharga negatif?
4. Usaha yang dilakukan oleh gaya resultan selalu sama besar dengan perubahan energi kinetik. Mungkinkah usaha yang dilakukan oleh salah satu komponen gaya lebih besar daripada perubahan energi kinetik? Jika mungkin berilah contoh.
5. Sebuah bola dilemparkan vertikal ke atas, kemudian ditangkap kembali. Bahaslah dengan menggunakan teorema kerja energi kecepatan bola pada saat sampai ke titik semula dengan asumsi: (a) gesekan udara diabaikan dan (b) gesekan udara tidak diabaikan.
6. Seorang mahasiswa bermassa 60 kg berlari menaiki tangga yang tingginya 5 m dalam waktu 4 sekon. Tentukan daya rata-rata yang dikeluarkannya.
7. Energi kinetik seseorang yang sedang berlari besarnya setengah energi kinetik seorang anak yang massanya separuh massa orang tersebut. Jika orang tersebut menambah lajunya sebesar 1 m/s, maka energi kinetiknya menjadi sama dengan energi kinetik anak tersebut. Tentukan laju (a) orang tersebut dan (b) anak tersebut mula-mula.
8. Sebuah gaya horizontal 50 N dikerjakan pada kotak 4 kg yang semula diam di meja horizontal yang koefisien gesekan kinetiknya adalah 0.25 dan koefisien gesekan statiknya 0.4. Tentukan (a) kerja yang dilakukan oleh gaya tersebut, (b) kerja yang dilakukan oleh gaya gesekan dan (c) energi kinetik kotak tersebut, setelah kotak bergerak sejauh 5 m.
9. Sebuah mobil sedan dapat menghasilkan gaya sebesar 20000N. Jika mobil tersebut melaju dengan kelajuan rata-rata 40 m/s tentukan daya

mobil tersebut. Pertanyaan yang sama untuk sebuah truk yang dapat menghasilkan gaya 40000N yang melaju dengan kelajuan rata-rata 10 m/s.

10. Untuk menghemat bahan bakar sebuah motor meluncur dengan kecepatan awal 4 m/s menuruni jalan dengan mesin dimatikan. Di akhir jalan menurun tersebut kelajuan motor ternyata mencapai 20 m/s. Jika gesekan-gesekan diabaikan, maka perkiraan beda tinggi posisi awal dan posisi akhir motor tersebut.
11. Seorang tukang menarik sebuah peti sejauh 5 m dengan kecepatan tetap 0,5 m/s dengan gaya sebesar 200 N. Tentukan waktu yang diperlukan dan daya tukang tersebut.
12. Sebuah mobil sedan dapat menghasilkan gaya sebesar 20000N. Jika mobil tersebut melaju dengan kelajuan rata-rata 40 m/s tentukan daya mobil tersebut. Pertanyaan yang sama untuk sebuah truk yang dapat menghasilkan gaya 40000N yang melaju dengan kelajuan rata-rata 10 m/s.
13. Perkirakan energi kinetik dan kelajuan yang diperlukan oleh seorang peloncat galah bermassa 70 kg agar dapat melewati mistar yang tingginya 5 m. Asumsikan pusat massa dari peloncat galah mula-mula ada pada ketinggian 0,9 m.
14. Sebuah batang kayu bermassa 500kg ditarik dari keadaan diam oleh seekor gajah sejauh 2 m oleh sehingga gaya total yang bekerja padanya adalah 100N. Tentukan energi kinetik dan kelajuan akhir batang kayu tersebut!
15. Sebuah sepeda motor bermassa 300 kg mempunyai kelajuan 25 m/s di awal jalan yang mendaki. Sepeda motor tersebut mengalami perlambatan sehingga pada akhir jalan mendaki kelajuannya tinggal 10 m/s. Jika beda ketinggian antara awal dan akhir jalan adalah 100 m, hitung usaha oleh mesin sepeda motor itu.

Daftar Pustaka

- Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid I (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga
- Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I, Terjemahan*. Jakarta: Penerbit Erlangga
- Tipler, P.A.1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid I (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga
- Young, Hugh D. & Freedman, Roger A. 2002. *Fisika Universitas (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

BAB VI

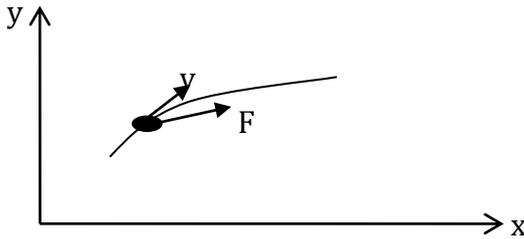
MOMENTUM DAN TUMBUKAN

1. Momentum dan Impuls

Misalkan sebuah partikel bermassa m yang bergerak dalam bidang xy seperti pada gambar di bawah ini, dan mengalami gaya resultan F yang besar dan arahnya dapat berubah. Kalau kecepatannya masih dalam kecepatan non relativistik, di mana massa benda m adalah konstan⁴⁷, maka berdasarkan Hukum kedua Newton, pada setiap saat:

$$F = m \frac{dv}{dt}$$
$$\mathbf{F} \cdot dt = \mathbf{m} \cdot d\mathbf{v}$$

(6.1)



Kalau v_1 adalah kecepatan ketika $t=t_1$ dan v_2 adalah kecepatan ketika $t=t_2$. Dengan mengintegrasikan persamaan (6.1) diperoleh:

$$\int_{t_1}^{t_2} F dt = \int_{v_1}^{v_2} m dv$$
$$\int_{t_1}^{t_2} F dt = m v_2 - m v_1$$
$$\int_{t_1}^{t_2} F dt = m (v_2 - v_1)$$
$$\int_{t_1}^{t_2} F dt = \Delta p$$
$$\mathbf{I} = \Delta \mathbf{p} \tag{6.2}$$

Bentuk integrasi di ruas kiri yaitu $\mathbf{I} = \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F} dt$ dinamakan Impuls gaya F dalam selang waktu t_1 sampai t_2 dan Impuls merupakan besaran vektor.

⁴⁷ Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid I (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

Dalam Hukum kedua Newton persamaan (4.3) dinyatakan bahwa laju perubahan momentum sebuah benda sebanding dengan besar gaya yang bekerja dalam selang waktu tertentu. Secara matematis dapat ditulis:

$$\mathbf{F} = \frac{\Delta \mathbf{P}}{\Delta t} = \frac{(\mathbf{m} \cdot \mathbf{v} - \mathbf{m} \cdot \mathbf{v}_0)}{\Delta t} \quad (6.3)$$

Hasil kali massa sebuah partikel dengan kecepatannya dinamakan momentum linier⁴⁸. Momentum linier termasuk besaran vektor. Secara matematis dapat ditulis:

$$\text{Momentum linier} = m \cdot v$$

$$\mathbf{p} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{v} \quad (6.4)$$

Dari persamaan (6.4), tampak bahwa momentum (**P**) berbanding lurus dengan massa (**m**) dan kecepatan (**v**). Semakin besar kecepatan benda, maka semakin besar juga momentum sebuah benda. Demikian juga, semakin besar massa sebuah benda, maka momentum benda tersebut juga bertambah besar.

Contoh Soal 6.1:

1. Sebuah mobil dengan massa 2000 kg, mula-mula bergerak lurus dengan kecepatan awal 20 m/s ke utara. Setelah beberapa saat, mobil tersebut direm dan setelah 10 detik kecepatannya berkurang menjadi 5 m/s. Tentukan:
 - a. Momentum awal mobil
 - b. Momentum mobil setelah direm. (setelah 10 detik)
 - c. Perubahan momentumnya setelah direm.

Jawab :

Terlebih dahulu arah positifnya (pemilihan ini boleh sembarang). Misalkan arah ke utara kita ambil sebagai arah positif. Oleh karena itu:

- a. Momentum awal mobil : $p_o = m \cdot v_o = 2000 \text{ kg} \times 20 \text{ m/s} = 40000 \text{ kg m/s}$
arah p_o ke utara
- b. Momentum akhir : $p_t = m \cdot v_t = 2000 \text{ kg} \times 5 \text{ m/s} = 10000 \text{ kg m/s}$
arah p_t ke utara
- c. Perubahan momentum bisa dinotasikan sebagai:

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_t - p_o \\ &= 10000 \text{ kg m/s} - 40000 \text{ kg m/s} = -30000 \text{ kg m/s} \end{aligned}$$

⁴⁸ Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I, Terjemahan*. Jakarta: Penerbit Erlangga

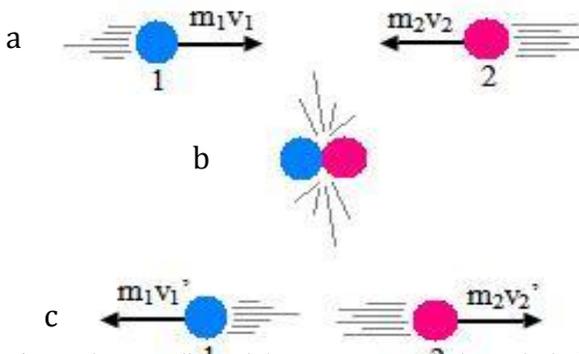
Perubahan momentum mempunyai tanda negatif, berarti arahnya ke selatan.

Catatan: Bila kita ambil arah selatan sebagai arah positif dan utara sebagai arah negatif tanda p_0 akan negatif, artinya ke utara (sesuai dengan jawaban a. yaitu arah ke utara) tanda P_1 akan negatif, artinya arahnya ke utara (sesuai dengan jawaban b. yaitu arah ke utara tanda Δp akan positif, artinya arahnya ke selatan (sesuai dengan jawaban c. yaitu arah ke selatan).

2. Hukum Kekekalan Momentum

Perhatikan ilustrasi berikut:

- Benda 1 dengan massa m_1 bergerak dengan kecepatan v_1 . Benda 2 dengan massa m_2 bergerak berlawanan arah gerak benda 1 dengan kecepatan v_2 (gambar a).
- Bila kedua benda berada pada lintasan yang sama dan lurus serta kecepatan benda 1 lebih besar dari kecepatan benda 2 ($v_1 > v_2$), maka pada suatu saat benda 2 akan ditabrak benda 1 (gambar b).
- Setelah terjadi tabrakan, sesuai dengan Hukum ketiga Newton kedua benda saling menekan dengan gaya F yang sama besar tetapi berlawanan arah (gambar c).



Dari gambar c, diperoleh persamaan hukum kekekalan momentum yaitu:

$$F_{\text{Aksi}} = - F_{\text{Reaksi}}$$

$$F_1 = - F_2$$

$$F_1 \cdot \Delta t = - F_2 \cdot \Delta t$$

$$I_1 = - I_2$$

$$\Delta p_1 = - \Delta p_2$$

$$m_1 v_1 - m_1 v_1' = - (m_2 v_2 - m_2 v_2')$$

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \quad (6.5)$$

$$p_1 + p_2 = p_1' + p_2' \quad (6.6)$$

Keterangan:

p_1, p_2 = momentum benda 1 dan benda 2 sebelum tumbukan (kg m/s)

p_1', p_2' = momentum benda 1 dan benda 2 setelah tumbukan (kg m/s)

m_1, m_2 = massa benda 1 dan benda 2 (kg)

v_1, v_2 = kecepatan benda 1 dan benda 2 sebelum tumbukan (m/s)

v_1', v_2' = kecepatan benda 1 dan benda 2 setelah tumbukan (m/s)

Persamaan (6.6) adalah Hukum kekekalan momentum: Jumlah momentum benda-benda sebelum dan setelah tumbukan adalah tetap asalakan tidak ada gaya luar yang bekerja pada benda-benda itu.

3. Tumbukan

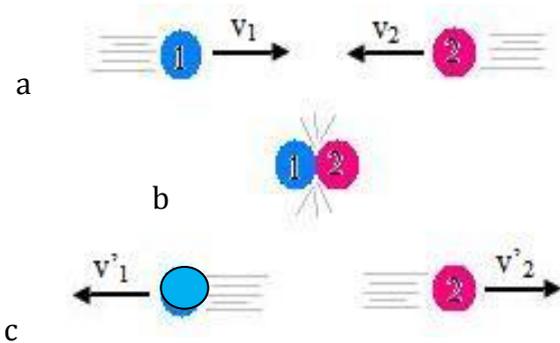
Secara umum terdapat beberapa jenis tumbukan, antara lain tumbukan lenting sempurna, tumbukan lenting sebagian dan tumbukan tidak lenting sama sekali⁴⁹.

a. Tumbukan lenting sempurna

Dua benda dikatakan melakukan Tumbukan lenting sempurna jika Momentum dan Energi Kinetik kedua benda sebelum tumbukan = momentum dan energi kinetik setelah tumbukan. Dengan kata lain, pada tumbukan lenting sempurna berlaku Hukum Kekekalan Momentum dan Hukum Kekekalan Energi Kinetik.

Hukum Kekekalan Momentum dan Hukum Kekekalan Energi Kinetik berlaku pada peristiwa tumbukan lenting sempurna karena total massa dan kecepatan kedua benda sama, baik sebelum maupun setelah tumbukan. Hukum Kekekalan Energi Kinetik berlaku pada Tumbukan lenting sempurna karena selama tumbukan tidak ada energi yang hilang. Perhatikan ilustrasi berikut:

⁴⁹ Young, Hugh D. & Freedman, Roger A. 2002. *Fisika Universitas (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga



Dua benda, benda 1 dan benda 2 bergerak saling mendekat. Benda 1 bergerak dengan kecepatan v_1 dan benda 2 bergerak dengan kecepatan v_2 . Kedua benda itu bertumbukan dan terpantul dalam arah yang berlawanan. Perhatikan (c) bahwa kecepatan merupakan besaran vektor sehingga dipengaruhi juga oleh arah. Sesuai dengan kesepakatan, arah ke kanan bertanda positif dan arah ke kiri bertanda negatif. Karena memiliki massa dan kecepatan, maka kedua benda memiliki momentum ($p = mv$) dan energi kinetik ($EK = \frac{1}{2} mv^2$). Total Momentum dan Energi Kinetik kedua benda sama, baik sebelum tumbukan maupun setelah tumbukan. Berdasarkan persamaan (6.5) Hukum Kekekalan Momentum dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 m_1 v_1 + m_2 v_2 &= m_1 v_1' + m_2 v_2' \\
 m_1 v_1 - m_1 v_1' &= m_2 v_2' - m_2 v_2 \\
 \mathbf{m_1 (v_1 - v_1')} &= \mathbf{m_2 (v_2' - v_2)} \qquad (6.7)
 \end{aligned}$$

Untuk tumbukan lenting sempurna berlaku hukum kekekalan energi kinetik:

$$\begin{aligned}
 EK_1 + EK_2 &= EK_1' + EK_2' \\
 \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 &= \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \\
 \mathbf{m_1 (v_1^2 - v_1'^2)} &= \mathbf{m_2 (v_2'^2 - v_2^2)} \qquad (6.8)
 \end{aligned}$$

Persamaan (6.8) dibagi persamaan (6.7) diperoleh:

$$\begin{aligned}
 \frac{v_1^2 - v_1'^2}{v_1 - v_1'} &= - \frac{(v_2'^2 - v_2^2)}{v_2' - v_2} \\
 \frac{(v_1 + v_1')(v_1 - v_1')}{v_1 - v_1'} &= - \frac{(v_2 - v_2')(v_2 + v_2')}{v_2' - v_2} \\
 v_1 + v_1' &= v_2 + v_2' \\
 -v_2 + v_1 &= v_2 - v_1 \\
 - \frac{(v_2' - v_1')}{(v_2 - v_1)} &= 1 \qquad (6.9)
 \end{aligned}$$

Untuk Tumbukan Lenting Sempurna, besar koefisien restitusi = 1. ini menunjukkan bahwa total kecepatan benda setelah tumbukan= total kecepatan benda sebelum tumbukan. Lambang koefisien restitusi adalah e. Secara umum, nilai koefisien restitusi dinyatakan dengan persamaan:

$$e = - \frac{(v_2' - v_1')}{(v_2 - v_1)} = 1 \quad (6.10)$$

b. Tumbukan tidak lenting sama sekali

Dua benda, benda 1 dan benda 2. Benda 1 bergerak dengan kecepatan v_1 dan benda 2 diam dengan kecepatan $v_2 = 0$. Setelah terjadi tumbukan kedua benda bergabung dengan kecepatan yang sama besar yaitu $v_1' = v_2' = v'$.

Dari persamaan (6.5) Hukum Kekekalan Momentum dirumuskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} m_1 v_1 + m_2 v_2 &= m_1 v_1' + m_2 v_2' \\ m_1 v_1 + m_2 (0) &= m_1 v' + m_2 v' \\ \mathbf{m_1 v_1} &= \mathbf{(m_1 + m_2) v'} \end{aligned} \quad (6.11)$$

Untuk Tumbukan tidak Lenting sama sekali, besar koefisien restitusi $e = 0$. Secara umum, nilai koefisien restitusi dinyatakan dengan persamaan:

$$e = - \frac{(v_2' - v_1')}{(v_2 - v_1)} = 0 \quad (6.12)$$

Pada tumbukan ini, terjadi pengurangan energi kinetik.

$$p = p_1 + p_2 = m_1 v_1 + m_2 v_2 \quad (v_2 = \text{diam} = 0)$$

$$p = m_1 v_1$$

Energi kinetik sebelum tumbukan:

$$EK = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad (v_2 = \text{diam} = 0)$$

$$EK = \frac{1}{2} m_1 v_1^2$$

$$EK = \frac{(m_1 v_1)^2}{2 m_1}$$

$$\mathbf{EK} = \frac{\mathbf{p^2}}{\mathbf{2 m_1}} \quad (6.13)$$

Oleh karena setelah tumbukan kedua benda bersatu dan bergerak dengan kecepatan v' . Jadi momentum setelah tumbukan adalah:

$$p' = (m_1 + m_2) v'$$

Energi kinetik setelah tumbukan:

$$EK' = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \quad (v_1' = v_2' = v')$$

$$EK' = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v'^2$$

$$EK = \frac{p^2}{2(m_1 + m_2)} \quad (6.14)$$

Perbandingan energi kinetik setelah tumbukan persamaan (6.14) dengan energi kinetik sebelum tumbukan persamaan (6.13) diperoleh:

$$\frac{EK'}{EK} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad (6.15)$$

Energi kinetik setelah tumbukan lebih kecil dari energi kinetik sebelum tumbukan ($EK' < EK$).

Contoh Soal:

Mobil dengan massa 500 kg bergerak dengan kecepatan tetap v . energi kinetiknya $EK = 100.000$ joule. Tentukan momentum dan kecepatan tersebut v (dengan satuan km/jam).

Jawab:

Hubungkan EK dengan p adalah :

$$EK = \frac{p^2}{2 m_1}$$

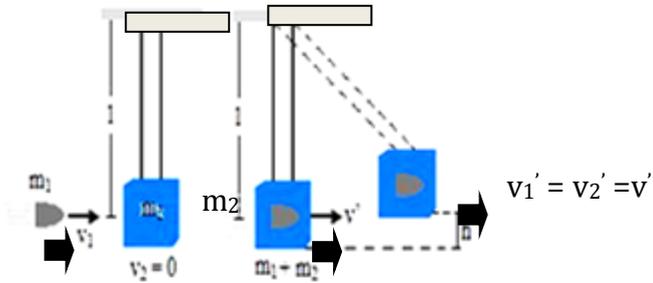
$$P = \sqrt{2 m_1 \cdot EK}$$

$$P = m_1 \cdot v$$

$$\sqrt{2 m_1 \cdot EK} = m_1 \cdot v$$

$$v = \frac{\sqrt{2 m_1 \cdot EK}}{m_1} = \frac{\sqrt{2 (500) \cdot (100000)}}{500} = \frac{10000}{500} = 20 \text{ m/s}$$

Suatu tumbukan dikatakan Tumbukan Tidak Lenting sama sekali apabila dua benda yang bertumbukan bersatu atau saling menempel setelah tumbukan. Salah satu contoh populer dari tumbukan tidak lenting sama sekali adalah pendulum balistik. Pendulum balistik merupakan sebuah alat yang sering digunakan untuk mengukur laju proyektil, seperti peluru. Sebuah balok besar yang terbuat dari kayu atau bahan lainnya digantung seperti pendulum. Setelah itu, sebutir peluru ditembakkan pada balok tersebut dan biasanya peluru tertanam dalam balok. Sebagai akibat dari tumbukan tersebut, peluru dan balok bersama-sama terayun ke atas sampai ketinggian tertentu (ketinggian maksimum). Lihat gambar di bawah ini.



Dari persamaan (6.11)

$$m_1 v_1 = (m_1 + m_2) v'$$

$$v_1 = \frac{m_1 + m_2}{m_1} v' \quad (6.16)$$

Dari persamaan hukum kekekalan energi mekanik persamaan (5.16) diperoleh:

$$m_1 g h_1 + \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = m_2 g h_2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 - \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = m_2 g h_2 - m_1 g h_1$$

Untuk kecepatan setelah tumbukan adalah sama yaitu v' dan ketinggian $h_1 = h_2 = h$. Maka diperoleh:

$$\frac{1}{2} (m_1 + m_2) (v')^2 = (m_2 + m_1) g h$$

$$\frac{1}{2} (v')^2 = g h$$

$$v' = \sqrt{2 g h} \quad (6.17)$$

Selanjutnya substitusikan persamaan (6.16) dengan (6.17), maka diperoleh kecepatan peluru:

$$v_1 = \frac{m_1 + m_2}{m_1} \sqrt{2 g h}$$

atau

$$v_P = \frac{m_P + m_B}{m_P} \sqrt{2 g h} \quad (6.18)$$

Keterangan:

$v_P = v_1$ = kecepatan peluru (m/s)

$v_B = v_2 = 0$ = kecepatan Balok (diam)

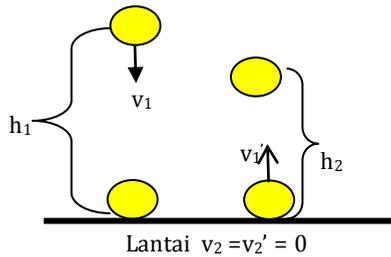
$m_P = m_1$ = massa peluru (kg)

$m_B = m_2$ = massa balok (kg)

h = ketinggian (m)

c. Tumbukan lenting sebagian

Pada tumbukan lenting sebagian, Hukum Kekekalan Energi Kinetik tidak berlaku karena ada perubahan energi kinetik terjadi ketika pada saat tumbukan. Perubahan energi kinetik bisa berarti terjadi pengurangan Energi Kinetik atau penambahan energi kinetik. Pengurangan energi kinetik terjadi ketika sebagian energi kinetik awal diubah menjadi energi lain, seperti energi panas, energi bunyi dan energi potensial. Hal ini yang membuat total energi kinetik akhir lebih kecil dari total energi kinetik awal⁵⁰. Kebanyakan tumbukan yang kita temui dalam kehidupan sehari-hari termasuk dalam jenis ini, di mana total energi kinetik akhir lebih kecil dari total energi kinetik awal. Tumbukan antara kelereng, tabrakan antara dua kendaraan, bola yang dipantulkan ke lantai dan lenting ke udara, dll. Sebaliknya, energi kinetik akhir total juga bisa bertambah setelah terjadi tumbukan. Hal ini terjadi ketika energi potensial (misalnya energi kimia atau nuklir) dilepaskan.



Misalkan benda 1 dijatuhkan dari ketinggian h_1 dengan kecepatan $v_1 = -\sqrt{2gh}$, dan benda pertama memantul dengan ketinggian h_2 , maka kecepatan setelah tumbukan $v_1' = +\sqrt{2gh}$. dari persamaan (6.10) diperoleh:

$$e = -\frac{(v_2' - v_1')}{(v_2 - v_1)} = 1$$

$$e = -\frac{(0 - \sqrt{2gh_2})}{(0 - (-\sqrt{2gh_1}))} = 1$$

$$e = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad (6.19)$$

untuk nilai koefisien restitusi e pada tumbukan lenting sebagian adalah terletak $0 < e < 1$.

⁵⁰ Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid 1 (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

Contoh Soal 6.2:

1. Dua buah benda A dan B masing-masing bermassa 2 kg dan 4 kg bergerak saling mendekat dengan kecepatan berturut-turut 4 m/s dan 3 m/s. Setelah tumbukan, massa A bergerak berlawanan dengan arah semula dengan kecepatan 5 m/s. tentukan:
- Kecepatan benda B setelah tumbukan
 - Koefisien restitusinya
 - Energi kinetik sistem yang hilang selama tumbukan

Jawab:

Diketahui : $m_A = 2 \text{ kg}$ dan $v_A' = -5 \text{ m/s}$

$$m_B = 4 \text{ kg}$$

$$v_A = 4 \text{ m/s}$$

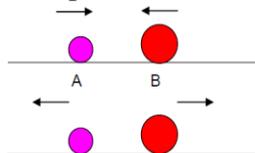
$$v_B = -3 \text{ m/s}$$

Ditanya :

- a. v_B' ? b) e ? c) ΔE_K ?

Jawab :

Ambil arah kekanan sebagai arah positif



- a. Kecepatan benda B setelah tumbukan;

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v_A' + m_B v_B'$$

$$2 \cdot 4 + 4 \cdot (-3) = 2(-5) + 4 v_B'$$

$$4 v_B' = 6 \text{ kg m/s}$$

$$v_B' = 1,5 \text{ m/s}$$

Tanda positif menyatakan bahwa arah kecepatan benda B setelah tumbukan ke kanan.

- b. Koefisien restitusi e

Ambil arah ke kanan sebagai arah positif

$$e = - \frac{(v_2' - v_1')}{(v_2 - v_1)}$$

$$e = - \frac{(1,5 - (-5))}{(-3 - 4)} = 0,93$$

- c. Energi kinetik yang hilang selama tumbukan

$$\begin{aligned}\Delta E_K &= E_{K_1} - E_{K_2} = \left(\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \right) - \left(\frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \right) \\ &= \left(\frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 4^2 + \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 3^2 \right) - \left(\frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 5^2 + \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 1,5^2 \right) \\ &= 34 - 29,5 = 4,5 \text{ joule}\end{aligned}$$

Latihan Soal 6.1

1. Zinedine Zidane menendang bola mati bermassa 0,6 kg sehingga sesaat setelah ditendang bola mempunyai kelajuan 18 m/s. Jika waktu yang kontak antara kaki dengan bola pada saat menendang adalah 0,02 sekon, tentukan gaya rata-rata yang diberikan Zidane pada bola.
2. Sebuah kelereng bermassa 20 gr menumbuk dinding dengan kelajuan 60 m/s dengan sudut pantul 30° dan memantul dengan kecepatan dan sudut yang sama. Tentukan besar dan arah impuls yang terjadi pada benda tersebut ?
3. Sebuah senapan dengan massa 2 kg mengeluarkan sebuah peluru bermassa 4 gram dengan kecepatan 750 m/s.
 - a. Hitunglah kecepatan senapan akibat tolakan tersebut
 - b. Jika senapan ditahan dengan gaya 20 N, berapa lama senapan tersebut akan diam.
4. Dua buah bola dengan massa yang sama bergerak berlawanan, masing-masing dengan kecepatan 4 m/s. Hitunglah kecepatan kedua benda tersebut jika tumbukannya:
 - a. Lenting sempurna
 - b. Tidak lenting sama sekali
 - c. Lenting sebagian $e = 0,2$
5. Benda dengan kecepatan 6 m/s berjalan dibelakang benda B yang sedang bergerak dengan kecepatan 2 m/s. massa benda A adalah 15 kg dan benda B adalah 20 kg. Hitunglah kecepatan benda tersebut setelah tumbukan, jika tumbukannya:
 - a. Lenting sempurna
 - b. Tidak lenting sama sekali
 - c. Lenting sebagian $e = 0,2$
6. Sebuah bola bermassa 0,4 kg menumbuk bola lain bermassa 0,6 kg yang sedang diam. Kecepatan bola pertama sebelum tumbukan adalah 2 m/s. Tentukan kecepatan masing-masing bola setelah tumbukan jika

tumbukan tersebut merupakan (a) tumbukan elastik (b) tidak elastik (c) elastik sebagian dengan $e = 0,5$.

7. Sebutir peluru bermassa 10 gram menumbuk bandul balistik bermassa 2 kg sehingga pusat massa bandul naik vertikal setinggi 12 cm. Tentukan kelajuan awal peluru sebelum menumbuk bandul.
8. Sebuah peluru bermassa 2 gram ditembakkan pada sebuah balok yang diam bermassa 1 kg. Koefisien gesek antara balok dan permukaannya 0,1. Peluru tersebut mengenai balok dan bersarang di dalamnya. Hitunglah kecepatan peluru ketika mengenai balok jika sistem (balok + peluru) bergerak sejauh 2 meter lalu berhenti.
9. Balok A bermassa 2 kg bergerak di bidang licin tanpa gesekan dengan kecepatan 8 m/s. Balok tersebut menabrak balok B bermassa 4 kg yang sedang bergerak dengan kecepatan 2 m/s. Sebuah pegas dengan konstanta $k = 1000$ N/m dipasang di belakang benda B seperti pada gambar. Berapa meterkah pegas akan tertekan maksimum jika kedua balok tersebut bertumbukan. (massa pegas diabaikan).



10. Sebuah kereta barang bermassa 20 ton bergerak dengan kecepatan 4 m/s menabrak sebuah benda bermassa 10 ton dengan kecepatan 2 m/s dalam arah yang sama.
 - a. Hitunglah kecepatan kereta tersebut setelah tumbukan, jika tumbukan tidak elastis
 - b. Hitunglah energi kinetik kereta yang hilang.

Daftar Pustaka

- Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid I (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga
- Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I, Terjemahan*. Jakarta: Penerbit Erlangga
- Young, Hugh D. & Freedman, Roger A. 2002. *Fisika Universitas (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga.

BAB VII

KESETIMBANGAN BENDA TEGAR

1. Pendahuluan

Konsep keseimbangan benda tegar merupakan pengetahuan dasar yang sangat penting dan mempunyai banyak penerapan dalam kehidupan sehari-hari, khususnya bidang teknik. Dalam pembahasan ini, kita tetap menganggap benda sebagai benda tegar. Suatu benda disebut sebagai benda tegar jika jarak antara setiap bagian benda itu selalu sama. Dalam hal ini, setiap benda bisa kita anggap tersusun dari partikel-partikel atau titik-titik, di mana jarak antara setiap titik yang tersebar di seluruh bagian benda selalu sama.

Dalam kenyataannya, setiap benda bisa berubah bentuk (menjadi tidak tegar), jika pada benda itu dikenai gaya atau torsi. Misalnya beton yang digunakan untuk membangun jembatan bisa bengkok, bahkan patah jika dikenai gaya berat yang besar, derek bisa patah jika beban yang diangkat melebihi kapasitasnya. Mobil bisa bungkuk kalau gaya berat penumpang melebihi kapasitasnya. Dalam hal ini benda-benda itu mengalami perubahan bentuk. Jika bentuk benda berubah, maka jarak antara setiap bagian pada benda itu tentu saja berubah atau benda menjadi tidak tegar lagi. Untuk menghindari hal ini, maka kita perlu mempelajari faktor-faktor apa saja yang dibutuhkan agar sebuah benda tetap tegar⁵¹.

2. Syarat Kesetimbangan

Benda dikatakan berada dalam kesetimbangan apabila :

- a. Benda itu sebagai satu keseluruhan tetap diam atau bergerak menurut garis lurus dengan kecepatan konstan.
- b. Benda itu tidak berotasi sama sekali atau berotasi dengan kecepatan tetap

Apabila benda dalam kesetimbangan maka resultan dari semua gaya yang bekerja pada benda tersebut sama dengan nol. Artinya :

$$\Sigma F_x = 0 \quad \text{dan} \quad \Sigma F_y = 0 \quad (7.1)$$

F_x adalah komponen-komponen gaya pada sumbu X, F_y adalah komponen-komponen gaya pada sumbu Y . Resultan vektornya :

⁵¹ Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I, Terjemahan*. Jakarta: Penerbit Erlangga

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

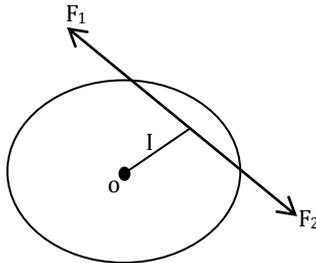
Sedangkan arahnya:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{F_y}{F_x}$$

3. Momen Gaya

Momen gaya : perkalian antara besarnya gaya dengan lengan dari gaya tersebut dengan persamaan:

$$\Gamma = F \cdot l \quad (7.2)$$



Suatu benda dikatakan dalam keadaan setimbang sempurna bila:

$$\sum F = 0 \quad \text{dan} \quad \sum \Gamma = 0$$

disini Γ adalah momen gaya F terhadap titik sembarang O . Jika gaya :

$$F = F_x \hat{i} + F_y \hat{j} + F_z \hat{k}$$

Vektor posisi titik tangkap gaya :

$$r = x \hat{i} + y \hat{j} + z \hat{k}$$

Dan momen gaya :

$$\Gamma = \Gamma_x \hat{i} + \Gamma_y \hat{j} + \Gamma_z \hat{k}$$

Maka:

$$\Gamma = r \times F$$

$$\Gamma = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ x & y & z \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix}$$

$$\Gamma = (F_z \cdot y - F_y \cdot z) \hat{i} + (F_x \cdot z - F_z \cdot x) \hat{j} + (F_y \cdot x - F_x \cdot y) \hat{k}$$

Disini:

$$\Gamma_x = (F_z \cdot y - F_y \cdot z) \hat{i}$$

$$\Gamma_y = (F_x \cdot z - F_z \cdot x) \hat{j}$$

$$\Gamma_z = (F_y \cdot x - F_x \cdot y) \hat{k}$$

Besar momen gaya Γ adalah :

$$\Gamma = |\mathbf{r} \times \mathbf{F}|$$

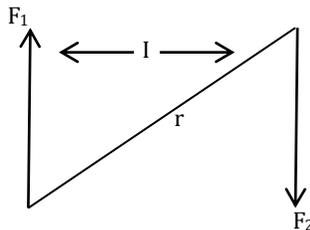
$$\Gamma = F \sin \theta$$

$$\Gamma = \mathbf{F} \cdot \mathbf{l} \quad (7.3)$$

Efek gaya F_1 ialah rotasi berlawanan arah putaran jarum jam terhadap sumbu putar di O, biasanya diberi tanda positif, sedangkan efek gaya F_2 ialah rotasi searah dengan jarum jam dan diberi tanda negatif.

Satuan momen gaya adalah Newton – meter (N-m) atau (lb-ft). Jika garis gaya F_1 dan F_2 sejajar dan tidak berimpit seperti gambar dibawah ini, maka pasangan gaya tersebut dinamakan kopel, contoh umum sebuah kopel adalah gaya-gaya pada jarum kompas di dalam medan magnet bumi.

Pada kutub utara dan selatan jarum itu bekerja gaya yang sama besar, yang satu mengarah ke utara dan yang satu mengarah ke selatan:



Momen resultan dari kopel terhadap titik sembarang O adalah :

$$C = \Sigma \Gamma$$

$$C = r_1 \times F + r_2 \times (-F)$$

$$C = (r_1 - r_2) F$$

$$C = \mathbf{r} \times \mathbf{F} \quad (7.4)$$

Dengan demikian kopel C adalah sebuah vektor yang tegak lurus bidang melalui dua gaya tersebut. Besar momen Kopel:

$$C = |\mathbf{r} \times \mathbf{F}|$$

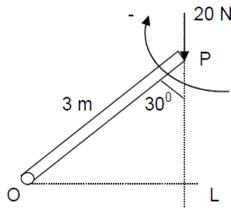
$$C = r F \sin \theta$$

$$C = \mathbf{F} \cdot \mathbf{l} \quad (7.5)$$

Sebuah benda yang padanya bekerja sebuah kopel hanya dapat dalam keadaan seimbang bila ada kopel lain yang bekerja pada benda tersebut yang besarnya sama dan berlawanan arah.

Contoh :

1. Tentukanlah momen gaya terhadap poros O oleh gaya 20 N pada gambar dibawah ini :



Jawab :

Garis kerja adalah PL, sedangkan lengan adalah OL, segitga OLP adalah siku-siku sehingga :

$$OL = OP \sin 30^\circ$$

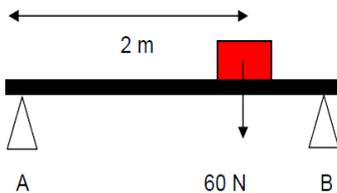
$$OL = 3 \sin 30^\circ = 1,5 \text{ m}$$

Gaya 20 N cenderung memutar tongkat OP searah jarum jam terhadap poros O, sehingga :

$$\Gamma = - F \cdot OL$$

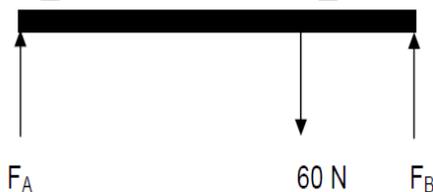
$$\Gamma = - 20 \cdot (1,5) = - 30 \text{ N}$$

2. Sebuah papan panjang 3 m dengan berat yang dapat diabaikan diam dengan ujung-ujungnya diatas pijakan. Sebuah balok 60 N berada pada papan itu 2 m dari ujung kiri dan 1 m dari ujung kanan. Brapakah gaya pada masing masing pijakan ?



Syarat setimbang:

$$\sum F = 0 \quad \text{dan} \quad \sum \Gamma = 0$$



Dengan mengambil arah keatas positif maka didapat diperoleh :

$$F_A + F_B - 60 \text{ N} = 0$$

Jika beban diambil sebagai titik putar maka momennya adalah :

$$1 \cdot F_B - 2 \cdot F_A = 0$$

$$F_B = 2 \cdot F_A$$

Dengan mempergunakan persamaan :

$$F_A + F_B - 60 \text{ N} = 0$$

Diperoleh :

$$F_A + 2 \cdot F_A - 60 \text{ N} = 0$$

$$3 F_A = 60 \text{ N}$$

$$F_A = 20 \text{ N}$$

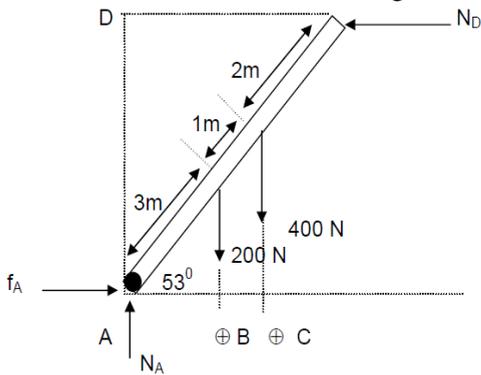
dan

$$F_B = 2 \cdot F_A$$

$$= 2 \cdot 20$$

$$= 40 \text{ N}$$

3. Sebuah tangga dengan berat 200 N bersandar pada tembok licin dan bertumpu pada lantai kasar dengan sudut 53° . Seorang tukang yang beratnya 400 N, berdiri pada tanggapada jarak 2 m dari dinding dan 4m dari lanati. Jika sistem setimbang, hitunglah gaya yang bekerja pada tembok dan lantai serta koefisien gesek tangga dengan lantai



Perhatikan gambar diatas :

Gaya-gaya pada tangga adalah :

1. gaya berat tangga : 200 N titik kerjanya ditengah-tengah tangga
2. gaya berat orang : 400 N titik kerjanya 2 m dari puncak tangga

3. gaya normal tembok N_D tegak lurus tembok

4. kompoenen gaya lantai yaitu gaya gesek f_A kekanan dan gaya normal N_A ketas

Kita ambil A sebagai poros :

$$\Sigma \Gamma = 0$$

$$+200 (BA) + 400 (CA) - N_D (DA) = 0$$

karena panjang tangga 6 m, maka diperoleh:

$$AB = \frac{1}{2} l \cos 53^\circ = \frac{1}{2} (6)(0,6) = 1,8 \text{ m}$$

$$CA = 4 \cos 53^\circ = 4 \cdot (0,6) = 2,4 \text{ m}$$

$$DA = l \sin 53^\circ = 6 \cdot (0,8) = 4,8 \text{ m}$$

Sehingga :

$$+200 (1,8) + 400 (2,4) - N_D (4,8) = 0$$

$$360 + 960 - 4,8 N_D = 0$$

$$4,8 N_D = 1320$$

$$N_D = 275 \text{ N}$$

Syarat kesetimbangan translasi :

$$\Sigma F_x = 0$$

$$f_A - N_D = 0$$

$$f_A = 275 \text{ N}$$

dan

$$\Sigma F_y = 0$$

$$N_A - 200 - 400 = 0$$

$$N_A = 600 \text{ N}$$

Gaya pada tembok = 275 N

$$\text{Gaya pada lantai : } F = \sqrt{f_A^2 + N_A^2} = \sqrt{275^2 + 600^2} = 660 \text{ N}$$

Koefisien gesek di A, dihitung pakai :

$$\mu_s = \frac{f_A}{N_A} = \frac{275}{600} = 0,46$$

4. Gaya-Gaya Sebidang

Gaya-gaya sebidang terletak dalam satu bidang datar, suatu sistem yang berpotongan terdiri dari gaya-gaya yang berpotongan di suatu titik

yang disebut titik perpotongan. Suatu sistem sejajar terdiri dari gaya-gaya yang berpotongan di titik tak berhingga. Suatu titik berpotongan dan tidak sejajar terdiri dari gaya-gaya yang tidak berpotongan mungkin sebuah gaya yang melalui titik perpotongan dan tidak sejajar⁵². Gaya-gaya berpotongan: gaya-gaya yang garis kerjanya berpotongan di suatu titik. Resultan R dari gaya-gaya yang berpotongan mungkin sebuah gaya yang melalui titik perpotongan atau nol. Besar vektor resultannya adalah :

$$R = \sqrt{(\sum F_x)^2 + (\sum F_y)^2}$$

Dengan arah:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sum F_y}{\sum F_x} \quad (7.6)$$

Sebuah benda berada dalam keadaan setimbang jika di bawah pengaruh gaya-gaya yang berpotongan, maka :

- Benda itu diam dan tetap diam (disebut keadaan kesetimbang statik)
- Benda itu bergerak dengan vektor kecepatan yang tetap (disebut kesetimbangan translasi).

Syarat kesetimbangan:

$$\mathbf{R} = \sum \mathbf{F} = \mathbf{0} \quad \text{atau} \quad \sum \mathbf{F}_x = \sum \mathbf{F}_y = \mathbf{0} \quad (7.7)$$

Gaya-gaya paralel: gaya - gaya yang berpotongan di suatu titik tak berhingga. Resultan gaya-gaya sejajar mempunyai arah yang sama dengan arah dengan arah gaya-gaya itu dan besarnya sama dengan jumlah besar gaya - gaya tadi. Gaya resultan ini mungkin :

- Sebuah gaya R yang sejajar dengan sistem
- Suatu kopel
- Nol

Jika sistem paralel ini sejajar dengan sumbu Y maka : $R = \sum F$ dan $R \cdot \bar{x} = \sum \Gamma_0$ disini \bar{x} adalah jarak tegak lurus dari pusat momen O ke resultan R dan besarnya:

$$\bar{x} = \frac{\sum \Gamma_0}{\sum F}$$

$$\frac{x_1 \cdot F_1 + x_2 \cdot F_2 + x_3 \cdot F_3 + \dots + x_n \cdot F_n}{F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n}$$

Jika $\sum F = 0$, kopel resultan jika ada besarnya sama dengan :

$$\bar{C} = \sum \Gamma_0 = R \cdot \bar{x}$$

⁵² Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid 1 (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

Gaya – gaya yang tidak berpotongan dan tidak sejajar adalah gaya – gaya yang garis kerjanya tidak berpotongan di satu titik dan tidak sejajar. Gaya resultan sistem mungkin :

- a. Gaya tunggal \bar{R}
- b. Suatu kopel dalam bidang sitem atau bidang sejajar
- c. Nol

Secara aljabar :

$$R = \sqrt{(\sum F_x)^2 + (\sum F_y)^2}$$

Dengan arah:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sum F_y}{\sum F_x}$$

Di sini θ_x adalah sudut antara resultan \bar{R} dengan sumbu x positif.

Garis kerja gaya resultan \bar{R} di peroleh dari persamaan :

$$\bar{R} \cdot \bar{a} = \Sigma \Gamma_0$$

Disini \bar{a} adalah jarak tegak lurus pusat momen O terhadap gaya resultan \bar{R} . Sitem gaya yang bekerja pada benda tegar pada umumnya sitem tidak berpotongan dan tidak sejajar. Syarat kesetimbangan benda tegar di bawah pengaruh gaya – gaya bidang adalah :

$$\Sigma F = 0$$

$$\text{atau } \Sigma F = \Sigma F_x = \Sigma F_y = \Sigma F_z = 0 \quad \text{dan} \quad \Sigma \Gamma_0 = 0$$

5. Pusat Massa

Pada sistem benda titik tiap anggota sistem mempunyai massa, maka massa dari sitem benda titik adalah jumlah dari massa-massa anggota sistem dan letak dari massa total ini adalah pada pusat massanya. Pusat massa adalah titik tangkap dari resultan gaya–gaya berat pada setiap anggota sistem, yang jumlah momen gayanya terhadap titik tangkap ini (pusat massa) sama dengan nol. Dikatakan juga bahwa pusat massa adalah sebuah titik pada sitem benda titik yang bila dikerjakan gaya luar akan mengakibatkan benda bergerak translasi murni. Setiap benda titik mengalami gaya tarik bumi dengan gaya $w = mg$ disebut gaya berat, arah gaya ini menuju pusat bumi, gaya ini akan berpotongan di tempat yang jauh sekali, arahnya dapat dikatakan sejajar⁵³. Jadi :

$$W_{\text{sistem}} = \sum m \cdot g$$

⁵³ Young, Hugh D. & Freedman, Roger A. 2002. *Fisika Universitas (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

$$\bar{r}_{pm} = \frac{\sum m_i \cdot g \cdot \bar{r}_i}{\sum m_i \cdot g}$$

$$\bar{r}_{pm} = \frac{\sum m_i \cdot \bar{r}_i}{\sum m_i}$$

atau ditulis menurut komponen-komponennya :

$$\bar{x}_{pm} = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i}$$

$$\bar{y}_{pm} = \frac{\sum m_i \cdot y_i}{\sum m_i}$$

$$\bar{z}_{pm} = \frac{\sum m_i \cdot z_i}{\sum m_i}$$

(x_{pm}, y_{pm}, z_{pm}) , adalah koordinat dari pusat massa. Perhatikan :

$$\bar{v}_{pm} = \frac{d}{dt} \bar{r}_{pm} = \frac{d}{dt} \frac{\sum m_i \cdot \bar{r}_i}{\sum m_i}$$

$$\bar{v}_{pm} = \frac{m_i \left(\frac{d}{dt} \bar{r}_i \right) \sum (m_i \cdot \bar{v}_i)}{\sum m_i \cdot \sum m_i}$$

$$\bar{a}_{pm} = \frac{d}{dt} \bar{v}_{pm} = \frac{d}{dt} \frac{\sum m_i \cdot \bar{v}_i}{\sum m_i}$$

$$\bar{a}_{pm} = \frac{m_i \left(\frac{d}{dt} \bar{v}_i \right) \sum (m_i \cdot \bar{a}_i)}{\sum m_i \cdot \sum m_i}$$

untuk benda rigid :

$$\lim_{\Delta m \rightarrow 0} \sum_{i=1}^{\infty} \Delta m_i = \int dm$$

yang terdiri dari banyak sekali titik-titik massa. Jadi koordinat titik massa benda rigid:

$$x_{pm} = \int \frac{x \cdot dm}{dm}, \quad y_{pm} = \int \frac{y \cdot dm}{dm}, \quad \text{dan} \quad z_{pm} = \int \frac{z \cdot dm}{dm}$$

$dm = \rho \cdot dv$, $dm = \sigma \cdot dA$, atau $dm = \lambda \cdot dl$. Jika :

ρ = massa persatuan volume (v)

σ = massa persatuan luas (A)

λ = massa persatuan panjang (l)

Jadi kordinat titik pusat massa juga dapat ditulis sebagai berikut :

$$x_{pm} = \int \frac{x \cdot dv}{v}, \quad \text{atau} \quad x_{pm} = \int \frac{x \cdot dA}{A}, \quad \text{atau} \quad x_{pm} = \int \frac{x \cdot dl}{l}$$

$$y_{pm} = \int \frac{y \cdot dv}{v}, \quad \text{atau} \quad y_{pm} = \int \frac{y \cdot dA}{A}, \quad \text{atau} \quad y_{pm} = \int \frac{y \cdot dl}{l},$$

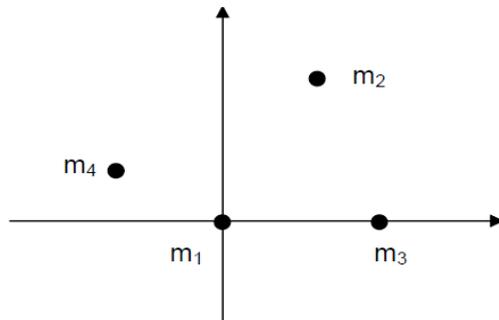
$$z_{pm} = \int \frac{z \cdot dv}{v}, \quad \text{atau} \quad z_{pm} = \int \frac{z \cdot dA}{A}, \quad \text{atau} \quad z_{pm} = \int \frac{z \cdot dl}{l},$$

Jika benda rigid yang homogen mempunyai bentuk simetri, pusat massa akan berimpit dengan pusat simetrinya, misalnya bola, parallelipedum (balok), kubus, dan lain-lain. Jika benda rigid yang homogen mempunyai sumbu simetri misalnya kerucut, silinder, maka pusat massanya akan berada pada sumbu simetrinya.

Contoh Soal:

1. Tentukanlah letak titik pusat massa dari system benda titik yang terdiri dari $m_1 = 5$ kg pada $(0,0)$, $m_2 = 30$ kg pada $(15,20)$, $m_3 = 20$ kg pada $(30,0)$ dan $m_4 = 15$ kg pada $(-15,10)$, dalam cm.

Jawab:

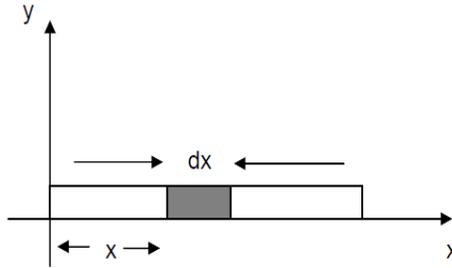


$$m = \sum m_i = (5 + 30 + 20 + 15) = 70 \text{ kg}$$

$$\bar{x}_{pm} = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i} = \frac{(5 \cdot 0) + (30 \cdot 15) + (20 \cdot 30) + (15 \cdot -15)}{70} = 11,8 \text{ cm}$$

$$\bar{y}_{pm} = \frac{\sum m_i \cdot y_i}{\sum m_i} = \frac{(5 \cdot 0) + (30 \cdot 20) + (20 \cdot 0) + (15 \cdot 10)}{70} = 10,7 \text{ cm}$$

2. Tentukanlah letak titik pusat massa sebuah tongkat yang panjangnya l dan massanya m



Kita pilih sumbu x pada panjang tongkat (0,0) di ujung tongkat . Ambil dm yang panjangnya dx pada jarak x dari (0,0). Pusat massa berada pada : $y_{pm} = 0$, sehingga yang dicari hanyalah x_{pm} :

$$x_{pm} = \int \frac{x \cdot dm}{dm}$$

Di mana : $dm = \lambda \cdot dx$, dan $\lambda = \frac{m}{l}$, sehingga:

$$x_{pm} = \frac{1}{m} \int x \cdot \lambda \cdot dx$$

$$x_{pm} = \frac{\lambda}{m} \int_0^l x \cdot dx$$

$$x_{pm} = \frac{\lambda}{m} \frac{1}{2} x^2$$

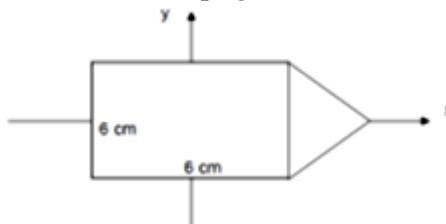
$$x_{pm} = \frac{\lambda}{m} \frac{1}{2} l^2$$

$$x_{pm} = \frac{l}{m} \frac{1}{2} l^2$$

$$x_{pm} = \frac{1}{2} l$$

Jadi pusat massa berada ditengah-tengah batang.

3. Tentukanlah pusat massa dari keping berikut :



$$\bar{x}_{pm} = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i} = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2}{m_1 + m_2}$$

$$m_1 = m, \quad x_1 = 0, \quad m_2 = \frac{1}{4}m, \quad \text{dan} \quad x_2 = 4 \text{ cm}$$

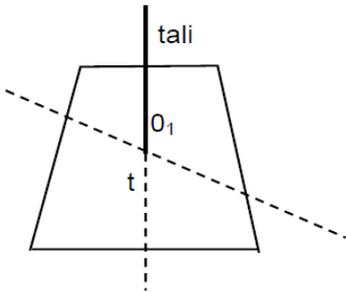
Jadi:

$$\bar{x}_{pm} = \frac{m \cdot 0 + \frac{1}{4}m \cdot 4}{m + \frac{1}{4}m}$$

$$\bar{x}_{pm} = \frac{m}{\frac{5}{4}m} = \frac{4}{5} \text{ cm}$$

6. Titik Berat

Titik berat adalah titik-titik yang dilalui oleh garis kerja dari resultan gaya berat sistem benda titik, berarti merupakan titik potong dari garis kerja gaya berat bila letak dari sistem ini berubah-ubah. Misal benda rigid seperti gambar dibawah ini : Titik berat adalah titik-titik yang dilalui oleh garis kerja dari resultan gaya berat sistem benda titik, berarti merupakan titik potong dari garis kerja gaya berat bila letak dari sistem ini berubah-ubah. Misal benda rigid seperti gambar di bawah ini :



Sebuah benda rigid digantung dengan pusat O , maka garis vertikal melalui O adalah tempat kedudukan titik berat benda. Jika digantung pada tempat yang berlainan maka akan mempunyai titik berat yang berbeda. Koordinat titik berat benda dirumuskan sebagai: Sebuah benda rigid digantung dengan pusat O , maka garis vertikal melalui O adalah tempat kedudukan titik berat benda. Jika digantung pada tempat yang berlainan maka akan mempunyai titik berat yang berbeda. Koordinat titik berat benda dirumuskan sebagai :

$$x_z = \frac{\sum w_i \cdot x_i}{\sum w_i} = \frac{\sum m_i \cdot g \cdot x_i}{\sum m_i \cdot g} = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i}$$

$$y_z = \frac{\sum w_i \cdot y_i}{\sum w_i} = \frac{\sum m_i \cdot g \cdot y_i}{\sum m_i \cdot g} = \frac{\sum m_i \cdot y_i}{\sum m_i}$$

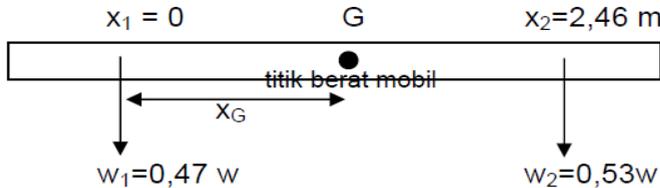
$$z_z = \frac{\sum w_i \cdot z_i}{\sum w_i} = \frac{\sum m_i \cdot g \cdot z_i}{\sum m_i \cdot g} = \frac{\sum m_i \cdot z_i}{\sum m_i}$$

$$x_z = \frac{\int x \cdot dw}{\int dw}, \quad y_z = \frac{\int y \cdot dw}{\int dw}, \quad \text{dan} \quad z_z = \frac{\int z \cdot dw}{\int dw}$$

Titik berat dan titik pusat massa mempunyai koordinat yang sama, berarti titik ini berimpit. Hal ini benar bila benda atau system berada dekat dengan permukaan bumi. Untuk benda-benda yang jauh dari permukaan bumi titik berat letaknya berubah, lebih dekat ke arah bumi dari pada pusat massa, yang selalu tetap letaknya dimana pun benda itu berada.

Contoh :

1. Sebuah mobil sedan memiliki 53% berat pada roda depan dan 47% berat pada roda belakang. Jarak antara poros depan dan belakang adalah 2,46 m. Yang berarti gaya normal pada kedua roda depan adalah 0,53 w dan pada roda belakang adalah 0,47 w, dimana w adalah berat total mobil. Berapa jauh titik berat mobil tersebut dari poros belakang ?

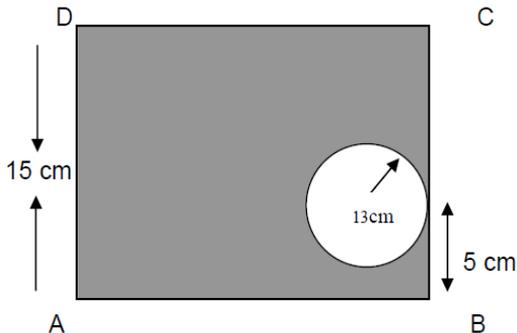


titik berat mobil x_G dapat ditentukan dengan :

$$x_z = \frac{\sum w_i \cdot x_i}{\sum w_i} = \frac{w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2}{w_1 + w_2} = \frac{0,47 \cdot w (0) + 0,53 \cdot w (2,46)}{0,47 w + 2,46 w}$$

$$x_z = \frac{0 + 0,53 w (2,46)}{w} = 1,30 \text{ meter}$$

2. Tentukanlah titik berat benda yang dihitamkan terhadap titik potong diagonal bidang ABCD.



Penyelesaian :

Untuk benda homogen yang berbentuk luasan dapat kitanyatakan dalam luas partikel :

$$M_i = \rho \cdot V_i = \rho \cdot A_i \cdot t$$

ρ = massa jenis

t = tebal benda

$$\begin{aligned}x_G &= \frac{\sum w_i \cdot x_i}{\sum w_i} \\&= \frac{\sum (\rho \cdot A_i \cdot t) x_i}{\sum \rho \cdot A_i \cdot t} \\&= \frac{\sum A_i \cdot x_i}{\sum A_i} \\y_G &= \frac{\sum A_i \cdot y_i}{\sum A_i}\end{aligned}$$

Jawab :

Untuk luas benda yang di hitamkan adalah luas ABCD dikurang luas lingkaran.

Bidang ABCD :

$$A_1 = AB \times BC$$

$$= 15 \times 15 = 225 \text{ cm}^2$$

$$x_1 = 0$$

$$y_1 = 0$$

Bidang lingkaran :

$$A_2 = \pi \cdot r^2 = (3,14) \cdot (3)^2 = 9\pi$$

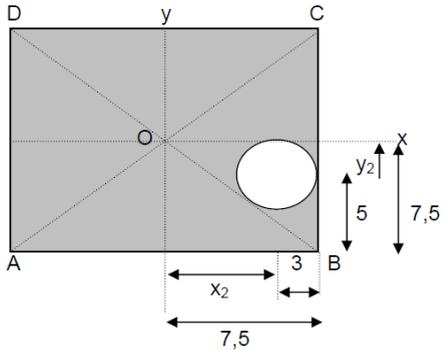
$$x_2 = 7,5 - 3 = 4,5$$

$$y_2 = -(7,5 - 5) = -2,5$$

Maka tita berat benda yang dihitamkan terhadap titik O adalah :

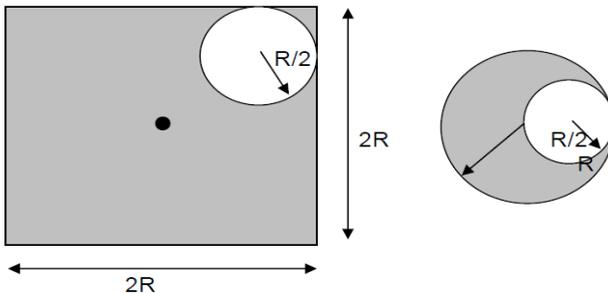
$$\begin{aligned}
 x_G &= \frac{\sum A_i \cdot x_i}{\sum A_i} \\
 &= \frac{A_1 \cdot x_1 - A_2 \cdot x_2}{A_1 - A_2} \\
 &= \frac{(225) \cdot (0) - (9\pi) \cdot (4,5)}{225 - 9\pi} \\
 &= -0,65 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_G &= \frac{\sum A_i \cdot y_i}{\sum A_i} \\
 &= \frac{A_1 \cdot y_1 - A_2 \cdot y_2}{A_1 - A_2} \\
 &= \frac{(225)(0) - (9\pi)(-2,5)}{225 - 9\pi} \\
 &= 0,36
 \end{aligned}$$



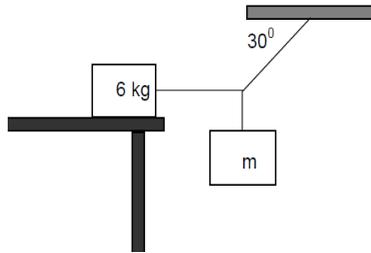
Latihan Soal:

1. Sebuah bidang persegi memiliki suatu lubang lingkaran dengan pusat lubang berlokasi pada $(R/2, R/2)$ seperti ditunjukkan pada gambar berikut. Tentukan letak pusat massa terhadap pusat lingkaran.

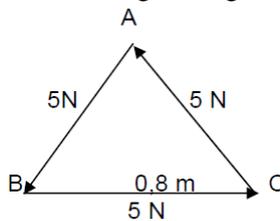


2. Sebuah cakram serba sama dengan jari-jari R memiliki sebuah lubang lingkaran dengan jari-jari $R/2$ seperti ditunjukkan pada gambar di atas. Tentukan letak pusat massa terhadap pusat cakram tanpa lubang.
3. Sistem pada gambar di bawah berada dalam keseimbangan. Gaya gesekan maksimum pada balok adalah 15 N. Tentukanlah:
 - a. koefisien gesekan antara meja dan balok

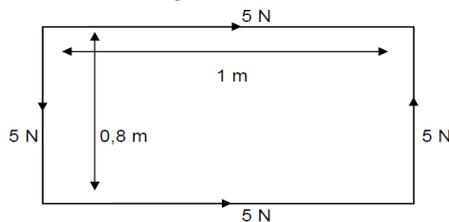
b. nilai maksimum m



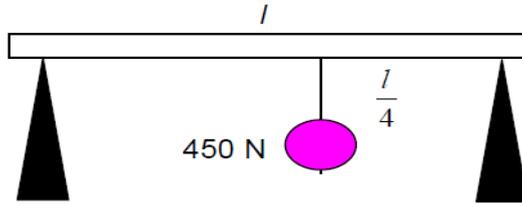
4. Suatu rangka baja yang berbentuk segitiga sama sisi, dengan sisi 0,8 m, digantung pada titik A, seperti pada gambar. Gaya-gaya sama besar (5 N) bekerja sepanjang ketiga sisi segitiga. Bagaimanakah efek resultan ketiga gaya itu terhadap keseimbangan rangka baja?



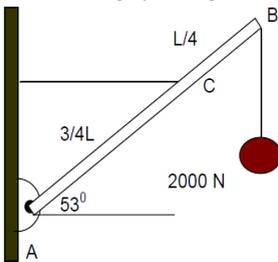
5. Gambar di bawah ini menunjukkan empat buah gaya bekerja sepanjang keliling suatu lembaran logam segi empat yang ukurannya 1,0 m x 0,8 m.
- Buktikan bahwa lembaran berada dalam keadaan seimbang.
 - Jika salah satu gaya 4 N dibalik arahnya, berapa besar resultan torsi pada lembaran logam?



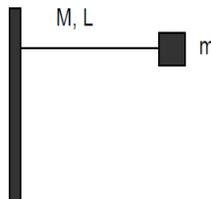
6. Pada batang homogen AB seberat 200 N digantungkan beban 450 N (lihat gambar). Tentukan besar gaya yang dilakukan penyangga pada batang.



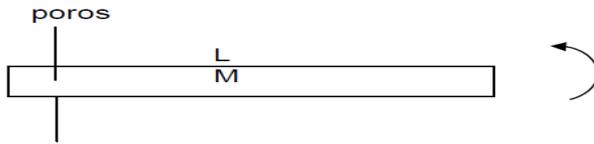
7. Batang AB , beratnya 400 N . Engsel ditempatkan di A , dan di titik C diikat pada tembok dengan seutas tali tak bermassa. Jika sistem seimbang, hitunglah:
- tegangan tali
 - besar gaya engsel ($\sin 53^\circ = 0,8$)



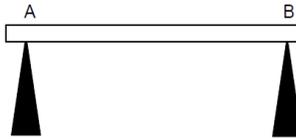
8. Batang tipis panjang (massa M , panjang L) pada ujung kanannya dilekatkan sebuah balok kecil bermassa m . Ujung kiri batang dipasang pada sebuah dinding dengan suatu titik sambung, yang bertindak sebagai suatu poros di mana batang dapat berputar. Batang dibebaskan dari keadaan diam dari posisi mendatar seperti ditunjukkan pada gambar. Batang mengayun ke bawah dan menumbuk dinding Berapakah kelajuan sudut sesaat menumbuk?



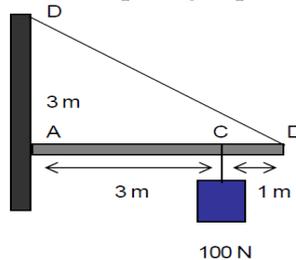
9. Sebuah batang tipis homogen dengan panjang L dan massa M bebas berputar terhadap suatu poros pada salah satu ujungnya, seperti tampak pada gambar. Batang dibebaskan dari keadaan diam dalam posisi horizontal.
- Berapa percepatan sudut awal batang?
 - Berapa percepatan tangensial awal titik pada ujung batang?



10. Sebuah bola pejal bermassa $0,036 \text{ kg}$ dan jari-jari $1,2 \text{ cm}$ menggelinding menuruni suatu bidang miring. Bola pejal itu mula-mula bergerak dengan kecepatan $0,50 \text{ m/s}$. Berapa kecepatan bola itu ketika ketinggiannya berkurang 14 cm ? (Percepatan gravitasi $g = 10 \text{ m/s}^2$).
11. Jarak sumbu roda depan dan sumbu roda belakang suatu mobil adalah $3,0 \text{ m}$. Bila 60 persen dari berat berada pada roda-roda depan, pada jarak berapa dari roda depan letak dari pusat gravitasinya?
12. Sebuah tangga yang panjangnya 20 ft dan beratnya 200 pon diangkat oleh dua orang. Bila seorang dapat mengangkat maksimum 80 pon dan pada sebuah ujungnya, di mana orang lainnya harus mengangkat?
13. Anda diberi (a) sebuah batang meteran yang telah diberi beberapa buah lubang sehingga pusat gravitasinya tidak pada titik tengahnya, (b) pisau, untuk meletakkan batang meteran, (c) benda yang beratnya w , dan (d) segulung benang. Hanya dengan menggunakan perlengkapan tersebut, jelaskan, dengan menggunakan bagan, bagaimana anda menentukan berat batang meteran.
14. Suatu papan serbasama panjang 15 m , berat 400 N , terletak secara simetris di atas dua buah penyangga yang jaraknya 8 m , seperti pada Gambar 8-1 1. Seorang anak yang beratnya 640 N berjalan mulai dari titik A ke kanan.
 - a. Dalam sebuah bagan lukiskan dua buah grafik yang menunjukkan gaya-gaya ke atas F_A dan F_B pada papan di titik A dan B , sebagai fungsi dari koordinat x dari anak tadi. Ambil $1 \text{ inci} = 250 \text{ N}$ ke atas, dan $1 \text{ inci} = 2,5 \text{ m}$ mendatar.
 - b. Dari bagan anda tentukan berapa jauh dari titik B anak tadi dapat berjalan sebelum papan terjungkit.
 - c. Berapa jauh dari ujung kanan papan penyangga B harus ditempatkan agar anak tadi dapat sampai ke ujung papan tanpa menyebabkan papan terjungkit?

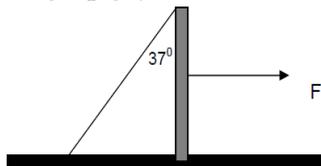


15. Pada Gambar di bawah tentukan tegangan pada kabel BD dan komponen mend serta tegak dari gaya oleh batang AB di titik A , dengan menggunakan:
- syarat pertama dan kedua dari kesetimbangan ($\sum F_x = 0$, $\sum F_y = 0$, $\sum M = 0$). dengan mengambil momen terhadap sumbu melalui titik A tegak lurus pada bidang bagan.
 - hanya syarat kedua dari kesetimbangan, dengan mengambil momen mula-mula hadap A , kemudian terhadap sumbu yang melalui B , dan akhirnya terhadap sumbu, yang melalui D . Berat batang dapat diabaikan.
 - Tunjukkan gaya-gaya yang dihitung dengan vektor pada bagan berskala, dan tunjukkan bahwa garis kerja dari gaya-gaya pada batang di titik A , B , dan C berpotongan pada satu titik.



16. Suatu batang mendatar yang panjangnya 4 m salah satu ujungnya diberi engsel pada dinding tegak, dan pada ujungnya yang lain diberi beban 500 N. Batang ditahan oleh kawat dari ujung luar ke dinding tepat di atas batang.
- Bila tegangan pada kawat tidak melebihi 1000 N, berapa jarak minimum di atas batang kawat tadi harus diikatkan pada dinding?
 - Berapa newton bertambahnya tegangan bila kawat dihubungkan pada suatu titik 0,5 m di bawah titik tadi, batang tetap mendatar? Abaikan berat batang.
17. Sebuah bola yang massanya 1 kg menempel pada ujung batang ringan yang panjangnya 0,4 m dan pada ujung yang lain menempel bola kedua yang massanya 3 kg. Di mana pusat gravitasi sistem?

18. Tiga buah benda kecil yang massanya sama terletak pada bidang- x , y , pada titik dengan koordinat $(0,1, 0)$, $(0, 0,1)$, $(0,1, 0,1)$. Tentukan koordinat pusat gravitasi. Dapatkah anda menggunakan sifat simetri dari keadaan untuk menyederhanakan perhitungan anda?
19. Seseorang yang massanya 80 kg berdiri pada jarak 1 m dari salah satu ujung kakanu yang panjangnya 5 m, massanya 40 kg, mula-mula diam. Ia berjalan menuju ke ujung yang lain hingga pada jarak 1 m dari ujung tersebut. Dengan anggapan bahwa pusat gravitasi sistem tidak bergerak, berapa jauh kanu bergerak?
20. Suatu kereta yang massanya 2000 kg mempunyai jarak sumbu roda depan dengan sumbu roda belakang 3,0 m. Biasanya pada roda-roda depan terdapat beban 1100 kg dan pada roda-roda belakang 900 kg. Sekarang beban 200 kg diletakkan pada bagian belakang kereta, 1,0 m di belakang sumbu roda belakang. Berapa beban total yang ada pada roda-roda depan? dan pada roda-roda belakang?
21. Salah satu ujung sebuah tonggak yang beratnya 500 N terletak pada permukaan mendatar yang kasar dengan $\mu_s = 0,3$. Ujung atasnya ditahan dengan tali yang dihubungkan dengan permukaan dan membentuk sudut 37° dengan tonggak, seperti pada Gambar 8-22. Tonggak diberi gaya mendatar F seperti pada gambar.
- Bila titik tangkap gaya F pada titik tengah tonggak, berapa harga terbesar yang dapat dipunyainya tanpa menyebabkan tonggak tergelincir?
 - Berapa besar gaya, tanpa menyebabkan tonggak tergelincir, bila titik tangkapnya adalah $0,7$ panjang tonggak dari tanah?
 - Buktikan bahwa bila titik tangkap gaya terlalu tinggi, tonggak tidak dapat tergelincir, betapapun besarnya gaya. Tentukan tinggi kritis untuk titik tangkap gaya.



22. Suatu daun pintu lebarnya 1,0 m dan tingginya 2,5 m berat 200 N dan ditahan oleh dua buah engsel, yang satu 0,5 m dari tepi atas dan lainnya 0,5 m dari tepi bawah. Setiap engsel menahan setengah dari

berat total daun pintu. Dengan anggapan bahwa pusat gravitasi daun pintu terletak pada tengah-tengahnya, tentukan:

- a. komponen-komponen gaya pada pintu oleh masing-masing engsel;
- b. besar dan arah gaya yang dilakukan oleh masing-masing engsel.

Daftar Pustaka

Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid I (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I, Terjemahan*. Jakarta: Penerbit Erlangga

Tipler, P.A.1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid I (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

Young, Hugh D. & Freedman, Roger A. 2002. *Fisika Universitas (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

BAB VIII

ELASTISITAS DAN GERAK HARMONIK SEDERHANA

1. Pendahuluan

Ketika menarik karet mainan sampai batas tertentu, karet tersebut bertambah panjang. Jika tarikanmu dilepaskan, maka karet akan kembali ke panjang semula. Demikian juga ketika merentangkan pegas, pegas tersebut akan bertambah panjang. Tetapi ketika dilepaskan, panjang pegas akan kembali seperti semula. Mengapa demikian? hal itu disebabkan karena benda-benda tersebut memiliki sifat elastis. ***Elastis atau elastsisitas adalah kemampuan sebuah benda untuk kembali ke bentuk awalnya ketika gaya luar yang diberikan pada benda tersebut dihilangkan***⁵⁴. Jika sebuah gaya diberikan pada sebuah benda yang elastis, maka bentuk benda tersebut berubah. Untuk pegas dan karet, yang dimaksudkan dengan perubahan bentuk adalah pertambahan panjang. Perlu anda ketahui bahwa gaya yang diberikan juga memiliki batas-batas tertentu. Sebuah karet bisa putus jika gaya tarik yang diberikan sangat besar, melawati batas elastisitasnya. Demikian juga sebuah pegas tidak akan kembali ke bentuk semula jika diregangkan dengan gaya yang sangat besar. Jadi benda-benda elastis tersebut memiliki batas elastisitas. Batas elastis itu apa? lalu bagaimana kita bisa mengetahui hubungan antara besarnya gaya yang diberikan dan perubahan panjang minimum sebuah benda elastis agar benda tersebut bisa kembali ke bentuk semula? untuk menjawab pertanyaan ini, dengan menggunakan Hukum Hooke.

2. Elastisitas

Pernyataan di atas, bila suatu benda dikenai sebuah gaya dan kemudian gaya tersebut dihilangkan, maka benda akan kembali ke bentuk semula, berarti benda itu adalah benda elastis. Namun pada umumnya benda bila dikenai gaya tidak dapat kembali ke bentuk semula walaupun gaya yang bekerja sudah hilang. Benda seperti ini disebut benda plastis. Contoh benda elastis adalah karet ataupun pegas. Bila pegas ditarik

⁵⁴ Anonim. 1999. *Belajar Fisika Lebih Mudah dan Menyenangkan*. <http://www.edukasi.net/>. Diakses tanggal 30 Juni 2009.

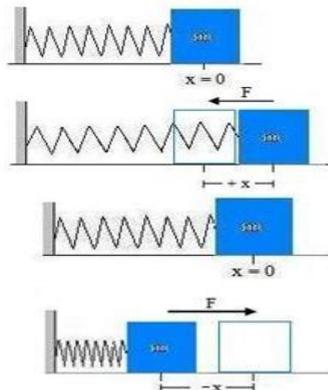
melebihi batasan tertentu maka benda itu tidak akan elastis lagi. Lalu bagaimanakah hubungan pertambahan panjang dengan gaya tarik?

3. Hukum Hooke Pada Pegas

Misalnya kita tinjau pegas yang dipasang horisontal, di mana pada ujung pegas tersebut dikaitkan sebuah benda bermassa m . Massa benda kita abaikan, demikian juga dengan gaya gesekan, sehingga benda meluncur pada permukaan horisontal tanpa hambatan. Terlebih dahulu kita tetapkan arah positif ke kanan dan arah negatif ke kiri. Setiap pegas memiliki panjang alami, jika pada pegas tersebut tidak diberikan gaya. Pada keadaan ini, benda yang dikaitkan pada ujung pegas berada dalam posisi setimbang (lihat gambar a).



Apabila benda ditarik ke kanan sejauh $+x$ (pegas diregangkan), pegas akan memberikan gaya pemulih pada benda tersebut yang arahnya ke kiri sehingga benda kembali ke posisi setimbangnya (gambar b).



Sebaliknya, jika benda ditarik ke kiri sejauh $-x$, pegas juga memberikan gaya pemulih untuk mengembalikan benda tersebut ke kanan sehingga benda kembali ke posisi setimbang (gambar c).

Besar gaya pemulih F ternyata berbanding lurus dengan simpangan x dari pegas yang direntangkan atau ditekan dari posisi setimbang (posisi setimbang ketika $x = 0$)⁵⁵. Secara matematis ditulis:

$$F_p = -k \cdot x$$

dengan,

k = konstanta pegas

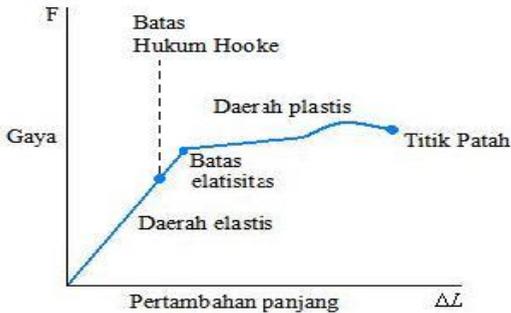
⁵⁵ Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

F_p = Gaya Pemulih (N)

x = Perpanjangan Pegas (m)

Persamaan inilah yang disebut dengan Hukum Hooke. Tanda negatif (-) dalam persamaan menunjukkan berarti gaya pemulih berlawanan arah dengan arah perpanjangan.

Besarnya gaya yang diberikan pada benda memiliki batas-batas tertentu. Jika gaya sangat besar maka regangan benda sangat besar sehingga akhirnya benda patah. Hubungan antara gaya dan pertambahan panjang (atau simpangan pada pegas) dinyatakan melalui grafik di bawah ini.



4. Elastisitas

Yang dimaksud dengan Modulus Elastisitas adalah perbandingan antara tegangan dan regangan. Modulus ini dapat disebut dengan sebutan Modulus Young.

a. Tegangan (*Stress*)

Tegangan adalah gaya per satuan luas penampang⁵⁶. Satuan tegangan adalah N/m^2 Secara matematis dapat dituliskan:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

b. Regangan (*Strain*)

Regangan adalah perbandingan antara pertambahan panjang suatu batang terhadap panjang awal mulanya bila batang itu diberi gaya. Secara matematis dapat dituliskan:

$$e = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Dari kedua persamaan di atas dan pengertian modulus elastisitas, kita dapat mencari persamaan untuk menghitung besarnya modulus elastisitas, yang tidak lain adalah:

⁵⁶ Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid 1* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

$$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta l}{l_0}} = \frac{F \cdot l_0}{A \cdot \Delta l}$$

Satuan untuk modulus elastisitas adalah N/m²

Benda Padat		Modulus Elastis (E) (N/m ²)
Baja		200 x 10 ⁹
Besi, Gips		100 x 10 ⁹
Kuningan		100 x 10 ⁹
Aluminium		70 x 10 ⁹
Marmer		50 x 10 ⁹
Granit		45 x 10 ⁹
Beton		20 x 10 ⁹
Tulang (<i>Tungkai</i>)		15 x 10 ⁹
Batu-bata		14 x 10 ⁹
Nilon		5 x 10 ⁹
Kayu (<i>pinus</i>)	<i>Sejajar dengan urat kayu</i>	10 x 10 ⁹
	<i>Tegak lurus urat kayu</i>	1 x 10 ⁹

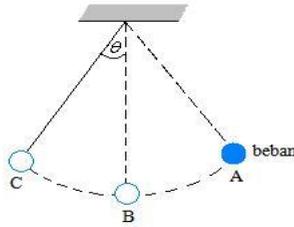
5. Gerak Harmonik Sederhana

a. Gerak harmonik

Setiap gerak yang terjadi secara berulang dalam selang waktu yang sama disebut **gerak periodik**. Karena gerak ini terjadi secara teratur maka disebut juga sebagai **gerak harmonik/harmonis**⁵⁷. Apabila suatu partikel melakukan gerak periodik pada lintasan yang sama maka geraknya disebut gerak osilasi/getaran. Bentuk yang sederhana dari gerak periodik adalah benda yang berosilasi pada ujung pegas. Karenanya kita menyebutnya gerak harmonis sederhana. Gerak harmonis sederhana yang dapat dijumpai dalam kehidupan sehari-hari adalah getaran benda pada pegas dan getaran benda pada ayunan sederhana. Kita akan mempelajarinya satu persatu.

⁵⁷ Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

1) Gerak harmonis sederhana pada ayunan



Ketika beban digantungkan pada ayunan dan tidak diberikan gaya maka benda akan diam di titik kesetimbangan B. Jika beban ditarik ke titik A dan dilepaskan, maka beban akan bergerak ke B, C, lalu kembali lagi ke A. Gerakan beban akan terjadi berulang secara periodik, dengan kata lain beban pada ayunan di atas melakukan gerak harmonik sederhana.

2) Besaran fisika pada gerak harmonik sederhana pada ayunan sederhana

Periode (T)

Benda yang bergerak harmonis sederhana pada ayunan sederhana memiliki periode alias waktu yang dibutuhkan benda untuk melakukan satu getaran secara lengkap. Benda melakukan getaran secara lengkap apabila benda mulai bergerak dari titik di mana benda tersebut dilepaskan dan kembali lagi ke titik tersebut. Pada contoh di atas, benda mulai bergerak dari titik A lalu ke titik B, titik C dan kembali lagi ke B dan A. Urutannya adalah A-B-C-B-A. Seandainya benda dilepaskan dari titik C maka urutan gerakannya adalah C-B-A-B-C.

Frekuensi (f)

Selain periode, terdapat juga *frekuensi atau banyaknya getaran yang dilakukan oleh benda selama satu detik*. Yang dimaksudkan dengan getaran di sini adalah getaran lengkap⁵⁸. Satuan frekuensi adalah 1 persekond atau s^{-1} disebut juga hertz.

⁵⁸ Mark W. Zemansky. 1994. *Fisika untuk Universitas (Mekanika, Panas, Bunyi)*. Jakarta: Bina Cipta.

Hubungan antara Periode dan Frekuensi

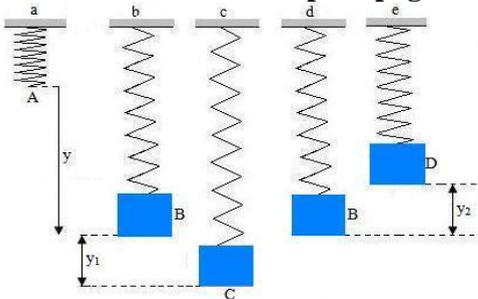
Selang waktu yang dibutuhkan untuk melakukan satu getaran adalah periode. Dengan demikian, secara matematis hubungan antara periode dan frekuensi adalah sebagai berikut :

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

Amplitudo (A)

Pada ayunan sederhana, selain periode dan frekuensi, terdapat juga amplitudo. Amplitudo adalah perpindahan maksimum dari titik kesetimbangan. Pada contoh ayunan sederhana sesuai dengan gambar di atas, amplitudo getaran adalah jarak AB atau BC.

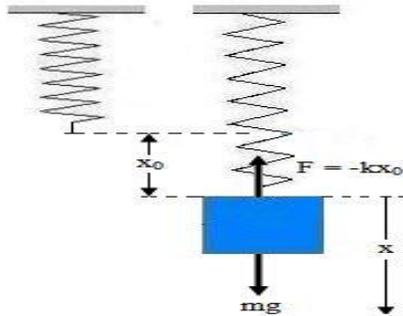
b. Gerak harmonis sederhana pada pegas



Semua pegas memiliki panjang alami sebagaimana tampak pada gambar a. Ketika sebuah benda dihubungkan ke ujung sebuah pegas, maka pegas akan meregang (bertambah panjang) sejauh y. Pegas akan mencapai titik kesetimbangan jika tidak diberikan gaya luar (ditarik atau digoyang), sebagaimana tampak pada gambar b. Jika beban ditarik ke bawah sejauh y_1 dan dilepaskan (gambar c), benda akan bergerak ke B, ke D lalu kembali ke B dan C. Gerakannya terjadi secara berulang dan periodik. Sekarang mari kita tinjau hubungan antara gaya dan simpangan yang dialami pegas.

c. Bagaimana osilasi atau getaran pada pegas yang digantungkan secara vertikal ?

Pada dasarnya osilasi atau getaran dari pegas yang digantungkan secara vertikal sama dengan getaran pegas yang diletakkan horisontal. Bedanya, pegas yang digantungkan secara vertikal lebih panjang karena pengaruh gravitasi yang bekerja pada benda (gravitasi hanya bekerja pada arah vertikal, tidak pada arah horisontal).

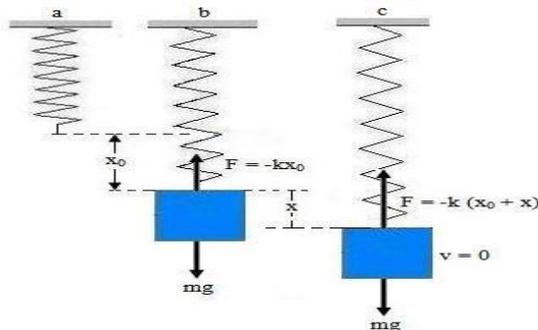


Pada pegas yang digantungkan vertikal, gravitasi bekerja pada benda bermassa yang dikaitkan pada ujung pegas. Akibatnya, walaupun tidak ditarik ke bawah, pegas dengan sendirinya meregang sejauh x_0 . Pada keadaan ini benda yang digantungkan pada pegas berada pada posisi setimbang. Berdasarkan Hukum kedua Newton, benda berada dalam keadaan setimbang jika gaya total = 0. Gaya yang bekerja pada benda yang digantung adalah gaya pegas ($F_0 = -k \cdot x_0$) yang arahnya ke atas dan gaya berat ($w = m \cdot g$) yang arahnya ke bawah. Total kedua gaya ini sama dengan nol. Mari kita analisis secara matematis.

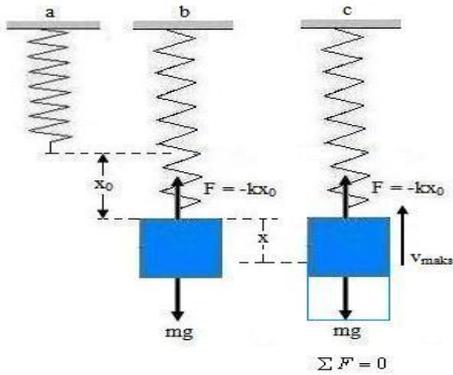
$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{g} - \mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_0 = \mathbf{0} \quad (F_0 = m \cdot g)$$

Dalam hal ini tetap menggunakan lambang x agar anda bisa membandingkan dengan pegas yang diletakkan horisontal. Anda dapat menggantikan x dengan y . Resultan gaya yang bekerja pada titik kesetimbangan = 0. Hal ini berarti benda diam atau tidak bergerak.

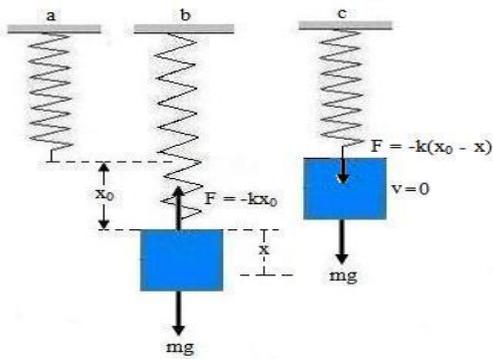
Jika kita meregangkan pegas (menarik pegas ke bawah) sejauh x , maka pada keadaan ini bekerja gaya pegas yang nilainya lebih besar dari pada gaya berat, sehingga benda tidak lagi berada pada keadaan setimbang (perhatikan gambar c di bawah).



Total kedua gaya ini tidak sama dengan nol karena terdapat pertambahan jarak sejauh x ; sehingga gaya pegas bernilai lebih besar dari gaya berat. Karena terdapat gaya pegas (gaya pemulih) yang berarah ke atas maka benda akan bergerak ke atas menuju titik setimbang. (lihat gambar di bawah ini).

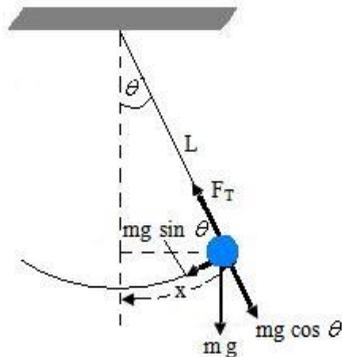


Pada titik setimbang, besar gaya total = 0, tetapi laju gerak benda bernilai maksimum (v_{maks}), sehingga benda bergerak terus ke atas sejauh $-x$. Laju gerak benda perlahan-lahan menurun, sedangkan besar gaya pemulih meningkat dan mencapai nilai maksimum pada jarak $-x$. Setelah mencapai jarak $-x$, gaya pemulih pegas menggerakkan benda kembali lagi ke posisi setimbang (lihat gambar di bawah ini). Demikian seterusnya. Benda akan bergerak ke bawah dan ke atas secara periodik. Dalam kenyataannya, pada suatu saat tertentu pegas tersebut berhenti bergerak karena adanya gaya gesekan udara.



6. Pendulum Sederhana

Contoh gerak osilasi (getaran) yang populer adalah gerak osilasi pendulum (bandul). Pendulum sederhana terdiri dari seutas tali ringan dan sebuah bola kecil (bola pendulum) bermassa m yang digantungkan pada ujung tali, sebagaimana tampak pada gambar di bawah. Dalam menganalisis gerakan pendulum sederhana, gaya gesekan udara kita abaikan dan massa tali sangat kecil sehingga dapat diabaikan relatif terhadap bola.



Gambar di atas memperlihatkan pendulum sederhana yang terdiri dari tali dengan panjang L dan bola pendulum bermassa m . Gaya yang bekerja pada bola pendulum adalah gaya berat ($w = mg$) dan gaya tegangan tali F_T . Gaya berat memiliki komponen $mg \cos \theta$ yang searah tali dan $mg \sin \theta$ yang tegak lurus tali. Pendulum berosilasi akibat adanya komponen gaya berat $mg \sin \theta$. Karena tidak ada gaya gesekan udara, maka pendulum melakukan osilasi sepanjang busur lingkaran dengan besar amplitudo tetap sama. Hubungan antara panjang busur x dengan sudut θ dinyatakan dengan persamaan:

$$x = L \cdot \theta$$

(ingat bahwa sudut θ adalah perbandingan antara jarak linear x dengan jari-jari lingkaran (r) jika dinyatakan dalam satuan radian. Karena lintasan pendulum berupa lingkaran maka kita menggunakan pendekatan ini untuk menentukan besar simpangannya. Jari-jari lingkaran pada kasus ini adalah panjang tali L)

Syarat sebuah benda melakukan Gerak Harmonik Sederhana adalah apabila gaya pemulih sebanding dengan simpangannya. Apabila gaya pemulih sebanding dengan simpangan x atau sudut θ maka pendulum melakukan Gerak Harmonik Sederhana.

Gaya pemulih yang bekerja pada pendulum adalah $-mg \sin \theta$. Secara matematis ditulis :

$$F = - m g \sin \theta$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa gaya mempunyai arah yang berlawanan dengan simpangan sudut θ . Berdasarkan persamaan ini, tampak bahwa gaya pemulih F sebanding dengan $\sin \theta$, bukan dengan θ . Maka gerakan tersebut bukan merupakan Gerak Harmonik Sederhana. Alasannya jika sudut θ kecil, maka panjang busur x ($x= L \theta$) hampir sama dengan panjang $L \sin \theta$ (garis putus-putus pada arah horisontal). Dengan demikian untuk sudut yang kecil, lebih baik kita menggunakan pendekatan : $\sin \theta \approx \theta$, sehingga persamaan gaya pemulih menjadi:

$$F = - m g \sin \theta \approx - m g \theta$$

Karena, $x= L \theta$ atau $\theta = \frac{x}{L}$, maka :

$$F = - m \cdot g \cdot \frac{x}{L}$$

$$F = - \frac{m \cdot g}{L} x$$

Berdasarkan persamaan Hukum Hooke:

$$F = - k \cdot x$$

$$k = \frac{m \cdot g}{L}$$

a. Periode Pendulum Sederhana

Periode pendulum sederhana dapat kita tentukan menggunakan persamaan :

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

Konstanta gaya efektif k kita ganti dengan $\frac{m \cdot g}{L}$:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{\frac{m \cdot g}{L}}}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

b. Frekuensi Pendulum Sederhana

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

Keterangan: T adalah periode, f adalah frekuensi, L adalah panjang tali dan g adalah percepatan gravitasi.

Berdasarkan persamaan di atas, tampak bahwa periode dan frekuensi getaran pendulum sederhana bergantung pada panjang tali dan

percepatan gravitasi. Karena percepatan gravitasi bernilai tetap, maka periode sepenuhnya hanya bergantung pada panjang tali (L). Dengan kata lain, periode dan frekuensi pendulum tidak bergantung pada massa beban alias bola pendulum. Anda dapat membuktikan dengan mendorong seorang yang gendut di atas ayunan. Bandingkan dengan seorang anak kecil yang didorong pada ayunan yang sama.

Contoh Soal:

1. Sebuah pendulum melakukan 40 getaran dalam 20 sekon. Hitunglah periode dan frekuensi.

Jawab:

- a) Periode adalah waktu yang dibutuhkan untuk melakukan satu getaran lengkap. Karena pendulum melakukan 40 getaran dalam 20 detik, maka satu getaran dilakukan selama 2 detik ($40/20 = 2$). Jadi $T = 2$ detik.
- b) Frekuensi adalah banyaknya getaran yang dilakukan dalam satu detik. Karena satu getaran dilakukan selama 2 detik, maka dalam satu detik pendulum melakukan setengah getaran. Kita juga menghitung menggunakan persamaan di bawah :

$$f = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ getaran}$$

Jadi dalam satu detik pendulum melakukan setengah getaran lengkap.

2. Hitunglah panjang pendulum pada jam yang berdetak sekali tiap detik dan Berapa periode jam dengan pendulum yang panjangnya 0,5 meter ? Anggap saja percepatan gravitasi (g) = 10 m/s^2 .

Jawab :

- a) Panjang pendulum pada jam yang berdetak sekali tiap detik. Karena jam berdetak sekali perdetik, maka kita bisa menganggap jam melakukan satu getaran selama satu detik ($T= 1$ sekon). Untuk menentukan panjang pendulum, kita menggunakan persamaan :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

$$L = \frac{T^2}{4\pi^2} g = \frac{(1\text{sekon})^2}{4\pi^2} (10\text{m/s}^2)$$

$$L = \frac{(1\text{sekon})^2}{(4)(3,14)^2} (10\text{m/s}^2)$$

$$L = \frac{1\text{s}^2}{39,4} (10\text{m/s}^2)$$

$$L = \frac{1\text{s}^2}{39,4} (10\text{m/s}^2)$$

$$L = 0,25\text{m}$$

Jadi panjangnya 0,25 meter (tidak tepat 0,25 meter karena dipengaruhi oleh faktor pembulatan).

- b) Periode jam dengan pendulum yang panjangnya 0,5 meter ?

$$T = (2)(3,14) \sqrt{\frac{0,25\text{meter}}{10\text{m/s}^2}}$$

$$T = (2)(3,14) \sqrt{0,158\text{s}^2}$$

$$T = 0,99\text{sekon}$$

Periode getaran-nya adalah 0,99 sekon (hasilnya tidak tepat = 0,99 sekon karena dipengaruhi oleh faktor pembulatan)

Catatan :

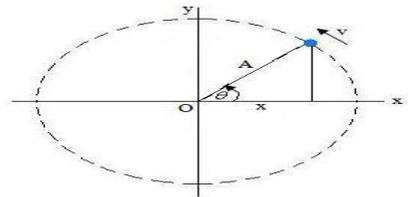
Dalam kenyataannya, jam pendulum tidak tepat melakukan Gerak Harmonik Sederhana (GHS) karena adanya gaya gesekan. Setelah berayun beberapa kali, amplitudonya semakin berkurang akibat adanya gaya gesek. Hal tersebut mempengaruhi ketepatan jam pendulum, di mana periode pendulum sedikit bergantung pada amplitudo (simpangan maksimum). Agar amplitudo jam pendulum tetap, sehingga periode ayunan tidak bergantung pada amplitudo, maka pada jam pendulum disertakan juga pegas utama (pada jam besar disertakan beban pemberat) yang berfungsi untuk memberikan energi untuk mengimbangi gaya gesekan dan mempertahankan amplitudo agar tetap konstan.

7. Persamaan Posisi, Kecepatan dan Percepatan pada GHS

Pada pokok bahasan mengenai hubungan antara GMB dan GHS, kita telah melihat keterkaitan antara GMB dan GHS, di mana Gerak Harmonik Sederhana dipandang sebagai suatu komponen Gerak Melingkar Beraturan atau sebaliknya, Gerak Melingkar Beraturan dapat dipandang sebagai gabungan dua gerak harmonik sederhana yang saling tegak lurus⁵⁹. Sekarang dengan menggunakan lingkaran acuan, mari kita selidiki persamaan yang menyatakan posisi, kecepatan dan percepatan benda bermassa yang melakukan GHS sebagai fungsi waktu.

a. Persamaan Posisi Sebagai Fungsi Waktu Pada GHS

Kita tinjau sebuah benda yang bergerak dengan laju linear tetap (v) pada sebuah lingkaran yang memiliki jari-jari A sebagaimana tampak pada gambar di bawah.



Dari gambar di atas, tampak bahwa

$$\cos \theta = \frac{x}{A}$$

Kita balik persamaan ini untuk menentukan nilai

$$x = A \cos \theta \rightarrow \text{persamaan 1}$$

Karena benda melakukan gerak melingkar dengan kecepatan sudut ω , di mana hubungan antara kecepatan sudut ω dan besar sudut simpangan θ dinyatakan dengan persamaan :

$$\theta = \omega t \rightarrow \text{persamaan 2}$$

Di mana θ dinyatakan dalam radian. (bandingkan dengan $s = v \cdot t$ pada gerak lurus). Lalu substitusikan nilai θ pada persamaan 2 ke dalam persamaan 1 :

$$x = A \cos \theta$$

$$x = A \cos \omega t \rightarrow \text{persamaan 3a}$$

Ini adalah persamaan posisi sebagai fungsi waktu

⁵⁹ Sears dan Zemansky. 2000. *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

Dalam hubungan dengan frekuensi, kecepatan sudut ω dapat juga dinyatakan dengan persamaan :

$$\omega = 2\pi f$$

Di mana f adalah frekuensi. (kita telah mempelajari hal ini pada Pokok Bahasan Besaran-besaran fisis gerak melingkar beraturan). Substitusikan nilai ω ke dalam persamaan 3 :

$$x = A \cos 2\pi ft \rightarrow \text{persamaan 3b}$$

Karena frekuensi dan periode memiliki keterkaitan, yang dinyatakan dengan persamaan :

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

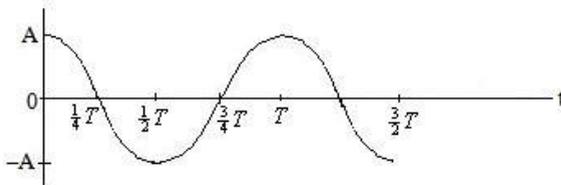
Maka persamaan 3b dapat kita tulis dalam bentuk :

$$x = A \cos \frac{2\pi t}{T} \rightarrow \text{persamaan 3c}$$

Persamaan 3a, 3b dan 3c merupakan persamaan posisi sebagai fungsi waktu pada Gerak Harmonik Sederhana.

b. Grafik posisi sebagai fungsi waktu

Posisi sebagai fungsi waktu digambarkan dengan grafik di bawah ini...



Pada saat $t = 0$, benda berada pada simpangan sejauh $+A$ (A alias *amplitudo*). Tanda positif menunjukkan bahwa benda berada pada bagian kanan atau bagian atas titik setimbang nol. Pada saat $t = \frac{1}{4} T$, benda berada pada posisi setimbang ($A=0$). Pada saat $t = \frac{1}{2} T$, benda berada pada simpangan sejauh $-A$. Tanda negatif menunjukkan bahwa benda berada pada bagian kiri titik acuan nol. Pada saat $t = \frac{3}{4} T$, benda kembali berada di posisi setimbang ($A=0$). Jadi benda bergerak kembali dari simpangan sejauh $-A$ menuju titik setimbang. Pada saat $t=T$, benda berada lagi di simpangan sejauh $+A$, posisi di mana benda pertama kali mulai bergerak. Demikian seterusnya, benda bergerak bolak balik dan membentuk kurva cosinus. Posisi benda dapat kita hitung dengan persamaan

$$x = A \cos \frac{2\pi t}{T}$$

Kita menggunakan persamaan ini karena gerakan benda membentuk kurva cosinus. Pada grafik di atas, benda mulai bergerak dari simpangan sejauh $+A$ sehingga gerakan benda tersebut membentuk kurva cosinus. Apabila benda mulai bergerak dari posisi setimbang ($A = 0$), maka gerakan benda tersebut membentuk kurva sinus.

Jika benda mulai bergerak dari posisi setimbang ($x = 0$) sehingga membentuk kurva sinus, bagaimana dengan persamaan untuk menghitung posisi benda ?

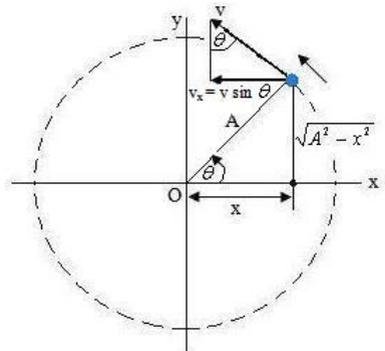
Kita menggunakan persamaan :

$$x = A \sin \frac{2\pi t}{T}$$

Jadi jangan terpacu dengan persamaan di atas. Tergantung benda bergerak dari mana. Apabila benda mulai bergerak dari simpangan sejauh A (amplitudo) maka kita menggunakan persamaan cosinus di atas. tapi jika benda mulai bergerak dari posisi setimbang, kita menggunakan persamaan sinus.

c. Persamaan Kecepatan Sebagai Fungsi Waktu pada GHS

Sekarang mari kita tinjau persamaan kecepatan pada GHS. Kita tetap menggunakan bantuan lingkaran acuan untuk menurunkan persamaan kecepatan sebagai fungsi waktu⁶⁰. Tinjau lagi sebuah benda yang bergerak dengan laju linear tetap (v) pada sebuah lingkaran yang memiliki jari-jari A sebagaimana tampak pada gambar di bawah:



v adalah laju linear benda, v_x adalah proyeksi laju linear benda pada sumbu x . Kedua segitiga yang memiliki sudut $teta$ pada gambar di atas simetris.

⁶⁰ Tipler, P.A.1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penebit Erlangga

Pada gambar di atas, tampak bahwa besar $v_x = v \sin \theta$, di mana arah v_x menuju ke kiri. Karena kecepatan termasuk besaran vektor, maka kita tulis kembali persamaan v_x menjadi :

$$v_x = -v \sin \theta$$

$$\text{Karena } \theta = \omega t = 2\pi f t = 2\pi \frac{t}{T}$$

Maka persamaan v_x di atas dapat ditulis menjadi :

$$v_x = -v \sin \omega t$$

$$v_x = -v \sin 2\pi f t$$

$$v_x = -v \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

$$v = \frac{2\pi r}{T} \rightarrow \text{karena } r = A \text{ maka :}$$

$$v = \frac{2\pi A}{T} \rightarrow \text{karena } T = \frac{1}{f} \text{ maka}$$

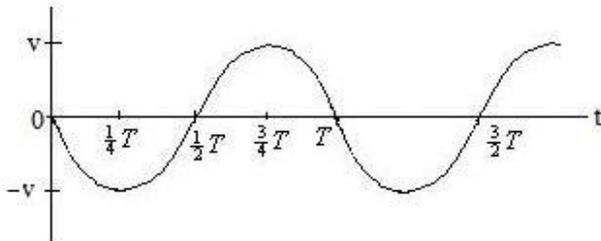
$$v = 2\pi A f \rightarrow \text{karena } f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ maka}$$

$$v = 2\pi A \left(\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \right)$$

$$v = A \sqrt{\frac{k}{m}} \rightarrow \text{persamaan } v$$

Ini adalah persamaan untuk menghitung besar v

Kecepatan sebagai fungsi waktu digambarkan dengan grafik di bawah ini.



Grafik di atas mengatakan bahwa pada saat $t = 0$, kecepatan benda = 0.

Pada saat $t = 1/4 T$, kecepatan benda menjadi menjadi $-v$ (kecepatan maksimum). Tanda negatif menunjukkan bahwa arah kecepatan ke kiri atau ke bawah jika kita tetapkan posisi setimbang adalah 0 pada sumbu koordinat xy . Karena kecepatan benda bernilai negatif maka bisa dipastikan benda sedang berada pada posisi setimbang. jadi dari grafik di atas tampak bahwa benda mulai bergerak dari simpangan sejauh $+A$ dan saat ini sedang berada pada posisi setimbang ($A=0$). Pada saat $t = 1/2 T$ kecepatan benda = 0. Benda sekarang berada pada simpangan sejauh $-A$. Ingat bahwa ketika mencapai simpangan maksimum, kecepatan benda = 0 dan sekarang benda akan berbalik arah. Pada saat $t = 3/4 T$, benda bergerak dengan kecepatan maksimum. Dari grafik, kita tahu bahwa kecepatan benda bernilai positif, sehingga bisa disimpulkan benda sedang bergerak ke kanan dan saat ini berada pada posisi setimbang. sekali lagi ingat bahwa ketika berada pada posisi setimbang, benda memiliki kecepatan maksimum. Pada saat $t = T$, kecepatan benda = 0. Sekarang benda berada pada simpangan sejauh $+A$ (benda berada di sebelah kanan posisi setimbang). sekarang benda telah melakukan satu getaran lengkap. Selanjutnya benda akan bergerak lagi ke posisi setimbang. demikian seterusnya.

Untuk menghitung kecepatan benda sepanjang kurva di atas, kita menggunakan persamaan kecepatan sebagai fungsi waktu yang telah diturunkan di atas, yakni :

$$v_x = -v \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

d. Persamaan Percepatan Sebagai Fungsi Waktu pada GHS

Persamaan percepatan sebagai fungsi waktu diturunkan dari Hukum II newton :

$$\Sigma F = ma$$

$$a = \frac{\Sigma F}{m} \rightarrow \text{persamaan 1}$$

Pada GHS, jumlah gaya total dinyatakan dengan persamaan :

$$\Sigma F = -kx \rightarrow \text{persamaan 2}$$

Kita substitusikan besar gaya total (ΣF) pada persamaan 2 ke dalam persamaan 1 :

$$a = \frac{-kx}{m} \rightarrow x = A \cos 2\pi ft$$

$$a = \frac{-k(A \cos 2\pi ft)}{m}$$

$$a = -\left(\frac{kA}{m}\right) \cos 2\pi ft$$

$$a = -a_{\max} \cos 2\pi ft \rightarrow \text{persamaan 3a}$$

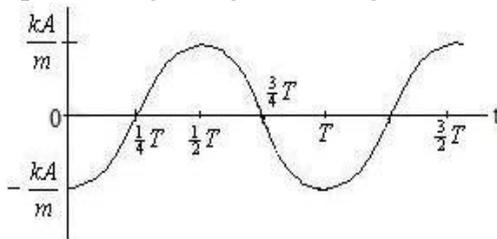
$$a = -a_{\max} \cos \frac{2\pi}{T}t \rightarrow \text{persamaan 3b}$$

$$\frac{kA}{m} = a_{\max} \rightarrow \text{Percepatan Maksimum}$$

Persamaan 3a dan persamaan 3b adalah persamaan percepatan sebagai fungsi waktu.

d. Grafik percepatan sebagai fungsi waktu

Percepatan sebagai fungsi waktu digambarkan dengan grafik di bawah ini.



Bagaimana membaca grafik ini?

Pada saat $t = 0$, percepatan benda bernilai maksimum. Ingat lagi persamaan yang telah kita turunkan tadi.

$$a_{\max} = \frac{kA}{m}$$

Sesuai dengan grafik di atas, percepatan benda bernilai negatif. ini berarti benda sedang bergerak ke kiri atau ke bawah dan benda berada pada posisi setimbang. Pada saat $t = 1/4 T$, percepatan benda = 0. benda sekarang sedang berada pada simpangan sejauh $-A$. Pada saat berada pada simpangan maksimum, kecepatan benda bernilai nol sesaat, sehingga percepatannya juga nol. Pada posisi ini benda mulai berbalik arah menuju ke kanan.

Pada saat $t = 1/2 T$, percepatan bernilai maksimum. Tanda negatif menunjukkan bahwa arah percepatan ke kanan. Saat ini benda sedang berada di posisi setimbang. Pada saat $t = 3/4 T$, percepatan bernilai nol. Benda sedang berada pada simpangan sejauh $+A$. Pada saat $t = T$, percepatan benda kembali bernilai maksimum (percepatan benda negatif). jadi benda sedang bergerak ke kiri dan saat ini sedang berada pada posisi setimbang. pada saat $t = T$, benda telah melakukan satu getaran lengkap, demikian seterusnya.

Daftar Pustaka

- Anonim. 1999. *Belajar Fisika Lebih Mudah dan Menyenangkan*. <http://www.e-dukasi.net/>. Diakses tanggal 30 Juni 2009.
- Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Mark W. Zemansky. 1994. *Fisika untuk Universitas (Mekanika, Panas, Bunyi)*. Jakarta: Bina Cipta.
- Sears dan Zemansky. 2000. *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Tipler, P.A.1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik -Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga

BAB IX

FLUIDA

1. Pendahuluan

Dalam fisika, fluida diartikan sebagai suatu zat yang dapat mengalir. Anda mungkin pernah belajar di sekolah bahwa materi yang kita temui dalam kehidupan sehari-hari terdiri dari zat padat, cair dan gas. Istilah fluida mencakup zat cair dan gas, karena zat cair seperti air atau zat gas seperti udara dapat mengalir. Zat padat seperti batu atau besi tidak dapat mengalir sehingga tidak bisa digolongkan dalam fluida. Zat gas dapat mengalir dari satu satu tempat ke tempat lain. Hembusan angin merupakan contoh udara yang berpindah dari satu tempat ke tempat lain.

Fluida merupakan salah satu aspek yang penting dalam kehidupan kita sehari-hari. Setiap hari kita menghirupnya, meminumnya dan bahkan terapung atau tenggelam di dalamnya. Setiap hari pesawat udara terbang melaluinya, kapal laut mengapung di atasnya; demikian juga kapal selam dapat mengapung atau melayang di dalamnya. Air yang kita minum dan udara yang kita hirup juga bersirkulasi di dalam tubuh kita setiap saat, hingga kadang tidak kita sadari.

2. Massa Jenis (Kerapatan) dan Berat jenis

Salah satu sifat penting dari suatu zat adalah kerapatan atau massa jenisnya/densitas (density). Kerapatan atau massa jenis merupakan perbandingan massa terhadap volume zat⁶¹. Secara matematis ditulis :

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

(8.1)

Kerapatan atau massa jenis fluida homogen (sama) pada dasarnya berbeda dengan kerapatan zat padat homogen. Besi atau es batu misalnya, memiliki kerapatan yang sama pada setiap bagiannya. Berbeda dengan fluida, misalnya atmosfer atau air. Pada atmosfer bumi, makin tinggi atmosfer dari permukaan bumi, kerapatannya semakin kecil sedangkan untuk air laut, misalnya, makin dalam kerapatannya semakin besar. Massa jenis atau kerapatan dari suatu fluida homogen dapat bergantung pada faktor lingkungan seperti temperature (suhu) dan tekanan.

⁶¹ Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid 1 (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

Satuan Sistem Internasional untuk massa jenis adalah kilogram per meter kubik (kg/m^3). Untuk satuan CGS atau centimeter, gram dan sekon, satuan massa jenis dinyatakan dalam gram per centimeter kubik (gr/cm^3). Kerapatan zat yang dinyatakan dalam tabel di bawah ini merupakan kerapatan zat pada suhu 0°C dan tekanan 1atm (atmosfer (atm) = satuan tekanan). Berikut ini data massa jenis dari beberapa zat.

Zat	Kerapatan (kg/m^3)
Zat Cair	
Air	$1,00 \times 10^3$
Air Laut	$1,03 \times 10^3$
Darah	$1,06 \times 10^3$
Bensin	$0,68 \times 10^3$
Air raksa	$13,6 \times 10^3$
Zat Padat	
Es	$0,92 \times 10^3$
Aluminium	$2,70 \times 10^3$
Besi & Baja	$7,8 \times 10^3$
Emas	$19,3 \times 10^3$
Gelas	$2,4 - 2,8 \times 10^3$
Kayu	$0,3 - 0,9 \times 10^3$
Tembaga	$8,9 \times 10^3$
Timah	$11,3 \times 10^3$
Tulang	$1,7 - 2,0 \times 10^3$
Zat Gas	
Udara	1,293
Helium	0,1786
Hidrogen	0,08994
Uap air (100°C)	0,6

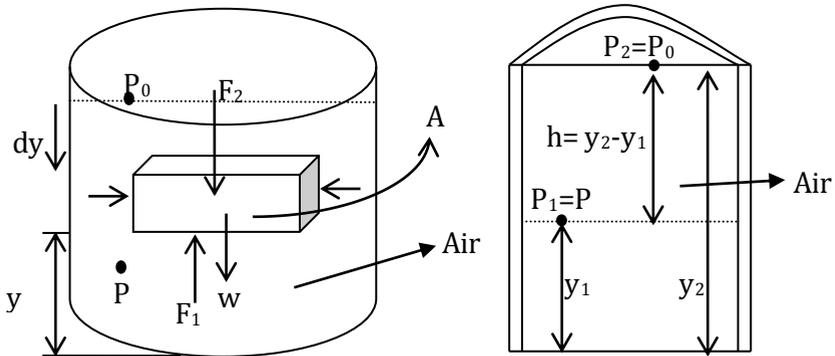
Berat jenis merupakan perbandingan kerapatan suatu zat terhadap kerapatan air. Berat jenis suatu zat dapat diperoleh dengan membagi kerapatannya dengan 10^3 kg/m^3 (kerapatan air). Berat jenis tidak memiliki dimensi. Apabila kerapatan suatu benda lebih kecil dari kerapatan air, maka benda akan terapung. Berat jenis benda yang terapung lebih kecil dari 1. Sebaliknya jika kerapatan suatu benda lebih besar dari kerapatan air, maka berat jenisnya lebih besar dari 1. Untuk kasus ini benda tersebut akan tenggelam.

3. Hidrostatika

Hidrostatika adalah ilmu yang mempelajari tentang zat alir atau fluida yang diam atau tidak bergerak. Fluida yang tidak mengalir, seperti zat yang berada dalam bejana yang tidak berlubang, terlihat secara langsung atau tidak langsung tentang tidak adanya perpindahan bagian-bagian zat itu⁶².

a. Tekanan dalam Fluida

Tekanan hidrostatik suatu titik di dalam suatu zat cair tergantung pada letak titik tersebut terhadap permukaan zat cair. Oleh karena itu semua titik yang berada pada kedalaman yang sama, tekanan hidrostatiknya sama besar. Titik-titik yang memiliki tekanan yang sama ini terletak pada satu bidang datar, atau sebaliknya jika titik itu pada ketinggian berbeda, maka tekanan hidrostatiknya berbeda. Misalnya, makin tinggi dari permukaan bumi, maka makin kurang tekanan udara, dan juga di dalam telaga atau laut makin berkurang tekanannya, jika makin jauh dari dasarnya. Karena itu definisi tekanan buat berlaku umum dan mendefinisikan tekanan disebarkan titik sebagai perbandingan gaya normal dF yang bekerja pada suatu luas kecil dA , di mana titik itu sendiri berada, terhadap luas dA itu (lihat gambar).



Misalkan F_1 adalah gaya tekan ke atas dari zat cair sebesar $F_1 = P \cdot A$, sedangkan F_2 adalah gaya tekan ke bawah dari zat cair sebesar $F_2 = (P + dP) A$, dan dy adalah tebal zat cair. Berdasarkan Hukum pertama Newton tentang kesetimbangan, di mana gaya-gaya yang bekerja pada benda tersebut mendapat tekanan sebesar:

$$\sum F = 0$$

⁶² Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I, Terjemahan*. Jakarta: Penerbit Erlangga

$$+F_1 - F_2 - dw = 0$$

$$\text{Untuk } dw = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g = \rho (A \cdot dy) g$$

$$P \cdot A - (P + dP) A - \rho \cdot g \cdot A \cdot dy = 0$$

$$P \cdot A - P \cdot A - dP \cdot A - \rho \cdot g \cdot A \cdot dy = 0$$

$$- dP \cdot A - \rho \cdot g \cdot A \cdot dy = 0$$

$$- dP \cdot A - \rho \cdot g \cdot A \cdot dy = 0$$

$$- dP \cdot A = \rho \cdot g \cdot A \cdot dy$$

$$dP = - \rho \cdot g \cdot dy$$

$$\int_{P_1}^{P_2} dP = \int_{y_1}^{y_2} - \rho \cdot g \cdot dy$$

$$(P_2 - P_1) = - \rho \cdot g (y_2 - y_1)$$

Jika $P_2 = P_0$, $P_1 = P$, $h = y_2 - y_1$, maka:

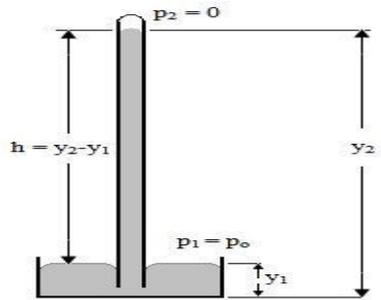
$$P = P_0 + \rho \cdot g \cdot h \quad (8.2)$$

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (8.3)$$

P_0 adalah tekanan atmosfer, untuk satuan internasional (SI) tekanan adalah pascal (Pa) atau newton/meter², sedangkan satuan yang lain adalah 1 milibar (mb) = 0,001 bar, dan 1 atmosfer (atm) = $1,01 \times 10^5$ Pa = 1,01 bar.

b. Pengukuran tekanan

Evangelista Torricelli (1608-1647), murid Galileo, membuat suatu metode atau cara untuk mengukur tekanan atmosfer pada tahun 1643 menggunakan barometer air raksa hasil karyanya. Barometer tersebut berupa tabung kaca yang panjang, di mana dalam tabung tersebut diisi air raksa. Tabung kaca yang berisi air raksa tersebut dibalik dalam sebuah piring yang juga telah diisi air raksa (lihat gambar di bawah).

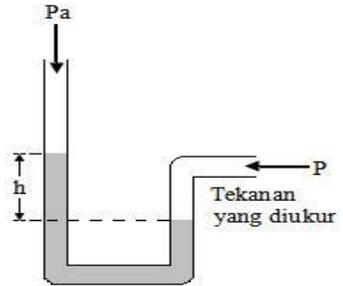


Ketika tabung kaca yang berisi air raksa dibalik maka pada bagian ujung bawah tabung (pada gambar terletak di bagian atas) tidak terisi air raksa, isinya cuma uap air raksa yang tekanannya sangat kecil sehingga diabaikan ($p_2 = 0$). Pada permukaan air raksa yang berada di dalam piring terdapat tekanan atmosfer yang arahnya ke bawah (atmosfer menekan air raksa yang berada di piring). Tekanan atmosfer tersebut menyanggah kolom air raksa yang berada dalam pipa kaca. Pada gambar, tekanan atmosfer dilambangkan dengan p_0 . Besarnya tekanan atmosfer dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$P_0 = \rho \cdot g \cdot h \quad (8.4)$$

Berdasarkan hasil pengukuran, rata-rata tekanan atmosfer pada permukaan laut adalah $1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Besarnya tekanan atmosfer pada permukaan laut ini digunakan untuk mendefinisikan satuan tekanan lain, yakni atm (atmosfer). Jadi $1 \text{ atm} = 1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 101,3 \text{ kPa}$ (kPa = kilo pascal). Satuan tekanan lain adalah bar (sering digunakan pada meteorologi). $1 \text{ bar} = 1,00 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 100 \text{ kPa}$.

Terdapat banyak alat yang digunakan untuk mengukur tekanan, di antaranya adalah manometer tabung terbuka (lihat gambar di bawah). Pada manometer tabung terbuka, di mana tabung berbentuk U, sebagian tabung diisi dengan zat cair (air raksa atau air). Tekanan yang terukur dihubungkan dengan perbedaan dua ketinggian zat cair yang dimasukkan ke dalam tabung. Besar tekanan dihitung menggunakan persamaan :



$$P = P_o + \rho \cdot g \cdot h \quad (8.5)$$

c. Tekanan ukur, absolute, dan gauge

Ketika mengisi udara dalam ban kendaraan (mobil atau sepeda motor). Biasanya menggunakan alat ukur tekanan udara. Hal ini membantu agar tekanan udara ban tidak kurang/melebihi batas yang ditentukan. Pada saat mengisi udara dalam ban, yang diukur adalah tekanan udara dalam ban saja. Tekanan atmosfer tidak diperhitungkan. Tekanan yang diukur tersebut dinamakan tekanan terukur⁶³.

Tekanan absolute adalah penjumlahan antara tekanan atmosfer dengan tekanan terukur. Jadi dengan kata lain, tekanan absolut = tekanan total. Secara matematis bisa ditulis :

$$P = P_o + P_{ukur} \quad (8.6)$$

Misalnya tekanan ban yang kita ukur= 100 kPa, maka tekanan absolut adalah:

$$P = P_o + P_{ukur} = 101 \text{ kPa} + 100 \text{ kPa} = 201 \text{ kPa}$$

Besarnya tekanan absolut = 201 kPa.

Tekanan gauge merupakan kelebihan tekanan di atas tekanan atmosfer. Misalnya kita tinjau tekanan ban sepeda motor. Ketika ban sepeda motor kempes, tekanan dalam ban = tekanan atmosfer (Tekanan

⁶³ Young, Hugh D. & Freedman, Roger A. 2002. *Fisika Universitas (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

atmosfir = $1,01 \times 10^5$ Pa = 101 kPa). Jika ingin menggunakan ban, maka harus mengisi ban tersebut dengan udara. Ketika ban diisi udara, tekanan ban pasti bertambah. Ketika tekanan ban menjadi lebih besar dari 101 kPa, maka kelebihan tekanan tersebut disebut juga tekanan gauge.

4. Hukum Pascal

Setiap fluida selalu memberikan tekanan pada semua benda yang bersentuhan dengannya. Air yang kita masukan ke dalam gelas akan memberikan tekanan pada dinding gelas. Demikian juga apabila kita mandi dalam kolam renang atau air laut, air kolam atau air laut tersebut juga memberikan tekanan pada seluruh tubuh kita. Tekanan total air pada kedalaman tertentu, misalnya tekanan air laut pada kedalaman 200 meter merupakan jumlah tekanan atmosfer yang menekan permukaan air laut dan “tekanan terukur” pada kedalaman 200 meter. Jadi selain lapisan bagian atas air menekan lapisan air yang ada di bawahnya, terdapat juga atmosfer atau udara yang menekan permukaan air laut tersebut.

Tekanan zat cair pada dasar wadah tentu saja lebih besar dari tekanan zat cair pada bagian di atasnya (ingat kembali pembahasan mengenai Tekanan Pada Fluida). Semakin ke bawah, semakin besar tekanan zat cair tersebut, sebaliknya semakin mendekati permukaan atas wadah, semakin kecil tekanan zat cair. Besarnya tekanan sebanding dengan $\rho g h$. Pada setiap titik pada kedalaman yang sama, besarnya tekanan sama. Hal ini berlaku untuk semua zat cair dalam wadah apapun dan tidak bergantung pada bentuk wadah tersebut. Apabila kita tambahkan tekanan luar, misalnya dengan menekan permukaan zat cair tersebut, pertambahan tekanan dalam zat cair adalah sama di mana-mana. Jadi apabila diberikan tekanan luar, setiap bagian zat cair mendapat tekanan yang sama. Karenanya besar tekanan selalu sama di setiap titik pada kedalaman yang sama. Ini merupakan Prinsip Pascal, dicetuskan dan dinamakan sesuai dengan nama pencetusnya, Blaise Pascal (1623-1662). Hukum Pascal menyatakan:

Bahwa tekanan yang diberikan pada cairan dalam suatu tempat tertutup akan diteruskan sama besar ke setiap bagian fluida dan dinding wadah⁶⁴. Secara matematis bisa ditulis sebagai berikut :

Secara matematis bisa ditulis sebagai berikut:

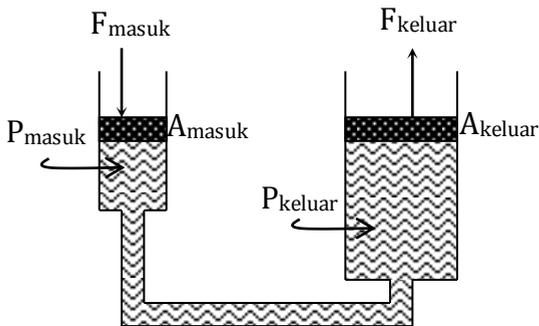
⁶⁴ Tipler, P.A.1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid I (terjemahan)*. Jakarta: Penebit Erlangga

$$P_{\text{masuk}} = P_{\text{keluar}}$$

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (8.7)$$

P = tekanan (Pa) , F = Gaya (N), dan A = Luas permukaan (m^2).

Berpedoman pada prinsip Pascal, manusia telah menghasilkan beberapa alat, baik yang sederhana maupun canggih untuk membantu mempermudah kehidupan. Beberapa di antaranya adalah Dongkrak Hidrolik, Lift Hidrolik, Rem Hidrolik, dan lain-lain. Cara kerja dongkrak atau lift hidrolik ditunjukkan pada gambar di bawah.



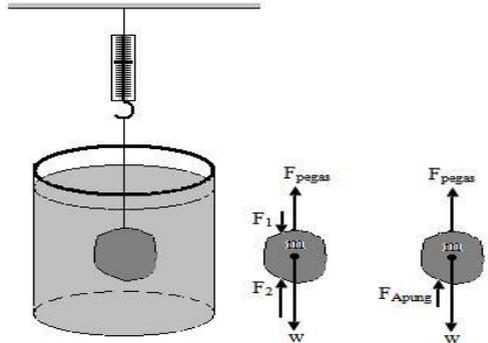
Dongkrak hidrolik terdiri dari sebuah bejana yang memiliki dua permukaan. Pada kedua permukaan bejana terdapat penghisap (piston), di mana luas permukaan piston di sebelah kiri lebih kecil dari luas permukaan piston di sebelah kanan. Luas permukaan piston disesuaikan dengan luas permukaan bejana. Bejana diisi cairan, seperti pelumas.

Apabila piston yang luas permukaannya kecil ditekan ke bawah, maka setiap bagian cairan juga ikut tertekan. Besarnya tekanan yang diberikan oleh piston yang permukaannya kecil (gambar kiri) diteruskan ke seluruh bagian cairan. Akibatnya, cairan menekan piston yang luas permukaannya lebih besar (gambar kanan) hingga piston terdorong ke atas. Luas permukaan piston yang ditekan kecil, sehingga gaya yang diperlukan untuk menekan cairan juga kecil. Tetapi karena tekanan (Tekanan = gaya / satuan luas) diteruskan seluruh bagian cairan, maka gaya yang kecil tadi berubah menjadi sangat besar ketika cairan menekan piston di sebelah kanan yang luas permukaannya besar. Pada bagian atas piston yang luas permukaannya besar biasanya diletakan benda atau bagian benda yang mau diangkat, misalnya mobil.

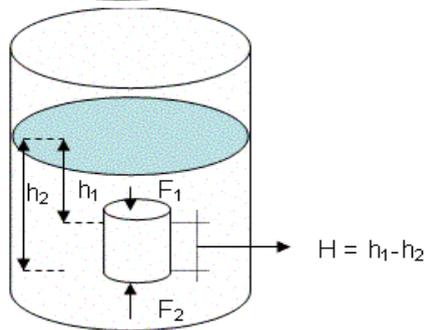
5. Hukum Archimedes

Jika kita menimbang sebuah batu yang beratnya dalam air dengan cara mengantungkannya dalam sebuah neraca seperti gambar di bawah ini. Maka seolah-olah berat batu tersebut menjadi berkurang. Kenapa demikian?

Untuk menjawab atau membuktikan fenomena di atas yang harus dilakukan adalah: langkah pertama menimbang batu di udara, yang beratnya w_u , kedua menimbang batu di dalam air, yang beratnya w_c . Berat batu di udara ternyata lebih besar ($w_u > w_c$), hal ini terjadi karena batu ketika ditimbang di dalam air mengalami gaya tekan ke atas oleh air. Jadi besarnya gaya apung merupakan selisih berat di udara dengan berat di air.



F_{pegas} = gaya pegas, w = gaya berat batu, F_1 = gaya yang diberikan fluida pada bagian atas batu, F_2 = gaya yang diberikan fluida pada bagian bawah batu, F_{apung} = gaya apung. F_{apung} merupakan gaya total yang diberikan fluida pada batu ($F_{\text{apung}} = F_2 - F_1$). Arah gaya apung (F_{apung}) ke atas, karena gaya yang diberikan fluida pada bagian bawah batu (F_2) lebih besar daripada gaya yang diberikan fluida pada bagian atas batu (F_1). Hal ini dikarenakan tekanan fluida pada bagian bawah lebih besar daripada tekanan fluida pada bagian atas batu.



Pada gambar di atas, tampak sebuah benda melayang di dalam air. Fluida yang berada di bagian bawah benda memiliki tekanan yang lebih besar daripada fluida yang terletak pada bagian atas benda. Hal ini disebabkan karena fluida yang berada di bawah benda memiliki kedalaman yang lebih besar daripada fluida yang berada di atas benda ($h_2 > h_1$). Besarnya tekanan fluida pada kedalaman h_2 adalah:

$$P_2 = \frac{F_2}{A}$$

$$F_2 = P_2 \cdot A = \rho \cdot g \cdot h_2 \cdot A \quad (8.8)$$

Besarnya tekanan fluida pada kedalaman h_1 adalah :

$$P_1 = \frac{F_1}{A}$$

$$F_1 = P_1 \cdot A = \rho \cdot g \cdot h_1 \cdot A \quad (8.9)$$

F_2 = gaya yang diberikan oleh fluida pada bagian bawah benda, F_1 = gaya yang diberikan oleh fluida pada bagian atas benda, A = luas permukaan benda. Selisih antara F_2 dan F_1 merupakan gaya total yang diberikan oleh fluida pada benda, yang kita kenal dengan istilah gaya apung. Besarnya gaya apung adalah :

$$F_{\text{apung}} = F_2 - F_1$$

$$F_{\text{apung}} = (\rho \cdot g \cdot h_2 \cdot A) - (\rho \cdot g \cdot h_1 \cdot A)$$

$$F_{\text{apung}} = \rho \cdot g \cdot A (h_2 - h_1)$$

$$F_{\text{apung}} = \rho_f \cdot g \cdot A \cdot h$$

$$F_{\text{apung}} = \rho_f \cdot g \cdot V \quad (8.10)$$

Dimana: ρ_f = Massa jenis fluida (kg/m^3), g = percepatan gravitasi (m/s^2), dan V = Volume benda yang berada dalam fluida (m^3).

Jadi besarnya gaya apung tergantung pada massa jenis (kerapatan) fluida dan volume benda, tetapi tidak pada bentuk benda. Besarnya gaya yang diberikan oleh fluida kepada benda yang tenggelam di dalamnya disebut sebagai gaya apung yang besarnya sama dengan berat fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut.

Hukum Archimedes menyatakan bahwa: Ketika sebuah benda tercelup seluruhnya atau sebagian di dalam zat cair, zat cair akan memberikan gaya ke atas (gaya apung) pada benda, di mana besarnya gaya ke atas (gaya apung) sama dengan berat zat cair yang dipindahkan⁶⁵.

Dalam menentukan massa jenis benda dapat dihitung dengan menggunakan konsep gaya apung yaitu:

$$F_{\text{apung}} = \rho_f \cdot g \cdot V$$

$$V = \frac{F_{\text{apung}}}{\rho_f \cdot g}$$

Berat benda $w = m_b \cdot g$, di mana $m_b = \rho_b \cdot V$, jadi:

$$w = m_b \cdot g$$

⁶⁵ Young, Hugh D. & Freedman, Roger A. 2002. *Fisika Universitas (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

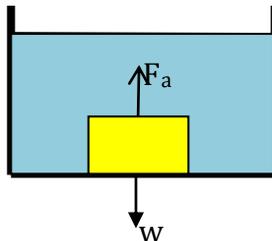
$$\begin{aligned}
 w &= (\rho_b \cdot V) \cdot g \\
 w &= \rho_b \cdot \left(\frac{F_{\text{apung}}}{\rho_f \cdot g} \right) \cdot g \\
 w &= \rho_b \cdot \left(\frac{F_{\text{apung}}}{\rho_f} \right) \\
 \frac{\rho_b}{\rho_f} &= \frac{w}{F_{\text{apung}}} \tag{8.11}
 \end{aligned}$$

Dimana: F_{apung} = gaya apung (N), ρ_f = Massa jenis fluida (kg/m^3), ρ_b = Massa jenis benda (kg/m^3), w = berat benda (N), dan V = volume fluida yang dipindahkan/volume benda yang tercelup (m^3).

6. Syarat Tenggelam, Melayang, dan Terapung

a. Tenggelam

Pada kasus tenggelam, gaya berat benda w lebih besar daripada gaya apung. Pada keadaan tenggelam, seluruh benda tercelup di dalam zat cair, sehingga volume zat cair yang dipindahkan sama dengan volume benda. Jadi, untuk keadaan tenggelam berlaku bahwa massa jenis benda lebih besar daripada massa jenis zat cair⁶⁶. Perhatikan gambar di bawah.



Pernyataan di atas dapat dirumuskan:

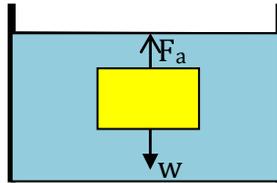
$$\begin{aligned}
 w_{\text{benda}} &> F_a \\
 m_b \cdot g &> m_f \cdot g \\
 \rho_b \cdot V_{\text{bf}} \cdot g &> \rho_f \cdot V_{\text{bf}} \cdot g \\
 \rho_b &> \rho_f \tag{8.12}
 \end{aligned}$$

b. Melayang

Pada kasus melayang, gaya berat benda w sama dengan gaya apung. Pada keadaan melayang, seluruh benda tercelup di dalam zat cair, sehingga volume zat cair yang dipindahkan sama dengan volume benda.

⁶⁶ Tipler, P.A.1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid I (terjemahan)*. Jakarta: Penebit Erlangga

Jadi, untuk keadaan melayang berlaku bahwa massa jenis benda sama dengan massa jenis zat cair. Perhatikan gambar di bawah.

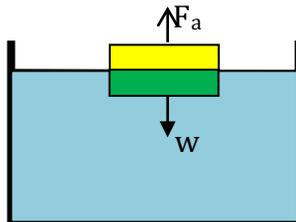


Pernyataan di atas dapat dirumuskan:

$$\begin{aligned}
 w_{\text{benda}} &= F_a \\
 m_b \cdot g &= m_f \cdot g \\
 \rho_b \cdot V_{\text{bf}} \cdot g &= \rho_f \cdot V_{\text{bf}} \cdot g \\
 \rho_b &= \rho_f
 \end{aligned}
 \tag{8.13}$$

c. Terapung

Pada kasus terapung, gaya berat benda w sama dengan gaya apung. Pada keadaan terapung, ada sebagian benda muncul di atas permukaan dan yang tercelup di dalam zat cair, sehingga volume zat cair yang dipindahkan sama dengan volume benda yang tercelup dalam zat cair, dan ini lebih kecil daripada volume benda. Jadi, untuk keadaan terapung berlaku bahwa massa jenis benda lebih kecil daripada massa jenis zat cair. Perhatikan gambar di bawah.



Pernyataan di atas dapat dirumuskan:

$$\begin{aligned}
 w_{\text{benda tercelup}} &= F_a \\
 m_b \cdot g &= m_f \cdot g \\
 \rho_b \cdot V_b \cdot g &= \rho_f \cdot V_{\text{bf}} \cdot g \\
 \rho_b \cdot V_b &= \rho_f \cdot V_{\text{bf}} \\
 \rho_b &= \frac{V_{\text{bf}}}{V_b} \rho_f
 \end{aligned}
 \tag{8.14}$$

oleh karena $V_{\text{bf}} < V_b$, maka $\frac{V_{\text{bf}}}{V_b} < 1$, diperoleh:

$$\rho_b < \rho_f
 \tag{8.15}$$

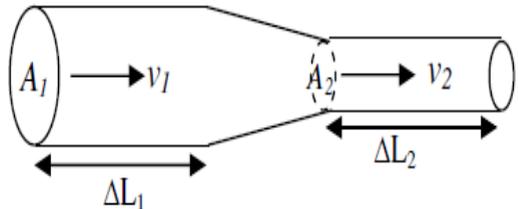
7. Dinamika Fluida

a. Aliran fluida

Dinamika fluida membahas tentang gerak fluida. Aliran fluida dibedakan menjadi dua tipe, yaitu: 1) Aliran lurus (*streamline*) atau aliran laminar. Terjadi jika aliran lancar, sehingga lapisan fluida yang saling berdekatan mengalir dengan lancar. Setiap partikel fluida mengikuti sebuah lintasan lurus yang tidak saling menyilang. 2) Aliran turbulen atau aliran bergolak. Di atas kecepatan tertentu, yang tergantung pada sejumlah faktor, aliran akan bergolak. Aliran ini dicirikan oleh ketidaktentuan, kecil, melingkar-lingkar seperti pusaran air yang disebut sebagai arus *eddy* atau kisanan.

b. Laju aliran massa dan persamaan kontinuitas

Massa fluida yang bergerak tidak berubah ketika mengalir. Fakta ini membimbing kita pada hubungan kuantitatif penting yang disebut persamaan kontinuitas. Volume fluida yang mengalir pada bagian pertama, V_1 , yang melewati luasan A_1 dengan laju v_1 selama rentang waktu Δt adalah $A_1 v_1 \Delta t$. Dengan mengetahui hubungan Volume dan Massa jenis, maka laju aliran massa yang melalui luasan A_1 adalah:



$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t}{\Delta t} = \rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 \quad (8.16)$$

Keadaan yang sama terjadi pada bagian kedua. Laju aliran massa yang melewati A_2 selama rentang waktu Δt adalah:

$$\rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2 \quad (8.17)$$

Volume fluida yang mengalir selama rentang waktu Δt pada luasan A_1 akan memiliki jumlah yang sama dengan volume yang mengalir pada A_2 . Dengan demikian:

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2 \quad (8.18)$$

Persamaan (8.18) disebut sebagai persamaan kontinuitas. Jika $\rho_1 = \rho_2$, maka persamaan tersebut dapat ditampilkan sebagai berikut:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (8.19)$$

Dengan persamaan (8.19), dapat dinyatakan bahwa pada aliran fluida yang nonkompresibel (tidak termampatkan), kecepatan aliran berbanding terbalik dengan luas penampang. Dengan demikian, pada fluida

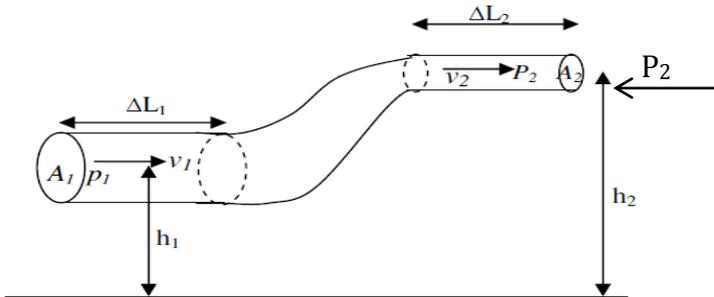
nonkompresibel, hasil kali antara kelajuan aliran fluida dan luas penampangnya selalu tetap. $A \cdot v = \text{konstan}$, atau disebut debit (Q). Debit adalah volume fluida yang mengalir melewati suatu penampang dalam selang waktu tertentu⁶⁷. Secara matematis ditulis:

$$Q = \frac{V}{t} \tag{8.20}$$

Q menyatakan debit (m^3/s), V menyatakan volume fluida (m^3), dan t menyatakan waktu fluida mengalir (sekon).

8. Persamaan Bernoulli

Salah satu persamaan fundamental dalam persoalan dinamika fluida adalah persamaan Bernoulli. Persamaan ini memberi hubungan antara tekanan, kecepatan dan ketinggian pada titik-titik sepanjang garis alir. Penurunan persamaan Bernoulli dapat dilakukan dengan menggunakan hukum kekekalan energi, dalam hal ini kerja total (net-work) sama dengan perubahan energi mekanik total yaitu perubahan energi kinetik ditambah perubahan energi potensial. Fluida dinamika yang memenuhi hukum Bernoulli adalah fluida ideal yang karakteristiknya; mengalir dengan garis-garis arus atau aliran tunak, tak kompresibel dan tak kental.



Dengan menggunakan hukum kekekalan energi, dalam hal ini kerja total (net-work) sama dengan perubahan energi mekanik total, yaitu perubahan energi kinetik ditambah perubahan energi potensial.

$$\begin{aligned} W_{\text{total}} &= EM = \Delta EK + \Delta EP \\ &= \left(\frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 \right) + (mgh_2 - mgh_1) \\ &= \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) + m g (h_2 - h_1) \\ W_{\text{total}} &= m \left[\frac{1}{2} (v_2^2 - v_1^2) + g (h_2 - h_1) \right] \tag{8.21} \end{aligned}$$

⁶⁷ Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I, Terjemahan*. Jakarta: Penerbit Erlangga

Suatu fluida yang massa jenisnya ρ dialirkan ke dalam pipa dengan penampang yang berbeda. Tekanan P_1 pada penampang A_1 disebabkan oleh gaya F_1 dan Tekanan P_2 pada penampang A_2 disebabkan oleh gaya F_2 . Gaya F_1 melakukan usaha sebesar $W_1 = F_1 \cdot \Delta l_1$ dan Gaya F_2 melakukan usaha sebesar $W_2 = - F_2 \cdot \Delta l_2$. Besar usaha totalnya adalah:

$$\begin{aligned} W_{\text{total}} &= W_1 + W_2 \\ &= F_1 \cdot \Delta l_1 + (- F_2 \cdot \Delta l_2) \\ &= P_1 \cdot A_1 \cdot \Delta l_1 - P_2 \cdot A_2 \cdot \Delta l_2 \quad \text{dimana} \quad (V = A \cdot \Delta l) \\ &= P_1 \cdot V_1 - P_2 \cdot V_2 \quad \text{di mana} \quad (V = \frac{m}{\rho}) \end{aligned}$$

$$W_{\text{total}} = (P_1 - P_2) \frac{m}{\rho} \tag{8.22}$$

Apabila persamaan (8.21) dan (8.22) digabungkan, akan diperoleh persamaan berikut:

$$(P_1 - P_2) \frac{m}{\rho} = m \left[\frac{1}{2} (v_2^2 - v_1^2) + g (h_2 - h_1) \right]$$

$$(P_1 - P_2) = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (h_2 - h_1)$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \tag{8.23}$$

Atau

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = \text{konstan} \tag{8.24}$$

Keterangan:

P = tekanan (Pa)

ρ = massa jenis (kg/m^3)

v = kecepatan aliran fluida (m/s)

g = percepatan gravitasi bumi (m/s^2)

h = tinggi tabung alir/pipa dari permukaan tanah (m)

Persamaan (8.24) disebut persamaan Bernoulli. Hukum Bernoulli menyatakan bahwa:

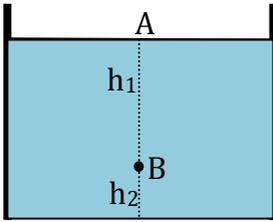
di mana kecepatan aliran fluida tinggi, tekanan fluida tersebut menjadi rendah. Sebaliknya jika kecepatan aliran fluida rendah, tekanannya menjadi tinggi.

Berdasarkan persamaan (8.23) dapat pula diturunkan persamaan-persamaan berikut:

a. Persamaan Bernoulli untuk fluida tidak bergerak

Kasus khusus dari persamaan Bernoulli adalah untuk fluida yang diam (fluida statis). Ketika fluida diam atau tidak bergerak, fluida tersebut

tentu saja tidak punya kecepatan. Dengan demikian, $v_1 = v_2 = 0$. Pada kasus fluida diam, persamaan Bernoulli (8.23) bisa dirumuskan menjadi :



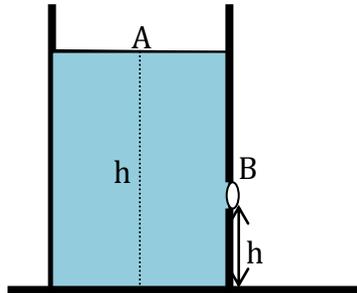
$$P_1 + \rho g h_1 = P_2 + \rho g h_2$$

$$P_1 - P_2 = \rho g h_2 - \rho g h_1$$

$$P_1 - P_2 = \rho g (h_2 - h_1) \quad (8.25)$$

b. Persamaan Bernoulli untuk fluida dalam wadah yang bocor pada ketinggian tertentu.

Salah satu penggunaan persamaan Bernoulli adalah menghitung kecepatan zat cair yang keluar dari dasar sebuah wadah (lihat gambar di bawah).



Kita terapkan persamaan Bernoulli pada titik 1 (permukaan wadah) dan titik 2 (permukaan lubang). Karena diameter kran/lubang pada dasar wadah jauh lebih kecil dari diameter wadah, maka kecepatan zat cair di permukaan wadah dianggap nol ($v_1 = 0$). Permukaan wadah dan permukaan lubang/kran terbuka sehingga tekanannya sama dengan tekanan atmosfer ($P_1 = P_2$). Dengan demikian, persamaan Bernoulli untuk kasus ini adalah :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

$$\rho g h_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Kecepatan aliran zat cair pada lubang di dasar wadah adalah:

$$\rho g h_1 = \left(\frac{1}{2} v_2^2 + g h_2\right) \rho$$

$$g h_1 = \left(\frac{1}{2} v_2^2 + g h_2\right)$$

$$\frac{1}{2} v_2^2 = g h_1 - g h_2$$

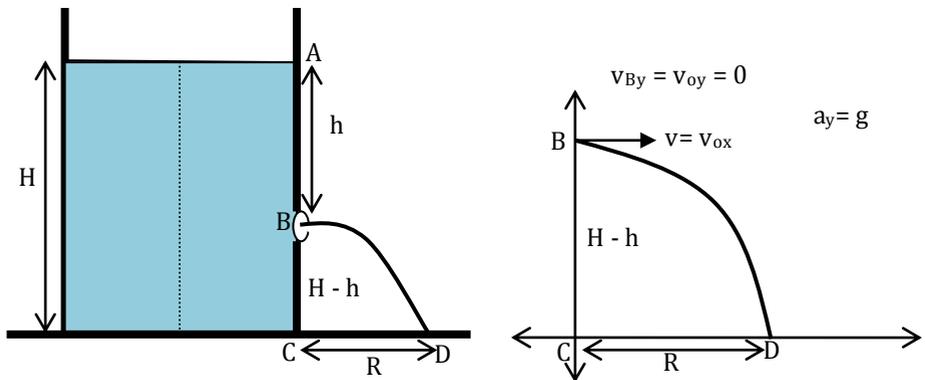
$$v_2^2 = 2g(h_1 - h_2)$$

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}, \text{ jika } h_1 = h_2$$

$$v_2 = \sqrt{2gh} \quad (8.26)$$

Berdasarkan persamaan (8.26), tampak bahwa laju aliran air pada lubang yang berjarak h dari permukaan wadah sama dengan laju aliran air yang jatuh bebas sejauh h . Ini dikenal dengan Teorema Torricelli⁶⁸.

Perhatikan gambar berikut. Jika air keluar dari lubang B dengan kelajuan v dan jatuh di titik D, maka kita dapatkan lintasan air dari titik B ke titik D berbentuk parabola. Berdasarkan analisis gerak parabola, kecepatan awal fluida sebesar $v_{Bx} = v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$, sedangkan kecepatan awal pada arah vertical (sumbu y) sebesar $v_{By} = 0$. Gerak air pada saat jatuh (sumbu y) merupakan GLBB dengan percepatan $a_y = g$.



Berdasarkan persamaan jarak $y = v_{oy} \cdot t - \frac{1}{2} a_y \cdot t^2$, dengan ketentuan $y = H - h$, $v_{oy} = 0$, dan $a_y = g$. Sehingga peroleh waktu yang dibutuhkan dari titik B ke titik D:

$$H - h = 0 + \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

$$t = \sqrt{\frac{2(H-h)}{g}} \quad (8.27)$$

gerak alir fluida pada sumbu x merupakan GLB, sehingga berlaku persamaan:

$$R = x = v_{ox} \cdot t \quad \text{oleh karena } v_{ox} = v_{Bx} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}, \text{ maka:}$$

⁶⁸ Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid 1 (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

$$R = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \sqrt{\frac{2(H-h)}{g}}$$

$$R = \sqrt{4h(H-h)} = 2\sqrt{h(H-h)} \quad (8.28)$$

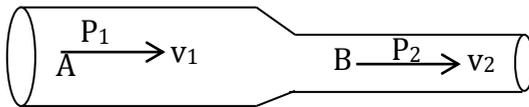
Apabila persamaan debit $Q = A \cdot v$, maka diperoleh:

$$Q = A \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (8.29)$$

- c. Untuk fluida yang mengalir di pipa horizontal (tidak ada perbedaan ketinggian $h_1 = h_2$), seperti tampak pada gambar berikut. Persamaan Bernoulli menjadi:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \quad (8.30)$$



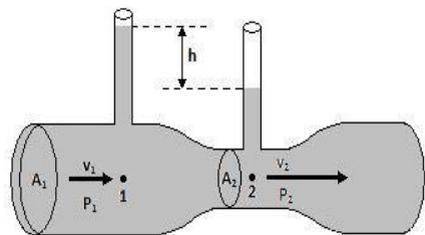
9. Penerapan Hukum Bernoulli

a. Pipa venturi

Alat ini dipakai untuk mengukur laju aliran fluida, misalnya menghitung laju aliran air atau minyak yang mengalir melalui pipa. Terdapat 2 jenis venturi meter, yakni venturimeter tanpa manometer dan venturimeter yang menggunakan manometer yang berisi cairan lain, seperti air raksa⁶⁹.

1) Venturimeter tanpa manometer

Gambar di bawah menunjukkan sebuah venturi meter yang digunakan untuk mengukur laju aliran zat cair dalam pipa. Ketika zat cair melewati bagian pipa yang penampangnya kecil (A_2), laju cairan meningkat. Menurut Hukum Bernoulli,



⁶⁹ Young, Hugh D. & Freedman, Roger A. 2002. *Fisika Universitas (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

Jika laju cairan meningkat, maka tekanan cairan menjadi kecil. Jadi tekanan zat cair pada penampang besar lebih besar dari tekanan zat cair pada penampang kecil ($P_1 > P_2$). Sebaliknya $v_2 > v_1$.

Substitusikan persamaan (8.19) dengan persamaan (8.30), diperoleh:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho \left(\left(\frac{A_1}{A_2} v_1 \right)^2 - v_1^2 \right)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right] \quad (8.31)$$

Substitusikan persamaan (8.25) dengan persamaan (8.31), diperoleh:

$$\rho g h = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right]$$

$$v_1^2 = \frac{2 g h}{\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 g h}{\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1}} \quad \text{atau} \quad v_2 = \sqrt{\frac{2 g h}{\left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right]}} \quad (8.32)$$

2) Venturimeter yang menggunakan manometer

Berdasarkan asas Bernoulli untuk pipa horizontal, berlaku persamaan (8.30), yaitu:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

$$v_2^2 - v_1^2 = \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} \quad (8.33)$$

Substitusikan persamaan kontinuitas: $v_1 = \frac{A_2}{A_1} v_2$, kedalam persamaan (8.33), diperoleh:

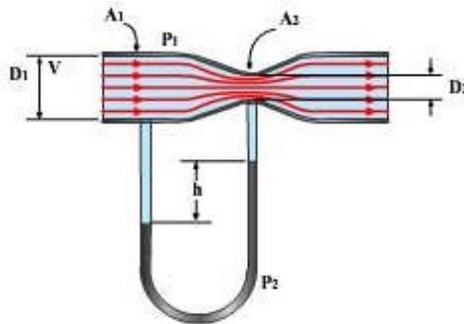
$$v_2^2 - \left(\frac{A_2}{A_1} v_2 \right)^2 = \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}$$

$$v_2^2 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 v_2^2 = \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}$$

$$\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] v_2^2 = \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}$$

$$v_2^2 = \frac{2(P_1 - P_2)}{\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \rho}$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right] \rho}} \quad \text{dan} \quad v_1 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\left[\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 - 1\right] \rho}} \quad (8.34)$$



Beda tekanan antara titik 1 dan titik 2 sama dengan tekanan hidrostatik cairan raksa pada manometer sehingga h.

$$P_1 - P_2 = \rho' g h \quad (8.35)$$

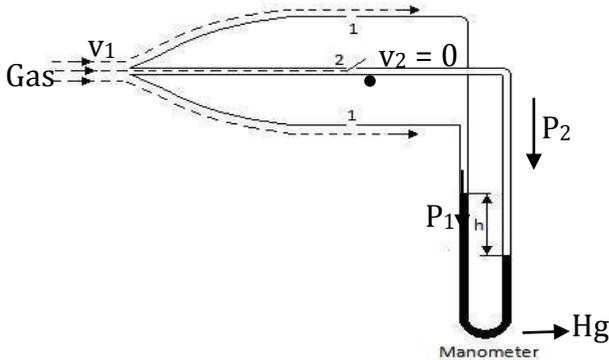
Substitusikan persamaan (8.34) dengan persamaan (8.35), sehingga diperoleh:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(\rho' g h)}{\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right] \rho}} \quad \text{dan} \quad v_1 = \sqrt{\frac{2(\rho' g h)}{\left[\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 - 1\right] \rho}} \quad (8.36)$$

b. Tabung pitot

Tabung pitot digunakan untuk mengukur laju aliran gas/udara. Alat ini dilengkapi dengan manometer raksa. Dengan mengetahui perbedaan ketinggian raksa pada kedua kaki manometer, aliran gas dapat ditentukan kelajuannya (lihat gambar). Misalkan, Lubang pada titik 1 sejajar dengan aliran udara. Posisi kedua lubang ini dibuat cukup jauh dari ujung tabung pitot, sehingga laju dan tekanan udara di luar lubang sama seperti laju dan tekanan udara yang mengalir bebas. Dalam hal ini, v_1 = laju aliran udara yang mengalir bebas (ini yang akan kita ukur), dan tekanan pada kaki kiri manometer (pipa bagian kiri) = tekanan udara yang mengalir bebas (P_1). ρ menyatakan massa jenis udara⁷⁰.

⁷⁰ Tipler, P.A.1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid I (terjemahan)*. Jakarta: Penebit Erlangga



$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2$$

$$P_2 - P_1 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \quad (8.37)$$

Beda tekanan antara titik 1 dan 2 sama dengan tekanan hidrostatik pada manometer sehingga diperoleh:

$$P_1 - P_2 = \rho g h \quad (8.38)$$

Substitusikan persamaan (8.37) dengan (8.38), diperoleh:

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 = \rho g h$$

$$v_1^2 = \frac{2 g h \rho'}{\rho}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 g h \rho'}{\rho}} \quad (8.39)$$

Keterangan:

v = kelajuan aliran gas/udara (m/s)

g = percepatan gravitasi bumi

h = beda tinggi zat cair dalam kaki manometer

ρ = massa jenis udara yang mengalir

ρ' = massa jenis zat cair dalam manometer

c. Alat penyemprot obat nyamuk dan parfum

Secara garis besar, prinsip kerja penyemprot parfum bisa digambarkan sebagai berikut (lihat gambar). Ketika bola karet diremas, udara yang ada di dalam bola karet meluncur keluar melalui pipa 1. Udara dalam pipa 1 mempunyai laju yang lebih tinggi, maka tekanan udara pada pipa 1 menjadi rendah. Sebaliknya, udara dalam pipa 2 mempunyai laju

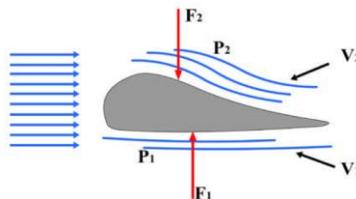
yang lebih rendah. Tekanan udara dalam pipa 2 lebih tinggi. Akibatnya, cairan parfum didorong ke atas. Ketika cairan parfum tiba di pipa 1, udara yang meluncur dari dalam bola karet mendorongnya keluar cairan parfum akhirnya menyembur membasahi tubuh⁷¹.



d. Gaya angkat pada pesawat terbang

Salah satu faktor yang menyebabkan pesawat bisa terbang adalah adanya sayap. Bentuk sayap pesawat melengkung dan bagian depannya lebih tebal daripada bagian belakangnya. Udara yang mengalir dari bawah berdesak-desakan dengan sayap yang ada di sebelah atas. Mirip seperti air yang mengalir dari pipa yang penampangnya besar ke pipa yang penampangnya sempit. Akibatnya, laju udara di sebelah atas sayap meningkat. Karena laju udara meningkat, maka tekanan udara menjadi kecil. Sebaliknya, laju aliran udara di sebelah bawah sayap lebih rendah, karena udara tidak berdesak-desakan (tekanan udaranya lebih besar). Adanya perbedaan tekanan ini, membuat sayap pesawat didorong ke atas. Karena sayapnya bersatu dengan badan pesawat, maka pesawat ikut terangkat.

**v besar & P kecil
udara berdesak-desakan**



v kecil & P besar

⁷¹ Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I, Terjemahan*. Jakarta: Penerbit Erlangga

Di mana gaya $F_1 = P_1 \cdot A$ dan $F_2 = P_2 \cdot A$. Perbedaan tekanan ($P_2 - P_1$) menimbulkan gaya angkat yang besarnya adalah:

$$F_1 - F_2 = (P_2 - P_1) A \quad (8.40)$$

Oleh karena $P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$, maka persamaan (8.40) menjadi:

$$F_1 - F_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) A \quad (8.41)$$

Agar pesawat dapat terangkat ke atas/ke udara, gaya angkat pesawat harus lebih besar daripada berat pesawat.

$$F_1 - F_2 > m \cdot g \quad (8.42)$$

Jika pesawat akan melayang dengan ketinggian tetap, gaya angkat pesawat harus sama dengan gaya berat pesawat.

$$F_1 - F_2 = m \cdot g \quad (8.43)$$

10. Tegangan Permukaan dan Kapilaritas

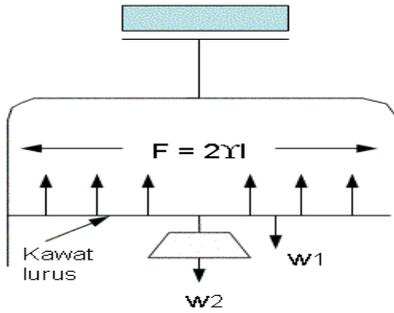
Keluarnya zat cair dari pipet bukan sebagai suatu aliran, tetapi sebagai tetesan-tetesan. Jika kita letakan sebuah pisau silet yang kecil dengan hati-hati pada permukaan zat cair, maka kita dapat membuatnya terapung. Peristiwa-peristiwa tersebut berhubungan dengan tegangan permukaan. Dapat dipahami bahwa bila suatu zat cair dibendung untuk tidak bergerak, maka pada hakikatnya tersimpan energi potensial yang sebanding dengan luas permukaannya yang disebut energi potensial permukaan zat cair. Jadi suatu zat air yang luas permukaannya A akan mempunyai energi (kerja) $W = \gamma A$, dimana γ adalah koefisien tegangan permukaan zat cair (satunya Joule/m²). Jadi suatu elemen luas permukaan zat cair yang besarnya dA akan mempunyai energi:

$$dW = \gamma dA \quad (8.44)$$

Jadi tegangan permukaan tidak lain adalah kerja yang dilakukan untuk menambah luas permukaan sebesar satu satuan luas, yakni:

$$\gamma = \frac{dW}{dA} \quad (8.45)$$

Sebagai contoh efek tegangan permukaan suatu zat cair, tinjaulah suatu kawat dibengkokkan berbentuk U dan seutas kawat lurus lain dipasang sehingga dapat bergerak pada kaki kawat, seperti pada gambar di bawah ini. Jika alat ini kita celupkan ke dalam larutan air sabun dan kemudian diangkat ke luar, maka kawat lurus akan tertarik ke atas jika berat w_1 tidak terlalu besar. Kawat lurus ini dapat dibuat setimbang dengan

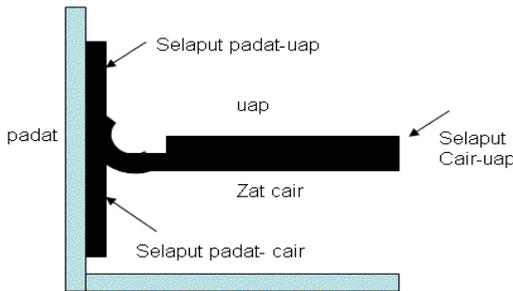


meletakkan pemberat kedua w_2 . Ternyata dengan gaya yang sama $F = w_1 + w_2$ akan membuat kawat lurus berada dalam keadaan setimbang pada setiap posisi, tak bergantung pada luas selaput sabun, selama temperature sabun tetap.

Peristiwa di atas dapat ditinjau dengan menggunakan persamaan (8.44). Misalkan kawat lurus bergerak ke bawah sejauh y oleh gaya $F = w_1 + w_2$. kerja yang dilakukan adalah sebesar Fy , dan luas selaput sabun bertambah sebesar $2ly$, maka tegangan permukaan zat air (air sabun) adalah:

$$\gamma = \frac{w}{F} \tag{8.46}$$

Kita telah membahas gaya permukaan zat cair, selain itu masih ada batasan-batasan lain dimana juga terjadi lapisan perbatasan. Kita dapat mempunyai batas antara dinding padat dan zat cair, seperti diperlihatkan pada Gambar di bawah ini.



Untuk tiap selaput kita dapatkan gaya permukaan, misalkan: γ_{pc} = tegangan permukaan selaput padat-cair, γ_{pu} = tegangan permukaan selaput padat-uap, dan γ_{cu} = tegangan permukaan selaput cair-uap.

Jika tempat ketiga selaput ini kita isolir, maka bagian ini berada dalam keadaan seimbang di bawah empat buah pengaruh gaya. Tiga dari gaya-gaya ini adalah tegangan permukaan. Gaya ke empat adalah gaya tarik

antara selaput permukaan dengan dinding, yang disebut gaya adhesi (A).
jika syarat kesetimbangan dipergunakan maka diperoleh:

$$F_x = \gamma_{cu} \sin \theta - A = 0$$

$$F_y = \gamma_{pu} - \gamma_{pc} - \gamma_{cu} \cos \theta = 0 \quad \text{atau}$$

$$A = \gamma_{cu} \sin \theta$$

$$\gamma_{pu} - \gamma_{pc} = \gamma_{cu} \cos \theta$$

dengan θ adalah sudut kontak.

Pengaruh tegangan permukaan yang paling dikenal adalah naiknya zat cair dalam pipa kapiler. Jika sudut kontak $\theta < 90^\circ$, maka zat cair akan naik dalam tabung sampai tercapai suatu ketinggian y , seperti pada gambar di atas. Jika tabung mempunyai jejari r , maka zat cair bersentuhan dengan tabung sepanjang $2\pi r$ dan tinggi zat cair dalam silinder y , maka gaya total ke atas adalah:

$$F = 2\pi r \gamma_{cu} \cos \theta \quad (8.47)$$

Jika rapat massa zat cair adalah ρ , maka gaya ke bawah adalah gaya berat w adalah:

$$w = \rho g \pi r^2 y \quad (8.48)$$

Syarat kesetimbangan gaya-gaya adalah:

$$F = w$$

$$2\pi r \gamma_{cu} \cos \theta = \rho g \pi r^2 y$$

$$y = \frac{2 \gamma_{cu} \cos \theta}{\rho g r} \quad (8.49)$$

Latihan Soal 9.1:

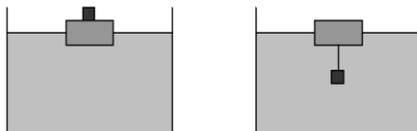
1. Suatu benda beratnya 70 N dimasukkan dalam air ($\rho_{air} = 1000 \text{ kg/m}^3$). Apabila berat benda dalam air menjadi setengahnya dan percepatan gravitasi bumi ($g = 10 \text{ m/s}^2$). Hitunglah :
 - a. Gaya tekan ke atas terhadap benda
 - b. Volume benda
 - c. Massa jenis benda
2. Sebuah balok kayu ($\rho_{kayu} = 600 \text{ kg/m}^3$) mengapung dipermukaan air. Apabila selempar aluminium ($\rho_{aluminium} = 2700 \text{ kg/m}^3$) yang massanya 64 gram dikaitkan pada balok itu, sistem tersebut akan bergerak ke dalam dan akhirnya melayang di dalam air. Berapakah volume balok kayu tersebut.
3. Sebuah gabus ($\rho_{gabus} = 0,24 \text{ g/cm}^3$) berukuran panjang 14 cm dan lebar 7 cm terapung di air. Pada gabus tersebut dikaitkan besi ($\rho_{besi} = 7,9 \text{ g/cm}^3$) yang massanya 37 gram. Berapakah tebal gabus agar sistem tersebut melayang di dalam air.

4. Sebuah tabung kosong massanya 200 gram diisi penuh air sehingga massa totalnya menjadi 400 gram. Jika tabung kosong diisi bola-bola kecil yang terbuat dari bahan A, massa tolanya menjadi 380 gram. Jika tabung berisi bola-bola kecil ditambahkan air massanya 420 gram. Berapakah massa jenis bahan A dan apakah bahan ini akan tenggelam.
5. Sebuah logam campuran emas dan perak massa jenisnya $17,5 \text{ g/cm}^3$. Jika dianggap bahwa dalam proses peleburan emas dan perak itu volume totalnya tidak berubah. Berapakah perbandingan massa emas dan perak dalam campuran itu. ($\rho_{\text{emas}} = 19,3 \text{ g/cm}^3$) dan ($\rho_{\text{perak}} = 10,5 \text{ g/cm}^3$).
6. Sebuah arca perak yang bagian dalamnya berongga, beratnya 84×10^3 dyne. Jika arca dicelupkan dalam minyak tanah ($\rho = 0,8 \text{ g/cm}^3$) beratnya $74,4 \times 10^3$ dyne. Hitunglah volume rongga yang terdapat di dalam arca bila ($\rho_{\text{arca}} = 10,5 \text{ g/cm}^3$).
7. Air mengalir dengan kecepatan 10 m/s dari pipa berdiameter kecil (D_1) menuju pipa berdiameter besar (D_2). Apabila $D_1 = 20 \text{ cm}$, $D_2 = 40 \text{ cm}$, tekanan di D_1 adalah $2 \times 10^4 \text{ N/m}^2$, dan beda tinggi pipa 2 meter. Berapakah tekanan di D_2 .
8. Sebuah pipa pitot yang dilengkapi manometer raksa ($\rho_{\text{raksa}} = 13,6 \text{ g/cm}^3$) digunakan untuk mengukur kelajuan aliran gas ($\rho_{\text{gas}} = 0,004 \text{ g/cm}^3$). Apabila beda tinggi kaki manometer 2,5 cm dan $g = 10 \text{ m/s}^2$. Berapakah kelajuan aliran gas.
9. Air mengalir dengan aliran stasioner pada suatu pipa mendatar yang luas penampangnya 30 cm^2 . Jika tekanan statis air sebesar $6,5 \times 10^4 \text{ Pa}$ dan tekanan totalnya $6,7 \times 10^4 \text{ Pa}$. Hitunglah:
 - a. Kelajuan aliran air
 - b. Debit air yang melalui pipa
10. Di dalam pipa silinder berdiameter 12 cm mengalir air dengan kelajuan 3 m/s. diujung pipa terdapat mulut pipa berdiameter 2 cm.
 - a. Hitunglah kelajuan air di mulut pipa
 - b. Jika tekanan udara $P_U = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$ dan mulut pipa berhubungan dengan udara. Hitunglah tekanan air di mulut pipa.
11. Sebuah pompa air mampu mengambil air setiap menitnya 60 liter. Pipa masukan digunakan untuk mengambil air berdiameter 3 cm, sedangkan pipa keluarannya berdiameter 2 cm. Jika tekanan udara $1 \times 10^5 \text{ Pa}$, massa jenis air 1000 kg/m^3 , $g = 10 \text{ m/s}^2$, dan panjang total pompa dari permukaan air sumur 15 cm. Hitunglah:
 - a. Kecepatan air pada pipa keluaran
 - b. Tekanan air pada ujung pipa keluaran

12. Sebuah tandon air di letakkan di atas penyangga. Pada bagian bawah tandon air terdapat keran yang dapat dibuka dan ditutup. ($g = 10 \text{ m/s}^2$).
 - a. Berapa kelajuan air yang keluar dari keran saat keran tersebut dibuka
 - b. Berapa jauh semburan air ke lantai
13. Sebuah venturimeter yang dilengkapi manometer raksa ($\rho_{\text{raksa}} = 13,6 \text{ g/cm}^3$) mempunyai diameter pipa utama 4,5 cm dan diameter pipa sempit 1,5 cm. Jika beda tekanan pada pipa utama dan pipa sempit sebesar $1,35 \times 10^5 \text{ Pa}$. Tentukan:
 - a. Kelajuan air pada pipa sempit
 - b. Beda tinggi raksa pada kedua kaki manometer
14. Sebuah bak yang luas digunakan untuk menampung air. Pada jarak 8 meter di bawah permukaan air. Air mengalir melalui celah sebanyak $50 \text{ cm}^3/\text{s}$. Jika di atas permukaan air diberi tambahan tekanan sebesar $0,4 \times 10^5 \text{ Pa}$. Hitunglah debit air yang mengalir.
15. Sebuah pesawat dengan berat 18.000 N terbang horizontal dengan kecepatan konstan. Jika luas sayap pesawat 40 m^2 dan kecepatan aliran udara pada bagian atas sayap 80 m/s. Berapakah kecepatan aliran udara pada bagian bawah sayap pesawat.

Latihan Soal 9.2:

1. Apakah skala timbangan menunjukkan nilai yang sama ketika menimbang badan bertumpu pada dua kaki dan bertumpu pada satu kaki?
2. Mengapa pisau yang tajam memotong lebih baik dibandingkan dengan pisau yang tumpul?
3. Mengapa badan kita lebih nyaman ketika berbaring dibandingkan dengan posisi duduk?
4. Mengapa tekanan darah diukur dipangkal lengan? Apakah tekanan darah di kaki lebih besar?
5. Sepotong besi ditempatkan diatas balok kayu membuat balok kayu terbenam sebagian di air. Jika sepotong besi tersebut digantung dengan seutas tali pada kayu, akankah kayu tenggelam lebih dangkal, sama rendah atau lebih dalam?



6. Akankah ikan mengapung di permukaan, tenggelam atau tetap pada kedalaman yang sama jika medan gravitasi bertambah?
7. Air keluar melalui lubang kecil pada dinding tangki seperti pada Gambar. Tentukan laju alir volume air dari tangki (Q).



8. Aliran darah mengalir lebih cepat pada pembuluh arteri dibandingkan pada pembuluh kapiler. Berdasarkan rumusan persamaan kontinuitas semestinya kecepatan aliran pada pembuluh kapiler lebih besar karena diameternya lebih kecil. Mengapa hal ini terjadi?
9. Tekanan hidrostatik yang diberikan oleh kolom zat cair yang massa jenisnya 1200 kg/m^3 adalah $0,9 \text{ atm}$. Tentukan tinggi kolom zat cair tersebut!
10. Tiga buah benda padat A, B dan C dimasukkan ke dalam bejana berisi air. Benda A tenggelam dalam air sedangkan benda B melayang dan benda C mengapung. F_A adalah gaya apung pada A, F_C adalah gaya apung pada B, dan F_C adalah gaya apung pada C.
 - a. Urutkan rapat massa ketiga benda tersebut dari yang terkecil sampai yang terbesar
 - b. Jika ketiga benda tersebut mempunyai volume yang sama besar, tentukan dua dari ketiga benda tersebut yang mendapatkan gaya apung yang sama besar dan tentukan pula apakah gaya apung pada benda yang satu lagi lebih besar atau lebih kecil (dibandingkan dengan dua pertama).
 - c. Pertanyaan yang sama dengan pertanyaan (b) jika ketiga benda tersebut mempunyai massa yang sama.
11. Benda padat yang uniform berbentuk kubus dengan panjang sisi 10 cm dan mempunyai massa 700 g . Apakah benda tersebut akan terapung dalam air? Jika terapung, tentukan volume bagian yang tercelup dalam air.
12. Sepotong bahan logam yang bentuknya tidak beraturan massanya 90 gram ketika ditimbang di udara. Ketika bahan itu berada dalam air, angka di timbangan menunjukkan 75 g . Tentukan volume dan rapat massa logam tersebut.

13. Seekor binatang kecil ditemukan bertahan didalam campuran 18% alkohol dan 82% air. Jika massa jenis alkohol adalah $0,8 \text{ gram/cm}^3$ dan massa jenis air adalah 1 gram/cm^3 , tentukan kerapatan binatang tersebut.
14. Sebuah balok kayu tercelup $\frac{3}{4}$ bagiannya dalam air. Tentukan rapat massa balok tersebut. Jika balok tersebut dimasukkan kedalam bejana berisi minyak yang rapat massanya $0,8 \text{ gr/cc}$, tentukan berapa bagian balok yang tercelup dalam minyak.
15. Sebuah dongkrak hidrolik mobil mempunyai luas penampang piston input dan piston angkat secara berurutan 100 cm^2 dan 1000 cm^2 . Dongkrak dapat mengangkat mobil seberat $1,4 \times 10^2 \text{ N}$. Tentukan besar gaya dan tekanan pada piston input.
16. Saluran pemanas berbentuk silinder yang digunakan untuk mengalirkan udara dengan laju $3,0 \text{ m/s}$ dapat mengisi ruangan dengan volume 300 m^3 setiap 15 menit. Tentukan luas penampang saluran tersebut.
17. Permukaan air pada tangki dipertahankan konstan setinggi 20 m . Pada dinding tangki bagian bawah dihubungkan pipa keluar yang kecil dan ujung pipa tersebut mengarah ke atas. Tentukan kelajuan air pada saat keluar dari pipa kecil itu.
18. Air mengalir pada pipa horizontal dengan kecepatan 3 m/s dan tekanan 200 kPa . Pipa mengecil menjadi separo diameternya semula. Tentukan kelajuan aliran dan tekanan di bagian yang sempit.
19. Air mengalir ke atas setinggi $1,5 \text{ m}$ melalui pipa dengan laju volume 14 L/s . Jika kecepatan pada ujung pipa yang rendah $3,0 \text{ m/s}$ dan luas penampang pipa pada ujung atas 20 cm^2 , tentukan perbedaan tekanan pada kedua ujung.
20. Mengapa pesawat terbang dapat terangkat ke atas dan bagaimana hubungan antara luas sayap dengan gaya angkat pesawat.

Daftar Pustaka

- Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid I (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga
- Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I, Terjemahan*. Jakarta: Penerbit Erlangga
- Tipler, P.A.1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid I (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga
- Young, Hugh D. & Freedman, Roger A. 2002. *Fisika Universitas (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga

BAB X

SUHU DAN KALOR

1. Suhu

Suhu atau temperatur adalah besaran yang menunjukkan derajat panas atau dingin suatu benda⁷². Ketika kita memanaskan atau mendinginkan suatu benda sampai pada suhu tertentu, beberapa sifat fisik benda berubah. Sebagai contoh; ketika memanaskan sebatang besi, besi akan memuai, begitu pula ketika mendinginkan air sampai suhu dibawah nol, air tersebut akan berubah menjadi es.

a. Sifat termometrik zat

Sifat termometrik zat adalah sifat-sifat zat yang berubah ketika suhunya berubah. Sifat-sifat tersebut antara lain: warna, volume, tekanan, dan daya hantar listrik⁷³.

b. Mengukur suhu dengan termometer

Untuk mengukur suhu suatu benda digunakan termometer. Zat cair yang paling banyak dipakai untuk mengisi tabung termometer adalah raksa. Kelebihan raksa dibanding zat cair lainnya antara lain :

- 1) Keseimbangan termal terhadap zat yang akan diukur lebih cepat.
- 2) Memiliki titik beku rendah, yaitu -39°C dan titik didih tinggi, yaitu 357°C .
- 3) Memiliki kenaikan volume yang teratur pada saat terjadi perubahan suhu.
- 4) Memiliki miniskus cembung sehingga pengukuran suhu lebih akurat.
- 5) Mudah dilihat karena raksa mengkilat

c. Jenis termometer

- 1) Termometer bimetal

Alat ini bekerja berdasarkan prinsip bahwa logam akan memuai jika dipanaskan.

- 2) Termometer hambatan

Alat ini bekerja berdasarkan prinsip bahwa bila seutas kawat logam

⁷² Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

⁷³ Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

dipanaskan, hambatan listrik akan bertambah.

3) Termometer gas

Bila sejumlah gas yang dipanaskan volumenya dijaga tetap, tekanannya akan bertambah. Sifat termometrik inilah yang digunakan untuk mengukur suhu pada thermometer gas.

4) Termokopel

Perbedaan pemuaian antara dua logam yang kedua ujungnya disentuh dimanfaatkan pada termokopel.

d. Skala beberapa termometer

Penetapan skala:⁷⁴

1) Termometer Celcius

Titik lebur es diberi angka 0, sedangkan titik didih air diberi angka 100. Daerah antara kedua titik tetap ini dibagi dalam 100 skala.

2) Termometer Reamur

Titik lebur es diberi angka 0, sedangkan titik didih air diberi angka 12. Daerah antara kedua titik tetap ini dibagi dalam 80 skala.

3) Termometer Fahrenheit

Titik lebur es diberi angka 32, sedangkan titik didih air diberi angka 212. Daerah antara kedua titik tetap ini dibagi dalam 180 skala.

4) Termometer Kelvin

Titik lebur es diberi angka 273, sedangkan titik didih air diberi angka 373. Daerah antara kedua titik tetap ini dibagi dalam 100 skala.

e. Perbandingan pembagian skala celcius ($^{\circ}\text{C}$), Reamur ($^{\circ}\text{R}$), Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), dan Rankine (R).

1) Hubungan antara $^{\circ}\text{C}$ dengan $^{\circ}\text{R}$

$$100 \text{ skala } ^{\circ}\text{C} = 80 \text{ skala } ^{\circ}\text{R}$$

$$5 \text{ skala } ^{\circ}\text{C} = 4 \text{ skala } ^{\circ}\text{R}$$

$$1 \text{ skala } ^{\circ}\text{C} = 4/5 \text{ skala } ^{\circ}\text{R}$$

$$0^{\circ}\text{C} = 0^{\circ}\text{R}$$

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{5}{4} (T^{\circ}\text{R})$$

atau

$$T^{\circ}\text{R} = \frac{4}{5} (T^{\circ}\text{C})$$

⁷⁴ Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

2) Hubungan antara $^{\circ}\text{C}$ dengan $^{\circ}\text{F}$

$$100 \text{ skala } ^{\circ}\text{C} = 180 \text{ skala } ^{\circ}\text{F}$$

$$5 \text{ skala } ^{\circ}\text{C} = 9 \text{ skala } ^{\circ}\text{F}$$

$$1 \text{ skala } ^{\circ}\text{C} = 9/5 \text{ skala } ^{\circ}\text{F}$$

$$0^{\circ}\text{C} = 32^{\circ}\text{F}$$

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (T^{\circ}\text{F} - 32)$$

atau

$$T^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} (T^{\circ}\text{C}) + 32$$

3) Hubungan antara $^{\circ}\text{R}$ dan $^{\circ}\text{F}$

$$80 \text{ skala } ^{\circ}\text{R} = 180 \text{ skala } ^{\circ}\text{F}$$

$$4 \text{ skala } ^{\circ}\text{R} = 9 \text{ skala } ^{\circ}\text{F}$$

$$1 \text{ skala } ^{\circ}\text{R} = 9/4 \text{ skala } ^{\circ}\text{F}$$

$$0^{\circ}\text{R} = 32^{\circ}$$

$$T^{\circ}\text{R} = \frac{4}{9} (T^{\circ}\text{F} - 32)$$

atau

$$T^{\circ}\text{F} = \frac{9}{4} (T^{\circ}\text{R}) + 32$$

4) Hubungan antara $^{\circ}\text{C}$ dengan K

$$100 \text{ skala } ^{\circ}\text{C} = 100 \text{ skala K}$$

$$1 \text{ skala } ^{\circ}\text{C} = 1 \text{ skala K}$$

$$0^{\circ}\text{C} = 273 \text{ K}$$

$$1^{\circ}\text{C} = (1 + 273)\text{K}$$

$$T = (T^{\circ}\text{C} + 273) \text{ K}$$

atau

$$T^{\circ}\text{C} = (T - 273) \text{ K}$$

5) Hubungan antara $^{\circ}\text{F}$ dan R (Rankine)

$$T \text{ (R)} = T^{\circ}\text{F} + 460$$

atau

$$T(^{\circ}\text{F}) = T(\text{R}) - 460$$

Contoh soal :

Suhu dalam skala derajat Celcius menunjukkan angka 30°C . Berapakah angka yang ditunjukkan dalam skala derajat:

a. Reamur ? ; (b) Fahrenheit ?; (c) Kelvin ?

Jawab :

$$T^{\circ}\text{C} = 30^{\circ}\text{C}$$

$$\text{a. } T^{\circ}\text{R} = \frac{4}{5}(T^{\circ}\text{C}) = \frac{4}{5}(30) = 24^{\circ}\text{R}$$

$$\text{b. } T^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}(T^{\circ}\text{C}) + 32 = \frac{9}{5}(30) + 32 = 86^{\circ}\text{F}$$

$$\text{c. } T = (T^{\circ}\text{C} + 273) = 30 + 273 = 303 \text{ K}$$

Latihan Soal 10.1

- Ubahlah suhu berikut ke dalam akala:
 - $80^{\circ}\text{C} = \dots\dots^{\circ}\text{F} = \dots\dots^{\circ}\text{R} = \dots\dots\text{K} = \dots\dots\text{R}$
 - $33^{\circ}\text{F} = \dots\dots^{\circ}\text{C} = \dots\dots^{\circ}\text{R} = \dots\dots\text{K} = \dots\dots\text{R}$
 - $45^{\circ}\text{R} = \dots\dots^{\circ}\text{C} = \dots\dots^{\circ}\text{F} = \dots\dots\text{K} = \dots\dots\text{R}$
 - $373\text{K} = \dots\dots^{\circ}\text{C} = \dots\dots^{\circ}\text{F} = \dots\dots^{\circ}\text{R} = \dots\dots\text{R}$
 - $176\text{R} = \dots\dots^{\circ}\text{C} = \dots\dots^{\circ}\text{F} = \dots\dots^{\circ}\text{R} = \dots\dots\text{K}$
- Pada suatu termometer skala A, titik beku air adalah 20°A dan titik didih air adalah 200°A . suatu benda diukur suhunya dengan termometer A menunjukkan angka 74°A .
 - Berapakah suhu benda bila diukur menggunakan termometer Celcius, Fahrenheit, dan Reamur.
 - Pada suhu berapakah skala termometer A dan Celcius menunjukkan angka yang sama.
- Suatu zat cair suhunya diukur dengan tiga buah termometer sekaligus, yaitu Celcius, Reamur, dan Fahrenheit. Jumlah suhu ketiga termometer adalah 158. Berapakah suhu yang ditunjukkan oleh termometer Fahrenheit dan Reamur.
- Suatu benda diukur dua kali berturut-turut dengan termometer Fahrenheit dan Celcius. Bila termometer Fahrenheit menunjukkan empat kali angka yang ditunjukkan oleh termometer Celcius. Berapakah suhu tersebut menurut termometer Fahrenheit.
- Jelaskan apa yang anda ketahui tentang nol mutlak.

2. Pemuaian Zat

a. Pemuaian zat padat

Pemuaian zat padat dapat dengan mudah diamati karena zat padat mempunyai bentuk yang tetap. Dengan mengukur panjang, lebar, dan tinggi zat padat setelah dipanaskan akan memuai⁷⁵.

⁷⁵ Mark W. Zemansky. 1994. *Fisika untuk Universitas (Mekanika, Panas, Bunyi)*. Jakarta: Bina Cipta.

1) Pemuaian panjang/linier

Bila suatu benda padat dipanaskan, maka benda tersebut akan memuai ke segala arah, tetapi untuk zat padat yang panjang, dengan luas penampang yang kecil, pemuaian dapat dianggap terjadi dalam arah panjang saja, sedangkan pemuaian dalam arah melebar, dan tebalnya diabaikan.

Besar muai panjang bergantung pada jenis bahannya, panjang batang mula-mula, dan kenaikan suhu.

Koefisien muai panjang (α) didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang zat (Δl), untuk setiap kenaikan suhu sebesar satu satuan suhu (ΔT).

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T}$$

atau

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$$

Dengan Δl = pertambahan panjang (m)

$$\Delta l = l_t - l_0$$

$$\begin{aligned} L_t &= l_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T) \\ &= \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T \\ &= \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T \end{aligned}$$

Dengan :

l_0 = panjang mula-mula (m)

l_t = panjang akhir (m)

ΔT = suhu akhir – suhu awal ($^{\circ}\text{C}/\text{K}$)

α = koefisien muai panjang ($^{\circ}\text{C}^{-1}/\text{K}^{-1}$)

Contoh Soal:

Batang aluminium yang panjangnya 4 m, naik suhunya dari 27°C menjadi 72°C . Jika koefisien muai panjang aluminium = $24 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, hitunglah :

- Pertambahan panjang aluminium
- Panjang batang aluminium pada suhu 72°C .

Jawab:

Diketahui : $l_0 = 4 \text{ m}$

$$\Delta T = 72^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C} = 45^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha = 24 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

a. $\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T = (24 \times 10^{-6}) (4) (45) = 4,320 \times 10^{-3} \text{ m} = 0,00432 \text{ m}$

b. $\Delta l = l_t - l_0$

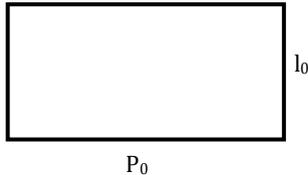
$$l_t = l_o + \Delta l = 4 + 0,00432 = 4,00432 \text{ m}$$

2) Pemuaiian luas

Apabila benda tipis berbentuk persegi panjang dipanaskan, maka akan terjadi pemuaian dalam arah memanjang dan melebar atau dikatakan mengalami pemuaian luas.

Sebuah plat segi empat dengan panjang mula-mula (P_o) dan lebar (l_o) dipanaskan sampai suhunya bertambah ΔT , maka ukurannya menjadi:

$$P_t = P_o (1 + \alpha \cdot \Delta T) \text{ dan } l_t = l_o (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$



Luas plat mula-mula $A_o = P_o \times l_o$ dan setelah dipanaskan menjadi:

$$A_t = P_t \times l_t$$

$$A_t = P_o (1 + \alpha \cdot \Delta T) \times l_o (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$A_t = A_o (1 + 2\alpha \cdot \Delta T + \alpha^2 \cdot \Delta T^2)$$

Karena α kecil, maka α^2 menjadi sangat kecil dan $\alpha^2 \cdot \Delta T^2$ dapat diabaikan, maka persamaan di atas menjadi:

$$A_t = A_o (1 + \beta \cdot \Delta T)$$

$$\beta = 2\alpha$$

Koefisien muai luas suatu zat (β) adalah perbandingan antara pertambahan luas zat (ΔA) dengan luas semula (A_o), untuk setiap kenaikan suhu sebesar satu satuan suhu (ΔT).

$$\beta = \frac{\Delta A}{A_o \Delta T}$$

dan

$$\Delta A = A_T - A_o$$

Dengan :

A_o = luas mula-mula (m^2)

A_T = luas setelah dipanaskan (m^2)

ΔT = kenaikan suhu ($^{\circ}C^{-1}$ atau K^{-1})

Contoh Soal:

Kaca jendela rumah pada suhu $25^{\circ}C$ luasnya 1 m^3 . Berapa luas kaca

tersebut setelah suhunya naik 45°C karena sinar matahari? (koefisien muai panjang kaca = $9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

Jawab:

$$A = 1 \text{ m}^3$$

$$\Delta T = 45 - 25 = 20^{\circ}\text{C}$$

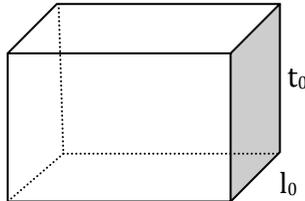
$$\beta = 2\alpha = 2 (9 \cdot 10^{-6}) = 18 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

$$\Delta A = \beta \cdot A_0 \cdot \Delta T = (18 \cdot 10^{-6}) (1) (20) = 360 \times 10^{-6} = 0,00036 \text{ m}^2$$

$$A_T = A_0 (1 + \beta \cdot \Delta T) = 1 + 0,00036 = 1,00036 \text{ m}^2$$

3) Pemuaiian volume

Jika zat padat berbentuk kubus, bola, atau balok maka pemuaiian yang harus diperhitungkan adalah muai volumenya. Apabila volume mula-mula V_0 dan volume setelah dipanaskan V_t , maka dapat diturunkan hubungan antara V_0 dan V_t :



$$V = V_0 + \Delta V \quad P_0$$

$$V_0 = l_0^3$$

$$\Delta V = 3 (l_0 \cdot l_0 \cdot \Delta l) + 3 (\Delta l \cdot l_0 \cdot \Delta l) + (\Delta l)^3$$

$$\Delta V = 3 (l_0^2 \cdot \Delta l) + 3 (\Delta l^2 \cdot l_0) + (\Delta l)^3$$

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Jadi:

$$\Delta V = 3 (l_0^2 \cdot l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T) + 3 (\Delta l^2 \cdot l_0) + (\Delta l)^3$$

Untuk $(\Delta l)^2$ dan $(\Delta l)^3$ bernilai sangat kecil sehingga dapat diabaikan:

$$\Delta V = 3 (l_0^3 \cdot \alpha \cdot \Delta T)$$

$$\Delta V = 3 V_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$\Delta V = V_0 \cdot 3\alpha \cdot \Delta T$$

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T$$

Koefisien muai volume suatu zat (γ) adalah perbandingan antara pertambahan volume (ΔV) dengan volume semula (V_0), untuk tiap kenaikan suhu sebesar satu satuan suhu (ΔT).

$$\gamma = \frac{\Delta V}{V_o \cdot \Delta T} \quad \text{dan} \quad \Delta V = V_t - V_o$$

Dengan ΔV = pertambahan volume zat (m^3)

V_o = volume mula-mula

V_T = volume setelah dipanaskan

ΔT = kenaikan suhu ($^{\circ}C/K$)

γ = koefisien muai volume ($^{\circ}C^{-1}/K^{-1}$)

$$V_t = V_o (1 + \gamma \Delta T)$$

$$\gamma = 3\alpha$$

Contoh Soal :

Sebuah bola baja ($\alpha = 11 \times 10^{-6} (^{\circ}C)^{-1}$) pada suhu $25^{\circ}C$ diameternya 2 cm. Berapakah volume bola tersebut bila suhunya dinaikkan menjadi $100^{\circ}C$?

Jawab :

$$R = \frac{1}{2} d = \frac{1}{2} \cdot 2 = 1 \text{ cm}$$

$$V_o = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} (3,14) (1)^3 = 4,186667 \text{ cm}^3$$

$$\Delta T = 100 - 25 = 75^{\circ}C$$

$$\gamma = 3\alpha = 3(11 \times 10^{-6}) = 33 \times 10^{-6} (^{\circ}C)^{-1}$$

$$V_t = V_o (1 + \gamma \Delta T) = 4,186667 (1 + 33 \cdot 10^{-6} \cdot 75) = 4,186667 (1 + 2475 \cdot 10^{-6})$$

$$V_t = 4,186667 + 110362 \cdot 10^{-6}$$

$$V_t = 4,186667 + 0,010362$$

$$V_t = 4,197029 \text{ cm}^3$$

b. Pemuai zat cair dan gas

Secara umum pada pemuai zat cair dan gas berlaku⁷⁶ :

$$\gamma = \frac{\Delta V}{V_o \cdot \Delta T}$$

$$\Delta V = \gamma \cdot V_o \cdot \Delta T$$

$$V_t = V_o (1 + \gamma \Delta T)$$

⁷⁶ Sears dan Zemansky. 2000. *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

Koefisien muai volume untuk gas pada tekanan tetap besarnya :

$$\gamma = \frac{1}{273}$$

Jadi secara khusus untuk pemuaian gas pada tekanan tetap berlaku :

$$\Delta V = \frac{V_0 \cdot \Delta T}{273}$$

$$V_t = V_0 \left(1 + \frac{\Delta T}{273} \right)$$

Latihan Soal 10.2:

1. Batang tembaga yang panjangnya 60 cm dengan suhu 16⁰C dipanaskan sampai 46⁰C. Hitunglah pertambahan panjang.
2. Batang-batang rel kereta api pada suhu 10⁰C panjangnya 20 meter. Ternyata batang-batang tersebut dipasang pada suhu 20⁰C. Berapakah besarnya celah yang harus diberikan antara dua batang berturut-turut agar ujung-ujung rel itu dapat bersambung jika suhunya naik sampai 50⁰C ($\alpha_{\text{besi}} = 1,2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$).
3. Sebuah bejana terbuka berukuran 10 liter dan terbuat dari baja diisi penuh dengan aseton (koefisien muai ruang= $1,5 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$), jika bejana dan aseton dipanaskan sehingga suhunya naik dari 0⁰C menjadi 40⁰C. Berapakah volume aseton yang tumpah.
4. Suatu lempeng tipis yang panjangnya 50 cm dan lebarnya 20 cm terbuat dari logam dengan koefisien muai liniernya $1,2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ pada suhu 25⁰C, jika logam tersebut dipanaskan sampai suhu 100⁰C. Berapakah luas logam sekarang.
5. Panjang suatu logam pada suhu 20⁰C adalah 100 cm. Logam itu kemudian dipanaskan sampai 100⁰C. Bila panjang logam saat dipanaskan mencapai 100,25 cm. Berapakah koefisien muai panjang logam.
6. Rapat massa emas pada suhu 30⁰C adalah 19,26 gram/cm³. Bila koefisien muai volum emas $42 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Hitunglah rapat massa emas tersebut pada suhu 60⁰C.

3. Kalor

a. Pengertian kalor

- Kalor merupakan salah satu bentuk energi, berarti kalor merupakan suatu besaran fisika yang dapat diukur. Alat yang digunakan untuk mengukur kalor disebut kalorimeter. Satu kalori didefinisikan

sebagai banyaknya kalor yang diperlukan untuk memanaskan 1 gram air sehingga suhunya naik 1°C .

- Kalor adalah suatu yang mengalir (fluida) dari benda yang bersuhu panas ke benda yang bersuhu dingin dalam rangka mencapai titik kesetimbangan termal (Josep Black, 1760).
- Kalor bukan fluida, tetapi kalor dihasilkan oleh usaha yang dilakukan oleh kerja mekanis (misalnya gesekan), (Benjamin Thomson, 1798).
- Satu kalori didefinisikan sebagai banyaknya kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 gram air sebesar 1°C .

$$2 \text{ kalori} = 4,186 \text{ J} \approx 4,2 \text{ J}$$

$$1 \text{ kkal} = 1000 \text{ kal} = 4186 \text{ J}^{77}$$

b. Kalor jenis dan kapasitas kalor

Dari hasil percobaan diperoleh kesimpulan, besarnya kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu suatu zat sebanding dengan massa zat, kenaikan suhu, dan jenis zat. Secara matematis dapat ditulis:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad \text{atau} \quad c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$$

Keterangan:

Q = kalor yang diserap/dilepaskan (J)

m = massa zat (kg)

$\Delta T = T_2 - T_1$ = perubahan suhu (K)

c = kalor jenis (J/kg.K)

Kalor jenis zat didefinisikan sebagai banyaknya kalor yang diperlukan untuk menaikkan/melepaskan suhu tiap satu kilogram massa suatu zat sebesar 1°C atau 1K.

Kapasitas kalor adalah perbandingan banyaknya kalor yang diberikan terhadap kenaikan suhu benda. Kapasitas kalor suatu benda adalah kemampuan suatu benda untuk menerima atau melepaskan kalor, untuk menaikkan atau menurunkan suhu benda sebesar 1°C atau 1K⁷⁸.

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

⁷⁷ Tipler, P.A.1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga

⁷⁸ Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

Dengan :

C = kapasitas kalor (J/K)

Q = kalor (J atau kal)

ΔT = perubahan suhu (K atau $^{\circ}\text{C}$)

Contoh Soal :

Sepotong tembaga yang massanya 5 kg dinaikkan suhunya sebesar 10 K dengan menggunakan pemanas listrik berdaya 1 kW. Ternyata untuk itu diperlukan waktu 20 detik. Anggap bahwa efisiensi pemanas itu 100%.

- Berapakah kalor jenis tembaga menurut hasil percobaan ini ?
- Berapakah kapasitas kalor tembaga itu ?

Jawab:

$$m = 5 \text{ kg}$$

$$\Delta T = 10 \text{ K}$$

$$P = 1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$$

$$t = 20 \text{ s}$$

Energi kalor yang dihasilkan pemanas adalah :

$$Q = W = P \cdot t = 1000 \cdot 20 = 20.000 \text{ joule}$$

a. Kalor jenis tembaga :

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{20000}{5 \cdot 10} = 400 \text{ J/kg.K}$$

b. Kapasitas kalor 5 kg tembaga

$$C = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{20.000}{10} = 2000 \text{ J/K}$$

4. Azas Black dan Kalorimeter

a. Azas Black

Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa energi bersifat kekal. Jika energi pada suatu zat berkurang maka energi tersebut harus muncul pada benda lain sebagai tambahan energi⁷⁹.

Josep Black (1720-1799) seorang ilmuwan Inggris telah melakukan perhitungan mengenai pertukaran kalor pada suatu zat dan menyimpulkan bahwa kalor yang dilepaskan oleh suatu zat akan sama dengan kalor yang diterima oleh zat lain. Hal ini yang dikenal dengan azas Black:

⁷⁹ Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

Kalor yang diterima = kalor yang dilepaskan

$$Q_{\text{terima}} = Q_{\text{lepas}}$$

Misalkan suhu air panas adalah T_1 , massanya m_1 , sedangkan suhu air dingin adalah T_2 dan massanya m_2 , suhu akhir campuran adalah x dan kalor jenis zat diasumsikan tidak berubah terhadap suhu, dengan mengabaikan kalor yang diserap oleh wadah dan kalor yang terbuang ke lingkungan. Persamaan jumlah kalor yang berpindah sebagai berikut:

Kalor yang dilepaskan oleh air panas:

$$Q_1 = m_1 \cdot c \cdot \Delta T = m_1 \cdot c \cdot (T_1 - x)$$

Kalor yang diterima oleh air dingin:

$$Q_2 = m_2 \cdot c \cdot \Delta T = m_2 \cdot c \cdot (x - T_2)$$

Menurut Azas Black

$$Q_1 = Q_2$$

$$m_1 \cdot c \cdot (T_1 - x) = m_2 \cdot c \cdot (x - T_2)$$

b. Kalorimeter

Kalorimeter adalah alat untuk mengukur kalor. Kalorimeter yang menggunakan teknik pencampuran dua zat di dalam suatu wadah, umumnya digunakan untuk menentukan kalor jenis suatu zat.

Beberapa jenis kalorimeter yang sering dipakai antara lain: kalorimeter aluminium, elektrik, gas, dan kalorimeter bom.

Contoh Soal :

Sepotong aluminium yang massanya 0,5 kg dan suhunya 100°C dicelupkan ke dalam air yang mempunyai massa 0,5 kg dan suhu 25°C . Bila suhu akhir menjadi 39°C dan kalor jenis air $4200 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, tentukanlah kalor jenis aluminium (abaikan kalor yang diambil wadah air).

Jawab:

$$\Delta T_{\text{al}} = 100 - 39 = 61^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{a}} = 39 - 25 = 14^\circ\text{C}$$

$$m_{\text{al}} = 0,5 \text{ kg} \quad \text{dan} \quad m_{\text{a}} = 0,5 \text{ kg}$$

$$c_{\text{a}} = 4200 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

Kalor yang dilepaskan aluminium :

$$Q_{\text{al}} = m_{\text{al}} \cdot c_{\text{al}} \cdot \Delta T_{\text{al}} = 0,5 \cdot c_{\text{al}} \cdot 61 = 30,5 c_{\text{al}} \text{ J}$$

kalor yang diterima air :

$$Q_{\text{a}} = m_{\text{a}} \cdot c_{\text{a}} \cdot \Delta T_{\text{a}} = 0,5 \cdot 4200 \cdot 14 = 29400 \text{ J}$$

$$Q_{\text{al}} = Q_{\text{a}}$$

$$30,5 c_{al} = 29400$$

$$c_{al} = 29400/30,5$$

$$c_{al} = 963,9 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

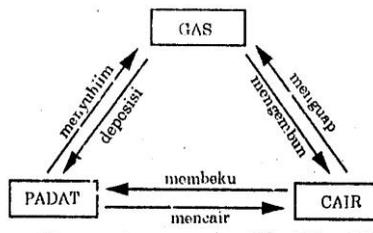
$$c_{al} = 9,6 \times 10^2 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

Latihan Soal 10.3:

1. Sebuah kalorimeter yang kapasitasnya 115 J/K berisi 125 gram air yang suhunya 12,5⁰C. Bila 50 gram air dengan suhu 55⁰C dimasukkan dalam kalorimeter. Tentukan suhu akhir campuran.
2. Sebuah bejana gelas yang massanya 50 gram, diisi 300 gram air yang suhunya 10⁰C. 200gram aluminium yang suhunya 55⁰C dimasukkan dalam bejana tersebut. Bila suhu akhir campuran 35⁰C, kalor jenis air 4200 J/kg.K dan kalor jenis gelas 840 J/kg.K. Berapakah besar kalor jenis aluminium.
3. Sebuah bejana aluminium yang massanya 100 gram, dengan kalor jenis 0,2 kal/g diisi minyak tanah 75 gram yang suhunya 15⁰C. Jika 100 gram kuningan dengan suhu 100⁰C dimasukkan dalam bejana. Berapakah suhu akhir campuran. (kalor jenis kuningan 0,075 kal/g.K dan kalor jenis minyak tanah 0,5 kal/g.K).
4. 250 gram air dengan suhu 50⁰C dan 150 gram dengan suhu 15⁰C dituang ke dalam sebuah kalorimeter. Bila suhu akhir campuran 25⁰C. Berapakah besar kalor yang diterima kalorimeter.
5. Bejana gelas yang mempunyai kapasitas kalor 300 J/K berisi 150 gram air yang suhunya 20⁰C. Kemudian, logam bermassa 250 gram dengan suhu 50⁰C dimasukkan dalam bejana. Bila suhu akhir campuran 40⁰C. Hitunglah kalor jenis zat (logam).

5. Kalor Pada Perubahan Wujud

Beberapa macam perubahan wujud dapat dilihat pada diagram di bawah ini :



a. *Padat ke Cair = Mencair (Melebur)*

Ketika melebur, zat memerlukan kalor sehingga selama melebur tidak terjadi kenaikan suhu. Suhu pada saat zat melebur disebut titik lebur.

Kalor lebur adalah kalor yang diperlukan untuk mengubah 1 kg zat padat menjadi cair. Contoh: es menjadi air.

b. *Cair ke Padat = Membeku*

Ketika membeku, zat melepaskan kalor yang disebut kalor beku. Suhu pada saat zat membeku disebut titik beku. Pada zat yang sama titik lebur sama dengan titik beku dan kalor lebur sama dengan kalor beku.

Contoh: air menjadi es.

$$L = \frac{Q}{m} \quad \text{atau} \quad Q = m \cdot L$$

Dengan :

Q = kalor (joule atau kalori)

m = massa zat (kg atau gram)

L = kalor lebur (J/kg atau kal/gram)⁸⁰

c. *Cair ke Gas = Menguap*

Pada waktu menguap, zat memerlukan kalor. Selama mendidih suhu zat tetap, suhu itu disebut titik didih. Contoh: air menjadi uap.

Kalor laten penguapan/kalor uap adalah kalor yang diperlukan untuk menguapkan satu satuan massa zat pada titik didih normalnya.

Beberapa istilah khusus kalor laten untuk perubahan wujud tertentu:

- 1) Kalor laten lebur atau kalor lebur.
- 2) Kalor laten beku atau kalor beku.
- 3) Kalor laten didih atau kalor didih.
- 4) Kalor laten embun atau titik embun.

d. *Gas ke Cair = Mengembun*

Contoh: bila butiran es dimasukkan ke dalam sebuah gelas maka akan ditemukan butiran air yang menempel pada dinding gelas.

Kalor uap adalah banyaknya kalor yang dibutuhkan untuk menguapkan 1 kilogram zat pada titik didihnya.

⁸⁰ Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid 1* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

$$U = \frac{Q}{m}$$

atau

$$Q = m \cdot U$$

U = kalor uap

e. Padat ke Gas dan Gas ke Padat = Menyublim

Contohnya: kapur barus dan karbon dioksida kering yang dapat langsung berubah menjadi uap tanpa melewati wujud cair.

Contoh Soal :

Berapa kalor yang diperlukan untuk mengubah 1 gram es – 50°C menjadi 1 gram uap 150°C ? Kalor jenis es = 0,5 kal/g°C, kalor jenis air = 1 kal/g°C, kalor lebur es = 80 kal/g, dan kalor didih air = 540 kal/g.

Jawab:

m = 1 gram

T_o = - 50°C

T_a = 150°C

c_{es} = 0,5 kal/g°C

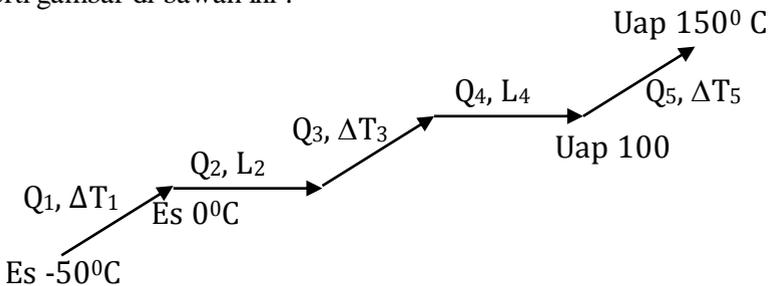
c_{air} = 1 kal/g°C

L₁ = 80 kal/g

L_d = 540 kal/g

Q_{terima} =?

Peristiwa yang dialami es dapat digambarkan dengan diagram kalor seperti gambar di bawah ini :



Kalor yang diterima es adalah :

$$Q_{\text{terima}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

Dengan :

$$Q_1 = m \cdot c_{\text{es}} \cdot \Delta T_1 = (1)(0,5) (50) \text{ kal} = 25 \text{ kal}$$

$$Q_2 = m \cdot L_1 = (1) (80) \text{ kal} = 80 \text{ kal}$$

$$Q_3 = m \cdot c_{\text{air}} \cdot \Delta T_3 = (1) (1) (100) \text{ kal} = 100 \text{ kal}$$

$$Q_4 = m \cdot L_d = (1) (540) \text{ kal} = 540 \text{ kal}$$

$$Q_5 = m \cdot c_{\text{air}} \cdot \Delta T_6 = (1) (1) (150 - 100) = 50 \text{ kal}$$

$$Q_{\text{terima}} = 25 + 80 + 100 + 540 + 50 = 795 \text{ kal}$$

Latihan Soal 10.4:

1. Berapa banyaknya kalor yang perlukan untuk mengubah 100 gram es pada -10°C menjadi uap pada suhu 100°C . ($c_{\text{air}} = 1 \text{ kal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $c_{\text{es}} = 0,5 \text{ kal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $L_{\text{es}} = 80 \text{ kal/g}$, $U_{\text{air}} = 539 \text{ kal/g}$).
2. Satu liter air teh pada suhu 30°C digunakan untuk membuat es teh dengan menambahkan 150 gram es pada suhu 0°C . Berapakah suhu es teh yang terjadi. ($c_{\text{air}} = 1 \text{ kal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $c_{\text{es}} = 0,5 \text{ kal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $L_{\text{es}} = 80 \text{ kal/g}$, $\rho_{\text{air}} = 1 \text{ g/cm}^3$).
3. Seratus gram es -5°C dicampur dengan 500 gram air bersuhu 30°C pada tekanan 1 atm. Jika hanya terjadi pertukaran kalor antara air dengan es. Berapakah suhu setimbangnya. ($c_{\text{air}} = 1 \text{ kal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $c_{\text{es}} = 0,5 \text{ kal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $L_{\text{es}} = 80 \text{ kal/g}$).
4. Sebongkah es yang suhunya -10°C disiram dengan 100 gram air mendidih. Jika massa es tersebut 20 gram. Hitunglah suhu akhir. ($c_{\text{air}} = 1 \text{ kal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $c_{\text{es}} = 0,5 \text{ kal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $L_{\text{es}} = 80 \text{ kal/g}$).
5. Berapa kalori dibutuhkan untuk menaikkan suhu 100 gram es -5°C menjadi uap 100°C . ($c_{\text{air}} = 1 \text{ kal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $c_{\text{es}} = 0,5 \text{ kal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$, $L_{\text{es}} = 80 \text{ kal/g}$, $U_{\text{air}} = 539 \text{ kal/g}$).

6. Perpindahan Kalor

Ada tiga cara perpindahan kalor, yaitu :

a. Konduksi (hantaran)

Konduksi adalah perpindahan kalor tanpa disertai perpindahan partikel zat⁸¹.

$$H = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{l}$$

Dengan : $H = \frac{Q}{t}$

H = Jumlah kalor yang mengalir tiap satu satuan waktu

k = koefisien konduksi termal (daya hantar panas)

⁸¹ Tipler, P.A.1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid 1* (terjemahan). Jakarta: Penebit Erlangga

A = luas penampang

ΔT = selisih temperatur antara kedua ujung batang

l = panjang batang

Contoh Soal:

Sebuah jendela kaca ruang bangunan berpangatur suhu (ber-AC) panjangnya 2 m, tingginya 1 m, dan tebalnya 5 mm. Suhu permukaan dalam kaca 25°C dan suhu permukaan luar 35°C . Berapakah banyaknya kalor yang mengalir keluar dari ruang itu melalui jendela kaca tersebut? (koefisien konduksi termal kaca = $8 \cdot 10^{-4} \text{ kJ/m.s.K}$).

Jawab :

$$A = 2 \times 1 = 2\text{m}^2$$

$$l = 5 \text{ mm} = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\Delta T = 35 - 25 = 10^{\circ}\text{C} = 8 \times 10^{-4} \text{ kJ/m.s.K}$$

$$H = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} = (8 \times 10^{-4}) (2) \frac{10}{5 \cdot 10^{-2}} = 32 \cdot 10^{-4} \cdot 10^2 = 32 \cdot 10^{-2} = 0,32$$

kJ/s

b. Konveksi (aliran)

Konveksi adalah perpindahan kalor yang disertai dengan perpindahan partikel zat.

$$H = h \cdot A \cdot \Delta T$$

Dengan :

H = jumlah kalor yang mengalir tiap satu satuan waktu

A = luas permukaan

T = perbedaan suhu

h = koefisien konveksi

Contoh Soal:

Seseorang yang tanpa pakaian memiliki suhu tubuh 33°C di kamar yang suhunya 29°C . Bila luas permukaan badan orang itu $1,5 \text{ m}^2$, berapa jumlah kalor yang dilepaskan badan orang tiap detik? (koefisien konveksi untuk tubuh manusia $h = 7,1 \text{ J/smK}$)

Jawab:

$$\Delta T = 33 - 29 = 4^{\circ}\text{C}$$

$$A = 1,5 \text{ m}^2$$

$$H = 7,1 \text{ J/smK}$$

$$H = h \cdot A \cdot \Delta T = (7,1) (1,5) (4) = 42,6 \text{ J/s}$$

c. Radiasi (pancaran)

Radiasi adalah perpindahan kalor tanpa memerlukan medium zat antara.

$$W = e \cdot \tau \cdot T^4$$

Dengan :

W= energi yang dipancarkan (J/s)

e = emisivitas benda ($0 < e \leq 1$)

T = suhu permukaan benda (Kelvin)

τ = konstanta Stefan-Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ watt/m}^2\text{K}^4$)

Contoh Soal:

Sebuah bola mempunyai suhu 600°C . Berapa energi yang dipancarkan benda persatuan luas tiap detiknya, jika bola dianggap hitam sempurna ?

Jawab:

$$T = 600 + 273 = 873 \text{ K}$$

$$W = e \cdot \tau \cdot T^4 = (1) (5,67 \times 10^{-8}) (873)^4 = 3,29 \cdot 10^4 \text{ watt/m}$$

Latihan Soal 10.5:

1. Sebuah bola besi berjari-jari 20 cm dipanaskan sampai dengan 500K, sedangkan benda-benda disekitarnya bersuhu 300K. Berapakah daya yang diperlukan untuk mempertahankan suhu bola jika permukaannya mempunyai emisivitas.
2. Bola yang radiusnya 2 cm memiliki emisivitas 0,8. Bola tersebut menyerap energi kalor dari lingkungan dengan laju $4,563\pi \text{ J/s}$. Berapakah suhu bola sekarang.
3. Permukaan dalam suatu dinding rumah dijaga bersuhu tetap 20°C pada saat suhu udara luar adalah 10°C . Berapakah banyak kalor yang hilang karena konveksi alami pada dinding yang berukuran 8m x 4m selama sehari. ($h = 3,5 \text{ J/s.m}^2\text{.K}$).
4. Seorang Empu akan membuat keris dari sepotong logam campuran yang massanya 100 gram dan kalor jenisnya $560 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$. Logam dipukul berulang-ulang sebanyak 7 kali dengan sebuah palu yang massanya 1 kg. Kecepatan palu tiap mengenai logam 10 m/s. Jika 80% energi pukulan palu dirubah untuk menaikkan suhu logam. Hitunglah kenaikan suhu logam tersebut.
5. Sebutkan dan jelaskan dua (2) proses perpindahan energi kalor secara konduksi.

6. Sebutkan dan jelaskan dua (2) jenis konveksi dan beri masing-masing dua (2) contoh.
7. Jelaskan penerapan dan pemanfaatan prinsip perpindahan kalor pada:
 - a. Termos air panas
 - b. Setrika
 - c. Efek rumah kaca
8. Jelaskan apa yang akan terjadi pada orang yang mengenakan pakaian yang berwarna hitam pada siang hari jika ditinjau dari aspek perpindahan kalor.
9. Manakah yang lebih besar koefisien perpindahan kalor pada konveksi bebas dan konveksi paksa. Mengapa demikian.
10. Dua batang logam sejenis A dan B penampangnya berbanding 2:1, sedangkan panjangnya berbanding 4:3. Bila beda suhu ujung-ujungnya batang sama. Berapakah perbandingan jumlah rambatan kalor tiap satuan waktu pada A dan B.

Latihan Soal 10.6 :

1. Jika termometer skala Fahrenheit menunjukkan angka 113°F , berapakah angka yang ditunjukkan oleh termometer skala Reamur, Celcius, dan Kelvin ?
2. Sebuah pipa baja panjangnya 100 cm pada suhu 27°C . Berapa panjangnya pada suhu 77°C jika koefisien muai panjang baja = $11 \cdot 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$?
3. Sebatang timah bermassa 200 gram dipanaskan sampai 90°C , kemudian dimasukkan kedalam 500 gram air pada suhu 20°C ($c_a = 1 \text{ kal/g}^{\circ}\text{C}$). Jika suhu akhir timah dan air $20,8^{\circ}\text{C}$. Berapa kalor jenis timah tersebut?
4. Sebuah pelat besi luasnya 5 m^2 pada suhu 20°C . Bila suhunya dinaikkan menjadi 120°C , maka luasnya sekarang menjadi berapa? (koefisien muai panjang besi = $11 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$).
5. Suatu kolom beton berukuran $0,5 \text{ m} \times 1,0 \text{ m} \times 6 \text{ m}$. Hitung perubahan volumenya ketika suhunya naik dari 15°C menjadi 35°C (koefisien muai panjang beton = $2 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$).
6. Berapa kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu 100 gram es -5°C menjadi uap 100°C ? Diketahui kalor lebur es = 80 kal/g , kalor didih air = 540 kal/g , kalor jenis es = $0,5 \text{ kal/g}^{\circ}\text{C}$, dan kalor jenis air $1 \text{ kal/g}^{\circ}\text{C}$.
7. Sebuah keping besi tebal 2 cm dengan luas penampang 5000 cm^2 , sisi yang satu bersuhu 150°C dan yang lain 140°C . Berapa kalor yang berpindah melalui keping setiap detik? ($k_{\text{besi}} = 4,6 \times 10^{-3} \text{ kJ/m.s.K}$)

Daftar Pustaka

- Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Mark W. Zemansky. 1994. *Fisika untuk Universitas (Mekanika, Panas, Bunyi)*. Jakarta: Bina Cipta.
- Sears dan Zemansky. 2000. *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Tipler, P.A. 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik -Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga

BAB XI

TEORI KINETIK GAS DAN TERMODINAMIKA

1. Teori Kinetik Gas

Teori kinetik gas menjelaskan sifat-sifat gas (misalnya tekanan) dengan menggunakan hukum-hukum Newton terhadap gerak molekul-molekul (partikel-partikel) gas dan beberapa anggapan terhadap gas (gas ideal).

Beberapa anggapan dasar yang dibuat untuk gas ideal dalam teori kinetik adalah sebagai berikut:

- a. Gas terdiri dari partikel-partikel yang disebut molekul
- b. Partikel-partikel gas bergerak dalam lintasan lurus dengan kelajuan tetap dan geraknya adalah acak
- c. Gerakan partikel hanya disebabkan oleh tumbukan dengan partikel lain ataupun dengan dinding wadahnya. Ini berarti antarpartikel dianggap tidak ada gaya tarik-menarik.
- d. Dalam semua tumbukan antarpartikel gas, baik antarpartikel ataupun dengan dinding wadahnya tidak ada kehilangan energi (tumbukan lenting sempurna).
- e. Selang waktu tumbukan antarpartikel berlangsung sangat singkat.
- f. Volume partikel gas sangat kecil dibandingkan dengan wadah yang ditempatinya sehingga dapat diabaikan
- g. Untuk semua partikel gas berlaku hukum-hukum Newton tentang gerak⁸².

2. Beberapa hukum tentang gas

a. Hukum Boyle (Robert Boyle, 1627-1691)

Bunyi: jika suhu gas yang berada dalam bejana tertutup (tidak bocor) dijaga konstan, maka tekanan gas berbanding terbalik dengan volumenya⁸³.

$$P \cdot V = \text{Konstan} \quad \text{atau} \quad P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \quad (11.1)$$

b. Hukum Charles dan Gay-Lussac

⁸² Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

⁸³ Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

Bunyi : Jika tekanan gas yang berada dalam bejana tertutup (tidak bocor) dijaga konstan, maka volume gas sebanding dengan suhu mutlaknya.

$$\frac{V}{T} = \text{konstan} \quad \text{atau} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (11.2)$$

Bunyi : Jika volume gas yang berada dalam bejana tertutup (tidak bocor) dijaga konstan, maka tekanan gas sebanding dengan suhu mutlaknya.

$$\frac{P}{T} = \text{konstan} \quad \text{atau} \quad \frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (11.3)$$

Jika suhu mutlak dinyatakan dalam $t^{\circ}\text{C}$, maka suhu mutlak gas T dalam satuan Kelvin (K): $T = t^{\circ}\text{C} + 273$.

c. Hukum Boyle-Gay Lussac

Dengan menggabungkan persamaan (11.1), (11.2), dan (11.3) diperoleh hubungan:

$$\frac{P \cdot V}{T} = \text{konstan} \quad \text{atau} \quad \frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} \quad (11.4)$$

Contoh Soal

1. Suatu gas yang suhunya 20°C dipanaskan sampai suhunya 111°C pada tekanan tetap. Bila volume gas sebelum dipanaskan V . Berapakah volume gas setelah dipanaskan.

Jawab:

Diketahui:

$$T_1 = 20^{\circ}\text{C} + 273 = 293 \text{ K}$$

$$T_2 = 111^{\circ}\text{C} + 273 = 383 \text{ K}$$

$$V_1 = V$$

Ditanyakan: $V_2 = \dots\dots?$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$V_2 = \frac{T_2}{T_1} \times V_1$$

$$V_2 = \frac{383}{293} \times V$$

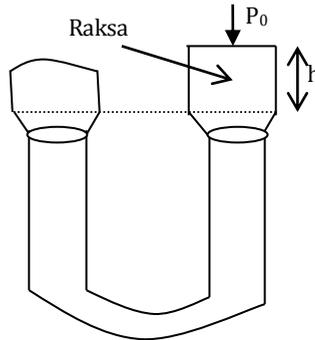
$$V_2 = \frac{4}{3} V$$

$$V_2 = \frac{4}{3} V$$

Latihan Soal 11.1

1. Gas oksigen pada suhu 27°C memiliki volume 25 liter dan tekanan 10^5 N/m^2 . Berapakah volume oksigen tersebut jika tekanannya dibuat menjadi $1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ pada suhu 100°C .

2. Seorang siswa ingin menerapkan hukum Boyle untuk menentukan tekanan udara luar dengan menggunakan peralatan seperti pada gambar. Ia mendapatkan bahwa ketika $h = 50 \text{ mm}$, $V = 18 \text{ cm}^3$ dan ketika $h = 150 \text{ mm}$, $V = 16 \text{ cm}^3$. Berapa mmHg tekanan udara luar (P_0) di tempat siswa itu melakukan percobaan.



3. Volume suatu gelembung udara pada dasar sebuah danau adalah $1,5 \text{ cm}^3$. Kedalam danau itu adalah 102 meter. Berapakah volume gelembung udara tersebut ketika berada tepat di bawah permukaan air. (tekanan udara luar = 75 cmHg , massa jenis raksa = $13,6 \text{ g/cm}^3$, massa jenis air = 1 g/cm^3).
4. Sebuah tangki silinder yang mengandung 19 kg udara pada tekanan 9,5 kali tekanan atmosfer, disimpan pada tempat bersuhu 70°C , ketika dipindahkan ke bengkel bersuhu 27°C . Sebuah katup pengaman pada tangki bekerja, membebaskan sejumlah udara. Jika katup meloloskan udara ketika tekanannya melebihi 10 kali tekanan atmosfer. Hitunglah massa udara yang lolos.

3. Persamaan Gas Ideal

Satu mol gas adalah sejumlah gas yang mengandung N_A molekul. N_A adalah bilangan Avogadro yang bernilai⁸⁴:

$$N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ molekul/mol}$$

$$N_A = 6,02 \times 10^{26} \text{ molekul/kmol}$$

Massa molekul relatif (M_r) adalah jumlah seluruh massa atom relatif (A_r) dari atom-atom penyusun unsure/senyawa tersebut.

Hubungan antara banyaknya mol (n), massa total gas (m), dan jumlah partikel (N) adalah:

⁸⁴ Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid 1* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga

$$m = n \cdot M_r \quad \text{atau} \quad n = \frac{m}{M_r}$$

$$N = n \cdot N_A \quad \text{atau} \quad n = \frac{N}{N_A}$$

Persamaan umum gas ideal adalah:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T = \frac{m}{M_r} \cdot R \cdot T = \frac{N}{N_A} \cdot R \cdot T \quad (11.5)$$

- $R = 8,314 \text{ J/mol.K}$ = jika satuan-satuan P , V , dan T dalam satuan SI, dan n dalam satuan mol.
- $R = 0,082 \text{ L.atm/mol.K}$ = jika satuan-satuan P , V , T , dan n berturut-turut atm, L, K, dan mol.

Jika nilai $k = \frac{R}{N}$, maka persamaan (11.5) menjadi:

$$P \cdot V = N \cdot k \cdot T \quad (11.6)$$

$$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

Berdasarkan persamaan (11.5), dapat ditentukan persamaan massa jenis (ρ) gas adalah:

$$P \cdot V = \frac{m}{M_r} \cdot R \cdot T$$

$$\frac{P \cdot M_r}{R \cdot T} = \frac{m}{V}$$

$$\rho = \frac{P \cdot M_r}{R \cdot T} \quad (11.7)$$

Contoh Soal:

1. Pada keadaan normal ($t=0^\circ\text{C}$, $P=1 \text{ atm}$). Berapakah volume 4 gram gas oksigen (O_2). ($M_r = 32 \text{ kg/kmol}$, $R=8314 \text{ J/kmol.K}$).

Jawab:

Diketahui:

$$T = 0^\circ\text{C} + 273 = 273 \text{ K}$$

$$R = 8314 \text{ J/kmol.K}$$

$$P = 1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$M_r = 32 \text{ kg/kmol}$$

$$m = 4 \text{ gram} = 4 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

Ditanyakan: $V = \dots\dots?$

$$P \cdot V = \frac{m}{M_r} \cdot R \cdot T$$

$$V = \frac{m \cdot R \cdot T}{M_r \cdot P}$$

$$V = \frac{(4 \times 10^{-3}) (8314) (273)}{(32) \cdot (10^5)} = \frac{9078888 \times 10^{-3}}{32 \times 10^5}$$

$$V = 283715,25 \times 10^{-8} \text{ m}^3 = 2,84 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

Latihan Soal 11.2:

- Berapakah jumlah molekul Oksigen per meter kubik dalam udara pada suhu dan tekanan normal ($t=0^{\circ}\text{C}$, $P=1\text{ atm}$).
- Sebuah bejana tertutup mengandung dua jenis gas non-radioaktif yaitu Neon (monoatomik) dan Oksigen (diatomik). Perbandingan tekanan parsial keduanya adalah 3:2. Tentukan:
 - Jumlah molekul
 - Massa jenis neon terhadap Oksigen
($M_r\text{ Neon} = 20,2$, $M_r\text{O}_2 = 32$)
- Sebuah tangki bervolume 590 liter berisi gas Oksigen pada suhu 20°C dan tekanan 5 atm. Tentukan massa Oksigen dalam tangki. ($M_r\text{O}_2 = 32\text{ kg/kmol}$)
- Sebuah wadah bervolume 20,78 liter berisi gas Argon pada suhu 27°C dan tekanan 1 atm. Tentukan banyaknya mol gas Argon. ($R = 8,314\text{ J/mol.K}$).
- Massa jenis gas Nitrogen pada keadaan normal ($t=0^{\circ}\text{C}$, $P=1\text{ atm}$) ialah $1,25\text{ kg/m}^3$. Hitunglah massa jenisnya pada suhu 60°C dan 72 cmHg .
- Suatu tabung mempunyai tekanan 10^{-7} mmHg pada suhu 27°C . Jika tabung 1 liter. Hitunglah:
 - Banyaknya molekul gas ($1\text{mmHg} = 133,23\text{ N/m}^2$).
 - Massa gas jika $M_r\text{ gas} = 28$.

4. Tekanan Gas Dalam Ruang Tertutup

Perhatikan gambar di bawah ini. Tinjaulah tumbukan molekul yang bergerak dengan kecepatan v yang mempunyai komponen kecepatan v_x , v_y , dan v_z , massa 1 molekul gas adalah m_0 . Pada saat bertumbukan dengan dinding secara elastis, kecepatan v_x berbalik sehingga bertanda negatif⁸⁵. Dengan demikian terjadi perubahan momentum gas sebesar:

$\Delta P = \text{momentum akhir} - \text{momentum awal}$

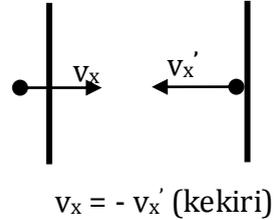
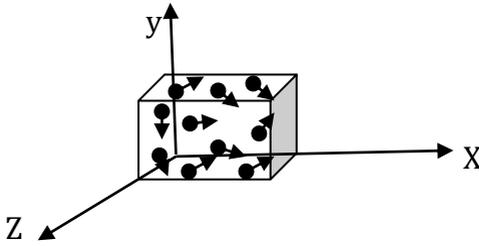
$$\Delta P = -m_0 v_x - m_0 v_x$$

$$\Delta P = -2 m_0 v_x \quad (11.8)$$

Molekul ini akan kembali lagi menumbuk dinding yang sama setelah menempuh komponen jarak x sejauh $2d$. Selang waktu perjalanan ini adalah:

$$\Delta t = \frac{\text{jarak}}{\text{kecepatan}} = \frac{2d}{v_x} \quad (11.9)$$

⁸⁵ Mark W. Zemansky. 1994. *Fisika untuk Universitas (Mekanika, Panas, Bunyi)*. Jakarta: Bina Cipta.



Laju perubahan momentum molekul pada suatu dinding yang sama sesuai dengan hukum kedua newton tidak lain adalah:

$$F = \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{2 m_0 v_x}{\frac{2d}{v_x}} = \frac{m_0 \cdot v_x^2}{d} \quad (11.10)$$

Tekanan P adalah gaya persatuan luas penampang, yaitu:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{\frac{m_0 \cdot v_x^2}{d}}{d^2} = \frac{m_0 \cdot v_x^2}{d^3} \quad (11.11)$$

Jika ada sejumlah N molekul gas dalam wadah tertutup dengan komponen kecepatan pada sumbu x adalah $v_{1x}, v_{2x}, \dots, v_{Nx}$, tekanan total gas pada suatu dinding adalah:

$$P = \frac{m_0}{d^3} (v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \dots + v_{Nx}^2) \quad (11.12)$$

Karena nilai rata-rata $\overline{v_x^2} = \frac{v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \dots + v_{Nx}^2}{N}$, dengan volume wadah $V = d^3$, maka dapat ditulis:

$$P = \frac{m_0 \cdot \overline{v_x^2}}{V} \quad (11.13)$$

Jika dalam kubus terdapat N partikel, tekanan pada dinding adalah:

$$P' = N \cdot P = \frac{N \cdot m_0 \cdot \overline{v_x^2}}{V} \quad (11.14)$$

Partikel-partikel gas tersebut mempunyai kecepatan rata-rata yang sama untuk berbagai arah sebab merupakan gerak acak murni.

$$\begin{aligned} \overline{v_x} &= \overline{v_y} = \overline{v_z} \\ \overline{v^2} &= \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} = 3\overline{v_x^2} \\ \overline{v_x^2} &= \frac{1}{3} \overline{v^2} \end{aligned} \quad (11.15)$$

Jika $\overline{v_x^2}$ ini dimasukkan ke persamaan (11.14) diperoleh:

$$P = \frac{N \cdot m_0 \cdot \overline{v^2}}{3V} \quad (11.16)$$

Keterangan:

P = Tekanan gas (Pa = N/m²)

m_0 = massa sebuah partikel (molekul) gas (kg)

\bar{v}^2 = rata-rata kuadrat kecepatan (m^2/s^2)

N = Banyak molekul (partikel) gas

V = volume gas (m^3)

Jika energi kinetik rata-rata ($\overline{EK} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \bar{v}^2$), maka:

$\bar{v}^2 = \frac{2 \overline{EK}}{m_0}$, maka persamaan (11.16) menjadi:

$$P = \frac{2 N \cdot \overline{EK}}{3V} \quad (11.17)$$

Contoh Soal:

1. Tentukan energi kinetik molekul-molekul dari 2 mol gas Neon, yang memiliki 22,4 liter pada tekanan 101 kPa. Neon adalah gas monoatomik pada keadaan normal.

Jawab:

Diketahui:

$$n = 2 \text{ mol}$$

$$V = 22,4 \text{ liter} = 22,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$P = 101 \text{ kPa} = 101 \times 10^3 \text{ Pa}$$

Ditanyakan: $\overline{EK} = \dots?$

$$N = n \cdot N_A = (2) (6,02 \times 10^{23}) = 12,04 \times 10^{23} \text{ molekul}$$

$$\overline{EK} = \frac{3 P \cdot V}{2 N} = \frac{3 (6,02 \times 10^{23}) (22,4 \times 10^{-3})}{2 (12,04 \times 10^{23})} = 2,83 \times 10^{-21} \text{ J}$$

Latihan Soal 11.3

1. Sebuah tangki dengan volume $0,5 \text{ m}^3$ mengandung 4 mol gas Neon, pada suhu 27°C .
 - a. Tentukan energi kinetik total gas Neon
 - b. Berapakah energi kinetik rata-rata setiap molekul gas
2. Sebuah tangki dengan volume 25 liter mengandung 2 mol gas monoatomik. Jika setiap molekul gas memiliki energi kinetik rata-rata $2,8 \times 10^{-21} \text{ J}$. Tentukan tekanan gas berada dalam tangki tersebut.
3. Energi kinetik rata-rata sebuah molekul gas monoatomik yang berada dalam tangki bervolume 30 liter dengan tekanan 1 atm adalah $2,52 \times 10^{-21} \text{ J}$. Berapa mol gas yang berada dalam tangki tersebut.
4. Gas Hidrogen mula-mula bertekanan 10 atm, jika $2/5$ bagian massa gas Hidrogen keluar. Berapakah tekanan gas sekarang.

5. Suhu Gas Ideal

Berdasarkan persamaan (11.17), diperoleh hubungan antara energi kinetik rata-rata dengan suhu:

$$P \cdot V = \frac{2}{3} N \cdot \overline{EK}$$

Sesuai dengan persamaan keadaan gas ideal (11.5) yaitu: $P \cdot V = N \cdot k \cdot T$, maka diperoleh:

$$N \cdot k \cdot T = \frac{2}{3} N \cdot \overline{EK}$$

$$T = \frac{2 \overline{EK}}{3k}$$

$$\overline{EK} = \frac{3}{2} k \cdot T \quad (11.18)$$

Dengan $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K disebut tetapan Boltzman. Pada persamaan (11.18) hanya berlaku untuk gas monoatomik⁸⁶.

Contoh Soal:

1. Suatu gas ideal dalam ruang tertutup suhunya 37°C . Energi kinetik partikelnya EK_0 . Apabila energi kinetiknya dijadikan $2 EK_0$. Tentukan suhu gas sekarang (nyatakan dalam $^{\circ}\text{C}$).

Jawab:

Keadaan I : $T_1 = (37^{\circ}\text{C} + 273) = 310 \text{ K}$

$$EK_1 = EK_0$$

Keadaan II: $T_2 = \dots?$

$$EK_2 = 2 EK_0$$

Jadi : $T \sim \overline{EK}$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\overline{EK}_2}{\overline{EK}_1} = \frac{2 EK_0}{EK_0} = 2$$

$$T_2 = 2 T_1 = 2 (310) = 620 \text{ K}$$

$$T_2 = (620 - 273) = 347^{\circ}\text{C}$$

Latihan Soal 11.4

1. Tentukan energi kinetik rata-rata partikel gas yang memiliki suhu 27°C .

⁸⁶ Sears dan Zemansky. 2000. *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

2. Suatu gas ideal dalam ruang tertutup memiliki energi kinetik partikel $3E_0$. Apabila energi kinetiknya dijadikan E_0 , suhu gas adalah 7°C . Berapakah suhu gas mula-mula.
3. Suatu partikel gas memiliki energi kinetik $6,68 \times 10^{-21}$ J. Berapakah suhu partikel gas tersebut.
4. Tentukan energi kinetik molekul-molekul dari 5 mol gas Neon yang bervolume 22,4 liter pada tekanan 100 kPa. Neon adalah gas monoatomik pada keadaan normal.
5. Pada daerah sela antar Bintang terdapat kabut gas Hidrogen dengan kecepatan 10^{10} molekul/cm³. Suhu di daerah tersebut sekitar 10^4 K. Berapakah tekanan dari kabut gas tersebut.

6. Kecepatan Efektif Gas Ideal

Molekul-molekul gas bergerak secara acak dan tidak seluruh molekul gas bergerak dengan kecepatan yang sama. Misalkan di dalam suatu wadah tertutup ada sebanyak N_1 molekul bergerak dengan kecepatan v_1 , N_2 molekul bergerak dengan kecepatan v_2 , dan seterusnya, maka rata-rata kuadrat kecepatan partikel gas \bar{v}^2 dapat dinyatakan sebagai:

$$\bar{v}^2 = \frac{N_1 v_1^2 + N_2 v_2^2 + \dots + N_n v_n^2}{N_1 + N_2 + \dots + N_n} = \frac{\sum(N_i v_i^2)}{N} \quad (11.19)$$

Kecepatan efektif v_{rms} (rms = *root mean square*) didefinisikan sebagai akar dari rata-rata kuadrat kecepatan.

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\bar{v}^2} \quad \text{atau} \quad \bar{v}^2 = v_{\text{rms}}^2 \quad (11.20)$$

Dengan menyatakan $\overline{EK} = \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot v_{\text{rms}}^2$, persamaan (11.18) dapat ditulis menjadi:

$$\frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot v_{\text{rms}}^2 = \frac{3}{2} k \cdot T$$

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3 k \cdot T}{m_0}} \quad (11.21)$$

Karena jumlah mol gas $n = \frac{m_{\text{total}}}{M_r} = \frac{N m_0}{M_r}$ atau $n = \frac{N}{N_A}$, maka $m_0 = \frac{M_r}{N_A}$, mengingat: $k = \frac{R}{N_A}$, maka persamaan (11.21) dapat ditulis:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3 \left(\frac{R}{N_A}\right) \cdot T}{\left(\frac{M_r}{N_A}\right)}}$$

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3 R \cdot T}{M_r}} \quad (11.22)$$

Pada suhu tertentu kecepatan efektif molekul gas berbanding terbalik dengan akar massa molekul relatif. Mengingat massa jenis $\rho = \frac{m}{V}$ dan dengan menyatakan $N m_0 =$ massa total gas (m), maka persamaan (11.16) diperoleh:

$$P = \frac{(N m_0) v_{rms}^2}{3 V}$$

$$P = \frac{1}{3} \left(\frac{m}{V} \right) v_{rms}^2$$

$$P = \frac{1}{3} \rho v_{rms}^2$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3 P}{\rho}} \tag{11.23}$$

Contoh Soal:

1. Hitunglah kelajuan *root mean square* (rms) molekul-molekul Hidrogen pada:

- a. 0⁰C
- b. 27⁰C

Jika massa jenis Hidrogen adalah 0,09 kg/m³ pada suhu 0⁰C dan tekanan 1,0 x 10⁵ Pa.

Jawab:

Diketahui:

$T_1 = 273 \text{ K}$

$P_1 = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$

$\rho_1 = 9 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$

Ditanyakan: $v_{rms} = \dots\dots?$

a. $v_{rms} = \sqrt{\frac{3 P}{\rho}} = \sqrt{\frac{3 (1 \times 10^5)}{9 \times 10^{-2}}} = 1,8 \times 10^3 \text{ m/s}$

b. $T_2 = 27^0\text{C} + 273 = 300 \text{ K}$. kelajuan *root mean square* (rms) pada suhu ini diperoleh dengan perbandingan v_{rms} pada suhu 300 K dengan suhu 273 K.

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3 R \cdot T}{M r}}$$

$$v_{rms} \approx \sqrt{T}$$

$$\frac{v_{rms (27^0\text{C})}}{v_{rms (0^0\text{C})}} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} = \sqrt{\frac{(300)}{(273)}} = \sqrt{\frac{100}{91}} = \frac{1}{3} \sqrt{10}$$

$$v_{\text{rms}}(27^{\circ}\text{C}) = \frac{1}{3} \sqrt{10} \cdot v_{\text{rms}}(0^{\circ}\text{C})$$

$$v_{\text{rms}}(27^{\circ}\text{C}) = \frac{1}{3} \sqrt{10} \quad (1,8 \times 10^3)$$

$$v_{\text{rms}}(27^{\circ}\text{C}) = 1,9 \times 10^3 \text{ m/s}$$

Latihan Soal:

- Tentukan perbandingan kelajuan efektif pada suhu tertentu antara:
 - Molekul gas N_2 dan gas CO
 - Molekul gas H_2 dan gas uap air H_2O
($M_r \text{ N} = 14 \text{ g/mol}$, $M_r \text{ C} = 12 \text{ g/mol}$, $M_r \text{ O} = 16 \text{ g/mol}$, $M_r \text{ H} = 1 \text{ g/mol}$)
- Dalam suatu ruang terdapat 800 miligram gas dengan tekanan 1 atm. Untuk kelajuan rata-rata partikel tersebut adalah 750 m/s. hitunglah volume ruangan. ($1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa}$).
- Dalam ruangan bervolume 1,5 liter terdapat gas bertekanan 10^5 Pa . Jika partikel gas memiliki kelajuan rata-rata 750 m/s. Tentukan massa gas yang terkandung dalam ruang tersebut.
- Pada suhu berapakah kelajuan rms molekul-molekul gas Hidrogen menjadi dua kali kelajuan rms-nya pada 300 K.
- Massa molar Nitrogen = 28, Oksigen= 32. Pada suhu berapakah kelajuan v_{rms} molekul-molekul Nitrogen sama dengan kelajuan v_{rms} molekul-molekul Oksigen pada suhu 300 K
- Kecepatan efektif suatu gas adalah 400 m/s. Jika gas tersebut berada dalam wadah bertekanan 8 atm. Tentukan massa jenisnya.
- Hitunglah besar massa jenis gas Oksigen bila pada keadaan STP (normal) mempunyai volume 22,4 liter.

7. Teorema Ekipartisi Energi

Bunyi: untuk suatu sistem molekul-molekul gas pada suhu mutlak T dengan setiap molekul memiliki f derajat kebebasan (*degree of freedom*), energi mekanik rata-rata permolekul \overline{EM} atau energi kinetik rata-rata permolekul \overline{EK} adalah⁸⁷:

$$\overline{EK} = f \left(\frac{1}{2} \cdot k \cdot T \right) \quad (11.24)$$

setiap molekul gas ideal dalam suatu wadah tertutup akan memiliki energi kinetik rata-rata \overline{EK} . Jika ada sejumlah N molekul gas, energi dalam gas U

⁸⁷ Tipler, P.A.1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid 1* (terjemahan). Jakarta: Penebit Erlangga

didefinisikan sebagai jumlah energi kinetik seluruh molekul gas yang terdapat dalam wadah tertutup.

$$U = N \cdot \overline{EK} = N \cdot f \left(\frac{1}{2} k \cdot T \right) \quad (11.25)$$

Berdasarkan derajat kebebasannya, rumusan energi dalam gas adalah sebagai berikut:

- a. Gas monoatomik ($f=3$), contohnya: H_e , N_e , Ar

$$U = \frac{3}{2} N \cdot k \cdot T = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot T \quad (11.26)$$

- b. Gas diatomik. Contoh: H_2 , N_2 , O_2

- Pada suhu rendah (± 250 K), $f=3$

$$U = \frac{3}{2} N \cdot k \cdot T = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot T \quad (11.27)$$

- Pada suhu sedang (± 500 K), $f=5$

$$U = \frac{5}{2} N \cdot k \cdot T = \frac{5}{2} n \cdot R \cdot T \quad (11.28)$$

- Pada suhu tinggi (± 1000 K), $f=7$

$$U = \frac{7}{2} N \cdot k \cdot T = \frac{7}{2} n \cdot R \cdot T \quad (11.29)$$

Latihan Soal:

1. Energi dalam dari 2 mol gas poliatomik pada suhu 500 K adalah 20,7 kJ. Tentukan banyaknya derajat kebebasan gas tersebut.
2. Suatu gas ideal mempunyai energi dalam $1,01 \times 10^{28}$ J. Berapakah jumlah mol gas ideal tersebut, bila besar energi kinetiknya 5 kJ.
3. Setiap molekul dari suatu gas poliatomik pada suhu 1200 K memiliki derajat kebebasan masing-masing tiga untuk gerak translasi, tiga gerak rotasi, dan empat gerak vibrasi.
 - a. Energi mekanik rata-rata tiap molekul
 - b. Energi dalam 5 mol gas ideal ini.
4. Tentukan energi kinetik rata-rata dan energi dalam 1 mol gas ideal pada suhu 800 K, jika gas tersebut adalah:
 - a. Gas monoatomik
 - b. Gas diatomik ($k= 1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
5. Nitrogen merupakan suatu gas diatomik. Hitunglah besar energi dalam dari 2,8 gram Nitrogen pada suhu $50^{\circ}C$. ($Mr= 28$ g/mol).

8. Hukum Pertama Termodinamika

Kalor (Q) merupakan energi yang berpindah dari satu benda ke benda yang lain akibat adanya perbedaan suhu⁸⁸. Berkaitan dengan sistem dan lingkungan, bisa dikatakan bahwa kalor merupakan energi yang

⁸⁸ Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

berpindah dari sistem ke lingkungan atau energi yang berpindah dari lingkungan ke sistem akibat adanya perbedaan suhu. Jika suhu sistem lebih tinggi dari suhu lingkungan, maka kalor akan mengalir dari sistem menuju lingkungan. Sebaliknya, jika suhu lingkungan lebih tinggi dari suhu sistem, maka kalor akan mengalir dari lingkungan menuju sistem. Jika Kalor (Q) berkaitan dengan perpindahan energi akibat adanya perbedaan suhu, maka Kerja (W) berkaitan dengan perpindahan energi yang terjadi melalui cara-cara mekanis. Misalnya jika sistem melakukan kerja terhadap lingkungan, maka energi dengan sendirinya akan berpindah dari sistem menuju lingkungan. Sebaliknya jika lingkungan melakukan kerja terhadap sistem, maka energi akan berpindah dari lingkungan menuju sistem.

Energi dalam sistem merupakan jumlah seluruh energi kinetik molekul sistem, ditambah jumlah seluruh energi potensial yang timbul akibat adanya interaksi antara molekul sistem. Jika kalor mengalir dari lingkungan menuju sistem (sistem menerima energi), energi dalam sistem akan bertambah. Sebaliknya, jika sistem melakukan kerja terhadap lingkungan (sistem melepaskan energi), energi dalam sistem akan berkurang. Dengan demikian, dari kekekalan energi, kita bisa menyimpulkan bahwa perubahan energi dalam sistem sama dengan kalor yang ditambahkan pada sistem (sistem menerima energi). Kerja yang dilakukan oleh sistem (sistem melepaskan energi)⁸⁹. Secara matematis, bisa ditulis seperti ini:

$$\begin{aligned}\Delta U &= Q - W && \text{(Hukum Pertama Termodinamika)} && (11.30) \\ W &= Q - \Delta U \\ Q &= \Delta U + W\end{aligned}$$

Keterangan :

ΔU = Perubahan energi dalam (J), Q = Kalor (J), W = Kerja (J)

Persamaan ini berlaku untuk sistem tertutup (sistem tertutup merupakan sistem yang hanya memungkinkan pertukaran energi antara sistem dengan lingkungan). Untuk sistem tertutup yang terisolasi, tidak ada energi yang masuk atau keluar dari sistem, karenanya, perubahan energi dalam = 0. Persamaan ini juga berlaku untuk sistem terbuka jika kita memperhitungkan perubahan energi dalam sistem akibat adanya penambahan dan pengurangan jumlah zat (sistem terbuka merupakan sistem yang memungkinkan terjadinya pertukaran materi dan energi antara sistem tersebut dengan lingkungan).

⁸⁹ Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

Hukum pertama termodinamika merupakan pernyataan Hukum Kekekalan Energi dan ketepatannya telah dibuktikan melalui banyak percobaan (seperti percobaan Joule). Perlu diketahui bahwa hukum ini dirumuskan pada abad kesembilan belas, setelah kalor dipahami sebagai energi yang berpindah akibat adanya perbedaan suhu.

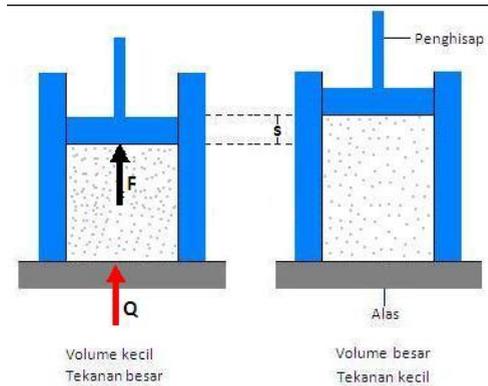
Energi dalam merupakan besaran yang menyatakan keadaan mikroskopis sistem. Besaran yang menyatakan keadaan mikroskopis sistem (energi dalam) tidak bisa diketahui secara langsung. Yang kita analisis dalam persamaan Hukum Pertama Termodinamika hanya perubahan energi dalam saja. Perubahan energi dalam bisa diketahui akibat adanya energi yang ditambahkan pada sistem dan energi yang dilepaskan sistem dalam bentuk kalor dan kerja. Jika besaran yang menyatakan keadaan mikroskopis sistem (energi dalam) tidak bisa diketahui secara langsung, maka besaran yang menyatakan keadaan makroskopis bisa diketahui secara langsung. Besaran yang menyatakan keadaan makroskopis adalah suhu (T), tekanan (p), volume (V) dan massa (m) atau jumlah mol (n). Kalor dan kerja hanya terlibat dalam proses perpindahan energi antara sistem dan lingkungan. Kalor dan kerja bukan merupakan besaran yang menyatakan keadaan sistem.

Aturan tanda untuk Kalor (Q) dan Kerja (W) disesuaikan dengan persamaan Hukum Pertama Termodinamika. Kalor (Q) dalam persamaan di atas merupakan kalor yang ditambahkan pada sistem (Q positif), sedangkan Kerja (W) pada persamaan di atas merupakan kerja yang dilakukan oleh sistem (W positif). Karenanya, jika kalor meninggalkan sistem, maka Q bernilai negatif. Sebaliknya, jika kerja dilakukan pada sistem, maka W bernilai negatif.

9. Kerja Yang Dilakukan Sistem Selama Perubahan Volume

Sebelum melangkah lebih jauh, terlebih dahulu kita tinjau kerja yang dilakukan sistem terhadap lingkungan. Untuk menghitung besarnya kerja (W) yang dilakukan sistem, kita tinjau gas ideal yang berada dalam sebuah wadah yang ditutup dengan sebuah penghisap/piston. Penghisap bisa digerakkan naik dan turun. Gambar ini disederhanakan menjadi dua dimensi. Anggap saja gambar ini tiga dimensi. Volume = panjang x lebar x tinggi.

Gas ideal diwakili oleh titik-titik yang terletak di dalam wadah. Alas wadah bersentuhan dengan sebuah benda yang memiliki suhu yang lebih tinggi (mirip seperti air dalam panci yang dipanaskan di atas nyala api). Benda bersuhu tinggi tidak disertakan dalam gambar, missalkan gas ideal dalam wadah merupakan sistem, sedangkan benda-benda lainnya



yang berada di luar wadah, termasuk benda bersuhu tinggi yang bersentuhan dengan alas wadah, merupakan lingkungan. Karena suhu lingkungan lebih tinggi dari suhu sistem, maka kalor dengan sendirinya mengalir dari lingkungan menuju sistem. Adanya sumbangan energi dari lingkungan menyebabkan energi dalam sistem (gas ideal) bertambah. Energi dalam gas ideal berbanding lurus dengan suhu ($U = \frac{3}{2} n.R.T$), karenanya ketika energi dalam gas ideal bertambah, suhu gas ideal juga meningkat. Peningkatan suhu gas ideal menyebabkan gas ideal memuai dan mendorong piston sejauh s . Ketika mendorong piston sejauh s , sistem (gas ideal) melakukan kerja terhadap lingkungan (udara luar).

Pada mulanya tekanan sistem besar (P_1) dan volume sistem kecil (V_1). Tekanan berbanding terbalik dengan volume (ingat lagi materi teori kinetik gas). Setelah kalor mengalir dari lingkungan menuju sistem dan sistem melakukan kerja terhadap lingkungan, volume sistem bertambah (V_2) dan tekanan sistem berkurang (P_2).

Besarnya kerja yang dilakukan sistem pada proses di atas adalah: Kerja (W) = Gaya dorong (F) x perpindahan (s). Karena gaya dorong (F) = tekanan (P) x luas permukaan (A) piston, maka persamaan Kerja bisa ditulis menjadi :

$$W = F \cdot s \quad \text{dimana} \quad F = P \cdot A$$

$$W = P \cdot A \cdot s \quad \text{dimana} \quad A \cdot s = V$$

Jadi: **$W = P \cdot V$** **(11.31)**

Perlu diketahui bahwa kerja yang dilakukan sistem terjadi selama perubahan volume. Karenanya, kerja total yang dilakukan sistem bisa diperoleh dengan mengalikan perubahan tekanan dan perubahan volume. Secara matematis ditulis seperti ini :

$$W = (\text{tekanan akhir} - \text{tekanan awal})(\text{volume akhir} - \text{volume awal})$$

$$W = (P_2 - P_1)(V_2 - V_1) \quad (11.32)$$

10. Penerapan Hukum Pertama Termodinamika

Sebelumnya kita sudah membahas Hukum Pertama Termodinamika dan menganalisis usaha yang dilakukan oleh sistem. Kali ini kita mencoba meninjau beberapa penerapan Hukum Pertama Termodinamika dalam empat proses termodinamika. Keempat proses termodinamika yang dimaksud adalah proses **isotermal**, **isokorik**, **isobarik** dan **adiabatik**. Isotermal = suhu selalu sama atau konstan, isokorik = volume yang sama atau konstan, isobarik = tekanan yang sama atau konstan.

a. Proses Isotermal (suhu selalu konstan)

Terlebih dahulu kita tinjau penerapan hukum pertama termodinamika pada proses isotermal. Dalam proses Isotermal, suhu sistem dijaga agar selalu konstan. Sistem yang kita analisis secara teoritis adalah gas ideal. Suhu gas ideal berbanding lurus dengan energi dalam gas ideal ($U = 3/2 nRT$). Karena T tidak berubah maka U juga tidak berubah. Dengan demikian, jika diterapkan pada proses isotermal, persamaan Hukum pertama termodinamika akan berubah bentuk seperti ini:

$$\Delta U = Q - W \quad (\Delta U = 0 \text{ energi dalam system tidak berubah})$$

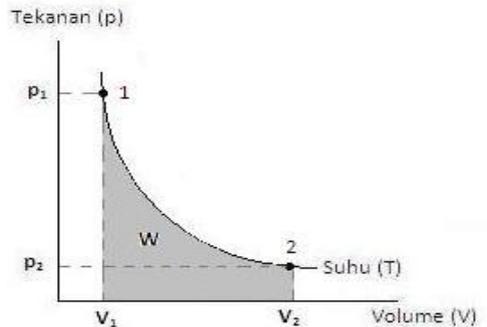
$$0 = Q - W$$

$$Q = W \quad (11.33)$$

Dari hasil ini, kita bisa menyimpulkan bahwa pada proses isotermal (suhu konstan), kalor (Q) yang ditambahkan pada sistem digunakan sistem untuk melakukan kerja (W). Perubahan tekanan dan volume sistem pada proses isotermal digambarkan melalui grafik di bawah:

Mula-mula volume sistem = V_1 (volume kecil) dan tekanan sistem = P_1 (tekanan besar). Agar suhu sistem selalu konstan maka setelah kalor ditambahkan pada sistem, sistem memuai dan melakukan kerja terhadap

lingkungan. Setelah sistem melakukan kerja terhadap lingkungan, volume sistem berubah menjadi V_2 (volume sistem bertambah) dan tekanan sistem berubah menjadi P_2 (tekanan sistem berkurang). Bentuk grafik melengkung



karena tekanan sistem tidak berubah secara teratur selama proses. Besarnya kerja yang dilakukan sistem = luasan yang diarsir.

b. Proses Adiabatik

Dalam proses adiabatik, tidak ada kalor yang ditambahkan pada sistem atau meninggalkan sistem ($Q = 0$). Proses adiabatik bisa terjadi pada sistem tertutup yang terisolasi dengan baik. Untuk sistem tertutup yang terisolasi dengan baik, biasanya tidak ada kalor yang dengan seandainya mengalir ke dalam sistem atau meninggalkan sistem. Proses adiabatik juga bisa terjadi pada sistem tertutup yang tidak terisolasi. Untuk kasus ini, proses harus dilakukan dengan sangat cepat sehingga kalor tidak sempat mengalir menuju sistem atau meninggalkan sistem. Jika diterapkan pada proses adiabatik, persamaan Hukum pertama termodinamika akan berubah bentuk seperti ini :

$$\Delta U = Q - W \quad (Q=0, \text{ tidak ada kalor yang masuk atau keluar sistem})$$

$$\Delta U = 0 - W$$

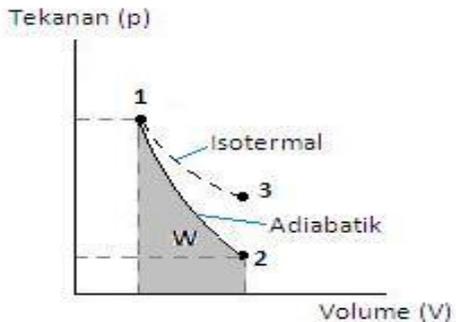
$$Q = -W \tag{11.34}$$

Apabila sistem ditekan dengan cepat (kerja dilakukan terhadap sistem), maka kerja bernilai negatif. Karena W negatif, maka U bernilai positif (energi dalam sistem bertambah). Sebaliknya jika sistem berekspansi atau memuai dengan cepat (sistem melakukan kerja), maka W bernilai positif. Karena W positif, maka U bernilai negatif (energi dalam sistem berkurang). Energi dalam sistem (gas ideal) berbanding lurus dengan suhu ($U = 3/2 nRT$), karenanya jika energi dalam sistem bertambah maka sistem juga bertambah. Sebaliknya, jika energi dalam sistem berkurang maka suhu sistem berkurang.

Perubahan tekanan dan volume sistem pada proses adiabatik digambarkan melalui grafik di bawah :

Kurva adiabatik pada grafik ini (kurva 1-2) lebih curam daripada kurva isothermal (kurva 1-3).

Perbedaan kecuraman ini menunjukkan bahwa untuk kenaikan volume yang sama, tekanan sistem berkurang lebih banyak pada proses adiabatik dibandingkan dengan proses isothermal. Tekanan sistem berkurang lebih



banyak pada proses adiabatik karena ketika terjadi pemuaian adiabatik, suhu sistem juga berkurang. Suhu berbanding lurus dengan tekanan, karenanya apabila suhu sistem berkurang, maka tekanan sistem juga berkurang. Sebaliknya pada proses isothermal, suhu sistem selalu konstan. Dengan demikian pada proses isothermal suhu tidak ikut mempengaruhi penurunan tekanan.

Salah satu contoh proses yang mendekati adiabatik terjadi pada mesin pembakaran dalam, misalnya mesin diesel dan mesin motor yang pakai bensin. Pada mesin diesel, udara dimasukkan ke dalam silinder dan udara yang berada di dalam silinder ditekan dengan cepat menggunakan piston (kerja dilakukan pada udara). Proses penekanan adiabatik (pengurangan volume sistem) digambarkan melalui kurva 2-1. Karena ditekan dengan cepat secara adiabatik maka suhu udara naik dengan cepat.

c. Proses Isokorik (volume selalu konstan)

Dalam proses Isokorik, volume sistem dijaga agar selalu konstan. Karena volume sistem selalu konstan, maka sistem tidak bisa melakukan kerja pada lingkungan. Demikian juga sebaliknya, lingkungan tidak bisa melakukan kerja pada sistem. Jika diterapkan pada proses isokorik, persamaan Hukum pertama termodinamika akan berubah bentuk seperti:

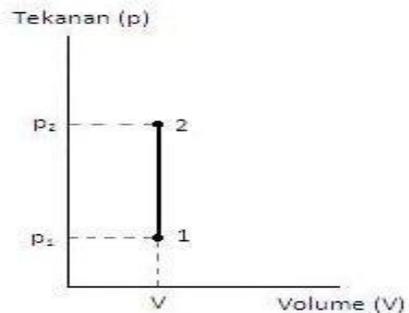
$$\Delta U = Q - W \quad (W = 0, \text{ sistem tidak melakukan kerja terhadap lingkungan})$$

$$\Delta U = Q - 0$$

$$\Delta U = Q \tag{11.35}$$

Dari hasil ini, kita bisa menyimpulkan bahwa pada proses isokorik (volume konstan), kalor (Q) yang ditambahkan pada sistem digunakan untuk menaikkan energi dalam sistem. Perubahan tekanan dan volume sistem pada proses isokorik digambarkan melalui grafik di bawah:

Mula-mula tekanan sistem = p_1 (tekanan kecil). Adanya tambahan kalor pada sistem menyebabkan energi dalam sistem bertambah. Karena energi dalam sistem bertambah maka suhu sistem (gas ideal) meningkat ($U = 3/2 n.R.T$). Suhu berbanding lurus dengan tekanan. Karenanya, jika suhu sistem meningkat, maka tekanan sistem bertambah (p_2).



Karena volume sistem selalu konstan maka tidak ada kerja yang dilakukan (tidak ada luasan yang diarsir).

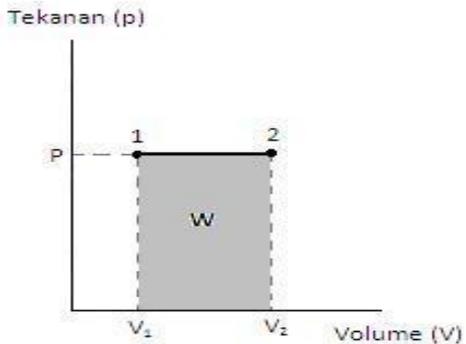
d. Proses Isobarik (tekanan selalu konstan)

Dalam proses Isobarik, tekanan sistem dijaga agar selalu konstan. Karena yang konstan adalah tekanan, maka perubahan energi dalam (ΔU), kalor (Q) dan kerja (W) pada proses isobarik tidak ada yang bernilai nol. Dengan demikian, persamaan hukum pertama termodinamika tetap utuh seperti semula :

$$\Delta U = Q - W \tag{11.36}$$

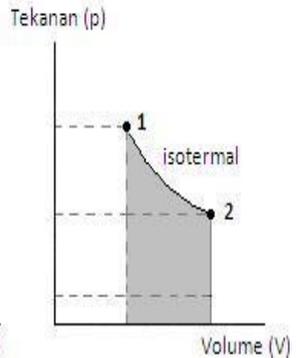
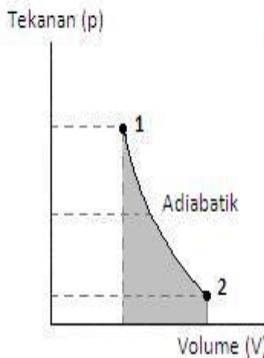
Perubahan tekanan dan volume gas pada proses isobarik digambarkan melalui grafik di bawah :

Mula-mula volume sistem = V_1 (volume kecil). Karena tekanan dijaga agar selalu konstan maka setelah kalor ditambahkan pada sistem, sistem memuai dan melakukan kerja terhadap lingkungan. Setelah melakukan kerja terhadap lingkungan, volume sistem berubah menjadi V_2 (volume sistem bertambah). Besarnya kerja (W) yang dilakukan sistem = luasan yang diarsir.



Contoh Soal:

1. Kurva 1-2 pada dua diagram di bawah menunjukkan pemuaian gas (pertambahan volume gas) yang terjadi secara adiabatik dan isothermal. Pada proses manakah kerja yang dilakukan oleh gas lebih kecil ?

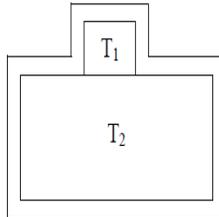


Jawab: Kerja yang dilakukan gas pada proses adiabatik lebih kecil daripada kerja yang

dilakukan gas pada proses isothermal. Luasan yang diarsir = kerja yang dilakukan gas selama proses pemuaian (pertambahan volume gas). Luasan yang diarsir pada proses adiabatik lebih sedikit dibandingkan dengan luasan yang diarsir pada proses isothermal.

11. Hukum Kedua Termodinamika

Gambar di bawah ini memperlihatkan dua sistem yang berbeda, masing-masing dilingkungi oleh dinding adiabatik. Pada gambar (a) sebuah benda yang suhunya T_1 bersinggungan dengan benda lain (reservoir) yang suhunya T_2 lebih tinggi daripada T_1 maka sesuai dengan hukum alam, sejumlah panas akan mengalir dari reservoir masuk ke dalam benda pertama, sampai akhirnya



(a)



(b)

dicapai keadaan seimbang, suhu benda pertama menjadi sama dengan suhu reservoir. Seperti diketahui reservoir adalah benda yang karena ukurannya besar atau karena mendapat masukan energi panas dari sistem lain, maka walaupun sejumlah panas mengalir ke luar atau masuk ke dalamnya, suhunya tidak berubah.

Proses di atas terjadi secara spontan dan irreversibel. Keadaan awal, kedua benda mempunyai suhu yang berbeda, setelah bdisentuhkan dan mencapai keseimbangan, maka keadaan akhirnya benda mempunyai suhu yang sama dengan suhu reservoir. Jika sistem ingin dikembalikan lagi ke keadan semula, dimana benda kembali mempunyai suhu T_1 yang lebih rendah, tidaklah mungkin terjadi. Andaikata proses ini dapat berlangsung maka hal ini sama sekali tidak bertentangan dengan hukum pertama, yang tidak lain adalah hukum kekekalan tenaga. Tetapi ternyata sesuai dengan pengalaman proses itu tidak pernah terjadi, walaupun jumlah tenaganya tetap saja, karena sistem itu dilingkungi dengan dinding adiabatik. Mengapa tidak dapat tertjadi ? Pada gambar (b) dilukiskan suatu bejana yang terbagi oleh dua diafragma. Bagian kiri berisi sejumlah gas dan bagian kanan hampa. Jika diafragma dirobek, maka sejumlah molekul gas dari bagian kiri akan bergerak memasuki bagian kanan sampai akhirnya dicapai keadaan seimbang dengan kedua bagian mempunyai tekanan yang sama. Proses inipun tak dapat berlangsung ke arah sebaliknya. Dari

keadaan seimbang dengan molekul-molekul gas menempati kedua bagian dengan tekanan yang sama kemudian sejumlah molekul bergerak ke kiri sampai akhirnya bagian kanan menjadi hampa. Andaikata hal ini dapat terjadi maka inipun tidak bertentangan dengan hukum pertama. Peristiwa ini dikenal dengan peristiwa ekspansi bebas, dimana dalam hal ini walaupun volume sistem bertambah, sistem dikatakan tidak melakukan usaha. Dari kedua peristiwa itu timbul pertanyaan mengapa suatu peristiwa yang sebenarnya tidak bertentangan dengan sesuatu hukum tetapi tidak juga dapat terjadi. Di alam ternyata ada peristiwa-peristiwa yang terjadi secara spontan ke satu arah saja.. Menghadapi kenyataan seperti ini maka haruslah diambil kesimpulan bahwa pastilah ada satu hukum alam lain di luar hukum pertama termodinamika dan yang tak dapat dijabarkan dari hukum pertama itu, lagipula dapat menentukan ke arah mana proses alami itu akan terjadi. Hukum ini selanjutnya akan disebut kedua termodinamika. Penyusunan hukum kedua ini tidak lepas dari usaha untuk mencari sifat atau besaran sistem yang merupakan fungsi keadaan. Ternyata orang yang menemukannya adalah Clausius dan besaran itu disebut entropi. Hukum kedua ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

Proses suatu sistem terisolasi yang disertai dengan penurunan entropi tidak mungkin terjadi. Dalam setiap proses yang terjadi pada sistem terisolasi, maka entropi system tersebut selalu naik atau tetap tidak berubah⁹⁰.

Lebih lanjut, jika suatu sistem terisolasi dalam keadaan demikian rupa sehingga entropinya maksimum, maka sistem itu dalam keadaan seimbang. Hal ini disebabkan karena setiap proses yang akan terjadi berkaitan dengan penurunan entropi, sehingga tidak mungkin terjadi. Dengan perkataan lain, syarat untuk keseimbangan ialah bahwa entropinya harus maksimum. Pernyataan di atas hanya berlaku untuk sistem yang terisolasi. Jadi mungkin saja bahwa suatu sistem yang tak terisolasi akan menjalani proses yang berkaitan dengan penurunan entropi. Namun selalu dapat diketemukan bahwa entropi sistem lain yang berinteraksi dengan sistem itu naik paling sedikit dengan jumlah yang sama dengan penurunan entropinya.

⁹⁰ Sears dan Zemansky. 2000. *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

12. Entropi

Dalam pembicaraan tentang siklus Carnot Pasal 4.5, disebutkan bahwa Q_2 adalah panas yang masuk kedalam sistem dan Q_1 panas yang keluar dari sistem. Ada faedahnya apabila masing-masing diberi tanda yang berbeda. Panas yang masuk ke dalam sistem yaitu Q_2 diberi tanda positif dan panas Q_1 yang keluar dari sistem diberi tanda negatif. Karena itu untuk siklus Carnot:

$$\frac{T_2}{T_1} = - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (11.37)$$

Jika suatu siklus kecil beroperasi antara suhu T_2 dan T_1 dengan arus panas yang bersangkutan ΔQ_2 dan ΔQ_1 , maka untuk siklus itu berlaku persamaan:

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad (11.38)$$

Jika dijumlahkan untuk semua siklus, diperoleh:

$$\sum \frac{\Delta S}{T} = 0 \quad (11.39)$$

Indeks r digunakan untuk menunjukkan bahwa proses itu reversibel. Besaran Q seperti sudah dijelaskan, bukanlah fungsi keadaan, sehingga $d'Q$ bukan diferensial eksak. Diferensial eksak yang untuk selanjutnya akan diberi lambang dS . Besaran S ini disebut entropi yang adalah fungsi keadaan. Jadi:

$$\begin{aligned} dS &= \frac{d'Q_r}{T} \\ \oint dS &= 0 \\ s &= \frac{S}{m} \quad \text{atau} \quad s = \frac{S}{n} \end{aligned}$$

13. Menghitung Perubahan Entropi dalam Proses Reversibel

Dalam proses adiabatik, $d'Q=0$, dan dalam proses adiabatik reversibel, $ds=0$. Oleh karena itu dalam setiap proses adiabatik reversibel, $ds=0$ atau ini berarti bahwa entropi S tetap. Proses demikian ini disebut pula sebagai proses isentropik. Jadi $d'Q_r=0$ dan $dS=0$. Dalam proses isothermal reversibel, suhu T tetap, sehingga perubahan entropi:

$$S_2 - S_1 = \frac{Q}{T} \quad (11.40)$$

Untuk melaksanakan proses semacam ini maka sistem dihubungkan dengan sebuah reservoir yang suhunya berbeda. Jika arus panas mengalir masuk kedalam sistem, maka Q_r positif dan entropi sistem naik. Jika arus panas keluar dari sistem, Q_r negatif dan entropi sistem turun. Dalam kebanyakan proses suatu arus panas yang masuk kedalam sistem secara reversibel umumnya disertai oleh perubahan suhu, sehingga

perhitungan perubahan entropi dari persamaan (5-4) suhu T tidak boleh dikeluarkan dari tanda integral. Jika proses terjadi pada volume tetap, maka $d'q = c_v \cdot dT$, sehingga:

$$S_2 - S_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v \frac{dT}{T}$$

Jika proses terjadi pada tekanan tetap, $d'q = c_p \cdot dT$, dan

$$S_2 - S_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T}$$

$$(S_2 - S_1)_v = c_v \ln \frac{Q}{T} \quad (11.41)$$

$$(S_2 - S_1)_p = c_p \ln \frac{Q}{T} \quad (11.42)$$

Jika dalam suatu proses terdapat arus panas antara sistem dengan lingkungannya secara reversibel, maka pada hakekatnya suhu sistem dan suhu lingkungan adalah sama. Besar arus panas ini yang masuk ke dalam sistem atau yang masuk ke dalam lingkungan di setiap titik adalah sama, tetapi harus diberi tanda yang berlawanan. Karena itu perubahan entropi lingkungan sama besar tetapi berlawanan tanda dengan perubahan entropi sistem dan jumlahnya menjadi nol. Karena sistem bersama dengan lingkungannya membentuk dunia, maka boleh dikatakan bahwa entropi dunia adalah tetap. Hendaknya diingat bahwa pernyataan ini hanya berlaku untuk proses reversibel saja.

14. Perubahan Entropi Dalam Proses Tak-Terbalikkan

Perubahan entropi seperti yang dirumuskan dalam pers (6.2) berlaku untuk proses reversibel. Namun karena entropi S adalah variabel keadaan, dan nilai perubahannya hanya ditentukan oleh keadaan awal dan akhir proses apapun, maka untuk proses irreversibel boleh digunakan rumus untuk proses reversibel asalkan keadaan awal dan akhir proses tersebut sama. Ditinjau lagi proses irreversibel seperti terlukis dalam gambar 6.1 (a) Suhu benda pertama setelah berhubungan dengan benda kedua (reservoir) berubah dari T_1 menjadi T_2 . Walaupun proses ini irreversibel, namun dapat digunakan persamaan untuk proses reversible asalkan keadaan awal dan keadaan akhirnya juga sama. Jika proses terjadi pada tekanan tetap (isobar) dan C_p juga dapat dianggap tetap, maka:

$$\Delta S_{\text{Benda}} = S_2 - S_1 = C_p \ln \frac{Q}{T} \quad (11.43)$$

Karena $T_2 > T_1$, maka arus panas masuk ke dalam benda dan $\ln \frac{T_2}{T_1}$ positif. Jadi entropi benda naik. Perubahan entropi reservoir dapat

dihitung seperti menghitung entropi pada proses isothermal reversibel. Jadi perubahan entropi reservoir:

$$\Delta S_{\text{res}} = C_P \frac{Q_2 - Q_1}{T_1} \quad (11.44)$$

Karena arus panas tersebut keluar dari reservoir, maka sesuai dengan perjanjian tentang tanda, harus diberi tanda negatif, artinya entropi reservoir berkurang.

$$\Delta S_{\text{res}} = - C_P \frac{Q_2 - Q_1}{T} \quad (11.45)$$

Perubahan entropi total sistem:

$$\Delta S = \Delta S_{\text{Benda}} + \Delta S_{\text{res}} \quad (11.46)$$

Sesuai dengan Hukum II Termodinamika, Perubahan entropi suatu sistem.

15. Pernyataan Clausius dan Kelvin Planck tentang Hukum kedua

Dalam uraian terdahulu telah diberikan pernyataan tentang hukum kedua sebagai pernyataan yang dikaitkan dengan kemungkinan perubahan entropi pada sebarang proses. Dua pernyataan juga sering dipakai sebagai titik awal untuk merumuskan hukum kedua. Pernyataan clausius tentang hukum kedua adalah sebagai berikut: *tidak ada proses yang mungkin terjadi bila satu-satunya hasil adalah adanya aliran panas dari suatu sistem pada suhu tertentu dan panas yang sama jumlahnya dialirkan pada sistem lain yang mempunyai suhu lebih tinggi*⁹¹.

Pernyataan Clausius ini dapat dilihat secara langsung pada prinsip kenaikan entropi. Perubahan entropi masing-masing sistem:

$$\Delta S_A = - \frac{Q}{T_A} \quad , \quad \Delta S_B = \frac{Q}{T_B}$$

$$\Delta S_A + \Delta S_B < 0 \quad (11.47)$$

Proses dengan jumlah entropi semesta menjadi berkurang bertentangan dengan Hukum II Termodinamika sehingga tidak mungkin terjadi. Pernyataan Kelvin-Planck tentang hukum kedua adalah: *tidak ada proses yang mungkin terjadi bila satu-satunya hasil adalah adanya aliran panas satu reservoir pada suhu tertentu dan mengubah seluruhnya menjadi menghasilkan kerja W (usaha mekanik).*

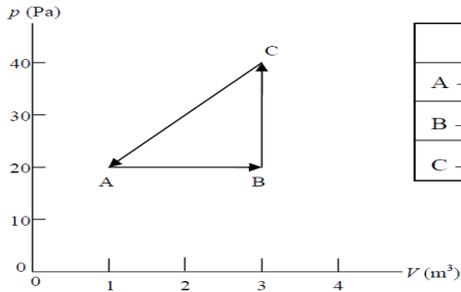
Pada pernyataan ini hanya terjadi penurunan entropi dari suatu reservoir tanpa diikuti dengan kenaikan entropi pada sistem lain, sehingga

⁹¹ Mark W. Zemansky. 1994. *Fisika untuk Universitas (Mekanika, Panas, Bunyi)*. Jakarta: Bina Cipta.

perubahan entropi semestannya negatif. Hal ini tidak sesuai dengan hukum kedua termodinamika.

Soal Latihan 11.1:

1. Benar atau salah: Jika pernyataan benar, jelaskan mengapa benar, jika salah berikan contoh penyanggah.
 - a) Suhu ketika air mendidih tidak bergantung pada tekanan.
 - b) Bila sebuah sistem berubah dari keadaan A ke keadaan B, jumlah panas yang ditambahkan ke dalam sistem adalah sama untuk semua proses.
 - c) Bila sebuah sistem berubah dari keadaan A ke keadaan B, usaha yang dilakukan sistem adalah sama untuk semua proses.
 - d) Bila sebuah sistem berubah dari keadaan A ke keadaan B, perubahan energi internal (energi dalam) sistem adalah sama untuk semua proses.
 - e) Energi internal sejumlah tertentu gas ideal hanya tergantung pada suhu mutlaknya.
 - f) Untuk semua bahan yang memuai jika dipanaskan, c_p lebih besar daripada c_v .
2. Untuk menaikkan suhu 1 liter air dari suhu ruang sampai sekitar 100° manakah proses yang lebih hemat dari segi pemakaian energi (a) air dipanaskan dalam panci yang terbuka atau (b) air dipanaskan dalam panci yang tertutup rapat. Jelaskan jawaban anda.
3. Manakah yang lebih cepat, merebus telur dalam panci terbuka berisi air mendidih (a) di puncak gunung yang tinggi atau (b) di pantai. Jelaskan jawaban anda!
4. Satu mol gas ideal mula-mula tekanannya 3 atm, volumenya 1 L dan energi dalamnya 456 J. Gas kemudian berekspansi pada tekanan tetap sampai volumenya 3 L, kemudian didinginkan pada volume konstan sampai tekanannya menjadi 2 atm. (a) Tunjukkan proses yang dialami gas dalam diagram p - V , (b) hitunglah usaha yang dilakukan gas, dan (c) hitunglah kalor yang ditambahkan pada gas selama proses tersebut.
5. Sebuah sistem termodinamika mengalami siklus A-B-C-A seperti gambar diagram p - V di bawah ini. (a) Lengkapilah tabel di bawah ini dengan mengisi tanda + (plus), - (minus) atau 0 (nol) yang sesuai dengan kuantitas termodinamika yang diasosiasikan untuk setiap proses (b) Hitunglah nilai numerik dari kerja yang dilakukan oleh sistem untuk siklus lengkap A-B-C-A.



	Q	W	ΔU
A \rightarrow B			+
B \rightarrow C	+		
C \rightarrow A			

- Satu mol gas ideal yang mula-mula ada pada tekanan 1 atm dan suhu 0°C ditekan secara isotermis dan kuasi statik sehingga tekanannya menjadi 2 atm. Hitung (a) volume gas mula-mula, (b) usaha yang diperlukan untuk menekan gas dan (c) panas yang dikeluarkan gas selama proses kompresi tersebut.
- Sebuah mesin kalor bekerja pada dua isobarik (10^5 Pa dan 3×10^5 Pa) dan dua isokhorik (0,5 L dan 2 L). (a) Gambarkan siklus mesin tersebut dalam diagram p-V. (b) Hitung kerja yang dihasilkan mesin tiap siklus.
- Sebuah mesin Carnot bekerja pada suhu 400 K dan 900 K. (a) tentukan efisiensi mesin. Jika kalor yang diserap sistem pada tandon suhu tinggi adalah 5000 J tiap siklusnya, tentukan (b) kalor yang dibuang sistem pada tandon suhu rendah dan (c) kerja yang dilakukan sistem tiap siklus.

Daftar Pustaka

- Frederick J. Bueche. 1999. *Seri Buku Schaum Teori dan Soal-Soal Fisika Edisi Delapan* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Giancoli, Douglas C., 2001. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Mark W. Zemansky. 1994. *Fisika untuk Universitas (Mekanika, Panas, Bunyi)*. Jakarta: Bina Cipta.
- Sears dan Zemansky. 2000. *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Tipler, P.A. 1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid I* (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.

RIWAYAT HIDUP



Bahtiar. Putra kedua dari Ahmad M. Ali (Alm.) dan Ibunda Ma'atum. Lahir di Dompu 19 Juli 1979. Penulis telah menikah dengan Nurmalina, S.Pd, dikarunia 3 putra yaitu; M. Sultanik Ar-Razak, M. Ibnu Sina Dewantara, dan M. Ikhlas Abdul Aziz. Sejak tahun 2005 menjadi Dosen Tetap IAIN Mataram Fakultas Ilmu Tarbiyah dan Keguruan (FITK) Jurusan Pendidikan Fisika. Pendidikan SD, SMP, dan SMA di Kempo-Dompu-NTB, Sarjana strata satu (S1) di Universitas Negeri Mataram (Unram) Jurusan Pendidikan Fisika, Magister Pendidikan Sains (S2) di Universitas Negeri Yogyakarta (UNY) Prodi Pendidikan Sains-Fisika, dan Doktor pendidikan sains di Universitas Negeri Surabaya (Unesa). Mata kuliah yang pernah diampu adalah; Fisika Dasar I dan II, Sains-2, Strategi Pembelajaran Fisika, Statistik, dan Tela'ah Kurikulum Fisika. Selain aktivitas mengajar, penulis banyak menulis bahan ajar, buku, dan jurnal/artikel ilmiah serta memberikan pelatihan guru-guru sains di Kementerian Agama NTB dan NTT. Adapun daftar karya ilmiah yang telah dipublikasi: **Journal of Education and Practice**: Development of Learning Model P3E to Improve Critical Thinking Skills Students of Islamic Senior High School (2016); **Proceeding: International Conference on Education (IECO)**: A Guided Inquiry Approach-Based Physics Practice Model To Improve Students' Critical Thinking Skill (2016); **Proceeding**: Mathematics, Informatics, Science and Education International Conference (MISEIC): Development of Learning Model P3E to Improve Critical Thinking Skills Students of Islamic Senior High School. **Buku**: Strategi Belajar Mengajar Sains (IPA) (2015); **Jurnal**: Analisis Keterampilan Berpikir Kritis Siswa Madrasah Aliyah Negeri (MAN) Kelas X se-Kota Mataram (2014); **Jurnal**: Pengaruh Model Pembelajaran Kooperatif Tipe NHT (*Numbered Head to Gether*) Menggunakan Peta Konsep Terhadap Hasil Belajar Fisika Siswa (2013); **Buku**: Evaluasi Hasil Pembelajaran Sains (IPA) (2012); dan **Buku**: Fisika Dasar 1 (2010)