



Dinas Pendidikan Aceh



PELAJARAN MUATAN AL-QURAN

FISIKA

FASE F KELAS XI

Disusun Oleh : Tim Pengembang Kurikulum

Jalan Tgk. H. Mohd Daud Beureueh Nomor 22 Banda Aceh Kode Pos 23121

Telepon (0651) 22620, Faks (0651) 32386

Website : disdikacehprov.go.id, Email : disdik@acehprov.go.id

Copyright © 2026 Dinas Pendidikan Aceh

DIPUBLIKASI OLEH TIM PENGEMBANG KURIKULUM

disdikacehprov.go.id

Catatan Lisensi & Penggunaan:

Suplemen materi bahan ajar ini dimaksudkan agar amanat Undang-Undang (UU) dan kekhlasan Aceh sebagaimana yang tertuang dalam **Peraturan Gubernur (Pergub) Nomor 7 Tahun 2022** dapat diintegrasikan secara optimal dalam proses pembelajaran oleh guru di setiap satuan pendidikan.

Cetakan Pertama, Juni 2026



Daftar Isi

Tim Penyusun	9
Kata Pengantar	11

I	Semester Satu	
1	Vektor	15
1.1	Konsep Dasar Vektor	18
1.2	Notasi dan Penulisan Vektor	18
1.3	Representasi Vektor	18
1.3.1	Representasi Geometri	18
1.3.2	Representasi Komponen atau Basis	19
1.3.3	Representasi Matriks	19
1.3.4	Besar Vektor	20
1.3.5	Arah Vektor	20
1.3.6	Kesamaan Dua Vektor	22
1.4	Operasi dasar pada vektor	23
1.4.1	Penjumlahan Vektor	23
1.4.2	Pengurangan Vektor	26
1.5	Sifat Penjumlahan Vektor	27
1.5.1	Sifat Asosiatif	27

2	Kinematika Gerak	29
2.1	Pengertian Gerak	31
2.1.1	Kerangka Acuan dan Posisi	32
2.1.2	Gerak sebagai Perubahan Posisi	32
2.2	Besaran-Besaran Gerak	32
2.2.1	Jarak dan Perpindahan	33
2.2.2	Kelajuan dan Kecepatan	34
2.2.3	Gerak Relatif	35
2.2.4	Kecepatan Rata-rata	35
2.2.5	Kecepatan Sesaat	35
2.2.6	Percepatan Rata-rata	36
2.2.7	Percepatan Sesaat	36
2.3	Gerak Lurus	37
2.3.1	Gerak Lurus dengan kecepatan Konstan	38
2.3.2	Gerak Lurus dengan Percepatan Konstan	40
2.4	Gerak Lengkung	43
2.4.1	Vektor pada Gerak Dua Dimensi	44
2.4.2	Gerak Parabola	47
2.4.3	Gerak Melingkar	53
2.4.4	Perpindahan Sudut dan Panjang Busur	54
2.4.5	Kecepatan Sudut	54
2.4.6	Periode dan Frekuensi	55
2.4.7	Kecepatan Linear dan Kecepatan Sudut	56
2.4.8	Gerak Melingkar Beraturan (GMB)	56
2.4.9	Percepatan Sentripetal	57
2.4.10	Gaya Sentripetal	57
2.4.11	Gerak Melingkar Berubah Beraturan (GMBB)	58
3	Dinamika Gerak	59
3.1	Gaya dan Hukum Newton	62
3.1.1	Konsep Gaya	62
3.1.2	Hukum I Newton	64
3.1.3	Hukum II Newton	65
3.1.4	Hukum III Newton	67
3.1.5	Diagram Gaya Bebas	70
3.1.6	Jenis-Jenis Gaya	72
3.2	Penerapan Hukum Newton	76
3.2.1	Langkah-Langkah Analisis Dinamika	76
3.2.2	Benda pada Bidang Datar Licin	77
3.2.3	Benda pada Bidang Miring	77
3.2.4	Gaya Gesek dalam Hukum Newton	79
3.2.5	Sistem Katrol Sederhana	80
3.2.6	Lift dan Berat Semu	81
3.2.7	Ringkasan	84

3.3	Momentum dan Impuls	84
3.3.1	Momentum	85
3.3.2	Impuls	85
3.3.3	Hubungan Impuls dan Momentum	86
3.3.4	Hukum Kekekalan Momentum	87
3.3.5	Koefisien Restitusi: Jembatan antara Tiga Jenis Tumbukan	88
3.3.6	Tumbukan Lenting Sempurna	89
3.3.7	Tumbukan Lenting Sebagian	90
3.3.8	Tumbukan Tidak Lenting Sama Sekali	91
3.3.9	Ringkasan	92
3.4	Usaha dan Energi	92
3.4.1	Konsep Usaha	93
3.4.2	Energi Kinetik	95
3.4.3	Energi Potensial	96
3.4.4	Energi Mekanik	98
3.4.5	Hukum Kekekalan Energi Mekanik	98
3.4.6	Daya	100
3.4.7	Ringkasan	101
3.5	Gerak Rotasi dan Keseimbangan Benda Tegar	101
3.5.1	Besaran-Besaran Rotasi	102
3.5.2	Momen Gaya (Torsi)	104
3.5.3	Momen Inersia	105
3.5.4	Hukum II Newton untuk Rotasi	106
3.5.5	Energi Kinetik Rotasi	107
3.5.6	Momentum Sudut	108
3.5.7	Keseimbangan Benda Tegar	109
3.5.8	Titik Berat	110
3.5.9	Ringkasan	111
3.6	Gravitasi	111
3.6.1	Hukum Gravitasi Newton	112
3.6.2	Medan Gravitasi	113
3.6.3	Percepatan Gravitasi	114
3.6.4	Energi Potensial Gravitasi	115
3.6.5	Gerak Satelit	116
3.6.6	Hukum Kepler	118
3.6.7	Ringkasan	120

II

Semester Dua

4	Fluida	125
4.1	Fluida Statis	128
4.1.1	Konsep Fluida	128
4.1.2	Massa Jenis dan Berat Jenis	129
4.1.3	Tekanan	130

4.1.4	Tekanan Hidrostatik	131
4.1.5	Hukum Pascal	132
4.1.6	Hukum Archimedes	134
4.1.7	Tegangan Permukaan dan Kapilaritas	135
4.1.8	Viskositas	136
4.1.9	Penerapan Fluida Statis dalam Kehidupan	137
4.1.10	Ringkasan	139
4.2	Fluida Dinamis	139
4.2.1	Karakteristik Fluida Dinamis	140
4.2.2	Laju Aliran dan Debit	141
4.2.3	Persamaan Kontinuitas	142
4.2.4	Persamaan Bernoulli	143
4.2.5	Teorema Torricelli	145
4.2.6	Efek Venturi	146
4.2.7	Gaya Angkat (Prinsip Bernoulli)	148
4.2.8	Viskositas dan Hukum Stokes	149
4.2.9	Penerapan Fluida Dinamis dalam Kehidupan	151
4.2.10	Ringkasan	153
5	Kalor dan Termodinamika	155
5.1	Suhu dan Kalor	158
5.1.1	Konsep Suhu	158
5.1.2	Pengukuran Suhu dan Termometer	159
5.1.3	Skala Suhu	159
5.1.4	Pemuaian Zat	160
5.1.5	Konsep Kalor	162
5.1.6	Kalor Jenis dan Kapasitas Kalor	162
5.1.7	Asas Black	163
5.1.8	Perubahan Wujud Zat	165
5.1.9	Perpindahan Kalor	166
5.1.10	Penerapan Suhu dan Kalor dalam Kehidupan	169
5.1.11	Ringkasan	171
5.2	Teori Kinetik Gas	171
5.2.1	Model Gas Ideal	172
5.2.2	Tekanan Gas dan Gerak Molekul	173
5.2.3	Persamaan Gas Ideal	174
5.2.4	Energi Kinetik Molekul Gas	176
5.2.5	Hubungan Suhu dan Energi Kinetik	176
5.2.6	Kelajuan Molekul Gas	177
5.2.7	Derajat Kebebasan Molekul	179
5.2.8	Energi Dalam Gas Ideal	180
5.2.9	Penerapan Teori Kinetik Gas	181
5.2.10	Ringkasan	182

5.3	Hukum Termodinamika	183
5.3.1	Sistem dan Lingkungan	183
5.3.2	Usaha pada Gas	184
5.3.3	Proses-Proses Termodinamika	186
5.3.4	Hukum I Termodinamika	188
5.3.5	Hukum II Termodinamika	189
5.3.6	Mesin Kalor	191
5.3.7	Siklus Carnot	192
5.3.8	Mesin Pendingin dan Pompa Kalor	194
5.3.9	Entropi	196
5.3.10	Ringkasan	198
6	Getaran, Gelombang dan Optika	199
6.1	Getaran dan Gelombang Mekanik	202
6.1.1	Konsep Getaran	203
6.1.2	Simpangan, Amplitudo, Periode, dan Frekuensi	203
6.1.3	Gerak Harmonik Sederhana	205
6.1.4	Energi pada Gerak Harmonik Sederhana	208
6.1.5	Konsep Gelombang Mekanik	210
6.1.6	Besaran-Besaran Gelombang	211
6.1.7	Persamaan Gelombang Berjalan	212
6.1.8	Gelombang Transversal	214
6.1.9	Gelombang Longitudinal	215
6.1.10	Prinsip Superposisi Gelombang	216
6.1.11	Gelombang Stasioner	217
6.1.12	Resonansi	219
6.1.13	Penerapan Gelombang Mekanik	221
6.1.14	Ringkasan	222
6.2	Gelombang Bunyi	223
6.2.1	Hakikat Gelombang Bunyi	223
6.2.2	Cepat Rambat Bunyi	224
6.2.3	Intensitas dan Taraf Intensitas Bunyi	226
6.2.4	Efek Doppler	227
6.2.5	Resonansi Bunyi	229
6.2.6	Pelayangan Bunyi	229
6.2.7	Dawai dan Kolom Udara	230
6.2.8	Penerapan Gelombang Bunyi	233
6.2.9	Ringkasan	234
6.3	Gelombang Cahaya dan Optik Geometri	234
6.3.1	Hakikat Cahaya	235
6.3.2	Pemantulan Cahaya	236
6.3.3	Pembiasan Cahaya	238
6.3.4	Hukum Snellius	239
6.3.5	Pemantulan Sempurna	240
6.3.6	Lensa	241

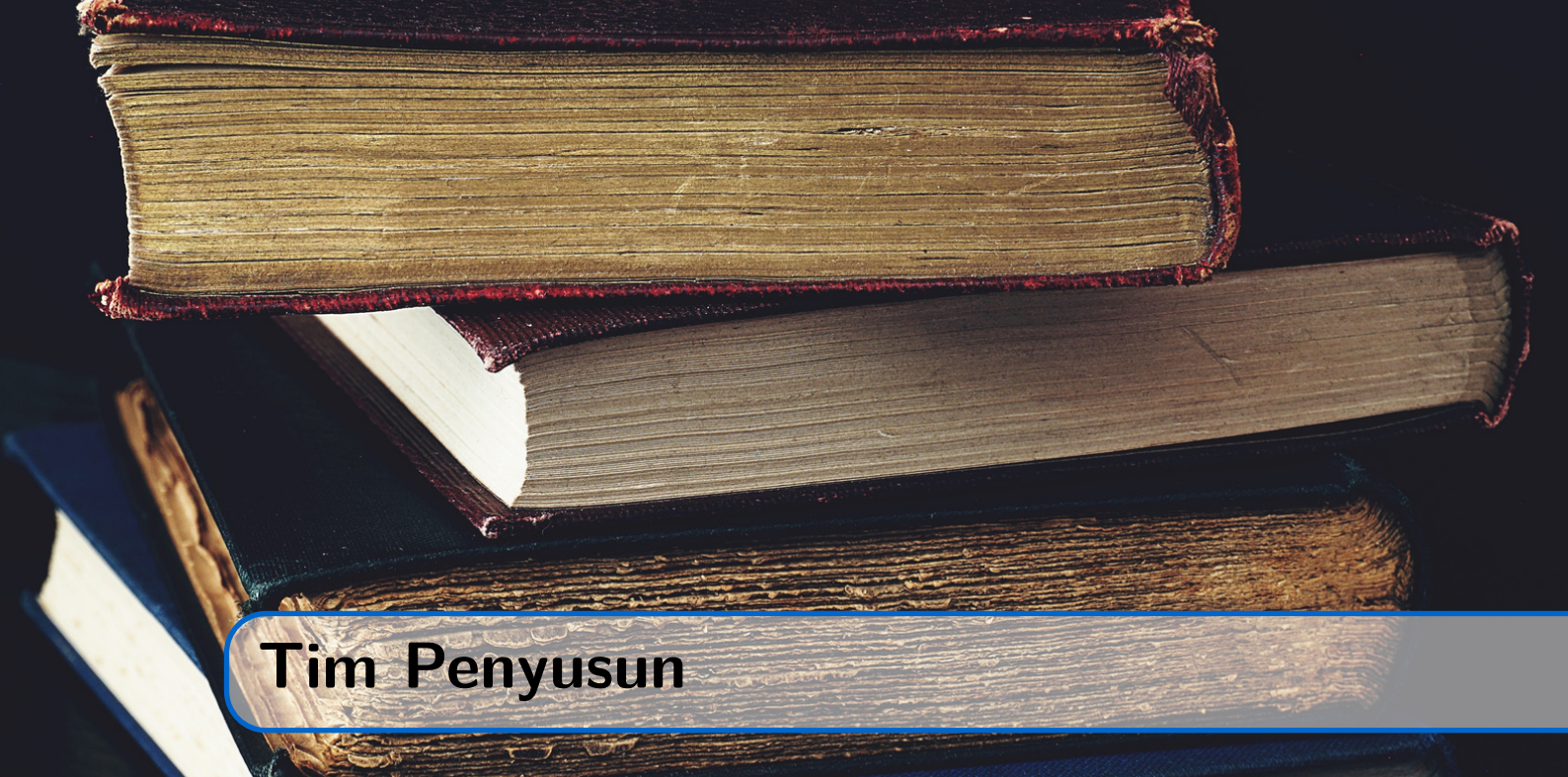
6.3.7	Kekuatan Lensa	242
6.3.8	Alat-Alat Optik	243
6.3.9	Dispersi Cahaya	246
6.3.10	Penerapan Optik Geometri	247
6.3.11	Ringkasan	248

Daftar Bacaan 249

Al-Qur'an Karim 249

Buku 249

Indeks 251



Tim Penyusun

Pembina: (Gubernur Aceh)

Penanggung Jawab: (Kepala Dinas Pendidikan Aceh)

Pengarah Utama: (Kepala Bidang Pembinaan SMA dan PKLK)

Pengarah:

Jhon Abdi, S.Pd., M.Pd	(Pengawas Dinas Pendidikan Aceh)
Zulbahri Nurdin, S.Pd., M.Ed	(Analisis Pengembang Kurikulum)
Luqmanulhakim, S.S	(Analisis Teknis Kebijakan)

Penyusun Modul:

Afriadi, S.Pd., M.Mat	(SMA Negeri 10 Fajar Harapan)
Herman	(SMA Negeri Modal Bangsa)

Editor Bahasa

Sabariah, S.Pd., M.Pd	(SMA Negeri 1 Leupung)
Najwa, S.PdI., M.HSc	(SMA Negeri 2 Banda Aceh)

Editor Konten

Mustafa, S.Ag	(SMA Negeri 10 Fajar Harapan)
Ahlul Fikri, S.PdI., M.Pd	(SMA Negeri 1 Kuta Baro)
Muhammad Yani, S.PdI., M.Ag	(SMA Negeri 1 Peukan Bada)

Reviewer

Dr. Suhrawardi Ilyas, M.Sc	Fakultas MIPA USK
----------------------------	-------------------



Kata Pengantar

Assalamu'alaikum wr wb

Segala puji hanya milik Allah SWT, Tuhan semesta alam. Shalawat dan salam semoga tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, keluarga, sahabat, serta seluruh umatnya yang setia mengikuti ajaran Islam hingga akhir zaman. Alhamdulillah, dengan izin dan rahmat Allah SWT, buku suplemen "Integrasi Al-Qur'an dalam Mata Pelajaran MIPA" ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik.

Buku suplemen ini hadir sebagai bentuk upaya menyelaraskan antara ilmu pengetahuan dan nilai-nilai keislaman yang terkandung dalam Al-Qur'an, khususnya dalam bidang Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (MIPA). Penyusunan buku suplemen ini diharapkan dapat menjadi rujukan bagi guru dalam mengintegrasikan ayat-ayat Alquran dan mengaitkan dengan konten materi yang dipelajari peserta didik, sehingga peserta didik dapat melihat keterkaitan yang harmonis antara ayat-ayat kauniyah (alam semesta) dan ayat-ayat Qur'aniyah (wahyu Ilahi), sehingga pembelajaran menjadi lebih bermakna, integratif, dan membentuk karakter islami.

Kami sadar buku suplemen ini jauh dari kesempurnaan, saran dan masukan untuk perbaikan sangat kami harapkan. Akhir kata, semoga buku suplemen ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak, khususnya dalam dunia pendidikan, dan menjadi bagian dari upaya mencerdaskan generasi muslim yang berilmu dan berakhlak mulia. Aamiin ya Rabbal 'alamin.

Banda Aceh, 2025
Kepala Dinas Pendidikan Aceh

MURTHALAMUDDIN, S.Pd., MSP
Pembina Tingkat 1
NIP. 19701130 199307 1 001



Semester Satu

1	Vektor	15
1.1	Konsep Dasar Vektor	
1.2	Notasi dan Penulisan Vektor	
1.3	Representasi Vektor	
1.4	Operasi dasar pada vektor	
1.5	Sifat Penjumlahan Vektor	
2	Kinematika Gerak	29
2.1	Pengertian Gerak	
2.2	Besaran-Besaran Gerak	
2.3	Gerak Lurus	
2.4	Gerak Lengkung	
3	Dinamika Gerak	59
3.1	Gaya dan Hukum Newton	
3.2	Penerapan Hukum Newton	
3.3	Momentum dan Impuls	
3.4	Usaha dan Energi	
3.5	Gerak Rotasi dan Keseimbangan Benda Tegar	
3.6	Gravitasi	

Teknologi Global Positioning System (GPS) memungkinkan pengguna menentukan lokasi dan arah pergerakan secara akurat. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan sinyal dari beberapa satelit yang mengorbit Bumi. Posisi satelit, posisi pengguna, serta arah perpindahan dapat direpresentasikan sebagai vektor sehingga perhitungan lokasi dapat dilakukan dengan presisi tinggi. Memahami vektor menjadi kunci dalam pengembangan sistem navigasi modern yang digunakan pada transportasi, pemetaan, dan berbagai layanan berbasis lokasi.



1. Vektor

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, murid mampu:

- ✓ Menjelaskan pengertian vektor, membedakannya dari besaran skalar, serta mengidentifikasi besaran-besaran vektor dalam kehidupan sehari-hari sebagai wujud pengamatan terhadap tanda-tanda kebesaran Allah SWT di alam semesta.
- ✓ Merepresentasikan vektor dalam berbagai bentuk (gambar, notasi, dan komponen) untuk menggambarkan arah dan nilai fisis suatu besaran secara tepat, teliti, dan bertanggung jawab.
- ✓ Melakukan operasi vektor menggunakan metode poligon, jajargenjang, dan analitis untuk menyelesaikan berbagai permasalahan fisika secara logis, sistematis, dan jujur.
- ✓ Menganalisis resultan vektor dan menginterpretasikan makna fisiknya pada berbagai fenomena alam yang menunjukkan adanya keteraturan, ketelitian, dan keseimbangan mutlak ciptaan Allah SWT.
- ✓ Menunjukkan sikap disiplin, tekun, dan rasa ingin tahu yang tinggi dalam mengaplikasikan konsep vektor sebagai bagian dari implementasi perintah Al-Qur'an untuk senantiasa berpikir (*tafakkur*) dan mengkaji alam semesta.

Cakupan Materi

Konsep Dasar Vektor
Notasi & Penulisan Vektor

Representasi Vektor
Operasi Dasar pada Vektor

Sifat Penjumlahan Vektor

Pengantar

Vektor dalam Perspektif Al-Qur'an

Pernahkah kamu merenungkan bagaimana sebuah kapal layar di tengah samudra luas dapat berlayar menuju pelabuhan tujuan dengan memanfaatkan embusan angin yang datang dari arah yang berbeda? Atau bagaimana para navigator menentukan lintasan pesawat terbang agar tidak terhempas oleh gaya seret angin samping di atmosfer? Di alam semesta ini, Allah ﷻ tidak menciptakan fenomena gerak secara acak, melainkan sebagai sistem yang teratur, terukur, dan memiliki arah yang presisi sebagai tanda keagungan-Nya:

لَا
الشَّمْسُ وَالْقَمَرُ بِحُسْبَانٍ

“Matahari dan bulan (beredar) sesuai dengan perhitungan.”
(QS. Ar-Rahman [55]: 5)

Pernyataan bahwa benda-benda langit beredar menurut **“perhitungan”** (*bi husban*) secara fisis mengindikasikan bahwa pergerakannya bukan sekadar perpindahan posisi (skalar), melainkan melibatkan parameter matematis yang ketat: memiliki lintasan yang pasti, kelajuan yang teratur, dan orientasi arah yang tetap. Seluruh parameter gerak ini dalam dunia sains direpresentasikan melalui besaran yang memiliki nilai sekaligus arah.

Di dalam Fisika, besaran yang tidak hanya memiliki nilai (magnitudo) tetapi juga arah yang menentukan karakteristik geometrisnya dipelajari dalam domain **Vektor**. Berbeda dengan besaran skalar seperti massa dan suhu yang cukup dinyatakan dengan angka, besaran vektor seperti perpindahan, kecepatan, percepatan, dan gaya memerlukan penentuan arah yang jelas. Ketika dua atau lebih gaya bekerja pada suatu objek, interaksinya tidak dijumlahkan secara aljabar biasa, melainkan melalui penjumlahan ruang geometri yang disebut analisis resultan vektor.

Al-Qur'an secara visual menggambarkan bagaimana akumulasi arah gaya dan pergerakan ini bekerja nyata pada moda transportasi laut saat menghadapi dinamika alam. Allah ﷻ berfirman:

ج ق
هُوَ الَّذِي يُسِيرُكُمْ فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ حَتَّىٰ إِذَا كُنْتُمْ فِي الْفُلِكِ وَجَرَيْنَ فِيهِمْ يَرِيحٌ طَيِّبَةٌ وَفَرِحُوا بِهَا جَاءَتْهَا رِيحٌ عَاصِفٌ وَجَاءَهُمُ الْمَوْجُ مِنْ كُلِّ مَكَانٍ وَظَنُوا أَنَّهُمْ أُحِيطَ بِهِمْ

“Dialah (Allah) yang menjadikan kamu dapat berjalan di daratan (dan berlayar) di lautan sehingga ketika kamu berada di dalam kapal, lalu meluncurlah (kapal) itu membawa mereka dengan tiupan angin yang baik dan mereka bergembira karenanya. Kemudian, datanglah badai dan gelombang menimpanya dari segenap penjuru dan mereka pun mengira telah terkepung (bahaya)...”
(QS. Yunus [10]: 22)

Gambaran fisis mengenai *badai dan gelombang yang menimpa dari segenap penjuru* adalah analogi yang sempurna mengenai konsep **analisis komponen gaya**. Ketika kapal dihantam oleh berbagai vektor gaya angin dan gelombang dari sudut yang berbeda-beda, kapal tersebut mengalami akumulasi gaya resultan. Untuk mempertahankan keseimbangan, arah dan besar setiap gaya eksternal tersebut harus dihitung secara presisi, sebuah prinsip mekanika yang mendasari struktur keselamatan transportasi modern.

Fenomena alam lain yang secara konstan menunjukkan karakteristik nilai dan arah yang masif adalah pergerakan sirkulasi udara di bumi. Allah ﷻ berfirman:

اللَّهُ الَّذِي يُرْسِلُ الرِّيحَ فَتُثِيرُ سَحَابًا فَيَبْسُطُهُ فِي السَّمَاءِ كَيْفَ يَشَاءُ وَيَجْعَلُهُ كِسْفًا
فَقَرَى الْوَدْقَ يَخْرُجُ مِنْ خِلَالِهِ

“Allahlah yang mengirim angin, lalu ia (angin) menggerakkan awan, kemudian Dia (Allah) membentangkannya di langit menurut yang dikehendaki-Nya dan Dia menjadikannya bergumpal-gumpal, lalu engkau melihat hujan keluar dari celah-celahnya...”

(QS. Ar-Rum [30]: 48)

Embusan angin yang menggerakkan dan membentangkan awan di langit merupakan perwujudan dari medan vektor (*vector field*) di atmosfer. Kecepatan angin memiliki magnitudo yang mendorong massa awan, serta memiliki arah koordinat geografis yang spesifik. Tanpa keteraturan arah vektor angin ini, distribusi uap air dan siklus hidrologi di permukaan bumi tidak akan pernah mencapai keseimbangan fisis yang stabil.

Dalam bab ini, ruang lingkup belajarmu akan mencakup cara merepresentasikan vektor secara grafis maupun matematis, menguraikan vektor ke dalam komponen sumbu- X dan sumbu- Y , serta menguasai metode penjumlahan vektor seperti metode poligon, jajargenjang, hingga metode analitis. Kamu juga akan diajak melatih ketelitian dalam menghitung arah sudut (θ) dan nilai resultan besaran-besaran fisis yang menjadi pondasi penting untuk memahami bab-bab mekanika selanjutnya.

Pada bab ini, kamu akan mempelajari bagaimana memformulasikan penjumlahan dan pengurangan vektor ke dalam operasi matematika yang sistematis, mendalami perkalian titik (*dot product*), perkalian silang (*cross product*), serta menganalisis efektivitas arah gaya pada berbagai fenomena mekanika.

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَاخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ لَآيَاتٍ لِأُولِي الْأَلْبَابِ

“Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi serta pergantian malam dan siang terdapat tanda-tanda (kebesaran Allah) bagi orang yang berakal, (QS. Ali Imran [3]: 190)”

Mempelajari Vektor adalah metode ilmiah bagi kita sebagai *ulul albab* untuk menyingkap struktur geometris dan navigasi alam raya yang mengagumkan. Setiap penggambaran anak panah, penguraian komponen sinus-kosinus, dan perhitungan resultan yang akan kamu bedah di dalam bab ini sejatinya adalah instrumen manusia untuk memahami betapa rigid, seimbang, dan terarahnya **hukum gerak dan interaksi materi** yang telah digariskan oleh Sang Maha Mengatur lagi Maha Mengetahui.

1.1 Konsep Dasar Vektor

Fisika mempelajari berbagai besaran yang digunakan untuk menggambarkan sifat dan fenomena alam. Setiap besaran fisika memiliki nilai yang dapat diukur, tetapi tidak semua besaran memiliki sifat yang sama. Secara umum, besaran fisika dibedakan menjadi dua kategori utama, yaitu besaran skalar dan besaran vektor.

Besaran skalar adalah besaran yang hanya memiliki nilai (besar) tanpa memerlukan informasi arah. Contohnya meliputi massa, waktu, suhu, panjang, energi, dan volume.

Sebaliknya, besaran vektor adalah besaran yang memiliki besar dan arah sekaligus. Contoh yang sering dijumpai dalam fisika adalah perpindahan, kecepatan, percepatan, gaya, medan listrik, dan medan magnet.

Perbedaan kedua jenis besaran ini sangat penting karena cara mengolahnya berbeda. Misalnya, menjumlahkan dua suhu cukup dilakukan dengan operasi bilangan biasa, sedangkan menjumlahkan dua gaya membutuhkan pertimbangan arah. Arah menjadi elemen yang tidak dapat diabaikan.

Untuk dapat menganalisis besaran-besaran berarah, fisika menggunakan suatu alat matematika yang kuat dan fundamental, yaitu vektor.

Secara sederhana, vektor adalah besaran yang memiliki besar dan arah. Dalam banyak persoalan fisika, vektor memudahkan kita menggambarkan dan memecahkan persoalan yang melibatkan arah, baik melalui gambar maupun perhitungan matematis.

1.2 Notasi dan Penulisan Vektor

Vektor dapat ditulis dalam beberapa cara. Dalam buku fisika SMA, ada dua konvensi umum:

1. Huruf dengan tanda panah di atas, misalnya: $\vec{A}$, $\vec{v}$, $\vec{F}$
2. Huruf tebal, misalnya: $\mathbf{A}$, $\mathbf{v}$, $\mathbf{F}$

Dalam penulisan komputer biasanya digunakan huruf tebal, sedangkan dalam buku ini digunakan tanda panah di atas huruf.

Besar vektor (magnitudo) dituliskan sebagai $|\vec{A}|$ atau A tanpa tanda panah.

1.3 Representasi Vektor

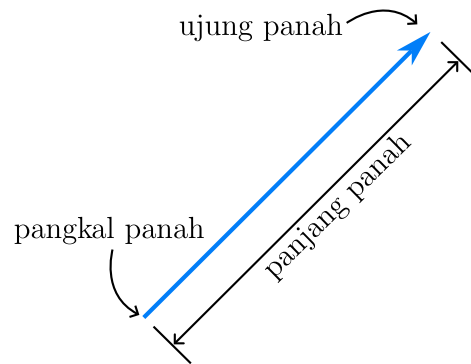
Dalam fisika, vektor dapat dinyatakan dalam berbagai bentuk agar mudah dipahami dan diolah dalam perhitungan. Setiap bentuk representasi memiliki keunggulan masing-masing, bergantung pada konteks analisis yang digunakan. Secara umum, vektor direpresentasikan melalui tiga cara utama: representasi geometris, representasi komponen atau basis, dan representasi matriks.

1.3.1 Representasi Geometri

Secara visual, vektor biasanya direpresentasikan dengan sebuah anak panah:

- Panjang anak panah menunjukkan panjang vektor, dan
- Arah ujung panah menunjukkan arah vektor.

Seperti ditunjukkan pada gambar 1.1 di bawah.



Gambar 1.1: anak panah yang merupakan gambaran sebuah vektor. (Sumber: Herman)

1.3.2 Representasi Komponen atau Basis

Bentuk Komponen (*Component Form*)

Vektor dapat direpresentasikan sebagai sepasang atau tripel bilangan yang menunjukkan proyeksi vektor tersebut pada masing-masing sumbu koordinat.

Dalam sistem Kartesius:

- untuk 2 dimensi, misalnya: $\vec{A} = (A_x, A_y)$ dan
- untuk 3 dimensi, misalnya: $\vec{A} = (A_x, A_y, A_z)$

Komponen-komponen ini menunjukkan seberapa besar vektor tersebut “mengarah” ke masing-masing sumbu x , y , dan z . Representasi ini sangat membantu dalam perhitungan analitis, seperti menghitung magnitudo, menentukan arah, dan melakukan operasi penjumlahan atau pengurangan vektor.

Bentuk Basis (*Basis vector Form*)

Selain dalam bentuk komponen, vektor juga dapat dinyatakan sebagai kombinasi dari vektor-vektor satuan yang mendefinisikan arah sumbu koordinat.

Dalam sistem Kartesius tiga dimensi, vektor satuan standar adalah:

- $\hat{i}$ untuk arah sumbu x positif
- $\hat{j}$ untuk arah sumbu y positif
- $\hat{k}$ untuk arah sumbu z positif

Dengan demikian, suatu vektor dapat dituliskan sebagai: $\vec{A} = A_x\hat{i} + A_y\hat{j} + A_z\hat{k}$.

Representasi basis memudahkan kita memahami bahwa setiap vektor dapat dibangun dari kombinasi arah dasar yang saling tegak lurus.

1.3.3 Representasi Matriks

Dalam matematika modern dan komputasi, vektor sering direpresentasikan sebagai matriks kolom atau matriks baris. Representasi ini sangat efisien dalam perhitungan menggunakan aljabar linear, terutama saat melakukan transformasi koordinat, rotasi, atau perhitungan numerik.

Contoh vektor dalam bentuk matriks kolom:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}$$

atau sebagai matriks baris:

$$\begin{bmatrix} v_x & v_y & v_z \end{bmatrix}$$

Representasi matriks sangat penting dalam bidang seperti:

- fisika moderen,
- mekanika kuantum,
- grafik komputer,
- robotika,
- analisis struktur, dan
- pemodelan 3D

1.3.4 Besar Vektor

Besar vektor atau magnitudo, adalah ukuran kuantitatif dari seberapa “panjang” atau “kuat” suatu vektor. Secara visual, magnitudo ditentukan oleh panjang anak panah yang mewakili vektor tersebut.

Contoh:

- Perpindahan 5 meter ke timur memiliki magnitudo 5 m.
- Gaya 30 newton ke atas memiliki magnitudo 30 N.

Dalam sistem koordinat kartesius, magnitudo vektor dapat dihitung menggunakan teorema Pythagoras. Misalnya untuk vektor dua dimensi $\vec{A} = [A_x \ A_y \ A_z]$ magnitudonya adalah:

$$\|\vec{A}\| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2} \quad (1.1)$$

Penentuan besar vektor dengan teorema Pythagoras dapat kita generalisasi untuk ruang tiga dimensi.

Dalam ruang tiga dimensi, panjang sebuah vektor atau jarak antara dua titik mengikuti Pythagoras 3D:

$$\|\vec{A}\| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \quad (1.2)$$

Persamaan (1.2) ini adalah bentuk umum dari teorema Pythagoras di ruang 3D.

Mengapa disebut Teorema Pythagoras 3D? : Karena bentuknya diperoleh dari penggabungan Pythagoras secara bertahap. (**coba buktikan sendiri ya!**)

Magnitudo selalu bernilai positif atau nol, dan tidak pernah negatif karena merupakan panjang geometris.

1.3.5 Arah Vektor

Selain memiliki besar atau magnitudo, setiap vektor juga memiliki arah, yaitu orientasi tertentu di ruang yang menunjukkan ke mana vektor tersebut bekerja atau menunjuk. Arah merupakan komponen penting yang membedakan vektor dari besaran skalar. Dua besaran fisika dapat memiliki magnitudo yang sama, tetapi memberikan efek fisik yang berbeda apabila arahnya tidak sama. Karena itu, arah dan besar vektor selalu dipertimbangkan secara bersamaan.

Secara konsep, arah vektor dapat dipahami sebagai “petunjuk orientasi” dari titik pangkal ke ujung vektor. Arah ini dapat dinyatakan dengan berbagai cara, tergantung pada kebutuhan analisis dan sistem koordinat yang digunakan.

Berikut adalah beberapa cara umum dan penting untuk menyatakan arah sebuah vektor:

Arah sebagai Sudut terhadap Sumbu Acuan

Dalam banyak situasi, terutama di dua dimensi, arah vektor dinyatakan sebagai sudut terhadap sumbu referensi tertentu. Misalnya dalam sistem koordinat Kartesius, sebuah vektor $\vec{A}$ dengan besar A membentuk sudut θ dimana sudut tersebut diukur dari sumbu x positif ke arah vektor, yang secara umum dinotasikan sebagai berikut:

$$\vec{A} = (A, \theta) \quad (1.3)$$

notasi pada persamaan (1.3) di atas artinya vektor dengan besar A dan sudut θ .

Metode ini banyak digunakan pada:

- Kinematika partikel (arah kecepatan atau perpindahan),
- Soal navigasi (arah kapal, pesawat, dan angin),
- Analisis gaya dua dimensi.

Arah Berdasarkan Komponen Koordinat

Dalam tiga dimensi, arah vektor lebih mudah dipahami melalui komponen-koordinatnya.

Misalnya sebuah vektor:

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix}$$

Nilai komponen-komponen ini menunjukkan orientasi vektor terhadap masing-masing sumbu x , y , dan z , yang mana:

- besar komponen menunjukkan seberapa kuat vektor tersebut “mengarah” ke sumbu itu, dan
- perbandingan komponen menentukan arah keseluruhan vektor.

Metode ini sangat penting dalam:

- Analisis gaya dalam tiga dimensi,
- Medan listrik dan medan magnet,
- Perhitungan gerak peluru tiga dimensi,
- Perhitungan gaya berat pada bidang miring,
- Grafik komputer dan animasi 3D.

Melalui komponen, arah vektor juga dapat dinyatakan menggunakan **sudut arah** (*direction cosines*) yaitu sudut antara vektor dengan masing-masing sumbu koordinat.

Arah dalam Bahasa Natural (Kartesian Kompas)

Dalam konteks sehari-hari, arah sering dinyatakan secara deskriptif menggunakan istilah seperti:

- ke timur
- ke utara
- ke atas
- ke bawah
- ke kiri
- ke kanan, dll.

Pendekatan ini umum digunakan dalam: (soal cerita, navigasi, meteorologi, dll.)

Arah melalui Vektor Satuan

Arah vektor juga dapat ditunjukkan melalui vektor satuan:

$$\hat{v} = \frac{\vec{v}}{v} \quad (1.4)$$

Vektor satuan menyatakan arah secara murni dengan magnitudo 1. Ini sangat penting untuk menganalisis gaya yang bekerja ke beberapa arah, mengekspresikan orientasi gerak, proyeksi vektor pada suatu sumbu atau garis. Mengapa Arah Sangat Penting dalam Fisika? Arah adalah aspek yang menentukan konsekuensi fisik dari suatu besaran berarah. Dua vektor dengan magnitudo sama dapat menghasilkan efek yang sangat berbeda apabila arahnya berubah.

1.3.6 Kesamaan Dua Vektor

Berdasarkan ketergantungannya terhadap posisi di ruang, vektor dapat dibedakan menjadi dua jenis. Pertama, vektor bebas (*free vector*), yaitu vektor yang tidak terikat pada lokasi tertentu sehingga dapat digeser sejajar tanpa mengubah maknanya. Kedua, vektor terikat (*bound vector*), yaitu vektor yang memiliki lokasi atau titik aplikasi tertentu sehingga tidak dapat dipindahkan tanpa mengubah sifat fisiknya. Klasifikasi ini penting untuk membedakan vektor yang hanya ditentukan oleh besar dan arah dari vektor yang maknanya juga bergantung pada tempat ia bekerja atau berlaku.

Kesamaan dua vektor dinyatakan dalam definisi berikut.

Definisi 1.3.1 — Kesamaan Dua Vektor. Untuk vektor bebas, dua vektor **didefinisikan sama** apabila memenuhi kedua syarat berikut:

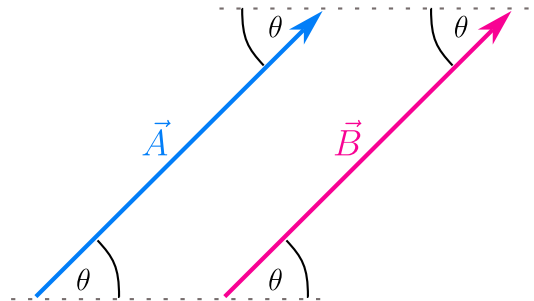
$$\vec{A} = \vec{B} \quad \text{jika dan hanya jika} \quad \begin{cases} |\vec{A}| = |\vec{B}| \\ \text{arah}(\vec{A}) = \text{arah}(\vec{B}) \end{cases} \quad (\text{magnitudonya sama})$$

Atau dalam koordinat:

$$\vec{A} = \vec{B} \iff \begin{cases} A_x = B_x \\ A_y = B_y \\ A_z = B_z \end{cases}$$

Untuk vektor terikat (misalnya vektor posisi), kesamaan tidak hanya ditentukan oleh besar dan arah, tetapi juga oleh titik aplikasinya.

Dengan demikian, dua vektor yang digambar di lokasi berbeda tetap merupakan vektor yang sama selama magnitudo dan arahnya sama hanya untuk vektor bebas. Contoh: dua panah dengan panjang sama dan arah yang sama, meskipun titik pangkalnya berbeda, seperti ditunjukkan pada gambar 1.2 di bawah.



Gambar 1.2: kesamaan dua vektor. (Sumber: Herman)

1.4 Operasi dasar pada vektor

Dalam fisika, operasi pada vektor penting untuk menganalisis gerak, gaya, medan listrik, dan konsep-konsep lainnya. Empat operasi dasar yang perlu dipahami adalah penjumlahan, pengurangan, sifat-sifat aljabar vektor, serta perkalian dengan skalar.

1.4.1 Penjumlahan Vektor

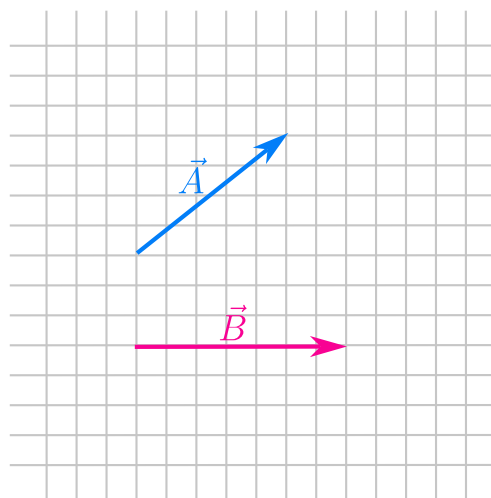
Penjumlahan vektor dapat dilakukan dengan dua cara:

- Metode geometris
- Metode aljabar (komponen)

A. Penjumlahan Vektor secara Geometris

1. Metode Ujung-Pangkal (*head to tail*)

Jika diberikan dua buah vektor $\vec{A}$ dan $\vec{B}$ seperti gambar di bawah,

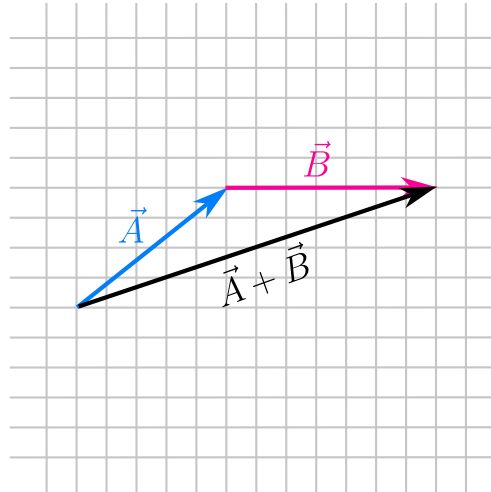


Gambar 1.3: dua buah vektor yang akan dijumlahkan. (Sumber: Herman)

maka untuk menentukan hasil penjumlahan ($\vec{A} + \vec{B}$) maka ikuti langkah-langkah berikut:

- Gambarkan vektor pertama ($\vec{A}$)
- Letakkan pangkal (ekor) vektor kedua ($\vec{B}$) tepat di ujung vektor pertama.
- Vektor hasil ($\vec{A} + \vec{B}$) adalah garis dari pangkal vektor pertama ke ujung vektor terakhir (vektor kedua).

Berdasarkan langkah-langkah di atas, diperoleh hasil penjumlahan seperti gambar di bawah.



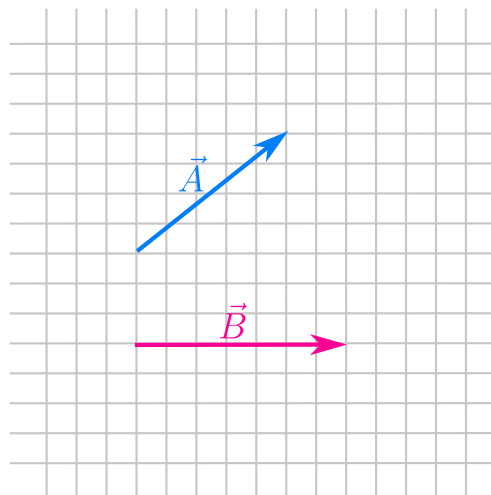
Gambar 1.4: hasil jumlah dua buah vektor. (Sumber: Herman)

Metode Ujung-ke-Ekor ini memiliki kelebihan dan kelemahan sebagai berikut:

- **Kelebihan:** intuitif untuk menggambarkan resultan gaya atau perpindahan.
- **Kelemahan:** kurang presisi jika tanpa skala yang jelas.

2. Metode Jajar Genjang

Jika diberikan dua buah vektor $\vec{A}$ dan $\vec{B}$ seperti gambar di bawah,

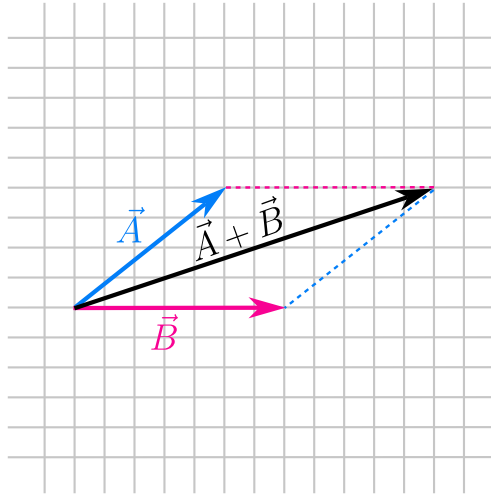


Gambar 1.5: dua buah vektor yang akan dijumlahkan. (Sumber: Herman)

maka untuk menentukan hasil penjumlahan ($\vec{A} + \vec{B}$) maka ikuti langkah-langkah berikut:

- Letakkan kedua vektor pada titik pangkal yang sama.
- Buat jajar genjang dengan kedua vektor sebagai sisi-sisinya.
- Diagonal jajar genjang adalah vektor hasil penjumlahan.

Berdasarkan langkah-langkah di atas, diperoleh hasil penjumlahan seperti gambar di bawah.



Gambar 1.6: dua buah vektor yang akan dijumlahkan. (Sumber: Herman)

Metode jajar genjang ini cocok untuk dua vektor, dan untuk memvisualisasikan sifat komutatif.

B. Penjumlahan Vektor secara Aljabari

Jika vektor dinyatakan sebagai komponen:

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix}$$

dan

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}$$

Maka penjumlahan $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$ dilakukan komponen demi komponen:

$$\vec{R} = \begin{bmatrix} A_x + B_x \\ A_y + B_y \\ A_z + B_z \end{bmatrix}$$

Catatan: Dalam buku ini kita akan sering merepresentasikan vektor dalam bentuk vektor kolom dengan alasan karena tampilannya lebih mudah ketika melakukan perhitungan.

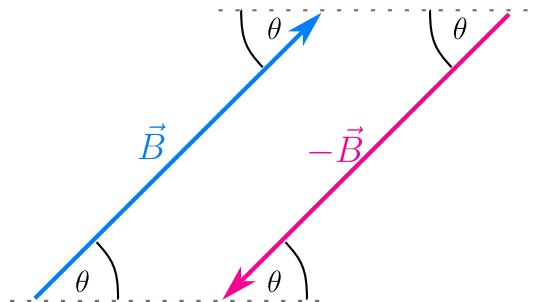
Keuntungan metode komponen: Sangat presisi, mudah diprogram atau dihitung secara sistematis, wajib dipakai untuk fisika tingkat lanjut.

1.4.2 Pengurangan Vektor

Pengurangan vektor, semisal $\vec{A} - \vec{B}$ secara konsep adalah menjumlahkan $\vec{A}$ dengan kebalikan arah dari $\vec{B}$ yaitu $(-\vec{B})$

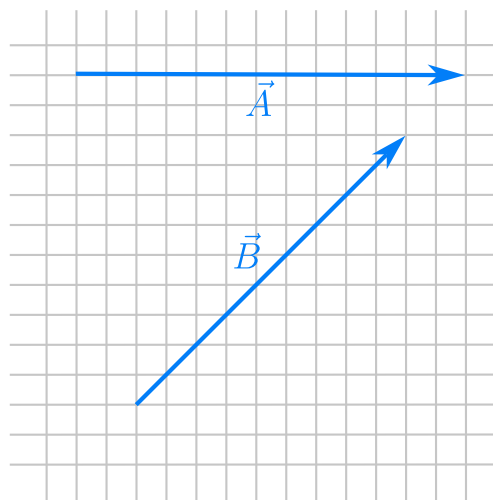
$$\vec{A} - \vec{B} = \vec{A} + (-\vec{B})$$

$\vec{B}$ dan $-\vec{B}$ adalah dua buah vektor yang saling berkebalikan arah dan besarnya sama, seperti ditunjukkan pada gambar di bawah.



Gambar 1.7: dua buah vektor yang besar sama dengan arah berkebalikan. (Sumber: Herman)

Misalkan vektor $\vec{A}$ dan $\vec{B}$ diberikan seperti pada gambar di bawah.

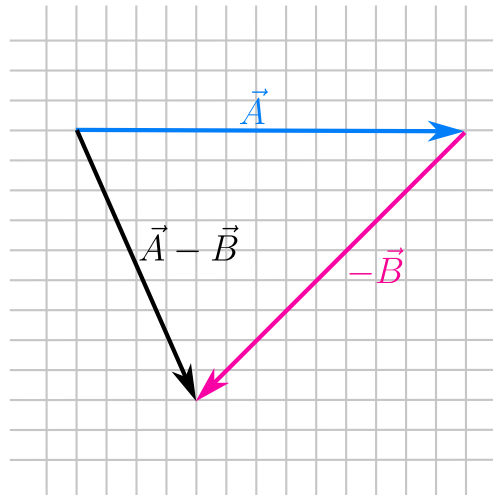


Gambar 1.8: dua buah vektor yang akan dilakukan operasi pengurangan. (Sumber: Herman)

Untuk menghitung $\vec{A} - \vec{B}$ secara geometris, langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

- Buat vektor $-\vec{B}$, yaitu vektor yang memiliki besar sama dengan $\vec{B}$ tetapi arahnya berlawanan.
- Tempatkan $-\vec{B}$ sedemikian sehingga pangkalnya berada di ujung vektor $\vec{A}$.
- Gambarkan hasil penjumlahan dengan menghubungkan pangkal $\vec{A}$ ke ujung $-\vec{B}$.

Dengan cara ini, hasil operasi $\vec{A} - \vec{B}$ dapat ditunjukkan secara geometris seperti pada gambar di bawah.



Gambar 1.9: hasil pengurangan dua buah vektor. (Sumber: Herman)

Berdasarkan gambar, secara komponen yang dinyatakan dalam bentuk vektor kolom dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\vec{A} - \vec{B} = \begin{bmatrix} 13 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 9 \\ 9 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13 - 9 \\ 0 - 9 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ -9 \\ 0 \end{bmatrix}$$

hasil ini juga bisa kita nyatakan dalam bentuk vektor basis sebagai berikut:

$$\vec{A} - \vec{B} = 4\hat{i} - 9\hat{j} + 0\hat{k}$$

Interpretasi fisika: Digunakan untuk mencari perubahan posisi (perpindahan relatif), dan juga sering digunakan untuk mencari gaya netto bila satu gaya melawan gaya lainnya.

1.5 Sifat Penjumlahan Vektor

Operasi penjumlahan vektor mengikuti hukum-hukum dasar aljabar berikut.

Sifat Komutatif

Sifat komutatif pada penjumlahan vektor menyatakan bahwa hasil penjumlahan dua vektor tidak bergantung pada urutan penjumlahannya. Artinya, menambahkan vektor $\vec{A}$ ke vektor $\vec{B}$ akan menghasilkan vektor resultan yang sama dengan menambahkan $\vec{B}$ ke $\vec{A}$.

Sifat 1.5.1 Komutatif: $\vec{A} + \vec{B} = \vec{B} + \vec{A}$.

Secara visual, hal ini dapat dijelaskan dengan metode ujung-pangkal (head to tail). Sifat komutatif menegaskan bahwa penjumlahan vektor bersifat fleksibel dalam urutan, selama besar dan arah masing-masing vektor tetap.

1.5.1 Sifat Asosiatif

Sifat asosiatif pada penjumlahan vektor menyatakan bahwa hasil penjumlahan beberapa vektor tidak dipengaruhi oleh cara pengelompokannya. Artinya, ketika tiga atau lebih vektor dijumlahkan, kita bebas menentukan vektor mana yang dijumlahkan terlebih dahulu tanpa mengubah vektor resultan yang diperoleh.

Secara geometris, sifat ini dapat dijelaskan dengan metode ujung–pangkal. Misalnya, vektor $\vec{A}$, $\vec{B}$ dan $\vec{C}$ disusun secara berurutan. Jika terlebih dahulu dijumlahkan $\vec{A}$ dan $\vec{B}$ sehingga diperoleh resultan sementara, kemudian resultan tersebut dijumlahkan dengan $\vec{C}$, hasil akhirnya akan sama dengan jika $\vec{B}$ dan $\vec{C}$ dijumlahkan terlebih dahulu, lalu hasilnya dijumlahkan dengan $\vec{A}$. Pada kedua cara tersebut, vektor resultan tetap memiliki besar dan arah yang sama.

Dengan demikian, sifat asosiatif menunjukkan bahwa dalam penjumlahan vektor, urutan pengelompokan tidak memengaruhi hasil, selama vektor-vektornya disusun secara konsisten. Secara matematis, sifat ini dinyatakan sebagai:

Sifat 1.5.2 Asosiatif: $(\vec{A} + \vec{B}) + \vec{C} = \vec{A} + (\vec{B} + \vec{C})$.



2. Kinematika Gerak

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, murid mampu:

- ✓ Menjelaskan pengertian parameter gerak (posisi, jarak, perpindahan, kecepatan, kelajuan, percepatan) serta menunjukkan sikap teliti dan rasa ingin tahu sebagai implementasi perintah Al-Qur'an untuk melakukan *tafakkur* terhadap alam semesta.
- ✓ Mengidentifikasi karakteristik serta menganalisis grafik (posisi-waktu dan kecepatan-waktu) pada Gerak Lurus Beraturan (GLB) dan Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB) sebagai wujud pengamatan terhadap keteraturan hukum alam ciptaan Allah SWT.
- ✓ Menganalisis gerak parabola dengan menguraikan komponen horizontal dan vertikal secara tepat, teliti, serta bertanggung jawab dalam menyelesaikan berbagai permasalahan sains terkait.
- ✓ Mendeskripsikan besaran-besaran pada gerak melingkar beraturan (sudut tempuh, kecepatan sudut, kecepatan linear, dan percepatan sentripetal) untuk menggambarkan pola gerak melingkar secara sistematis dan logis.
- ✓ Menerapkan persamaan-persamaan gerak (GLB, GLBB, gerak parabola, dan gerak melingkar beraturan) dalam memecahkan masalah fisika kontekstual secara jujur, disiplin, penuh tanggung jawab, dan tekun.

Cakupan Materi

Pengertian Gerak
Besaran-besaran Gerak
Gerak Lurus
Gerak Lengkung

Pengantar

Kinematika Gerak dalam Perspektif Al-Qur'an

Pernahkah kamu merenungkan bagaimana bayangan tiang di halaman rumahmu berubah panjang dan posisinya dari pagi hingga sore hari? Atau bagaimana awan yang tampak tenang di langit sebenarnya bergerak berpindah tempat melintasi pulau demi pulau? Allah ﷻ senantiasa mengajak kita untuk memperhatikan gerak objek-objek di sekitar kita sebagai tanda awal untuk membaca keteraturan ciptaan-Nya:

وَهُوَ الَّذِي خَلَقَ اللَّيْلَ وَالنَّهَارَ وَالشَّمْسَ وَالْقَمَرَ كُلٌّ فِي فَلَكٍ يَسْبَحُونَ

“Dan Dialah yang telah menciptakan malam dan siang, matahari dan bulan.
Masing-masing beredar pada garis edarnya.”
(QS. Al-Anbiya [21]: 33)

Kata “beredar” (yasbahun) dan “garis edar” (falak) dalam ayat ini menunjukkan sebuah penegasan fisis yang luar biasa. Allah ﷻ tidak hanya mengabarkan bahwa alam semesta ini aktif bergerak, melainkan bergerak dengan keteraturan geometri yang geometris dan memiliki rute yang pasti. Objek-objek tersebut berpindah tempat tanpa pernah saling bertubrukan, seolah-olah berjalan di atas rel-rel tak kasat mata yang telah diukur dengan tingkat ketelitian yang sangat tinggi.

Di dalam Fisika, cabang mekanika yang mempelajari deskripsi matematika dari gerak suatu benda tanpa memedulikan apa yang menyebabkan benda tersebut bergerak dinamakan **kinematika**. Melalui kinematika, kita belajar bagaimana cara mengukur, menggambarkan, dan memetakan gerak objek melalui parameter dasar seperti posisi, jarak, perpindahan, kelajuan, kecepatan, hingga percepatan. Kinematika menjawab pertanyaan tentang “*bagaimana*” suatu benda bergerak di dalam ruang dan waktu.

Al-Qur'an menggunakan fenomena gerak periodik benda langit untuk membimbing akal manusia agar mengenali konsep lintasan dan perubahan bentuk gerak tersebut terhadap waktu. Allah ﷻ berfirman:

وَالْقَمَرَ قَدَرَهُ مَنَازِلَ حَتَّىٰ عَادَ كَالْعُرْجُونِ الْقَدِيمِ

“Dan telah Kami tetapkan tempat-tempat peredaran bagi bulan, sehingga (setelah ia sampai ke tempat peredaran yang terakhir) kembalilah ia seperti bentuk tandan yang tua.”
(QS. Yasin [36]: 39)

Frasa “*tempat-tempat peredaran*” (manazil) mengindikasikan adanya urutan perubahan **posisi** dan titik koordinat yang ditempuh oleh suatu objek secara kontinu terhadap fungsi **waktu**. Ketika kita mengamati gerak bulan dari malam ke malam, kita sedang menyaksikan kajian nyata dari kinematika gerak melingkar, di mana posisi benda yang berubah relatif terhadap pengamat di Bumi menghasilkan fase-fase bulan yang teratur.

Setiap gerak di alam ini diatur dalam sebuah takaran dan batasan numerik yang mutlak. Tidak ada gerak yang terjadi secara kebetulan atau acak tanpa hitungan matematis. Hal ini disinggung oleh Allah ﷻ di dalam ayat-Nya:

الَّذِي لَهُ مُلْكُ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَلَمْ يَتَّخِذْ وَلَدًا وَلَمْ يَكُنْ لَهُ شَرِيكٌ فِي الْمُلْكِ
وَخَلَقَ كُلَّ شَيْءٍ فَقَدَرَهُ تَقْدِيرًا

“Yang memiliki kerajaan langit dan bumi, tidak mempunyai anak, tidak ada sekutu bagi-Nya dalam kekuasaan(-Nya), dan Dia menciptakan segala sesuatu, lalu menetapkan ukuran-ukurannya dengan tepat.”
(QS. Al-Furqan [25]: 2)

Kata “*menetapkan ukuran-ukurannya dengan tepat*” adalah fondasi bagi sains modern. Batasan ukuran inilah yang diterjemahkan oleh para fisikawan menjadi rumus-rumus kinematika, seperti Gerak Lurus Beraturan (GLB) dengan kecepatannya yang konstan, maupun Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB) yang melibatkan percepatan tetap.

Selain mempelajari gerak lurus pada lintasan horizontal dan vertikal (seperti gerak jatuh bebas), ruang lingkup kinematika gerak juga akan meluas pada analisis dua dimensi, seperti **gerak parabola** pada lintasan proyektil, hingga **gerak melingkar** yang merepresentasikan sistem roda-roda gigi pada mesin serta orbit makrokosmos planet-planet di tata surya kita.

Pada bab ini, kamu akan mempelajari bagaimana memformulasikan parameter-parameter gerak tersebut ke dalam persamaan matematika, menganalisis grafik hubungan antara posisi, kecepatan, dan waktu, serta memahami sifat-sifat fisis dari berbagai macam jenis lintasan gerak objek.

لَا

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَاخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ لَآيَاتٍ لِأُولِي الْأَلْبَابِ

“Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi serta pergantian malam dan siang terdapat tanda-tanda (kebesaran Allah) bagi orang yang berakal,
(QS. Ali Imran [3]: 190)

Mempelajari kinematika gerak adalah langkah awal bagi kita sebagai *ulul albab* untuk menyingkap rahasia ketepatan waktu dan keteraturan posisi yang ada di alam semesta. Setiap besaran, simbol, dan grafik yang akan kamu bedah di dalam bab ini sejatinya adalah metode ilmiah manusia untuk meraba dan mengagumi betapa rapinya **skenario gerak ciptaan Allah** yang terbentang luas di jagat raya.

2.1 Pengertian Gerak

Dalam fisika, gerak bukanlah konsep yang bersifat mutlak. Gerak merupakan fenomena yang sangat bergantung pada sudut pandang pengamat. Suatu benda dikatakan bergerak apabila posisinya berubah terhadap suatu titik acuan dalam selang waktu tertentu. Dengan kata lain, gerak selalu melibatkan tiga unsur penting, yaitu benda yang diamati, titik acuan, dan waktu.

2.1.1 Kerangka Acuan dan Posisi

Sebuah benda dikatakan bergerak jika posisinya berubah terhadap suatu acuan tertentu. Dalam fisika, acuan yang digunakan untuk menentukan dan mendeskripsikan posisi suatu benda disebut **kerangka acuan** (*reference frame*). Tanpa kerangka acuan, kita tidak dapat menyatakan secara pasti apakah suatu benda diam atau bergerak.

- **Kerangka Acuan:** Merupakan sistem koordinat yang digunakan untuk menentukan posisi dan mendeskripsikan gerak suatu benda. Kerangka acuan menyediakan titik asal, arah sumbu koordinat, serta acuan waktu sehingga posisi benda dapat dinyatakan secara kuantitatif.

Sebagai contoh, seseorang yang duduk di dalam kereta yang sedang melaju tampak diam jika diamati oleh penumpang lain di dalam kereta (kerangka acuan kereta). Namun, jika diamati oleh seseorang yang berdiri di peron stasiun (kerangka acuan bumi), orang tersebut bergerak bersama kereta. Contoh ini menunjukkan bahwa keadaan diam atau bergerak bergantung pada kerangka acuan yang digunakan.

- **Posisi:** Posisi menyatakan letak suatu benda terhadap titik asal dalam suatu kerangka acuan. Dalam fisika, posisi dinyatakan dengan vektor posisi $\vec{r}$ yang menunjukkan lokasi benda pada suatu saat tertentu. Pada sistem koordinat Kartesius dua dimensi, vektor posisi dituliskan sebagai

$$\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j} \quad (2.1)$$

dengan x dan y menyatakan koordinat benda pada sumbu- x dan sumbu- y , sedangkan $\hat{i}$ dan $\hat{j}$ adalah vektor satuan pada masing-masing sumbu.

2.1.2 Gerak sebagai Perubahan Posisi

Gerak pada dasarnya adalah perubahan posisi suatu benda terhadap kerangka acuan tertentu seiring berjalannya waktu. Jika posisi awal benda pada waktu t_1 adalah $\vec{r}_1$ dan posisi akhirnya pada waktu t_2 adalah $\vec{r}_2$, maka benda tersebut telah mengalami gerak.

Perubahan posisi tersebut dapat dideskripsikan menggunakan beberapa besaran fisika, seperti jarak, perpindahan, kelajuan, dan kecepatan. Masing-masing besaran memberikan informasi yang berbeda mengenai gerak benda. Oleh karena itu, pemahaman yang baik mengenai besaran-besaran gerak sangat penting dalam analisis kinematika.

2.2 Besaran-Besaran Gerak

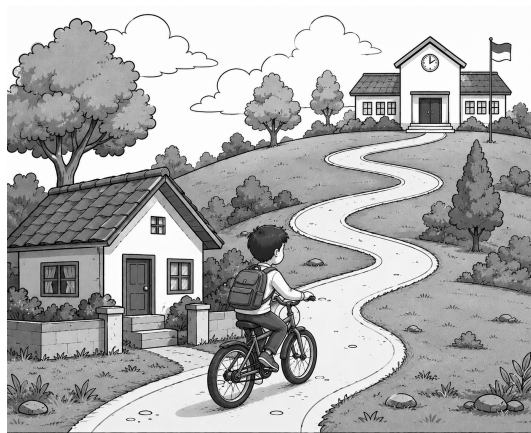
Untuk mendeskripsikan gerak secara kuantitatif, fisika menggunakan sejumlah besaran yang dapat diukur dan dianalisis secara matematis. Besaran-besaran ini memungkinkan kita menjawab berbagai pertanyaan, seperti seberapa jauh suatu benda bergerak, seberapa cepat geraknya, serta bagaimana perubahan geraknya dari waktu ke waktu. Pada bagian ini akan dibahas beberapa besaran dasar yang digunakan dalam kajian gerak, yaitu jarak, perpindahan, kelajuan, kecepatan, gerak relatif, kecepatan rata-rata, dan percepatan rata-rata.

2.2.1 Jarak dan Perpindahan

Untuk mendeskripsikan perubahan posisi suatu benda, fisika menggunakan dua besaran yang berbeda, yaitu **jarak** dan **perpindahan**. Meskipun keduanya berkaitan dengan gerak benda, keduanya memiliki makna fisika yang berbeda.

- **Jarak (s)**

Jarak adalah panjang total lintasan yang ditempuh oleh benda selama bergerak. Berbeda dengan perpindahan, jarak merupakan besaran skalar sehingga hanya memiliki nilai tanpa arah. Nilai jarak selalu positif atau nol dan bergantung pada bentuk lintasan yang dilalui benda.



Gambar 2.1: jarak adalah panjang total lintasan. (Sumber: Herman)

- **Perpindahan ($\Delta \vec{r}$)**

Perpindahan adalah perubahan posisi suatu benda dari posisi awal ke posisi akhir. Perpindahan merupakan besaran vektor sehingga memiliki besar dan arah. Secara matematis, perpindahan dinyatakan sebagai

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 \quad (2.2)$$

Vektor perpindahan selalu mengarah dari posisi awal menuju posisi akhir tanpa memperhatikan lintasan yang ditempuh benda.

Perbedaan karakteristik antara jarak dan perpindahan dapat diringkas pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1: Perbedaan Jarak dan Perpindahan

Aspek	Jarak	Perpindahan
Jenis besaran	Skalar	Vektor
Memiliki arah	✗	✓
Bergantung pada lintasan	✓	✗
Ditentukan oleh posisi awal dan akhir	✗	✓
Dapat bernilai nol meskipun benda bergerak	✗	✓
Satuan SI	meter (m)	meter (m)

Catatan Penting: Besar perpindahan tidak pernah melebihi jarak yang ditempuh. Secara matematis dapat dituliskan

$$|\Delta \vec{r}| \leq s \quad (2.3)$$

Tanda sama dengan berlaku apabila benda bergerak sepanjang lintasan lurus tanpa berubah arah.

2.2.2 Kelajuan dan Kecepatan

Selain mengetahui seberapa jauh suatu benda bergerak, kita juga perlu mengetahui seberapa cepat gerak tersebut terjadi. Dalam fisika, terdapat dua besaran yang digunakan untuk mendeskripsikan hal ini, yaitu kelajuan dan kecepatan.

- **Kelajuan (*Speed*)**

Kelajuan adalah jarak yang ditempuh benda setiap satuan waktu. Kelajuan merupakan besaran skalar sehingga hanya memiliki besar tanpa arah.

Secara matematis,

$$v = \frac{s}{\Delta t} \quad (2.4)$$

dengan s menyatakan jarak yang ditempuh dan Δt menyatakan selang waktu.

- **Kecepatan (*Velocity*)**

Kecepatan adalah perpindahan yang dialami benda setiap satuan waktu. Kecepatan merupakan besaran vektor sehingga memiliki besar dan arah.

Secara matematis,

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad (2.5)$$

Karena merupakan besaran vektor, dua benda dapat memiliki kelajuan yang sama tetapi kecepatan yang berbeda apabila arah geraknya berbeda.

Catatan Penting: Dalam percakapan sehari-hari, istilah “kecepatan” sering digunakan untuk menyatakan “kelajuan”. Namun dalam fisika, kedua istilah tersebut memiliki makna yang berbeda.

2.2.3 Gerak Relatif

Gerak bersifat relatif, artinya keadaan diam atau Bergeraknya suatu benda bergantung pada kerangka acuan yang digunakan oleh pengamat.

Sebagai contoh, seorang penumpang yang duduk di dalam kereta tampak diam terhadap kursi kereta. Namun terhadap seseorang yang berdiri di stasiun, penumpang tersebut bergerak bersama kereta.

Konsep ini menunjukkan bahwa tidak ada gerak yang bersifat mutlak. Posisi, perpindahan, dan kecepatan suatu benda hanya dapat dinyatakan setelah kerangka acuannya ditentukan.

Jika sebuah benda bergerak dengan kecepatan $\vec{v}_{AB}$ menurut pengamat B, sedangkan pengamat B bergerak dengan kecepatan $\vec{v}_{BC}$ menurut pengamat C, maka kecepatan benda menurut pengamat C diberikan oleh

$$\vec{v}_{AC} = \vec{v}_{AB} + \vec{v}_{BC} \quad (2.6)$$

Persamaan ini dikenal sebagai prinsip penjumlahan kecepatan dalam relativitas Galileo.

2.2.4 Kecepatan Rata-rata

Dalam banyak situasi, kecepatan benda tidak selalu konstan. Oleh karena itu, sering digunakan besaran kecepatan rata-rata untuk menggambarkan gerak secara keseluruhan selama suatu interval waktu.

Kecepatan rata-rata didefinisikan sebagai perpindahan total yang dialami benda dibagi selang waktu total yang diperlukan.

$$\vec{v}_{\text{rata-rata}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad (2.7)$$

dengan

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (2.8)$$

Karena didasarkan pada perpindahan, kecepatan rata-rata merupakan besaran vektor yang memiliki besar dan arah.

Catatan Penting: Kecepatan rata-rata tidak selalu sama dengan rata-rata aritmetika dari beberapa nilai kecepatan yang dimiliki benda selama bergerak.

2.2.5 Kecepatan Sesaat

Kecepatan rata-rata memberikan gambaran umum mengenai gerak benda selama suatu selang waktu tertentu. Namun, dalam banyak situasi, kita sering ingin mengetahui kecepatan

benda pada suatu saat tertentu, bukan selama suatu interval waktu.

Sebagai contoh, ketika melihat speedometer mobil, angka yang ditampilkan bukanlah kecepatan rata-rata sejak mobil mulai bergerak, melainkan kecepatan mobil pada saat itu juga. Besaran inilah yang disebut **kecepatan sesaat**.

Secara konseptual, kecepatan sesaat diperoleh dengan memperkecil selang waktu pengamatan hingga mendekati nol. Dengan kata lain, kecepatan sesaat merupakan limit dari kecepatan rata-rata ketika interval waktunya semakin kecil.

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad (2.9)$$

Dalam kalkulus, limit tersebut dikenal sebagai turunan posisi terhadap waktu, sehingga kecepatan sesaat dapat dituliskan sebagai

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (2.10)$$

Karena kecepatan sesaat merupakan besaran vektor, maka kecepatan memiliki besar dan arah. Besar dari vektor kecepatan sesaat disebut **kelajuan sesaat**.

Catatan Penting: Pada gerak lurus beraturan (GLB), kecepatan rata-rata dan kecepatan sesaat memiliki nilai yang sama karena kecepatan benda konstan. Namun pada gerak yang kecepataannya berubah, kedua besaran tersebut umumnya memiliki nilai yang berbeda.

2.2.6 Percepatan Rata-rata

Selain perubahan posisi, gerak juga dapat ditinjau dari perubahan kecepatan. Besaran yang digunakan untuk menyatakan perubahan kecepatan terhadap waktu disebut percepatan.

Percepatan rata-rata didefinisikan sebagai perubahan kecepatan yang terjadi selama selang waktu tertentu.

Jika kecepatan benda berubah dari $\vec{v}_1$ pada waktu t_1 menjadi $\vec{v}_2$ pada waktu t_2 , maka percepatan rata-rata dinyatakan sebagai

$$\vec{a}_{\text{rata-rata}} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1} \quad (2.11)$$

Percepatan merupakan besaran vektor sehingga memiliki besar dan arah.

Nilai percepatan yang positif menunjukkan bahwa kecepatan benda bertambah terhadap arah acuan yang dipilih, sedangkan percepatan negatif menunjukkan bahwa kecepatan benda berkurang terhadap arah tersebut.

2.2.7 Percepatan Sesaat

Pada pembahasan sebelumnya, percepatan rata-rata digunakan untuk menggambarkan perubahan kecepatan selama suatu interval waktu tertentu. Namun, perubahan kecepatan suatu benda sering kali berlangsung secara terus-menerus sehingga nilai percepatannya dapat berbeda dari satu saat ke saat lainnya. Oleh karena itu, diperlukan besaran yang dapat

menyatakan laju perubahan kecepatan pada suatu saat tertentu, yang disebut **percepatan sesaat**.

Secara matematis, percepatan sesaat diperoleh dengan mengambil limit percepatan rata-rata ketika selang waktu pengamatan diperkecil hingga mendekati nol.

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (2.12)$$

Dalam kalkulus, bentuk limit tersebut dinyatakan sebagai turunan kecepatan terhadap waktu, sehingga percepatan sesaat dapat dituliskan sebagai

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (2.13)$$

Karena kecepatan merupakan turunan pertama posisi terhadap waktu, maka percepatan dapat pula dinyatakan sebagai turunan kedua posisi terhadap waktu,

$$\vec{a} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \quad (2.14)$$

Arah percepatan menunjukkan bagaimana vektor kecepatan berubah terhadap waktu. Apabila percepatan searah dengan kecepatan, kelajuan benda bertambah. Sebaliknya, apabila percepatan berlawanan arah dengan kecepatan, kelajuan benda berkurang.

Catatan Penting: Percepatan tidak selalu berkaitan dengan perubahan besar kecepatan. Sebuah benda juga dapat mengalami percepatan ketika arah gerakannya berubah, meskipun kelajuannya tetap. Fenomena ini terjadi, misalnya, pada gerak melingkar beraturan. Dalam kasus tersebut, percepatan selalu mengarah menuju pusat lintasan.

2.3 Gerak Lurus

Benda-benda di sekitar kita dapat bergerak dengan berbagai pola lintasan. Sebuah bola yang ditendang dapat bergerak membentuk lintasan melengkung, satelit mengelilingi Bumi pada lintasan yang hampir melingkar, sedangkan kereta api yang melaju pada rel lurus bergerak sepanjang lintasan yang relatif lurus. Jejak atau kumpulan titik-titik yang dilalui oleh suatu benda selama bergerak disebut **lintasan**.

Berdasarkan bentuk lintasannya, gerak dapat dibedakan menjadi beberapa jenis, antara lain gerak lurus, gerak parabola, dan gerak melingkar. Pada bagian ini, pembahasan akan difokuskan pada gerak lurus, yaitu gerak suatu benda yang lintasannya berupa garis lurus.

Contoh gerak lurus dapat dijumpai dalam kehidupan sehari-hari, seperti kereta yang bergerak pada rel lurus, seorang pelari yang berlari di lintasan lurus, atau sebuah benda yang jatuh vertikal menuju permukaan Bumi. Meskipun lintasannya sama-sama lurus, karakteristik gerakannya belum tentu sama. Ada benda yang bergerak dengan kecepatan tetap, ada pula yang mengalami perubahan kecepatan selama bergerak.

Sebuah kereta api yang meninggalkan stasiun mula-mula bergerak dengan kecepatan yang terus bertambah hingga mencapai kecepatan tertentu. Setelah itu, kereta dapat bergerak pada lintasan lurus dengan kecepatan yang hampir tetap. Kedua kondisi tersebut menunjukkan bahwa meskipun lintasan geraknya sama-sama lurus, karakteristik geraknya dapat berbeda. Pada keadaan pertama, kecepatan kereta berubah terhadap waktu sehingga kereta mengalami percepatan. Pada keadaan kedua, kecepatan kereta tetap sehingga tidak terjadi percepatan.

Perbedaan karakteristik tersebut melahirkan dua model dasar gerak lurus yang menjadi landasan dalam kajian kinematika, yaitu **Gerak Lurus Beraturan (GLB)** dan **Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB)**. GLB menggambarkan gerak pada lintasan lurus dengan kecepatan tetap, sedangkan GLBB menggambarkan gerak pada lintasan lurus dengan percepatan tetap. Kedua jenis gerak ini akan menjadi dasar untuk memahami berbagai fenomena gerak yang lebih kompleks.

2.3.1 Gerak Lurus dengan kecepatan Konstan

Pernahkah Anda memperhatikan kendaraan yang melaju pada jalan lurus dengan kecepatan tetap? Pada kondisi tersebut, kendaraan menempuh perpindahan yang sama dalam selang waktu yang sama. Sebagai contoh, sebuah mobil yang bergerak dengan kecepatan tetap 60 km/jam akan berpindah sejauh 60 km setiap satu jam. Gerak seperti ini disebut Gerak Lurus Beraturan (GLB).

Definisi 2.3.1 — Gerak Lurus Beraturan (GLB). Gerak Lurus Beraturan adalah gerak suatu benda pada lintasan lurus dengan kecepatan tetap.

Karena kecepatan benda tidak berubah terhadap waktu, maka percepatannya bernilai nol.

$$a = 0 \quad (2.15)$$

Pada GLB, kecepatan rata-rata selalu sama dengan kecepatan sesaat sehingga berlaku hubungan

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.16)$$

Jika benda bergerak dengan kecepatan tetap v selama selang waktu t , maka perpindahan yang ditempuh adalah

$$\Delta x = vt \quad (2.17)$$

Apabila posisi awal benda adalah x_0 , maka posisi benda pada waktu t dapat dinyatakan sebagai

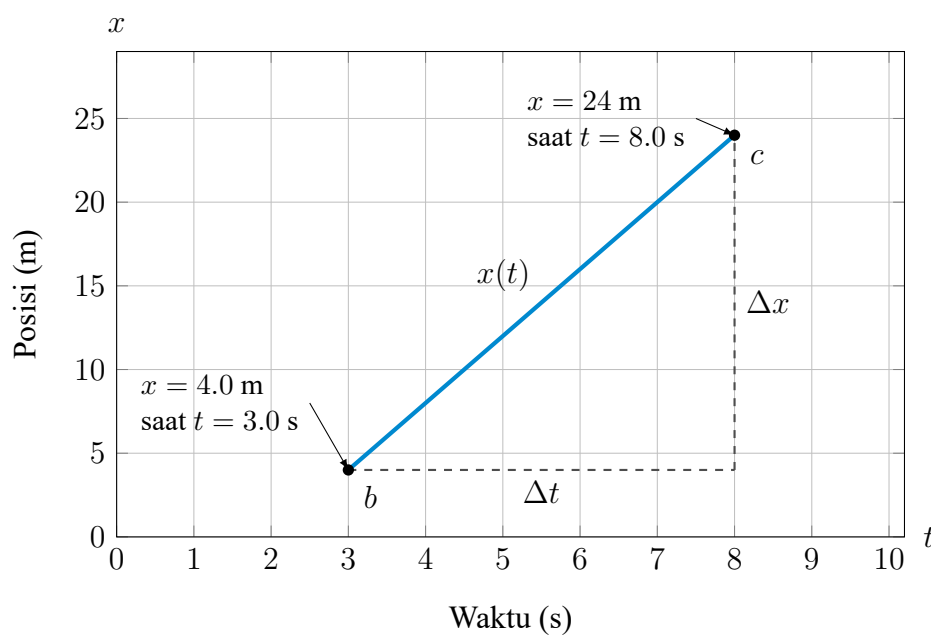
$$x = x_0 + vt \quad (2.18)$$

Persamaan tersebut dikenal sebagai **persamaan posisi pada Gerak Lurus Beraturan**.

Representasi Grafik GLB

Gerak Lurus Beraturan dapat direpresentasikan melalui grafik posisi terhadap waktu ($x-t$) dan grafik kecepatan terhadap waktu ($v-t$).

1. Grafik Posisi terhadap Waktu ($x-t$)

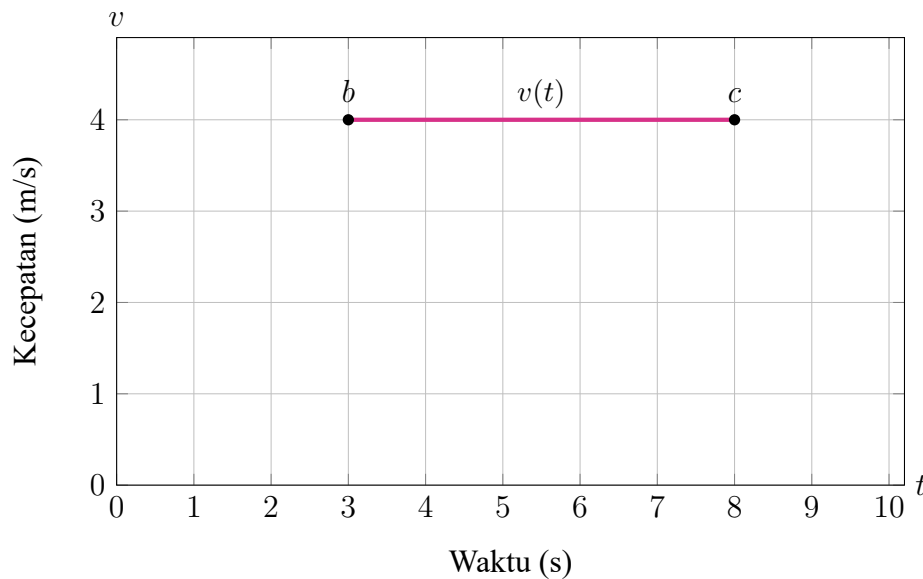


Grafik posisi terhadap waktu berbentuk garis lurus. Kemiringan (gradien) grafik menunjukkan besar kecepatan benda.

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.19)$$

Semakin besar gradien grafik, semakin besar pula kecepatan benda.

2. Grafik Kecepatan terhadap Waktu ($v - t$)



Karena kecepatan bernilai tetap, grafik $v - t$ berbentuk garis horizontal yang sejajar dengan sumbu waktu.

Selain menunjukkan bahwa kecepatan benda konstan, luas daerah di bawah grafik $v - t$ menyatakan perpindahan benda.

$$\Delta x = \text{luas daerah di bawah grafik } v - t \quad (2.20)$$

Karakteristik Gerak Lurus Beraturan

Karakteristik utama GLB dapat diringkas pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2: Karakteristik Gerak Lurus Beraturan

Aspek	Karakteristik
Lintasan	Garis lurus
Kecepatan	Tetap (konstan)
Percepatan	Nol
Perpindahan	Sebanding dengan waktu
Grafik $v - t$	Garis horizontal
Grafik $x - t$	Garis lurus dengan gradien tetap

Catatan Penting: Pada GLB, benda menempuh perpindahan yang sama dalam selang waktu yang sama. Oleh karena itu, kecepatan rata-rata dan kecepatan sesaat selalu memiliki nilai yang sama.

2.3.2 Gerak Lurus dengan Percepatan Konstan

Bila Anda berada di dalam kendaraan yang baru bergerak dari lampu merah, Anda akan merasakan kendaraan tersebut melaju semakin cepat. Sebaliknya, saat mendekati lampu

merah berikutnya, kendaraan akan melambat hingga akhirnya berhenti. Pada kondisi ini, kecepatan kendaraan mengalami perubahan secara teratur. Gerak dengan perubahan kecepatan yang teratur pada lintasan lurus ini disebut Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB).

Definisi 2.3.2 — Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB). Gerak Lurus Berubah Beraturan adalah gerak suatu benda pada lintasan lurus dengan percepatan tetap (konstan).

Karena kecepatan benda berubah secara beraturan terhadap waktu, maka perubahan kecepatan dalam setiap satuan waktu selalu sama. Hal ini berarti nilai percepatannya konstan.

$$a = \text{konstan} \quad (2.21)$$

Pada GLBB, hubungan antara kecepatan akhir (v), kecepatan awal (v_0), dan percepatan (a) dalam selang waktu (t) dinyatakan melalui persamaan:

$$v = v_0 + at \quad (2.22)$$

Sementara itu, posisi benda (x) pada waktu t jika posisi awalnya adalah x_0 dapat ditentukan melalui **persamaan posisi pada Gerak Lurus Berubah Beraturan**:

$$x = x_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2 \quad (2.23)$$

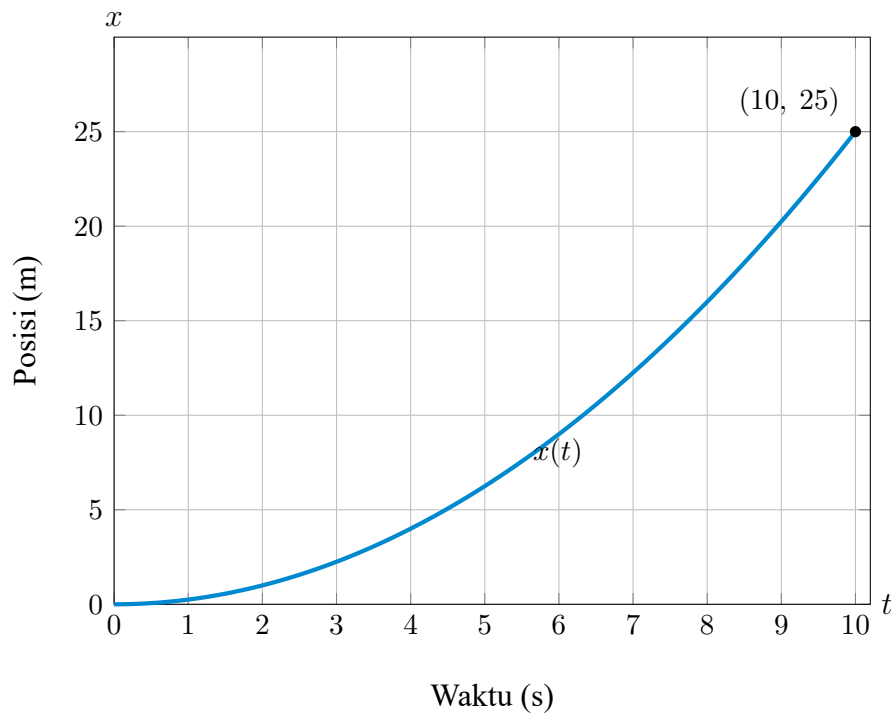
Jika waktu t tidak diketahui dalam persoalan, Anda dapat menggunakan hubungan antara kecepatan, percepatan, dan perpindahan (Δx) berikut:

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \quad (2.24)$$

Representasi Grafik GLBB

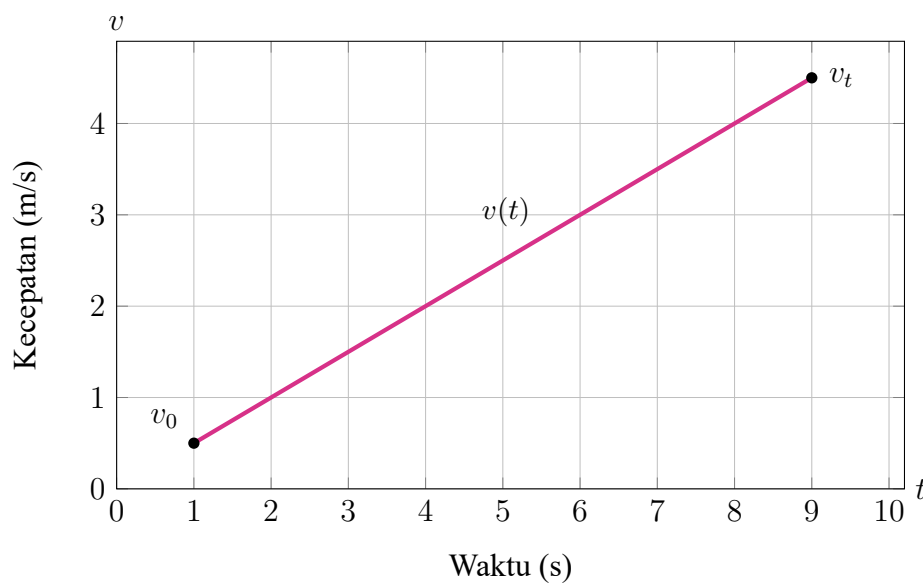
Gerak Lurus Berubah Beraturan untuk kondisi dipercepat ($a > 0$) dapat direpresentasikan melalui grafik posisi terhadap waktu ($x - t$) dan grafik kecepatan terhadap waktu ($v - t$).

1. Grafik Posisi terhadap Waktu ($x - t$)

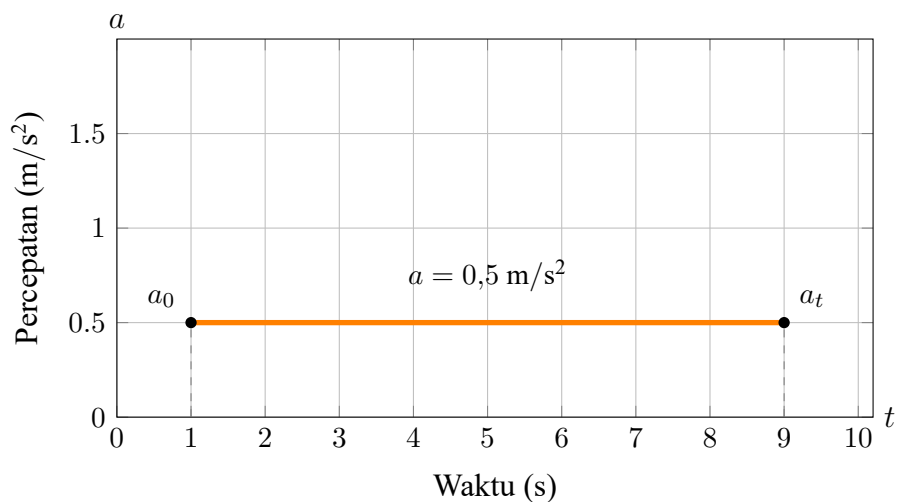


Grafik posisi terhadap waktu pada GLBB tidak lagi berbentuk garis lurus, melainkan berbentuk **kurva parabola** (melengkung). Hal ini dikarenakan posisi (x) sebanding dengan kuadrat dari waktu (t^2).

2. Grafik Kecepatan terhadap Waktu ($v - t$)



Berbeda dengan GLB, grafik kecepatan terhadap waktu ($v - t$) pada GLBB berbentuk **garis lurus miring**. Kemiringan (gradien) dari garis ini merepresentasikan nilai percepatan (a) benda, seperti ditunjukkan pada grafik di bawah



Sama seperti pada GLB, luas daerah di bawah grafik $v - t$ (yang membentuk trapesium atau kombinasi persegi dan segitiga) juga menyatakan besar perpindahan (Δx) yang ditempuh oleh benda.

$$\Delta x = \text{luas daerah di bawah grafik } v - t$$

(2.25)

Karakteristik Gerak Lurus Berubah Beraturan

Karakteristik utama GLBB dapat diringkaskan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3: Karakteristik Gerak Lurus Berubah Beraturan

Aspek	Karakteristik
Lintasan	Garis lurus
Kecepatan	Berubah secara beraturan (naik/turun)
Percepatan	Tetap (konstan) tidak nol ($a \neq 0$)
Perpindahan	Sebanding dengan kuadrat waktu (t^2)
Grafik $v - t$	Garis lurus miring (memiliki gradien)
Grafik $x - t$	Garis melengkung (parabola)

Catatan Penting: Jika nilai percepatan positif ($a > 0$), benda mengalami GLBB dipercepat. Sebaliknya, jika nilai percepatan negatif ($a < 0$), benda mengalami GLBB diperlambat.

2.4 Gerak Lengkung

Pada pembahasan sebelumnya telah dipelajari gerak lurus, yaitu gerak benda yang lintasannya berupa garis lurus. Namun, banyak gerak yang dijumpai dalam kehidupan sehari-hari tidak mengikuti lintasan lurus. Sebuah bola yang ditendang ke udara, aliran air yang keluar dari selang, atau atlet lompat jauh yang melayang sebelum mendarat merupakan contoh gerak yang lintasannya melengkung.

Gerak dengan lintasan yang tidak berupa garis lurus disebut **gerak lengkung**. Pada gerak ini, arah kecepatan benda berubah secara terus-menerus selama benda bergerak. Oleh karena itu, analisis gerak lengkung lebih kompleks dibandingkan gerak lurus karena melibatkan perubahan posisi dalam lebih dari satu arah.

Untuk mempermudah analisis, gerak lengkung biasanya diuraikan menjadi dua komponen yang saling tegak lurus, yaitu komponen gerak pada arah horizontal dan komponen gerak pada arah vertikal. Dengan pendekatan ini, prinsip-prinsip yang telah dipelajari pada gerak lurus tetap dapat digunakan untuk menjelaskan gerak yang lebih kompleks.

Salah satu bentuk gerak lengkung yang paling penting dalam fisika adalah **gerak parabola**, yaitu gerak benda yang dipengaruhi oleh percepatan gravitasi sehingga lintasannya berbentuk parabola. Selain itu, terdapat pula **gerak melingkar**, yaitu gerak benda yang lintasannya membentuk lingkaran dengan jarak tetap terhadap suatu titik pusat.

Pada bagian ini akan dibahas karakteristik, persamaan, serta penerapan berbagai jenis gerak lengkung dalam kehidupan sehari-hari.

2.4.1 Vektor pada Gerak Dua Dimensi

Pada pembahasan sebelumnya, gerak benda dianalisis pada satu dimensi sehingga posisi benda cukup dinyatakan dengan satu koordinat. Namun, banyak gerak yang dijumpai dalam kehidupan sehari-hari berlangsung pada bidang datar sehingga posisi benda berubah dalam dua arah sekaligus. Sebagai contoh, bola yang ditendang ke udara bergerak ke depan sekaligus ke atas, sehingga geraknya tidak dapat dijelaskan hanya dengan satu koordinat.

Untuk mendeskripsikan gerak pada bidang datar digunakan konsep **vektor**. Vektor merupakan besaran yang memiliki besar dan arah. Dalam gerak dua dimensi, besaran seperti posisi, perpindahan, kecepatan, dan percepatan dinyatakan dalam bentuk vektor.

Vektor Posisi

Posisi suatu benda dalam bidang datar dinyatakan terhadap suatu sistem koordinat Kartesius yang terdiri atas sumbu horizontal (x) dan sumbu vertikal (y). Jika suatu benda berada pada koordinat (x, y) , maka vektor posisinya dituliskan sebagai

$$\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j} \quad (2.26)$$

dengan:

- x = koordinat pada sumbu horizontal,
- y = koordinat pada sumbu vertikal,
- $\hat{i}$ = vektor satuan pada arah sumbu- x ,
- $\hat{j}$ = vektor satuan pada arah sumbu- y .

Besar vektor posisi diperoleh menggunakan Teorema Pythagoras,

$$|\vec{r}| = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.27)$$

Vektor Perpindahan

Apabila sebuah benda berpindah dari posisi awal $\vec{r}_1$ menuju posisi akhir $\vec{r}_2$, maka perpindahannya didefinisikan sebagai

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 \quad (2.28)$$

Jika

$$\vec{r}_1 = x_1\hat{i} + y_1\hat{j}$$

dan

$$\vec{r}_2 = x_2\hat{i} + y_2\hat{j},$$

maka

$$\Delta\vec{r} = (x_2 - x_1)\hat{i} + (y_2 - y_1)\hat{j} \quad (2.29)$$

Besar perpindahan dapat dihitung melalui

$$|\Delta\vec{r}| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (2.30)$$

Vektor Kecepatan

Dalam gerak dua dimensi, kecepatan dapat diuraikan menjadi komponen-komponen pada arah horizontal dan vertikal.

$$\vec{v} = v_x\hat{i} + v_y\hat{j} \quad (2.31)$$

dengan:

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

masing-masing menyatakan komponen kecepatan pada arah horizontal dan vertikal. Besar kecepatan diperoleh dari

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (2.32)$$

Jika arah kecepatan membentuk sudut θ terhadap sumbu horizontal, maka komponen-komponennya dapat dituliskan sebagai

$$v_x = v \cos \theta \quad (2.33)$$

$$v_y = v \sin \theta \quad (2.34)$$

Hubungan ini sangat penting dalam analisis gerak parabola.

Vektor Percepatan

Sama seperti kecepatan, percepatan pada gerak dua dimensi juga dapat diuraikan menjadi dua komponen.

$$\vec{a} = a_x \hat{i} + a_y \hat{j} \quad (2.35)$$

dengan

$$a_x = \frac{dv_x}{dt}, \quad a_y = \frac{dv_y}{dt}$$

yang menyatakan percepatan pada arah horizontal dan vertikal.

Besar percepatan diberikan oleh

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \quad (2.36)$$

Penguraian Vektor

Salah satu keuntungan menggunakan vektor adalah suatu besaran dapat diuraikan menjadi komponen-komponen yang saling tegak lurus. Dengan cara ini, gerak yang kompleks dapat dipelajari sebagai gabungan beberapa gerak yang lebih sederhana.

Sebagai contoh, pada gerak parabola, gerak benda dapat dipandang sebagai gabungan antara:

- gerak horizontal dengan kecepatan konstan,
- gerak vertikal yang dipengaruhi percepatan gravitasi.

Pendekatan ini memungkinkan analisis gerak dua dimensi dilakukan dengan menggunakan konsep-konsep gerak satu dimensi yang telah dipelajari sebelumnya.

Catatan Penting: Dalam gerak dua dimensi, komponen-komponen vektor pada sumbu- x dan sumbu- y dianalisis secara terpisah. Setelah masing-masing komponen ditentukan, keduanya digabungkan kembali untuk memperoleh besar dan arah besaran yang sebenarnya.

2.4.2 Gerak Parabola

Salah satu contoh gerak dua dimensi yang paling sering dijumpai dalam kehidupan sehari-hari adalah gerak benda yang dilempar atau ditembakkan dengan sudut tertentu terhadap arah horizontal. Sebagai contoh, bola yang ditendang ke udara, batu yang dilempar, atau lintasan air yang keluar dari selang. Lintasan benda-benda tersebut membentuk kurva yang menyerupai parabola sehingga gerakanya disebut **gerak parabola**.

Gerak parabola merupakan perpaduan antara dua jenis gerak yang saling tegak lurus, yaitu:

- Gerak lurus beraturan (GLB) pada arah horizontal.
- Gerak lurus berubah beraturan (GLBB) pada arah vertikal akibat pengaruh gravitasi.

Karena kedua komponen gerak tersebut saling independen, masing-masing dapat dianalisis secara terpisah.

Gambar 2.2: Lintasan benda pada gerak parabola.

Misalkan sebuah benda ditembakkan dengan kecepatan awal v_0 yang membentuk sudut θ terhadap arah horizontal. Kecepatan awal tersebut dapat diuraikan menjadi dua komponen:

$$v_{0x} = v_0 \cos \theta \quad (2.37)$$

$$v_{0y} = v_0 \sin \theta \quad (2.38)$$

dengan:

- v_{0x} = komponen kecepatan awal arah horizontal,
- v_{0y} = komponen kecepatan awal arah vertikal.

Komponen Gerak pada Arah Horizontal

Pada arah horizontal tidak bekerja gaya yang menyebabkan perubahan kecepatan (hambatan udara diabaikan). Oleh karena itu, benda mengalami GLB dengan kecepatan tetap.

$$v_x = v_{0x} \quad (2.39)$$

Posisi benda pada arah horizontal diberikan oleh

$$x = v_{0x} t \quad (2.40)$$

atau

$$x = v_0 \cos \theta t \quad (2.41)$$

Komponen Gerak pada Arah Vertikal

Pada arah vertikal, benda mengalami percepatan gravitasi yang arahnya selalu menuju pusat Bumi.

Dengan memilih arah ke atas sebagai arah positif, percepatan vertikal dituliskan sebagai

$$a_y = -g \quad (2.42)$$

Kecepatan vertikal setiap saat diberikan oleh

$$v_y = v_{0y} - gt \quad (2.43)$$

atau

$$v_y = v_0 \sin \theta - gt \quad (2.44)$$

Sedangkan posisi vertikal benda adalah

$$y = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (2.45)$$

atau

$$y = v_0 \sin \theta t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (2.46)$$

Persamaan Lintasan Gerak Parabola

Persamaan lintasan diperoleh dengan menghilangkan variabel waktu dari persamaan posisi horizontal dan vertikal.

Dari

$$x = v_0 \cos \theta t$$

diperoleh

$$t = \frac{x}{v_0 \cos \theta}.$$

Substitusi ke persamaan vertikal menghasilkan

$$y = x \tan \theta - \frac{g x^2}{2v_0^2 \cos^2 \theta} \quad (2.47)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa lintasan benda berbentuk parabola.

Karakteristik Gerak Parabola

Gerak parabola memiliki beberapa karakteristik penting sebagai berikut.

- Lintasan berbentuk parabola.
- Komponen gerak horizontal merupakan GLB.
- Komponen gerak vertikal merupakan GLBB.
- Kecepatan horizontal tetap.
- Kecepatan vertikal berubah akibat gravitasi.
- Pada titik tertinggi lintasan, komponen kecepatan vertikal bernilai nol.

Catatan Penting: Meskipun kecepatan vertikal bernilai nol di titik tertinggi, benda tetap bergerak karena masih memiliki komponen kecepatan horizontal.

Tinggi Maksimum Gerak Parabola

Ketika benda bergerak ke atas, komponen kecepatan vertikalnya semakin berkurang akibat pengaruh gravitasi. Pada titik tertinggi lintasan, benda sesaat berhenti bergerak ke arah vertikal sebelum kembali turun. Oleh karena itu, pada titik tertinggi berlaku

$$v_y = 0 \quad (2.48)$$

Dari persamaan kecepatan vertikal

$$v_y = v_0 \sin \theta - gt,$$

diperoleh waktu yang diperlukan benda untuk mencapai titik tertinggi,

$$t_{\text{maks}} = \frac{v_0 \sin \theta}{g} \quad (2.49)$$

Nilai waktu tersebut kemudian disubstitusikan ke persamaan posisi vertikal

$$y = v_0 \sin \theta t - \frac{1}{2}gt^2.$$

Sehingga diperoleh tinggi maksimum benda terhadap titik peluncuran,

$$H_{\text{maks}} = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{2g} \quad (2.50)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa tinggi maksimum bergantung pada kuadrat kecepatan awal dan kuadrat sinus sudut peluncuran. Semakin besar kecepatan awal atau semakin besar sudut peluncuran, semakin tinggi benda dapat mencapai titik puncaknya.

Catatan Penting: Tinggi maksimum dicapai ketika komponen kecepatan vertikal bernilai nol, tetapi benda tetap memiliki komponen kecepatan horizontal sehingga tidak benar-benar berhenti bergerak.

Waktu Terbang

Waktu terbang adalah selang waktu sejak benda diluncurkan hingga kembali mencapai ketinggian yang sama dengan titik peluncurannya. Besaran ini sering disebut sebagai *time of flight*.

Misalkan benda ditembakkan dari permukaan tanah dan kembali jatuh ke permukaan tanah yang sama. Pada saat benda menyentuh tanah kembali berlaku

$$y = 0.$$

Dengan menggunakan persamaan posisi vertikal

$$y = v_0 \sin \theta t - \frac{1}{2}gt^2,$$

diperoleh

$$0 = t \left(v_0 \sin \theta - \frac{1}{2}gt \right).$$

Penyelesaian pertama, yaitu $t = 0$, menyatakan saat benda mulai diluncurkan. Penyelesaian kedua memberikan waktu ketika benda kembali ke tanah, yaitu

$$T = \frac{2v_0 \sin \theta}{g} \quad (2.51)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa waktu terbang berbanding lurus dengan komponen kecepatan awal pada arah vertikal. Semakin besar komponen vertikalnya, semakin lama benda berada di udara.

Selain itu, waktu terbang juga dapat dinyatakan sebagai dua kali waktu yang diperlukan untuk mencapai titik tertinggi,

$$T = 2t_{\text{maks}} \quad (2.52)$$

Hubungan ini berlaku karena gerak parabola memiliki sifat simetris apabila titik peluncuran dan titik pendaratan berada pada ketinggian yang sama.

Catatan Penting: Persamaan waktu terbang di atas hanya berlaku jika benda diluncurkan dan mendarat pada ketinggian yang sama.

Jangkauan Maksimum

Jangkauan horizontal adalah jarak terjauh yang dicapai benda pada arah horizontal sejak diluncurkan hingga mendarat kembali. Besaran ini sering disebut sebagai *range*.

Karena gerak horizontal merupakan GLB, maka posisi horizontal benda diberikan oleh

$$x = v_0 \cos \theta t.$$

Ketika benda mendarat, waktu yang digunakan sama dengan waktu terbang T . Dengan mensubstitusikan

$$T = \frac{2v_0 \sin \theta}{g},$$

diperoleh jangkauan horizontal

$$\begin{aligned} R &= v_0 \cos \theta \left(\frac{2v_0 \sin \theta}{g} \right) \\ &= \frac{2v_0^2 \sin \theta \cos \theta}{g}. \end{aligned}$$

Dengan menggunakan identitas trigonometri

$$2 \sin \theta \cos \theta = \sin 2\theta,$$

diperoleh

$$R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g} \quad (2.53)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa jangkauan horizontal dipengaruhi oleh kecepatan awal dan sudut peluncuran.

Nilai jangkauan akan maksimum apabila

$$\sin 2\theta = 1.$$

Karena nilai maksimum fungsi sinus adalah 1, maka

$$2\theta = 90^\circ,$$

sehingga

$$\theta = 45^\circ \quad (2.54)$$

Dengan demikian, untuk kecepatan awal tertentu, jangkauan horizontal maksimum diperoleh ketika benda ditembakkan dengan sudut 45° terhadap arah horizontal.

Jangkauan maksimum yang dapat dicapai adalah

$$R_{\text{maks}} = \frac{v_0^2}{g} \quad (2.55)$$

Catatan Penting: Dua sudut peluncuran yang jumlahnya 90° akan menghasilkan jangkauan horizontal yang sama. Misalnya, sudut 30° dan 60° menghasilkan jangkauan yang identik jika kecepatan awalnya sama.

Tabel 2.4: Ringkasan Persamaan Gerak Parabola

Besaran	Persamaan
Komponen kecepatan awal horizontal	$v_{0x} = v_0 \cos \theta$
Komponen kecepatan awal vertikal	$v_{0y} = v_0 \sin \theta$
Posisi horizontal	$x = v_0 \cos \theta t$
Posisi vertikal	$y = v_0 \sin \theta t - \frac{1}{2}gt^2$
Kecepatan horizontal	$v_x = v_0 \cos \theta$
Kecepatan vertikal	$v_y = v_0 \sin \theta - gt$
Tinggi maksimum	$H_{\text{maks}} = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{2g}$
Waktu mencapai titik tertinggi	$t_{\text{maks}} = \frac{v_0 \sin \theta}{g}$
Waktu terbang	$T = \frac{2v_0 \sin \theta}{g}$
Jangkauan horizontal	$R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$
Jangkauan maksimum	$R_{\text{maks}} = \frac{v_0^2}{g}$
Sudut untuk jangkauan maksimum	$\theta = 45^\circ$

Tabel 2.5: Fakta Penting Gerak Parabola

Aspek	Keterangan
Jenis gerak gabungan	GLB pada arah horizontal dan GLBB pada arah vertikal
Pada titik tertinggi	Kecepatan vertikal bernilai nol ($v_y = 0$)
Kecepatan horizontal	Selalu konstan (jika hambatan udara diabaikan)
Waktu naik dan turun	Waktu naik sama dengan waktu turun
Jangkauan maksimum	Dicapai pada sudut peluncuran $\theta = 45^\circ$
Sudut peluncuran	Dua sudut yang jumlahnya 90° menghasilkan jangkauan yang sama

2.4.3 Gerak Melingkar

Selain gerak lurus dan gerak parabola, terdapat jenis gerak lain yang banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari, yaitu **gerak melingkar**. Gerak ini terjadi ketika suatu benda bergerak pada lintasan berbentuk lingkaran dengan jarak tetap terhadap suatu titik pusat.

Contoh gerak melingkar dapat ditemukan pada roda kendaraan yang berputar, baling-baling kipas angin, jarum jam, komidi putar, hingga pergerakan satelit yang mengorbit Bumi. Meskipun bentuk lintasannya berbeda-beda, semua contoh tersebut memiliki karakteristik yang sama, yaitu benda bergerak mengelilingi suatu titik pusat.

Gambar 2.3: Benda bergerak pada lintasan melingkar berjari-jari r .

Pada gerak melingkar, posisi benda dapat dinyatakan menggunakan sudut θ yang dibentuk terhadap suatu garis acuan. Oleh karena itu, selain besaran-besaran linear seperti perpindahan dan kecepatan, digunakan pula besaran sudut untuk mendeskripsikan gerak benda.

Beberapa besaran penting dalam gerak melingkar adalah:

- **Jari-jari lintasan (r):** jarak benda terhadap pusat lingkaran.
- **Perpindahan sudut (θ):** perubahan posisi sudut benda terhadap pusat lingkaran.
- **Panjang busur (s):** panjang lintasan yang ditempuh benda sepanjang lingkaran.
- **Kecepatan sudut (ω):** laju perubahan sudut terhadap waktu.
- **Percepatan sudut (α):** laju perubahan kecepatan sudut terhadap waktu.

Hubungan antara panjang busur dan perpindahan sudut diberikan oleh

$$s = r\theta \quad (2.56)$$

dengan:

- s = panjang busur (m),
- r = jari-jari lintasan (m),

- θ = perpindahan sudut (rad).

Persamaan tersebut hanya berlaku apabila sudut dinyatakan dalam satuan radian.

Dalam gerak melingkar, arah kecepatan benda selalu menyinggung lintasan (tangen terhadap lingkaran). Akibatnya, meskipun besar kecepatan dapat tetap, arah kecepatan terus berubah setiap saat. Perubahan arah kecepatan inilah yang menyebabkan benda mengalami percepatan.

Berdasarkan sifat kecepatannya, gerak melingkar dapat dibedakan menjadi dua jenis utama:

1. **Gerak Melingkar Beraturan (GMB)**, yaitu gerak melingkar dengan besar kecepatan tetap.
2. **Gerak Melingkar Berubah Beraturan (GMBB)**, yaitu gerak melingkar dengan kecepatan sudut yang berubah secara teratur.

Pada bagian berikutnya akan dibahas terlebih dahulu gerak melingkar beraturan beserta besaran-besaran yang digunakan untuk mendeskripsikannya.

2.4.4 Perpindahan Sudut dan Panjang Busur

Pada gerak melingkar, posisi benda lebih mudah dinyatakan menggunakan sudut daripada koordinat Kartesius. Ketika sebuah benda bergerak mengelilingi pusat lingkaran, perubahan posisinya dinyatakan sebagai **perpindahan sudut**.

Perpindahan sudut ($\Delta\theta$) adalah sudut yang ditempuh benda terhadap pusat lingkaran selama selang waktu tertentu. Satuan SI untuk perpindahan sudut adalah radian (rad).

Hubungan antara perpindahan sudut dan panjang lintasan yang ditempuh sepanjang lingkaran diberikan oleh

$$s = r\theta \quad (2.57)$$

dengan

- s = panjang busur (m),
- r = jari-jari lintasan (m),
- θ = perpindahan sudut (rad).

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa semakin besar sudut yang ditempuh atau semakin besar jari-jari lintasan, semakin panjang lintasan yang dilalui benda.

Catatan Penting: Persamaan $s = r\theta$ hanya berlaku apabila sudut dinyatakan dalam satuan radian.

2.4.5 Kecepatan Sudut

Selain kecepatan linear yang menyatakan perubahan posisi terhadap waktu, pada gerak melingkar digunakan besaran yang disebut **kecepatan sudut**.

Kecepatan sudut didefinisikan sebagai laju perubahan perpindahan sudut terhadap waktu.

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (2.58)$$

dengan

- ω = kecepatan sudut (rad/s),
- $\Delta\theta$ = perpindahan sudut (rad),
- Δt = selang waktu (s).

Jika benda berputar semakin cepat, nilai kecepatan sudutnya semakin besar. Sebaliknya, jika putarannya semakin lambat, nilai kecepatan sudutnya semakin kecil.

Untuk gerak yang berubah secara kontinu, kecepatan sudut sesaat dinyatakan sebagai

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.59)$$

Catatan Penting: Satu putaran penuh sama dengan 360° atau 2π radian.

2.4.6 Periode dan Frekuensi

Suatu benda yang bergerak melingkar akan melakukan putaran secara berulang. Untuk mendeskripsikan gerak berulang tersebut digunakan besaran periode dan frekuensi.

Periode (T) adalah waktu yang diperlukan benda untuk menyelesaikan satu putaran penuh.

Frekuensi (f) adalah banyaknya putaran yang dilakukan benda setiap satuan waktu.

Hubungan antara frekuensi dan periode diberikan oleh

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

atau

$$T = \frac{1}{f}.$$

dengan

- T = periode (s),
- f = frekuensi (Hz).

Frekuensi sebesar 1 Hz berarti benda melakukan satu putaran setiap detik.

Catatan Penting: Semakin besar frekuensi, semakin kecil periode, dan sebaliknya.

2.4.7 Kecepatan Linear dan Kecepatan Sudut

Dalam gerak melingkar, kecepatan benda dapat dinyatakan dalam dua cara, yaitu melalui kecepatan linear dan kecepatan sudut.

Kecepatan linear menyatakan laju perubahan panjang lintasan terhadap waktu, sedangkan kecepatan sudut menyatakan laju perubahan sudut terhadap waktu.

Dengan menggunakan hubungan $s = r\theta$, diperoleh

$$v = r\omega \quad (2.60)$$

dengan

- v = kecepatan linear (m/s),
- r = jari-jari lintasan (m),
- ω = kecepatan sudut (rad/s).

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa benda yang berada lebih jauh dari pusat lingkaran memiliki kecepatan linear yang lebih besar jika kecepatan sudutnya sama.

Catatan Penting: Pada roda yang berputar, semua titik memiliki kecepatan sudut yang sama, tetapi kecepatan linearnya berbeda-beda bergantung pada jaraknya dari pusat roda.

2.4.8 Gerak Melingkar Beraturan (GMB)

Gerak Melingkar Beraturan (GMB) adalah gerak suatu benda pada lintasan berbentuk lingkaran dengan besar kecepatan tetap.

Meskipun besar kecepatannya tetap, arah kecepatan selalu berubah sehingga benda tetap mengalami percepatan.

Karakteristik GMB adalah:

- lintasan berbentuk lingkaran,
- kecepatan sudut konstan,
- kecepatan linear konstan,
- percepatan selalu menuju pusat lingkaran.

Kecepatan sudut pada GMB dapat dinyatakan sebagai

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.61)$$

atau

$$\omega = 2\pi f \quad (2.62)$$

Catatan Penting: Pada GMB, yang tetap adalah besar kecepatan, bukan arah kecepatannya.

2.4.9 Percepatan Sentripetal

Ketika sebuah benda bergerak melingkar, arah kecepatannya terus berubah. Perubahan arah kecepatan ini menyebabkan benda mengalami percepatan yang selalu mengarah menuju pusat lingkaran.

Percepatan tersebut disebut **percepatan sentripetal**.

Besar percepatan sentripetal diberikan oleh

$$a_s = \frac{v^2}{r} \quad (2.63)$$

atau

$$a_s = r\omega^2 \quad (2.64)$$

dengan

- a_s = percepatan sentripetal (m/s^2),
- v = kecepatan linear (m/s),
- r = jari-jari lintasan (m),
- ω = kecepatan sudut (rad/s).

Catatan Penting: Percepatan sentripetal tidak menyebabkan besar kecepatan berubah, tetapi menyebabkan arah kecepatan berubah secara terus-menerus.

2.4.10 Gaya Sentripetal

Menurut Hukum II Newton, percepatan hanya dapat terjadi jika terdapat gaya yang bekerja pada benda. Oleh karena itu, percepatan sentripetal harus disebabkan oleh suatu gaya yang arahnya menuju pusat lingkaran.

Gaya tersebut disebut **gaya sentripetal**.

Besarnya gaya sentripetal diberikan oleh

$$F_s = ma_s \quad (2.65)$$

atau

$$F_s = \frac{mv^2}{r} \quad (2.66)$$

serta dapat dituliskan sebagai

$$F_s = mr\omega^2 \quad (2.67)$$

dengan

- F_s = gaya sentripetal (N),
- m = massa benda (kg).

Gaya sentripetal bukan merupakan jenis gaya baru, melainkan resultan gaya yang mengarah ke pusat lingkaran. Gaya tersebut dapat berasal dari gaya tegangan tali, gaya gesek, gaya gravitasi, atau gaya normal yang akan kita pelajari lebih lanjut di bab Dinamika Gerak.

2.4.11 Gerak Melingkar Berubah Beraturan (GMBB)

Pada beberapa kasus, kecepatan sudut benda tidak tetap melainkan berubah secara teratur terhadap waktu. Gerak seperti ini disebut **Gerak Melingkar Berubah Beraturan (GMBB)**.

GMBB merupakan analogi gerak melingkar dari Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB), yaitu gerak yang memiliki percepatan sudut tetap.

Percepatan sudut didefinisikan sebagai laju perubahan kecepatan sudut terhadap waktu.

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (2.68)$$

Untuk percepatan sudut konstan berlaku persamaan

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \quad (2.69)$$

$$\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (2.70)$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\alpha\theta \quad (2.71)$$

dengan

- ω_0 = kecepatan sudut awal (rad/s),
- ω = kecepatan sudut akhir (rad/s),
- α = percepatan sudut (rad/s²),
- θ = perpindahan sudut (rad).

Catatan Penting: Persamaan GMBB memiliki bentuk yang sangat mirip dengan persamaan GLBB. Perbedaannya hanya terletak pada besaran yang digunakan, yaitu besaran sudut menggantikan besaran linear.



3. Dinamika Gerak

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, murid mampu:

- ✓ Menjelaskan sifat kelembaman (inersia) suatu benda serta mendeskripsikan beberapa jenis gaya melalui penggambaran diagram gaya sebagai wujud memahami hukum keseimbangan alam yang diciptakan Allah SWT.
- ✓ Mengaplikasikan persamaan-persamaan Hukum Newton tentang gerak dalam menyelesaikan berbagai permasalahan fisika dengan menunjukkan sikap teliti, kritis, dan rasa ingin tahu yang tinggi.
- ✓ Menganalisis fenomena kecepatan terminal pada fluida atau gerak jatuh objek dalam kehidupan sehari-hari sebagai bentuk pengamatan terhadap batasan ukuran dan ketetapan (*sunnatullah*) di alam semesta.
- ✓ Menerapkan konsep dan hukum kekekalan momentum pada berbagai fenomena tabrakan atau interaksi benda sehari-hari secara logis, sistematis, dan bertanggung jawab.
- ✓ Mendeskripsikan momen gaya (torsi) serta penerapannya pada dinamika gerak rotasi secara kontekstual dengan menunjukkan ketekunan, kejujuran, dan kedisiplinan dalam belajar.

Cakupan Materi

Gaya & Hukum
Newton
Penerapan Hukum
Newton
Momentum & Impuls
Usaha & Energi
Gerak Rotasi
Gravitasi Newton

Pengantar

Dinamika Gerak dalam Perspektif Al-Qur'an

Pernahkah kamu merenungkan mengapa bulan tidak jatuh ke bumi, meskipun ia terus bergerak mengelilinginya selama miliaran tahun? Atau mengapa bola yang kamu tendang akhirnya berhenti, sementara planet-planet di langit tidak pernah berhenti pada orbitnya? Allah ﷻ telah memberikan isyarat atas pertanyaan-pertanyaan ini jauh sebelum manusia mampu menjawabnya secara ilmiah:

أَلَمْ تَرَ أَنَّ اللَّهَ يَسْجُدُ لَهُ مَنْ فِي السَّمَوَاتِ وَمَنْ فِي الْأَرْضِ وَالشَّمْسُ وَالْقَمَرُ
 وَالنُّجُومُ وَالْجِبَالُ وَالشَّجَرُ وَالدَّوَابُّ وَكَثِيرٌ مِنَ النَّاسِ وَكَثِيرٌ حَقَّ عَلَيْهِ الْعَذَابُ
 وَمَنْ يُهِنِ اللَّهُ فَمَا لَهُ مِنْ مُكْرِمٍ إِنَّ اللَّهَ يَفْعَلُ مَا يَشَاءُ

“Tidakkah engkau mengetahui bahwa bersujud kepada Allah siapa yang ada di langit dan siapa yang ada di bumi, juga matahari, bulan, bintang, gunung, pohon, hewan melata, dan kebanyakan manusia? Akan tetapi, banyak (manusia) yang pantas mendapatkan azab. Siapa yang dihinakan Allah tidak seorang pun yang akan memuliakannya. Sesungguhnya Allah melakukan apa yang Dia kehendaki. (QS. Al-Hajj [22]: 18)

“Bersujud” dalam ayat ini bukan sekadar makna ritual — ia mencerminkan **ketundukan total** setiap ciptaan Allah terhadap hukum-hukum yang telah Ia tetapkan. Matahari terbit dan terbenam tepat waktu, planet bergerak pada orbitnya dengan presisi luar biasa, buah jatuh ke tanah tanpa pernah melenceng ke atas — semuanya tunduk pada *sunnah Allah* yang kita kenal sebagai **hukum alam**.

Pada bab sebelumnya telah dipelajari **kinematika**, yaitu cabang fisika yang mendeskripsikan gerak benda melalui besaran-besaran seperti posisi, perpindahan, kecepatan, dan percepatan tanpa membahas penyebab terjadinya gerak tersebut. Melalui kinematika, kita dapat menjelaskan *bagaimana* suatu benda bergerak, tetapi belum dapat menjawab *mengapa* benda tersebut bergerak atau mengalami perubahan gerak.

Pertanyaan “*mengapa*” inilah yang mendorong para ilmuwan untuk berpikir lebih dalam. Allah ﷻ berfirman:

قُلْ اَنْظُرُوا مَاذَا فِي السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَمَا تُغْنِي الْآيَاتُ وَالنُّذُرُ عَنْ قَوْمٍ لَا
 يُؤْمِنُونَ

“Katakanlah (Nabi Muhammad), “Perhatikanlah apa saja yang ada di langit dan di bumi!” Tidaklah berguna tanda-tanda (kebesaran Allah) dan peringatan-peringatan itu (untuk menghindarkan azab Allah) dari kaum yang tidak beriman. (QS. Yunus [10]: 101)

Perintah “*perhatikanlah*” dalam ayat ini adalah undangan Allah kepada manusia untuk **mengamati, berpikir, dan memahami** alam semesta. Dalam kehidupan sehari-hari,

sebuah bola dapat bergerak karena ditendang, mobil dapat melaju karena mesin menghasilkan gaya dorong, dan buah jatuh ke tanah karena adanya gaya gravitasi. Semua peristiwa tersebut menunjukkan bahwa perubahan keadaan gerak suatu benda berkaitan dengan adanya **gaya** yang bekerja padanya.

Cabang fisika yang mempelajari hubungan antara gaya dan gerak disebut **dinamika**. Dinamika menjelaskan bagaimana gaya dapat menyebabkan benda bergerak, berhenti, berubah arah, atau berubah kecepatannya. Dasar utama kajian dinamika dirumuskan oleh ilmuwan Inggris, *Sir Isaac Newton*, melalui tiga hukum gerak yang dikenal sebagai **Hukum Newton**.

Sungguh menarik bahwa jauh sebelum Newton merumuskan hukum-hukumnya pada abad ke-17, Al-Qur'an telah menegaskan bahwa alam semesta berjalan di atas keteraturan yang Allah jamin:

إِنَّ اللَّهَ يُمْسِكُ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ أَنْ تَزُولَا ۚ وَلَئِنْ زَالَتَا إِنْ أَمْسَكَهُمَا مِنْ أَحَدٍ
 مِّنْ بَعْدِهِ إِنَّهُ كَانَ حَلِيمًا غَفُورًا

“Sesungguhnya Allah yang menahan langit dan bumi agar tidak lenyap. Jika keduanya akan lenyap, tidak ada seorang pun yang mampu menahannya selain-Nya. Sesungguhnya Dia Maha Penyantun lagi Maha Pengampun. (QS. Fatir [35]: 41)

Ayat ini mengisyaratkan adanya **gaya** yang menopang langit dan bumi — sebuah kekuatan tak kasat mata yang dalam fisika modern kita kenal sebagai **gaya gravitasi**. Hukum gravitasi Newton membuktikan secara matematis apa yang telah Allah nyatakan: bahwa ada gaya yang menjaga keteraturan seluruh alam semesta.

Selain membahas gaya dan Hukum Newton, dinamika juga mencakup konsep **momentum, impuls, usaha, energi, gerak rotasi**, serta **gravitasi**. Konsep-konsep tersebut sangat penting karena menjadi dasar untuk memahami berbagai fenomena alam dan teknologi modern, mulai dari pergerakan kendaraan, peluncuran roket, hingga pergerakan planet mengelilingi Matahari.

Pada bab ini akan dipelajari hubungan antara gaya dan gerak melalui Hukum Newton, konsep momentum dan impuls, usaha dan energi, dinamika rotasi, serta hukum gravitasi Newton yang menjelaskan interaksi gravitasi antar benda di alam semesta.

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَاخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ لَآيَاتٍ لِّأُولِي الْأَلْبَابِ

“Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi serta pergantian malam dan siang terdapat tanda-tanda (kebesaran Allah) bagi orang yang berakal, (QS. Ali Imran [3]: 190)

Mempelajari dinamika adalah salah satu cara kita menjadi *ulul albab* — orang-orang yang menggunakan akalnya untuk mengenali kebesaran Allah melalui keteraturan alam yang Ia ciptakan. Setiap rumus yang kamu pelajari dalam bab ini sejatinya adalah **jejak kekuasaan Allah** yang berhasil dituliskan manusia dalam bahasa matematika.

3.1 Gaya dan Hukum Newton

Setiap perubahan gerak selalu berkaitan dengan adanya interaksi antara benda-benda yang terlibat. Interaksi tersebut dapat menyebabkan benda bergerak, berhenti, mempercepat gerak, atau mengubah arah geraknya. Dalam fisika, interaksi semacam ini dinyatakan melalui konsep **gaya**.

Hubungan antara gaya dan gerak dijelaskan oleh tiga Hukum Newton yang menjadi dasar mekanika klasik. Melalui hukum-hukum tersebut, kita dapat memahami bagaimana gaya memengaruhi keadaan gerak suatu benda serta menganalisis berbagai fenomena yang terjadi dalam kehidupan sehari-hari.

3.1.1 Konsep Gaya

Pada bab sebelumnya telah dipelajari bagaimana suatu benda bergerak melalui besaran-besaran seperti posisi, kecepatan, dan percepatan. Namun, muncul pertanyaan yang lebih mendasar: *apa yang menyebabkan suatu benda bergerak, berhenti, atau berubah arah?*

Dalam kehidupan sehari-hari, kita sering melakukan aktivitas yang melibatkan dorongan atau tarikan. Misalnya, seseorang mendorong meja agar bergeser, menarik koper saat bepergian, menendang bola agar bergerak, atau menarik busur panah sebelum dilepaskan. Semua aktivitas tersebut melibatkan suatu besaran fisika yang disebut **gaya**.

Secara umum, gaya dapat didefinisikan sebagai tarikan atau dorongan yang bekerja pada suatu benda dan berpotensi mengubah keadaan gerak maupun bentuk benda tersebut.

Gaya merupakan besaran vektor karena memiliki besar dan arah. Oleh karena itu, untuk mendeskripsikan gaya secara lengkap diperlukan informasi mengenai nilai gaya dan arah kerjanya.

Pengaruh Gaya terhadap Benda

Gaya yang bekerja pada suatu benda dapat menimbulkan berbagai akibat, antara lain:

1. Mengubah keadaan gerak benda dari diam menjadi bergerak.
2. Menghentikan benda yang sedang bergerak.
3. Mengubah besar kecepatan benda.
4. Mengubah arah gerak benda.
5. Mengubah bentuk benda.

Sebagai contoh, ketika sebuah bola diam ditendang, bola mulai bergerak. Ketika sepeda direm, kecepatannya berkurang hingga berhenti. Ketika plastisin ditekan dengan tangan, bentuknya berubah. Semua peristiwa tersebut terjadi karena adanya gaya yang bekerja pada benda.

Gaya sebagai Besaran Vektor

Karena gaya merupakan besaran vektor, penjumlahannya tidak dapat dilakukan seperti besaran skalar biasa. Jika beberapa gaya bekerja secara bersamaan pada suatu benda, maka perlu ditentukan resultan gayanya.

Misalkan dua gaya $\vec{F}_1$ dan $\vec{F}_2$ bekerja pada sebuah benda, maka resultan gaya dinyatakan sebagai

$$\vec{F}_{\text{resultan}} = \sum \vec{F} \quad (3.1)$$

Resultan gaya merupakan gaya tunggal yang memberikan pengaruh yang sama dengan seluruh gaya yang bekerja pada benda.

Satuan Gaya

Dalam Sistem Internasional (SI), satuan gaya adalah **newton (N)** untuk menghormati ilmuwan Inggris Sir Isaac Newton.

Satu newton didefinisikan sebagai gaya yang diperlukan untuk memberikan percepatan sebesar 1 m/s^2 pada benda bermassa 1 kg .

Secara matematis,

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \quad (3.2)$$

Hubungan ini akan dipahami lebih mendalam melalui Hukum II Newton yang akan dibahas pada bagian berikutnya.

Keseimbangan dan Ketidakseimbangan Gaya

Dalam banyak situasi, sebuah benda dapat dikenai lebih dari satu gaya secara bersamaan.

- Jika resultan gaya yang bekerja sama dengan nol, benda dikatakan berada dalam keadaan setimbang.
- Jika resultan gaya tidak sama dengan nol, benda akan mengalami percepatan.

Secara matematis,

$$\sum \vec{F} = 0 \quad (3.3)$$

menunjukkan kondisi keseimbangan gaya.

Sebagai contoh, sebuah buku yang diam di atas meja mengalami dua gaya utama, yaitu gaya gravitasi yang menarik buku ke bawah dan gaya normal meja yang mendorong buku ke atas. Kedua gaya tersebut saling menyeimbangkan sehingga buku tetap diam.

Gaya dalam Kehidupan Sehari-hari

Konsep gaya tidak hanya penting dalam fisika, tetapi juga dalam berbagai bidang teknologi dan kehidupan sehari-hari. Perancangan kendaraan, pembangunan jembatan, peluncuran roket, hingga olahraga semuanya memerlukan pemahaman mengenai gaya dan pengaruhnya terhadap gerak benda.

Pemahaman tentang gaya menjadi dasar bagi tiga hukum gerak Newton yang menjelaskan hubungan antara gaya dan perubahan gerak benda. Ketiga hukum tersebut merupakan salah satu fondasi terpenting dalam fisika klasik dan akan dibahas pada bagian-bagian berikutnya.

Catatan Penting: Gaya tidak selalu menyebabkan benda bergerak. Sebuah benda dapat tetap diam meskipun dikenai beberapa gaya apabila resultan gaya yang bekerja padanya sama dengan nol.

3.1.2 Hukum I Newton

Pernahkah Anda merasakan tubuh terdorong ke depan ketika kendaraan direm mendadak atau terdorong ke belakang ketika kendaraan mulai bergerak? Peristiwa tersebut menunjukkan bahwa benda cenderung mempertahankan keadaan geraknya. Sifat inilah yang menjadi dasar Hukum I Newton.

Sebelum Newton merumuskan hukum-hukum gerak, banyak orang beranggapan bahwa suatu benda hanya dapat terus bergerak jika selalu diberikan gaya. Namun, melalui pengamatannya, Newton menyimpulkan bahwa gaya tidak diperlukan untuk mempertahankan gerak suatu benda. Sebaliknya, gaya hanya diperlukan untuk mengubah keadaan gerak benda.

Hukum I Newton menyatakan bahwa:

Suatu benda akan tetap berada dalam keadaan diam atau bergerak lurus beraturan selama resultan gaya yang bekerja padanya sama dengan nol.

Secara matematis, Hukum I Newton dapat dituliskan sebagai

$$\sum \vec{F} = 0 \quad (3.4)$$

dengan $\sum \vec{F}$ menyatakan resultan seluruh gaya yang bekerja pada benda.

Hukum I Newton menjelaskan dua keadaan berikut:

1. Jika benda mula-mula diam dan resultan gaya yang bekerja padanya nol, maka benda akan tetap diam.
2. Jika benda mula-mula bergerak dengan kecepatan tertentu dan resultan gaya yang bekerja padanya nol, maka benda akan terus bergerak lurus dengan kecepatan tetap.

Konsep Inersia

Kecenderungan suatu benda untuk mempertahankan keadaan diam atau keadaan geraknya disebut **inersia** atau **kelembaman**. Semakin besar massa suatu benda, semakin besar pula inersianya.

Sebagai contoh, lebih mudah mendorong kursi kosong dibandingkan lemari yang penuh barang. Hal ini terjadi karena lemari memiliki massa yang lebih besar sehingga lebih sulit mengubah keadaan geraknya.

Konsep inersia merupakan alasan mengapa penumpang kendaraan tampak terdorong ke depan ketika kendaraan direm mendadak. Tubuh penumpang berusaha mempertahankan keadaan geraknya sehingga tetap bergerak maju ketika kendaraan mulai melambat.

Kerangka Acuan Inersial

Hukum I Newton berlaku pada kerangka acuan yang disebut **kerangka acuan inersial**. Kerangka acuan inersial adalah kerangka acuan yang tidak mengalami percepatan, sehingga benda yang tidak dikenai gaya resultan akan tetap diam atau bergerak lurus beraturan.

Dalam banyak kasus sehari-hari, permukaan Bumi dapat dianggap sebagai kerangka acuan inersial sehingga Hukum I Newton dapat diterapkan dengan baik.

Contoh Penerapan Hukum I Newton

Beberapa contoh penerapan Hukum I Newton dalam kehidupan sehari-hari antara lain:

- Penumpang terdorong ke depan saat mobil direm mendadak.
- Penumpang terdorong ke belakang saat mobil mulai bergerak.
- Debu terlepas dari karpet ketika karpet dipukul.
- Buah yang jatuh dari pohon ketika cabang digoyangkan dengan cepat.

Pada semua contoh tersebut, benda berusaha mempertahankan keadaan geraknya sesuai dengan sifat inersia yang dimilikinya.

Catatan Penting: Hukum I Newton sering disebut sebagai **Hukum Kelembaman (Law of Inertia)** karena menjelaskan kecenderungan benda untuk mempertahankan keadaan diam atau geraknya apabila tidak ada resultan gaya yang bekerja padanya.

3.1.3 Hukum II Newton

Hukum I Newton menjelaskan bahwa suatu benda akan tetap diam atau bergerak lurus beraturan jika resultan gaya yang bekerja padanya sama dengan nol. Namun, dalam banyak situasi, benda mengalami perubahan kecepatan, baik bertambah, berkurang, maupun berubah arah. Perubahan keadaan gerak tersebut menunjukkan bahwa pada benda bekerja resultan gaya yang tidak nol.

Sebagai contoh, sebuah troli belanja yang didorong dengan gaya yang lebih besar akan bergerak semakin cepat. Sebaliknya, untuk gaya dorong yang sama, troli yang lebih berat akan lebih sulit dipercepat dibandingkan troli yang lebih ringan. Fenomena ini menunjukkan bahwa percepatan suatu benda bergantung pada besar gaya yang bekerja dan massa benda tersebut.

Hubungan antara gaya, massa, dan percepatan dirumuskan oleh Newton dalam **Hukum II Newton** yang menyatakan bahwa:

*Percepatan yang dialami suatu benda berbanding lurus dengan resultan gaya yang bekerja padanya dan berbanding terbalik dengan massa benda tersebut.
Arah percepatan selalu sama dengan arah resultan gaya.*

Secara matematis, Hukum II Newton dinyatakan sebagai

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \quad (3.5)$$

dengan

- $\sum \vec{F}$ = resultan gaya yang bekerja pada benda (N),
- m = massa benda (kg),
- $\vec{a}$ = percepatan benda (m/s²).

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa:

1. Semakin besar resultan gaya yang bekerja pada benda, semakin besar percepatan yang dihasilkan.
2. Semakin besar massa benda, semakin kecil percepatan yang dihasilkan oleh gaya yang sama.
3. Arah percepatan selalu searah dengan arah resultan gaya.

Makna Fisik Hukum II Newton

Hukum II Newton menjelaskan bagaimana gaya memengaruhi gerak benda. Jika resultan gaya pada suatu benda bernilai nol, percepatan benda juga nol sehingga benda tetap diam atau bergerak lurus beraturan sesuai Hukum I Newton.

Sebaliknya, jika resultan gaya tidak nol, benda akan mengalami percepatan. Percepatan ini dapat berupa:

- penambahan kecepatan,
- pengurangan kecepatan,
- perubahan arah gerak,
- atau kombinasi dari ketiganya.

Dengan demikian, gaya bukanlah penyebab gerak, melainkan penyebab **perubahan gerak**.

Satuan Newton

Berdasarkan persamaan Hukum II Newton,

$$F = ma,$$

maka satuan gaya dapat diturunkan menjadi

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2.$$

Artinya, gaya sebesar satu newton adalah gaya yang mampu memberikan percepatan sebesar 1 m/s^2 pada benda bermassa 1 kg .

Contoh Penerapan Hukum II Newton

Contoh 1

Sebuah benda bermassa 2 kg ditarik dengan gaya horizontal sebesar 10 N . Tentukan percepatan benda tersebut jika gaya gesek diabaikan.

Penyelesaian

Diketahui:

$$m = 2 \text{ kg}$$

$$F = 10 \text{ N}$$

Berdasarkan Hukum II Newton,

$$F = ma$$

$$a = \frac{F}{m}$$

$$a = \frac{10}{2}$$

$$a = 5 \text{ m/s}^2$$

Jadi, percepatan benda adalah

$$a = 5 \text{ m/s}^2$$

Hubungan Gaya dan Percepatan

Hubungan antara gaya dan percepatan dapat diringkas sebagai berikut:

Kondisi	Akibat
Massa tetap, gaya diperbesar	Percepatan bertambah
Massa tetap, gaya diperkecil	Percepatan berkurang
Gaya tetap, massa diperbesar	Percepatan berkurang
Gaya tetap, massa diperkecil	Percepatan bertambah

Hubungan ini menunjukkan bahwa massa dapat dianggap sebagai ukuran kelembaman suatu benda. Semakin besar massa benda, semakin sulit mengubah keadaan geraknya.

Catatan Penting: Hukum II Newton berlaku untuk resultan gaya, bukan untuk masing-masing gaya secara terpisah. Oleh karena itu, sebelum menggunakan persamaan $\sum \vec{F} = m\vec{a}$, semua gaya yang bekerja pada benda harus dijumlahkan terlebih dahulu secara vektor.

3.1.4 Hukum III Newton

Pada pembahasan sebelumnya telah dijelaskan bahwa gaya dapat menyebabkan perubahan gerak suatu benda. Namun, muncul pertanyaan yang lebih mendasar: *dari mana gaya berasal?*

Dalam kehidupan sehari-hari, gaya selalu muncul akibat adanya interaksi antara dua benda. Ketika tangan mendorong dinding, tangan memberikan gaya pada dinding. Pada saat yang sama, dinding juga memberikan gaya pada tangan. Ketika seseorang berjalan, kaki mendorong permukaan tanah ke belakang, dan tanah memberikan gaya yang mendorong tubuh ke depan. Fenomena-fenomena tersebut menunjukkan bahwa gaya tidak pernah muncul secara tunggal.

Hubungan antara pasangan gaya yang timbul akibat interaksi dua benda dijelaskan oleh **Hukum III Newton**, yang menyatakan bahwa:

Untuk setiap gaya aksi selalu terdapat gaya reaksi yang sama besar tetapi berlawanan arah.

Secara matematis, Hukum III Newton dituliskan sebagai

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA} \quad (3.6)$$

dengan

- $\vec{F}_{AB}$ adalah gaya yang diberikan benda A kepada benda B,
- $\vec{F}_{BA}$ adalah gaya yang diberikan benda B kepada benda A.

Tanda negatif menunjukkan bahwa kedua gaya memiliki arah yang berlawanan.

Pasangan Aksi dan Reaksi

Menurut Hukum III Newton, gaya selalu muncul dalam pasangan aksi–reaksi yang memiliki karakteristik sebagai berikut:

1. Besarnya sama.
2. Arahnya berlawanan.
3. Bekerja pada dua benda yang berbeda.
4. Muncul dan hilang secara bersamaan.

Karena bekerja pada benda yang berbeda, pasangan gaya aksi–reaksi tidak saling meniadakan.

Sebagai contoh, ketika sebuah buku diletakkan di atas meja, buku memberikan gaya tekan ke bawah pada meja. Sebagai reaksinya, meja memberikan gaya normal ke atas pada buku dengan besar yang sama. Kedua gaya tersebut merupakan pasangan aksi–reaksi.

Contoh Penerapan Hukum III Newton

1. Seseorang berjalan

Ketika berjalan, kaki mendorong tanah ke belakang. Sebagai reaksi, tanah memberikan gaya gesek ke depan pada kaki sehingga tubuh dapat bergerak maju.

2. Peluncuran roket

Mesin roket menyemburkan gas hasil pembakaran ke bawah dengan kecepatan tinggi. Sebagai reaksinya, gas memberikan gaya dorong ke atas pada roket sehingga roket dapat meluncur.

3. Menembak dengan senapan

Ketika peluru ditembakkan ke depan, senapan mengalami gaya reaksi yang arahnya ke belakang. Fenomena ini dikenal sebagai *recoil* atau hentakan balik.

4. Berenang

Perenang mendorong air ke belakang menggunakan tangan dan kaki. Sebagai reaksinya, air memberikan gaya ke depan yang menggerakkan tubuh perenang.

Kesalahan yang Sering Terjadi

Banyak siswa menganggap bahwa gaya berat dan gaya normal pada sebuah benda yang diam di atas meja merupakan pasangan aksi–reaksi. Anggapan ini tidak tepat.

Pada sebuah buku yang diam di atas meja:

- Gaya berat bekerja pada buku oleh Bumi.
- Gaya normal bekerja pada buku oleh meja.

Kedua gaya tersebut bekerja pada benda yang sama, yaitu buku, sehingga bukan pasangan aksi–reaksi.

Pasangan aksi–reaksinya adalah:

- Bumi menarik buku ke bawah.
- Buku menarik Bumi ke atas.

serta

- Buku menekan meja ke bawah.
- Meja menekan buku ke atas.

Makna Fisik Hukum III Newton

Hukum III Newton menunjukkan bahwa gaya selalu merupakan hasil interaksi antara dua benda. Tidak mungkin terdapat gaya yang bekerja pada suatu benda tanpa adanya benda lain yang memberikan gaya tersebut.

Pemahaman ini sangat penting dalam analisis dinamika karena membantu mengidentifikasi asal-usul setiap gaya yang bekerja pada suatu sistem.

Catatan Penting: Pasangan gaya aksi dan reaksi selalu bekerja pada dua benda yang berbeda. Oleh karena itu, meskipun besarnya sama dan arahnya berlawanan, kedua gaya tersebut tidak pernah saling meniadakan.

Ringkasan Hukum Newton

1. Hukum I Newton (Hukum Kelembaman)

Jika resultan gaya yang bekerja pada benda sama dengan nol, maka benda akan tetap diam atau bergerak lurus beraturan.

$$\sum \vec{F} = 0$$

2. Hukum II Newton

Percepatan benda berbanding lurus dengan resultan gaya dan berbanding terbalik dengan massanya.

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

3. Hukum III Newton

Setiap gaya aksi selalu memiliki gaya reaksi yang sama besar dan berlawanan arah.

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$$

3.1.5 Diagram Gaya Bebas

Coba perhatikan sebuah kotak yang ditarik tali sambil berada di atas lantai kasar. Tanpa menggambar apa pun, dapatkah Anda menyebutkan dengan pasti seluruh gaya yang bekerja pada kotak tersebut, lengkap dengan arahnya masing-masing? Jika jawabannya tidak mudah, di sinilah pentingnya sebuah alat bantu yang disebut **diagram gaya bebas**.

Pada pembahasan Hukum Newton telah dijelaskan bahwa gerak suatu benda ditentukan oleh resultan gaya yang bekerja padanya. Namun, dalam banyak kasus sebuah benda dapat mengalami lebih dari satu gaya secara bersamaan. Oleh karena itu, diperlukan suatu cara untuk mengidentifikasi dan menggambarkan semua gaya yang bekerja pada benda secara sistematis. Representasi tersebut disebut **Diagram Gaya Bebas** (*Free Body Diagram/FBD*).

Diagram gaya bebas memungkinkan kita memvisualisasikan seluruh gaya yang bekerja pada suatu benda sebelum melangkah ke tahap perhitungan. Langkah ini bukan sekadar formalitas – tanpa identifikasi gaya yang tepat, penerapan Hukum Newton dapat menghasilkan kesimpulan yang salah, baik karena ada gaya yang terlewat maupun karena gaya semu yang ikut diperhitungkan padahal tidak nyata.

Diagram gaya bebas adalah gambar sederhana yang menunjukkan sebuah benda beserta seluruh gaya luar yang bekerja padanya. Benda biasanya digambarkan sebagai sebuah titik atau kotak, sedangkan gaya-gaya yang bekerja dinyatakan dengan anak panah (vektor).

Diagram ini tidak menggambarkan gaya yang diberikan benda kepada benda lain, melainkan hanya gaya-gaya yang **bekerja pada** benda yang sedang dianalisis. Hal ini sejalan dengan Hukum III Newton, yang menyatakan bahwa setiap gaya aksi memiliki pasangan reaksi pada benda yang berbeda.

Langkah-Langkah Membuat Diagram Gaya Bebas

Untuk membuat diagram gaya bebas secara sistematis, langkah-langkah berikut dapat digunakan:

1. Tentukan benda yang akan dianalisis.
2. Pisahkan benda tersebut dari lingkungan sekitarnya secara imajiner.
3. Identifikasi semua gaya luar yang bekerja pada benda.
4. Gambarkan setiap gaya sebagai vektor yang berawal dari pusat benda, dengan arah sesuai arah kerja gaya.
5. Beri label pada setiap anak panah sesuai jenis dan simbol gayanya.
6. Tentukan arah sumbu koordinat yang sesuai untuk mempermudah penjumlahan gaya, terutama pada benda di bidang miring.

Setelah diagram gaya bebas selesai dibuat, resultan gaya pada masing-masing arah dapat dihitung menggunakan Hukum Newton.

Gaya-Gaya yang Umum Muncul

Beberapa gaya yang sering muncul dalam diagram gaya bebas antara lain:

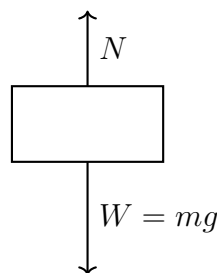
- **Gaya berat ($\vec{W}$)** – gaya gravitasi yang diberikan Bumi kepada benda, dengan arah selalu menuju pusat Bumi.

$$\vec{W} = m\vec{g}$$

- **Gaya normal ($\vec{N}$)** – gaya yang diberikan permukaan pada benda yang bersentuhan dengannya, arahnya selalu tegak lurus permukaan kontak.
- **Gaya tegangan tali ($\vec{T}$)** – gaya yang diberikan tali pada benda, arahnya sepanjang tali dan menjauhi benda.
- **Gaya gesek ($\vec{f}$)** – gaya yang timbul akibat kontak dua permukaan, arahnya selalu melawan kecenderungan gerak relatif benda.
- **Gaya dorong atau gaya tarik ($\vec{F}$)** – gaya yang diberikan oleh agen luar, seperti tangan, mesin, atau benda lainnya.

Contoh Diagram Gaya Bebas

Pertimbangkan sebuah balok bermassa m yang diam di atas lantai datar. Pada balok tersebut bekerja dua gaya, yaitu gaya berat ($W = mg$) yang mengarah ke bawah dan gaya normal (N) yang mengarah ke atas.



Karena balok berada dalam keadaan diam, resultan gaya vertikal sama dengan nol, sehingga berlaku

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow N - W = 0 \Rightarrow N = W = mg \quad (3.7)$$

Dari diagram tersebut terlihat bahwa gaya normal dan gaya berat memiliki besar yang sama tetapi arah berlawanan, sehingga resultan gayanya nol.

Contoh lain dapat ditemukan pada benda yang ditarik oleh tali pada bidang datar sambil mengalami gaya gesek. Pada kasus ini, terdapat empat gaya yang bekerja sekaligus, yaitu gaya berat, gaya normal, gaya tarik, dan gaya gesek yang berlawanan arah dengan gerak benda.

Benda pada Bidang Miring

Diagram gaya bebas menjadi semakin penting ketika benda berada pada bidang miring. Pada kondisi ini, gaya berat biasanya diuraikan menjadi dua komponen:

- komponen sejajar bidang,

$$W_{\parallel} = mg \sin \theta,$$

- komponen tegak lurus bidang,

$$W_{\perp} = mg \cos \theta.$$

Penguraian gaya ini mempermudah penggunaan Hukum Newton pada masing-masing arah, sehingga persamaan gerak benda di bidang miring dapat diselesaikan dengan lebih sistematis.

Kesalahan yang Sering Terjadi

Dalam membuat diagram gaya bebas, beberapa kesalahan yang sering dilakukan antara lain:

1. Menggambarkan gaya yang sebenarnya tidak bekerja pada benda.
2. Tidak menggambarkan semua gaya yang bekerja pada benda.
3. Salah menentukan arah gaya gesek.
4. Mencampurkan pasangan aksi–reaksi Hukum III Newton ke dalam diagram benda yang sama.

Manfaat Diagram Gaya Bebas

Penggunaan diagram gaya bebas memberikan beberapa manfaat penting dalam analisis dinamika, antara lain:

- Memudahkan identifikasi seluruh gaya yang bekerja pada benda secara sistematis.
- Mencegah kesalahan akibat gaya yang terlewat atau gaya semu yang sebenarnya tidak bekerja pada benda.
- Membantu menentukan persamaan gerak menggunakan Hukum II Newton pada sumbu- x dan sumbu- y secara terpisah.
- Mempermudah analisis pada benda di bidang miring, dengan menguraikan gaya berat ke dalam komponen-komponennya.

Catatan Penting: Langkah terpenting dalam menyelesaikan soal dinamika bukanlah langsung menuliskan persamaan Hukum Newton, melainkan membuat diagram gaya bebas yang benar terlebih dahulu. Diagram gaya bebas hanya memuat gaya-gaya yang bekerja **pada** benda yang sedang dianalisis, bukan gaya yang diberikan benda tersebut kepada benda lain. Diagram yang tepat akan mempermudah penentuan resultan gaya dan mengurangi kesalahan dalam perhitungan selanjutnya.

3.1.6 Jenis-Jenis Gaya

Pada pembahasan diagram gaya bebas telah dijelaskan bahwa gerak suatu benda ditentukan oleh resultan gaya yang bekerja padanya. Dalam praktiknya, gaya yang bekerja pada suatu benda dapat berasal dari gravitasi, kontak dengan permukaan, tali, pegas, maupun interaksi lainnya. Oleh karena itu, diperlukan pemahaman mengenai karakteristik masing-masing gaya sebelum melakukan analisis menggunakan Hukum Newton.

Beberapa gaya yang paling sering dijumpai dalam mekanika akan dibahas pada bagian berikut.

Gaya Berat

Setiap benda yang berada di dekat permukaan Bumi selalu mengalami tarikan gravitasi. Gaya gravitasi yang bekerja pada suatu benda disebut **gaya berat**.

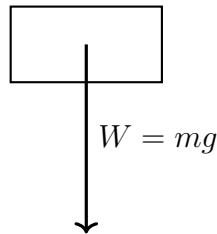
Besar gaya berat bergantung pada massa benda dan percepatan gravitasi di lokasi benda berada. Semakin besar massa benda, semakin besar pula gaya beratnya.

$$W = mg$$

dengan

- W = gaya berat (N),
- m = massa benda (kg),
- g = percepatan gravitasi ($9,8 \text{ m/s}^2$ atau sering dibulatkan menjadi 10 m/s^2).

Arah gaya berat selalu menuju pusat Bumi.



Gambar 3.1: Gaya berat selalu mengarah ke pusat Bumi.

Massa dan Berat Bukan Hal yang Sama

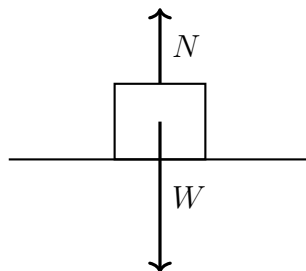
Banyak siswa keliru menganggap massa dan berat sebagai besaran yang sama. Padahal, **massa** (m) adalah ukuran banyaknya materi penyusun benda dan bersifat tetap di mana pun benda berada, sedangkan **berat** (W) adalah gaya gravitasi yang bekerja pada benda tersebut dan nilainya bergantung pada lokasi.

Sebagai ilustrasi, seorang astronaut bermassa 80 kg akan tetap bermassa 80 kg di Bulan. Namun, karena percepatan gravitasi di Bulan hanya sekitar $1,6 \text{ m/s}^2$ (sekitar seperenam gravitasi Bumi), berat astronaut tersebut di Bulan jauh lebih kecil dibandingkan di Bumi. Inilah sebabnya astronaut dapat melompat jauh lebih tinggi di permukaan Bulan – bukan karena massanya berubah, melainkan karena gaya gravitasi yang menariknya ke bawah jauh lebih lemah.

Gaya Normal

Gaya normal adalah gaya kontak yang diberikan suatu permukaan kepada benda yang bersentuhan dengannya. Kata *normal* dalam fisika tidak berarti "biasa", melainkan berarti **tegak lurus** terhadap permukaan bidang sentuh.

Secara mikroskopik, gaya normal muncul karena permukaan benda sebenarnya tidak benar-benar kaku. Ketika dua permukaan bersentuhan dan saling menekan, ikatan antar-molekul pada permukaan tersebut mengalami sedikit deformasi – seperti pegas yang tertekan dalam skala sangat kecil – sehingga menghasilkan gaya pemulih yang melawan tekanan tersebut. Inilah alasan mengapa gaya normal disebut sebagai gaya *reaktif*: besarnya tidak tetap, melainkan selalu menyesuaikan diri agar benda tidak menembus permukaan.



Gambar 3.2: Gaya normal pada bidang datar.

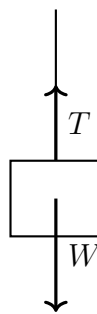
Kesalahpahaman Umum: N Tidak Selalu Sama dengan W

Banyak siswa beranggapan bahwa gaya normal selalu sama dengan gaya berat. Anggapan ini hanya benar pada kondisi tertentu, yaitu ketika benda diam di atas bidang datar tanpa ada gaya luar lain pada arah vertikal. Jika ada gaya tambahan – misalnya seseorang menekan benda dari atas, atau benda berada di dalam lift yang sedang bergerak dipercepat – besar gaya normal akan berbeda dari gaya berat, karena nilainya ditentukan oleh resultan gaya pada arah vertikal sesuai Hukum II Newton, bukan oleh gaya berat semata.

Gaya Tegangan Tali

Ketika sebuah benda digantung atau ditarik menggunakan tali, tali memberikan gaya tarik pada benda tersebut. Gaya ini disebut **gaya tegangan tali**.

Gaya tegangan selalu bekerja sepanjang arah tali dan menjauhi benda yang ditinjau. Ini terjadi karena tali hanya dapat **menarik**, tidak dapat mendorong – berbeda dengan batang kaku yang dapat memberikan gaya dorong maupun tarik.



Gambar 3.3: Benda yang digantung pada tali.

Tali Ideal: Tanpa Massa dan Tidak Mulur

Dalam soal-soal dinamika tingkat SMA, tali umumnya diasumsikan sebagai **tali ideal**, yaitu tali yang massanya diabaikan dan tidak dapat mulur (*inextensible*). Konsekuensi dari asumsi ini adalah besar tegangan tali **sama di setiap titik** sepanjang tali tersebut, selama tali tidak melalui katrol yang memiliki massa atau gesekan. Asumsi inilah yang memungkinkan dua benda yang dihubungkan tali dianggap memiliki besar percepatan yang sama.

Gaya Gesek

Gaya gesek adalah gaya yang timbul akibat kontak antara dua permukaan dan arahnya selalu melawan kecenderungan gerak relatif kedua permukaan tersebut.

Secara mikroskopik, gaya gesek muncul akibat ketidaksempurnaan permukaan benda. Meskipun suatu permukaan terlihat licin oleh mata, pada skala mikroskopis permukaan tersebut sebenarnya memiliki tonjolan-tonjolan kecil (*asperities*) yang saling mengganjal dan berikatan ketika dua permukaan bersentuhan. Gaya gesek berperan penting dalam kehidupan sehari-hari. Tanpa gaya gesek, manusia tidak dapat berjalan, kendaraan tidak dapat bergerak, dan benda akan mudah tergelincir.

Gaya gesek dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan keadaan benda:

- **Gaya gesek statis** (f_s) bekerja ketika benda belum bergerak relatif terhadap permukaan. Besarnya **menyesuaikan diri** terhadap gaya luar yang bekerja, hingga mencapai nilai maksimum tertentu sebelum benda mulai bergerak.

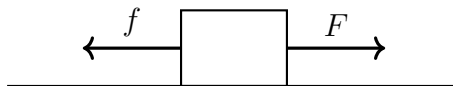
$$f_s \leq \mu_s N, \quad f_{s,\text{maks}} = \mu_s N$$

- **Gaya gesek kinetis** (f_k) bekerja ketika benda sudah bergerak relatif terhadap permukaan. Berbeda dengan gaya gesek statis, besarnya **tetap** selama kecepatan relatif kedua permukaan tidak nol.

$$f_k = \mu_k N$$

dengan hubungan

$$\mu_s > \mu_k$$



Gambar 3.4: Gaya gesek selalu berlawanan arah dengan kecenderungan gerak.

Mengapa μ_s Selalu Lebih Besar dari μ_k ?

Pada saat benda diam, tonjolan-tonjolan mikroskopis di kedua permukaan memiliki waktu untuk "saling mengganjal" lebih dalam, bahkan membentuk ikatan molekuler sementara. Ketika benda mulai bergerak, kontak antar-tonjolan menjadi lebih singkat dan tidak sedalam saat diam, sehingga gaya gesek yang diperlukan untuk mempertahankan gerak menjadi lebih kecil dibandingkan gaya yang diperlukan untuk memulai gerak tersebut.

Gaya Pegas

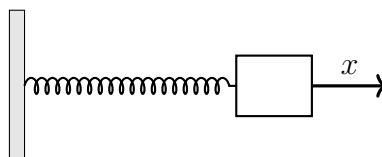
Pegas memiliki sifat elastis, yaitu dapat kembali ke bentuk semula setelah mengalami regangan atau tekanan.

Ketika pegas diregangkan atau ditekan, pegas memberikan gaya pemulih yang selalu berusaha mengembalikan pegas ke panjang keseimbangannya. Sifat ini dirumuskan dalam **Hukum Hooke**:

$$F = -kx$$

dengan

- F = gaya pegas (N),
- k = konstanta pegas (N/m),
- x = pertambahan panjang pegas (m).



Gambar 3.5: Pegas yang diregangkan sejauh x .

Makna Tanda Negatif pada Hukum Hooke

Tanda negatif pada $F = -kx$ memiliki makna fisis yang penting: gaya pegas selalu berlawanan arah dengan arah perpindahan ujung pegas. Jika pegas ditarik ke kanan (x

positif), gaya pegas akan menarik balik ke kiri. Sebaliknya, jika pegas ditekan ke kiri (x negatif), gaya pegas akan mendorong balik ke kanan. Karena sifat inilah, gaya pegas sering disebut sebagai **gaya pemulih** (*restoring force*) – sifat yang nantinya menjadi dasar penting dalam pembahasan **gerak harmonik sederhana**.

Catatan Penting: Hukum Hooke hanya berlaku selama pegas tidak diregangkan atau ditekan melebihi **batas elastisitasnya**. Jika batas tersebut terlampaui, pegas akan mengalami deformasi permanen dan tidak lagi kembali ke bentuk semula, sehingga hubungan $F = -kx$ tidak lagi berlaku.

3.2 Penerapan Hukum Newton

Hukum Newton tidak hanya digunakan untuk menjelaskan konsep gaya dan gerak, tetapi juga untuk menganalisis berbagai permasalahan fisika secara kuantitatif. Dalam praktiknya, suatu benda sering mengalami beberapa gaya yang bekerja secara bersamaan sehingga diperlukan analisis yang sistematis untuk menentukan gerak benda tersebut.

Penerapan Hukum Newton umumnya diawali dengan pembuatan diagram gaya bebas, kemudian menentukan resultan gaya yang bekerja pada benda, dan akhirnya menggunakan persamaan Hukum II Newton untuk memperoleh besaran yang dicari, seperti percepatan, tegangan tali, gaya normal, atau gaya gesek.

Pada bagian ini akan dibahas beberapa contoh penerapan Hukum Newton yang sering dijumpai dalam kehidupan sehari-hari dan dalam berbagai persoalan fisika. Sebelum itu, perlu ditegaskan bahwa hampir semua persoalan dinamika tingkat SMA diselesaikan dengan beberapa **asumsi penyederhanaan**, yaitu:

- **Tali ideal** – tali dianggap tidak bermassa dan tidak dapat mulur (*inextensible*), sehingga tegangan tali bernilai sama di setiap titik sepanjang tali.
- **Katrol ideal** – katrol dianggap tidak bermassa dan tidak memiliki gesekan pada sumbunya, sehingga katrol hanya berfungsi mengubah arah tali tanpa mengubah besar tegangannya.
- **Permukaan licin** – kecuali disebutkan secara eksplisit, sebagian kasus mengabaikan gaya gesek untuk menyederhanakan analisis awal.

Asumsi-asumsi ini akan disebutkan secara eksplisit pada setiap subbab agar tidak menimbulkan kesalahpahaman.

3.2.1 Langkah-Langkah Analisis Dinamika

Sebagian besar soal dinamika dapat diselesaikan menggunakan prosedur yang sama. Langkah-langkah berikut sangat dianjurkan sebelum melakukan perhitungan matematis.

1. Tentukan benda yang akan dianalisis.
2. Buat diagram gaya bebas (DGB).
3. Tentukan sistem koordinat yang sesuai.
4. Uraikan gaya yang membentuk sudut terhadap sumbu koordinat.
5. Hitung resultan gaya pada setiap sumbu.
6. Terapkan Hukum II Newton:

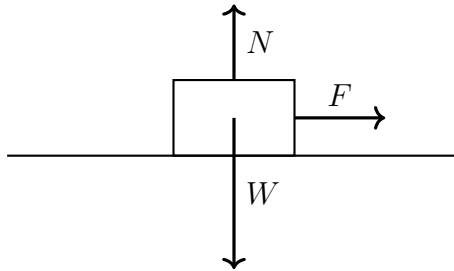
$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

7. Selesaikan persamaan untuk memperoleh besaran yang dicari.

Langkah-langkah tersebut berlaku untuk hampir semua persoalan dinamika, baik pada bidang datar, bidang miring, maupun sistem katrol.

3.2.2 Benda pada Bidang Datar Licin

Perhatikan sebuah balok bermassa m yang ditarik dengan gaya horizontal F pada permukaan datar yang **licin** (gaya gesek diabaikan).



Gambar 3.6: Balok pada bidang datar licin.

Karena benda tidak mengalami percepatan pada arah vertikal,

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow N - W = 0 \Rightarrow N = W = mg$$

Pada arah horizontal, gaya F merupakan satu-satunya gaya yang menyebabkan percepatan, sehingga berlaku

$$\sum F_x = ma \Rightarrow F = ma \Rightarrow a = \frac{F}{m} \quad (3.8)$$

Contoh Soal

Sebuah balok bermassa 2 kg ditarik dengan gaya horizontal sebesar 8 N pada lantai licin. Tentukan percepatan balok tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $m = 2 \text{ kg}$, $F = 8 \text{ N}$

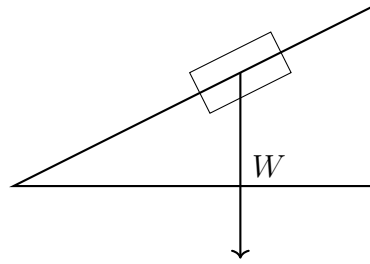
$$a = \frac{F}{m} = \frac{8}{2} = 4 \text{ m/s}^2$$

Balok bergerak dengan percepatan 4 m/s^2 searah gaya tarik.

3.2.3 Benda pada Bidang Miring

Pada bidang miring, gaya berat tidak lagi sejajar dengan sumbu koordinat sehingga perlu diuraikan menjadi dua komponen: komponen yang sejajar bidang miring dan komponen yang tegak lurus bidang miring.

Komponen gaya berat pada masing-masing arah adalah



Gambar 3.7: Balok pada bidang miring licin dengan sudut kemiringan θ .

$$W_{\parallel} = mg \sin \theta \quad (\text{sejajar bidang miring})$$

$$W_{\perp} = mg \cos \theta \quad (\text{tegak lurus bidang miring})$$

Pada arah tegak lurus bidang, benda tidak mengalami percepatan (benda tidak menembus atau melayang di atas bidang), sehingga gaya normal harus menyeimbangkan komponen gaya berat pada arah tersebut:

$$N = W_{\perp} = mg \cos \theta \quad (3.9)$$

Pada arah sejajar bidang (jika bidang **licin**, tanpa gaya gesek), komponen $W_{\parallel}$ menjadi satu-satunya gaya penyebab percepatan benda menuruni bidang miring:

$$\begin{aligned} \sum F_{\parallel} &= ma \\ mg \sin \theta &= ma \end{aligned}$$

$$a = g \sin \theta \quad (3.10)$$

Perhatikan bahwa gaya normal pada bidang miring **tidak sama** dengan gaya berat ($N \neq mg$), melainkan hanya sama dengan komponen tegak lurusnya ($N = mg \cos \theta$). Nilai N inilah yang nantinya digunakan untuk menghitung gaya gesek jika bidang miring tidak licin.

Contoh Soal

Sebuah balok bermassa 4 kg meluncur pada bidang miring licin dengan sudut kemiringan 30° . Tentukan percepatan balok dan besar gaya normal yang bekerja! ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

Penyelesaian:

Diketahui: $m = 4 \text{ kg}$, $\theta = 30^\circ$

Percepatan benda:

$$a = g \sin \theta = 10 \times \sin 30^\circ = 10 \times 0,5 = 5 \text{ m/s}^2$$

Gaya normal:

$$N = mg \cos \theta = 4 \times 10 \times \cos 30^\circ = 40 \times 0,87 \approx 34,6 \text{ N}$$

3.2.4 Gaya Gesek dalam Hukum Newton

Pada kondisi nyata, sebagian besar benda bergerak pada permukaan yang menimbulkan gaya gesek. Oleh karena itu, gaya gesek harus diperhitungkan dalam analisis dinamika. Sebelum benda bergerak, perlu dipastikan terlebih dahulu apakah gaya yang diberikan sudah cukup besar untuk membuat benda mulai bergerak.

Tahap 1 – Benda Belum Bergerak (Gesek Statis)

Ketika benda masih diam dan diberikan gaya F , gaya gesek yang bekerja adalah **gaya gesek statis** (f_s). Besarnya gaya gesek statis **menyesuaikan** dengan gaya F yang diberikan, selama nilainya belum melampaui batas maksimumnya:

$$f_s \leq \mu_s N, \quad f_{s,\text{maks}} = \mu_s N$$

Selama $F \leq f_{s,\text{maks}}$, benda akan **tetap diam** karena gaya gesek statis mampu mengimbangi gaya F sepenuhnya, sehingga $\sum F = 0$.

Tahap 2 – Benda Mulai Bergerak (Gesek Kinetis)

Begitu gaya F melampaui nilai $f_{s,\text{maks}}$, benda mulai bergerak dan gaya gesek yang bekerja berubah menjadi **gaya gesek kinetis** (f_k), yang besarnya **tetap** selama benda bergerak:

$$f_k = \mu_k N$$

Pada kondisi ini, Hukum II Newton diterapkan sebagai

$$\sum F = ma$$

$$F - f_k = ma$$

$$a = \frac{F - \mu_k N}{m} \quad (3.11)$$

Contoh Soal

Sebuah balok bermassa 5 kg berada di atas lantai dengan koefisien gesek statis $\mu_s = 0,4$ dan koefisien gesek kinetis $\mu_k = 0,3$. Balok ditarik dengan gaya horizontal $F = 25$ N. Tentukan apakah balok bergerak, dan jika bergerak, tentukan percepatannya! ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

Penyelesaian:

Diketahui: $m = 5 \text{ kg}$, $\mu_s = 0,4$, $\mu_k = 0,3$, $F = 25 \text{ N}$

Gaya normal: $N = mg = 5 \times 10 = 50 \text{ N}$

Gaya gesek statis maksimum:

$$f_{s,\text{maks}} = \mu_s N = 0,4 \times 50 = 20 \text{ N}$$

Karena $F = 25 \text{ N} > f_{s,\text{maks}} = 20 \text{ N}$, balok **mulai bergerak** dan gaya gesek yang bekerja adalah gaya gesek kinetis:

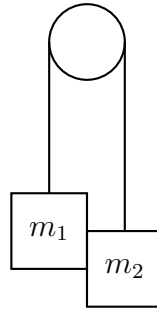
$$f_k = \mu_k N = 0,3 \times 50 = 15 \text{ N}$$

Percepatan balok:

$$a = \frac{F - f_k}{m} = \frac{25 - 15}{5} = \frac{10}{5} = 2 \text{ m/s}^2$$

3.2.5 Sistem Katrol Sederhana

Sistem katrol merupakan salah satu aplikasi penting Hukum Newton karena melibatkan lebih dari satu benda yang saling berinteraksi melalui tali. Pembahasan berikut menggunakan asumsi **tali ideal** (tak bermassa, tak mulur) dan **katrol ideal** (tak bermassa, tanpa gesekan), sehingga besar tegangan tali T sama di kedua sisi, dan besar percepatan kedua benda juga sama.



Gambar 3.8: Sistem katrol sederhana dengan $m_1 > m_2$.

Misalkan $m_1 > m_2$, sehingga m_1 bergerak turun dan m_2 bergerak naik dengan besar percepatan yang sama (a). Dengan meninjau gaya pada masing-masing benda secara terpisah:

Untuk massa m_1 (bergerak turun, sehingga gaya berat dikurangi tegangan tali menghasilkan percepatan ke bawah):

$$m_1 g - T = m_1 a$$

Untuk massa m_2 (bergerak naik, sehingga tegangan tali dikurangi gaya berat menghasilkan percepatan ke atas):

$$T - m_2 g = m_2 a$$

Dengan menjumlahkan kedua persamaan tersebut (sehingga T saling menghilangkan), diperoleh:

$$a = \frac{(m_1 - m_2)g}{m_1 + m_2} \quad (3.12)$$

Setelah nilai a diperoleh, besar tegangan tali T dapat dihitung dengan mensubstitusikan kembali nilai a ke salah satu persamaan awal, misalnya:

$$T = m_2(g + a)$$

Contoh Soal

Dua benda dihubungkan dengan tali melalui katrol ideal. Massa $m_1 = 6 \text{ kg}$ dan $m_2 = 4 \text{ kg}$. Tentukan percepatan sistem dan tegangan talinya! ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

Penyelesaian:

Diketahui: $m_1 = 6 \text{ kg}$, $m_2 = 4 \text{ kg}$

Percepatan sistem:

$$a = \frac{(m_1 - m_2)g}{m_1 + m_2} = \frac{(6 - 4) \times 10}{6 + 4} = \frac{20}{10} = 2 \text{ m/s}^2$$

Tegangan tali (menggunakan persamaan m_2):

$$T = m_2(g + a) = 4 \times (10 + 2) = 48 \text{ N}$$

3.2.6 Lift dan Berat Semu

Ketika seseorang berdiri di dalam lift yang bergerak dipercepat, gaya normal yang dirasakan tubuh tidak selalu sama dengan berat sebenarnya (mg). Gaya normal inilah yang dirasakan tubuh sebagai berat, sehingga disebut **berat semu**.

Untuk menentukan besar gaya normal pada lift, Hukum II Newton diterapkan pada arah vertikal, dengan memperhatikan **arah percepatan** lift – bukan hanya arah geraknya. Terdapat empat kemungkinan kasus yang perlu dibedakan dengan cermat:

Kasus 1 – Lift Bergerak ke Atas, Dipercepat

Percepatan searah dengan arah gerak (ke atas), sehingga:

$$N - mg = ma$$

$$N = m(g + a) \quad (3.13)$$

Berat semu **lebih besar** dari berat sebenarnya – inilah sebabnya tubuh terasa "lebih berat" saat lift baru mulai naik.

Kasus 2 – Lift Bergerak ke Atas, Diperlambat

Lift masih bergerak ke atas, tetapi kecepatannya berkurang karena akan berhenti, sehingga percepatan justru berarah ke bawah:

$$mg - N = ma$$

$$N = m(g - a) \quad (3.14)$$

Berat semu **lebih kecil** dari berat sebenarnya.

Kasus 3 – Lift Bergerak ke Bawah, Dipercepat

Lift bergerak ke bawah dan kelajuannya bertambah, sehingga percepatan berarah ke bawah:

$$mg - N = ma$$

$$N = m(g - a) \quad (3.15)$$

Berat semu **lebih kecil** dari berat sebenarnya – inilah sebabnya tubuh terasa ”lebih ringan” saat lift baru mulai turun.

Kasus 4 – Lift Bergerak ke Bawah, Diperlambat

Lift masih bergerak ke bawah, tetapi kelajuannya berkurang karena akan berhenti, sehingga percepatan justru berarah ke atas:

$$N - mg = ma$$

$$N = m(g + a) \quad (3.16)$$

Berat semu **lebih besar** dari berat sebenarnya.

Kasus Khusus – Lift Jatuh Bebas

Jika tali penggantung lift putus sehingga lift jatuh bebas, maka $a = g$ (searah dengan g , ke bawah), sehingga

$$N = m(g - a) = m(g - g) = 0$$

Keadaan ini disebut **kondisi tanpa bobot** (*weightlessness*). Perlu ditegaskan bahwa pada kondisi ini gaya berat (mg) **tetap ada** dan tidak hilang – yang bernilai nol adalah **gaya normal**, karena lantai lift tidak lagi memberikan gaya dorong kepada tubuh. Tubuh dan lift jatuh bersama-sama dengan percepatan yang sama, sehingga tubuh tidak lagi menekan lantai lift.

Tabel Ringkasan Kasus Lift

Tabel 3.1: Empat Kasus Gerak Lift dan Berat Semu

Keadaan Gerak Lift	Arah a	Berat Semu
Naik, dipercepat	ke atas	$N = m(g + a)$ (lebih besar)
Naik, diperlambat	ke bawah	$N = m(g - a)$ (lebih kecil)
Turun, dipercepat	ke bawah	$N = m(g - a)$ (lebih kecil)
Turun, diperlambat	ke atas	$N = m(g + a)$ (lebih besar)

Contoh Soal

Seseorang bermassa 60 kg berdiri di dalam lift yang bergerak ke atas dengan percepatan 2 m/s^2 . Tentukan gaya normal yang dialami orang tersebut! ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

Penyelesaian:

Diketahui: $m = 60 \text{ kg}$, $a = 2 \text{ m/s}^2$ (lift naik dipercepat, sehingga a searah ke atas)

$$N = m(g + a) = 60 \times (10 + 2) = 720 \text{ N}$$

Bandingkan dengan berat sebenarnya $W = mg = 600 \text{ N}$ – orang tersebut merasakan berat semu yang **lebih besar** 120 N dibandingkan beratnya saat lift diam.

3.2.7 Ringkasan

Tabel 3.2: Persamaan Penting Penerapan Hukum Newton

Kasus	Persamaan
Bidang datar licin	$a = \frac{F}{m}$
Bidang miring licin (sejajar)	$a = g \sin \theta$
Bidang miring (gaya normal)	$N = mg \cos \theta$
Gesek statis maksimum	$f_{s,\text{maks}} = \mu_s N$
Gesek kinetis	$f_k = \mu_k N$
Benda ditarik dengan gesekan	$a = \frac{F - \mu_k N}{m}$
Katrol sederhana	$a = \frac{(m_1 - m_2)g}{m_1 + m_2}$
Lift naik dipercepat / turun diperlambat	$N = m(g + a)$
Lift naik diperlambat / turun dipercepat	$N = m(g - a)$
Lift jatuh bebas	$N = 0$

Catatan Penting: Pada setiap persoalan dinamika, kesalahan yang paling sering terjadi bukan pada perhitungan matematis, melainkan pada **kesalahan menentukan arah percepatan** dan **lupa memeriksa asumsi** yang berlaku (licin atau tidak, tali ideal atau tidak). Oleh karena itu, diagram gaya bebas yang benar dan pemahaman arah percepatan menjadi kunci utama dalam menyelesaikan soal-soal penerapan Hukum Newton.

3.3 Momentum dan Impuls

Pada pembahasan sebelumnya telah dipelajari hubungan antara gaya dan gerak melalui Hukum Newton. Hukum-hukum tersebut menjelaskan bagaimana gaya dapat menyebabkan perubahan kecepatan suatu benda. Namun, dalam banyak peristiwa fisika, terutama yang melibatkan tumbukan, pendekatan menggunakan gaya sering kali sulit dilakukan karena gaya yang bekerja sangat besar tetapi berlangsung dalam waktu yang sangat singkat.

Sebagai contoh, ketika bola ditendang, raket memukul bola tenis, atau kendaraan mengalami tabrakan, gaya yang bekerja berubah-ubah terhadap waktu dan sulit diukur secara langsung. Untuk menganalisis peristiwa semacam ini, fisika menggunakan besaran yang disebut **momentum** dan **impuls**.

Momentum menggambarkan kecenderungan suatu benda untuk mempertahankan keadaan geraknya, sedangkan impuls menyatakan pengaruh gaya yang bekerja selama selang waktu tertentu. Kedua konsep ini menjadi dasar dalam memahami berbagai fenomena tumbukan dan menghasilkan salah satu hukum penting dalam fisika, yaitu **Hukum Kekekalan Momentum**.

Pada bagian ini akan dipelajari pengertian momentum dan impuls, hubungan antara keduanya, hukum kekekalan momentum, serta penerapannya pada berbagai jenis tumbukan.

3.3.1 Momentum

Dalam kehidupan sehari-hari, kita dapat merasakan bahwa benda yang bergerak cepat atau memiliki massa besar cenderung lebih sulit dihentikan dibandingkan benda yang bergerak lambat atau bermassa kecil. Sebagai contoh, menghentikan bola tenis yang bergerak tentu lebih mudah dibandingkan menghentikan sepeda motor yang bergerak dengan kecepatan yang sama. Fenomena ini menunjukkan bahwa gerak suatu benda tidak hanya dipengaruhi oleh kecepatannya, tetapi juga oleh massanya.

Untuk menyatakan kuantitas gerak suatu benda, fisika menggunakan besaran yang disebut **momentum**. Momentum didefinisikan sebagai hasil kali massa benda dengan kecepatan benda tersebut.

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (3.17)$$

dengan:

- $\vec{p}$ = momentum (kg m/s)
- m = massa benda (kg)
- $\vec{v}$ = kecepatan benda (m/s)

Momentum merupakan besaran vektor sehingga memiliki besar dan arah. Arah momentum selalu sama dengan arah kecepatan benda.

Semakin besar massa atau semakin besar kecepatan suatu benda, semakin besar pula momentumnya. Oleh karena itu, benda yang memiliki momentum besar akan lebih sulit dihentikan dibandingkan benda yang memiliki momentum kecil.

Contoh Soal

Sebuah mobil bermassa 1.000 kg bergerak dengan kelajuan 20 m/s. Tentukan besar momentum mobil tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $m = 1.000$ kg, $v = 20$ m/s

$$p = mv = 1.000 \times 20 = 20.000 \text{ kg m/s}$$

3.3.2 Impuls

Ketika sebuah gaya bekerja pada suatu benda selama selang waktu tertentu, gaya tersebut dapat mengubah keadaan gerak benda. Pengaruh gaya yang bekerja dalam interval waktu tertentu disebut **impuls**.

Secara matematis, impuls didefinisikan sebagai hasil kali gaya dengan lamanya gaya tersebut bekerja.

$$\vec{I} = \vec{F}\Delta t \quad (3.18)$$

dengan:

- $\vec{I}$ = impuls (N.s)
- $\vec{F}$ = gaya (N)
- Δt = selang waktu (s)

Karena gaya merupakan besaran vektor, impuls juga merupakan besaran vektor. Arah impuls selalu sama dengan arah gaya yang bekerja.

Konsep impuls menjelaskan mengapa memperbesar waktu tumbukan dapat memperkecil gaya yang dirasakan. Untuk impuls yang sama (perubahan momentum yang sama), gaya yang dirasakan akan jauh lebih kecil jika waktu kontak diperpanjang. Prinsip ini dimanfaatkan pada berbagai perangkat keselamatan seperti airbag, helm, dan sabuk pengaman kendaraan – semuanya bekerja dengan cara memperpanjang waktu tumbukan agar gaya yang dialami tubuh menjadi lebih kecil.

Contoh Soal

Sebuah bola bermassa 0,2 kg dipukul dengan gaya 50 N selama 0,02 s. Tentukan besar impuls yang bekerja pada bola tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $F = 50 \text{ N}$, $\Delta t = 0,02 \text{ s}$

$$I = F\Delta t = 50 \times 0,02 = 1 \text{ N.s}$$

3.3.3 Hubungan Impuls dan Momentum

Hubungan antara impuls dan momentum dapat diturunkan dari Hukum II Newton.

Menurut Hukum II Newton,

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

dan

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

sehingga diperoleh

$$\vec{F} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

Mengalikan kedua ruas dengan Δt menghasilkan

$$\vec{F}\Delta t = m\Delta \vec{v}$$

Karena

$$\vec{I} = \vec{F}\Delta t$$

dan

$$m\Delta \vec{v} = m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1 = \Delta \vec{p},$$

maka diperoleh

$$\vec{I} = \Delta \vec{p} \quad (3.19)$$

Persamaan tersebut menyatakan bahwa impuls yang bekerja pada suatu benda sama dengan perubahan momentum benda tersebut. Pernyataan ini dikenal sebagai **teorema impuls-momentum**.

Contoh Soal

Sebuah bola bermassa 0,5 kg mula-mula bergerak dengan kelajuan 4 m/s. Setelah dipukul, bola bergerak berlawanan arah dengan kelajuan 6 m/s. Tentukan besar impuls yang bekerja pada bola!

Penyelesaian:

Diketahui: $m = 0,5 \text{ kg}$, $v_1 = 4 \text{ m/s}$, $v_2 = -6 \text{ m/s}$ (tanda negatif karena arahnya berlawanan dengan arah semula)

$$I = \Delta p = m(v_2 - v_1) = 0,5 \times (-6 - 4) = 0,5 \times (-10) = -5 \text{ N.s}$$

Besar impuls adalah 5 N.s, dengan tanda negatif menunjukkan arahnya berlawanan dengan arah gerak bola semula.

3.3.4 Hukum Kekekalan Momentum

Tinjau dua benda yang saling bertumbukan. Selama tumbukan, kedua benda saling memberikan gaya satu sama lain. Menurut **Hukum III Newton**, gaya yang diberikan benda pertama kepada benda kedua akan sama besar tetapi berlawanan arah dengan gaya yang diberikan benda kedua kepada benda pertama. Karena kedua gaya ini bekerja dalam selang waktu yang sama, impuls yang dialami kedua benda juga sama besar namun berlawanan arah, sehingga total perubahan momentum sistem sama dengan nol.

Inilah dasar mengapa, dalam suatu **sistem terisolasi** – yaitu sistem yang tidak dipengaruhi oleh gaya dari luar sistem (resultan gaya eksternal sama dengan nol) – jumlah momentum total sistem akan tetap, meskipun terjadi interaksi (seperti tumbukan) di antara benda-benda penyusun sistem tersebut.

Istilah “sistem terisolasi” digunakan untuk membedakan dengan istilah “sistem tertutup” yang dalam termodinamika memiliki makna berbeda, yaitu sistem yang tidak mengalami perpindahan massa tetapi masih dapat mengalami perpindahan energi (misalnya dalam bentuk kalor) dengan lingkungannya.

Pernyataan tersebut dikenal sebagai **Hukum Kekekalan Momentum**.

Secara matematis,

$$\sum \vec{p}_{\text{awal}} = \sum \vec{p}_{\text{akhir}} \quad (3.20)$$

Untuk dua benda yang bertumbukan,

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2 \quad (3.21)$$

dengan:

- v_1, v_2 = kecepatan sebelum tumbukan
- v'_1, v'_2 = kecepatan sesudah tumbukan

Hukum kekekalan momentum merupakan prinsip utama dalam analisis berbagai jenis tumbukan.

Konvensi Tanda pada Tumbukan Satu Dimensi

Karena momentum dan kecepatan merupakan besaran vektor, penentuan tanda menjadi sangat penting dalam penyelesaian soal tumbukan satu dimensi (segaris). Sebelum menyelesaikan soal, tentukan terlebih dahulu satu arah sebagai arah positif (biasanya searah gerak benda pertama). Benda yang bergerak searah dengan arah positif tersebut diberi tanda positif, sedangkan benda yang bergerak berlawanan arah diberi tanda negatif. Kesalahan paling umum dalam soal tumbukan adalah lupa memberi tanda negatif pada benda yang bergerak berlawanan arah.

Contoh Soal

Dua benda bergerak saling berhadapan pada satu garis lurus. Benda pertama bermassa 2 kg bergerak ke kanan dengan kelajuan 3 m/s, dan benda kedua bermassa 1 kg bergerak ke kiri dengan kelajuan 4 m/s. Setelah tumbukan, benda pertama bergerak ke kanan dengan kelajuan 1 m/s. Tentukan kecepatan benda kedua setelah tumbukan!

Penyelesaian:

Tetapkan arah ke kanan sebagai arah positif.

Diketahui: $m_1 = 2 \text{ kg}$, $v_1 = 3 \text{ m/s}$, $m_2 = 1 \text{ kg}$, $v_2 = -4 \text{ m/s}$, $v'_1 = 1 \text{ m/s}$

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

$$(2)(3) + (1)(-4) = (2)(1) + (1)v'_2$$

$$6 - 4 = 2 + v'_2$$

$$v'_2 = 0 \text{ m/s}$$

Benda kedua diam setelah tumbukan.

3.3.5 Koefisien Restitusi: Jembatan antara Tiga Jenis Tumbukan

Pada peristiwa tumbukan, hukum kekekalan momentum selalu berlaku selama sistem terisolasi. Namun, energi kinetik sistem **tidak selalu kekal** – sebagian energi kinetik dapat berubah menjadi bentuk energi lain, seperti panas, bunyi, atau energi deformasi benda. Besarnya energi kinetik yang "hilang" selama tumbukan ditentukan oleh sifat elastisitas benda-benda yang bertumbukan, yang secara kuantitatif diukur melalui suatu besaran yang disebut **koefisien restitusi** (e).

Koefisien restitusi didefinisikan sebagai perbandingan antara kelajuan relatif benda sesudah tumbukan dan kelajuan relatif benda sebelum tumbukan, dengan tanda negatif untuk menunjukkan bahwa keduanya saling mendekat sebelum tumbukan dan saling menjauh sesudahnya:

$$e = -\frac{v'_1 - v'_2}{v_1 - v_2} \quad (3.22)$$

Nilai e berkisar antara 0 dan 1, dan nilai inilah yang menjadi **dasar klasifikasi** ketiga jenis tumbukan yang akan dibahas pada subbab-subbab berikutnya:

Tabel 3.3: Klasifikasi Tumbukan Berdasarkan Koefisien Restitusi

Jenis Tumbukan	Nilai e	Keterangan Energi Kinetik
Lenting sempurna	$e = 1$	Energi kinetik total kekal
Lenting sebagian	$0 < e < 1$	Sebagian energi kinetik hilang
Tidak lenting sama sekali	$e = 0$	Kehilangan energi kinetik maksimum

Dengan kerangka berpikir ini, ketiga jenis tumbukan yang akan dibahas selanjutnya sebenarnya merupakan **satu spektrum yang sama**, dibedakan hanya oleh seberapa besar energi kinetik yang dipertahankan selama proses tumbukan berlangsung.

3.3.6 Tumbukan Lenting Sempurna

Tumbukan lenting sempurna adalah tumbukan yang memenuhi dua hukum sekaligus, yaitu:

1. Momentum total kekal ($e = 1$).
2. Energi kinetik total kekal.

Secara matematis, kedua hukum tersebut dituliskan sebagai

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

dan

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v'^2_1 + \frac{1}{2} m_2 v'^2_2$$

Menurunkan Persamaan Kecepatan Akhir

Untuk menyelesaikan soal tumbukan lenting sempurna secara praktis, kedua persamaan di atas dapat digabungkan dan disederhanakan (dengan memanfaatkan $e = 1$ pada persamaan koefisien restitusi) sehingga diperoleh rumus eksplisit untuk kecepatan masing-masing benda setelah tumbukan:

$$v'_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2 v_2}{m_1 + m_2} \quad (3.23)$$

$$v_2' = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1v_1}{m_1 + m_2} \quad (3.24)$$

Contoh yang mendekati tumbukan lenting sempurna adalah tumbukan antarbola biliar atau tumbukan molekul gas ideal.

Contoh Soal

Bola A bermassa 2 kg bergerak dengan kelajuan 6 m/s menumbuk bola B bermassa 4 kg yang mula-mula diam. Jika tumbukan bersifat lenting sempurna, tentukan kecepatan masing-masing bola setelah tumbukan!

Penyelesaian:

Diketahui: $m_1 = 2 \text{ kg}$, $v_1 = 6 \text{ m/s}$, $m_2 = 4 \text{ kg}$, $v_2 = 0$

$$v_1' = \frac{(2 - 4)(6) + 2(4)(0)}{2 + 4} = \frac{-12 + 0}{6} = -2 \text{ m/s}$$

$$v_2' = \frac{(4 - 2)(0) + 2(2)(6)}{2 + 4} = \frac{0 + 24}{6} = 4 \text{ m/s}$$

Setelah tumbukan, bola A bergerak berlawanan arah dengan kelajuan 2 m/s, sedangkan bola B bergerak searah gerak awal bola A dengan kelajuan 4 m/s.

3.3.7 Tumbukan Lenting Sebagian

Pada tumbukan lenting sebagian, momentum total sistem tetap kekal, tetapi sebagian energi kinetik berubah menjadi bentuk energi lain seperti panas, bunyi, atau deformasi, sesuai dengan nilai koefisien restitusi yang berada pada rentang $0 < e < 1$.

Karena energi kinetik tidak seluruhnya kekal, maka berlaku

$$E_{k,\text{akhir}} < E_{k,\text{awal}}$$

Penyelesaian soal pada tumbukan lenting sebagian menggunakan dua persamaan sekaligus, yaitu hukum kekekalan momentum dan persamaan koefisien restitusi (dengan nilai e yang diketahui dari soal), karena energi kinetik tidak lagi dapat digunakan sebagai persamaan kekekalan.

Sebagian besar tumbukan yang terjadi dalam kehidupan sehari-hari termasuk kategori tumbukan lenting sebagian.

Contoh Soal

Bola bermassa 0,4 kg dijatuhkan dari ketinggian tertentu dan menumbuk lantai dengan kelajuan 5 m/s, kemudian memantul kembali dengan kelajuan 3 m/s. Tentukan koefisien restitusi tumbukan antara bola dan lantai!

Penyelesaian:

Karena rantai tidak bergerak ($v_2 = v'_2 = 0$), persamaan koefisien restitusi menjadi

$$e = -\frac{v'_1 - v'_2}{v_1 - v_2} = -\frac{(-3) - 0}{5 - 0} = \frac{3}{5} = 0,6$$

(Tanda kecepatan pantul -3 m/s menunjukkan arah berlawanan dengan arah jatuh bola.) Karena $0 < e < 1$, tumbukan ini tergolong lenting sebagian.

3.3.8 Tumbukan Tidak Lenting Sama Sekali

Tumbukan tidak lenting sama sekali merupakan tumbukan dengan $e = 0$, yaitu tumbukan yang menyebabkan benda-benda yang bertumbukan menyatu setelah tumbukan dan bergerak bersama dengan kecepatan yang sama.

Momentum sistem tetap kekal,

$$m_1v_1 + m_2v_2 = (m_1 + m_2)v'$$

sehingga kecepatan setelah tumbukan diberikan oleh

$$v' = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2} \quad (3.25)$$

Pada tumbukan jenis ini, kehilangan energi kinetik mencapai nilai maksimum dibandingkan jenis tumbukan lainnya.

Contoh tumbukan tidak lenting sama sekali adalah peluru yang menancap pada balok kayu atau dua gerbong kereta yang saling bertabrakan kemudian bergerak bersama.

Contoh Soal

Sebuah peluru bermassa $0,02$ kg ditembakkan dengan kelajuan 200 m/s ke arah balok kayu bermassa $1,98$ kg yang diam tergantung bebas. Peluru bersarang di dalam balok. Tentukan kelajuan balok beserta peluru setelah tumbukan!

Penyelesaian:

Diketahui: $m_1 = 0,02$ kg, $v_1 = 200$ m/s, $m_2 = 1,98$ kg, $v_2 = 0$

$$v' = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2} = \frac{(0,02)(200) + (1,98)(0)}{0,02 + 1,98} = \frac{4}{2} = 2 \text{ m/s}$$

Balok beserta peluru bergerak bersama dengan kelajuan 2 m/s searah gerak peluru semula.

3.3.9 Ringkasan

Tabel 3.4: Persamaan Penting Momentum dan Impuls

Konsep	Persamaan
Momentum	$\vec{p} = m\vec{v}$
Impuls	$\vec{I} = \vec{F}\Delta t$
Teorema impuls-momentum	$\vec{I} = \Delta\vec{p}$
Hukum kekekalan momentum	$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v'_1 + m_2v'_2$
Koefisien restitusi	$e = -\frac{v'_1 - v'_2}{v_1 - v_2}$
Tumbukan lenting sempurna ($e = 1$)	$v'_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2v_2}{m_1 + m_2}$
Tumbukan tidak lenting sama sekali ($e = 0$)	$v' = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2}$

Catatan Penting: Hukum kekekalan momentum berlaku pada seluruh jenis tumbukan, selama sistem bersifat terisolasi dari gaya luar. Yang membedakan ketiga jenis tumbukan bukanlah berlaku atau tidaknya hukum kekekalan momentum, melainkan **seberapa besar energi kinetik sistem yang dipertahankan**, yang dinyatakan secara kuantitatif melalui koefisien restitusi (e). Kesalahan paling umum yang dilakukan siswa adalah lupa menentukan tanda kecepatan pada benda yang bergerak berlawanan arah – pastikan arah positif ditetapkan terlebih dahulu sebelum substitusi nilai ke dalam persamaan.

3.4 Usaha dan Energi

Pada pembahasan sebelumnya, gerak suatu benda dianalisis menggunakan Hukum Newton dengan meninjau gaya-gaya yang bekerja pada setiap saat. Pendekatan ini sangat efektif untuk kasus-kasus sederhana, tetapi menjadi rumit ketika gaya yang bekerja berubah-ubah terhadap posisi, atau ketika lintasan benda berbentuk kurva yang kompleks.

Sebagai alternatif, fisika menyediakan pendekatan lain yang disebut pendekatan **usaha dan energi**. Pendekatan ini tidak meninjau gerak benda dari waktu ke waktu secara rinci, melainkan membandingkan keadaan benda pada dua titik berbeda – yaitu keadaan awal dan keadaan akhir – melalui besaran skalar yang disebut **energi**. Karena energi merupakan besaran skalar (tidak memiliki arah), perhitungan dengan pendekatan ini sering jauh lebih sederhana dibandingkan analisis gaya menggunakan Hukum Newton, terutama untuk lintasan yang rumit.

Konsep kunci yang menjembatani gaya dan energi disebut **usaha**. Usaha menyatakan besarnya "transfer energi" yang terjadi ketika suatu gaya menyebabkan perpindahan pada benda. Pada bagian ini akan dipelajari konsep usaha, dua bentuk energi mekanik (energi kinetik dan energi potensial), hukum kekekalan energi mekanik, serta besaran daya yang menyatakan kecepatan suatu usaha dilakukan.

3.4.1 Konsep Usaha

Dalam percakapan sehari-hari, kata "usaha" sering digunakan untuk menyatakan segala bentuk upaya, termasuk upaya yang tidak menghasilkan perpindahan sama sekali – misalnya seseorang yang mendorong tembok dengan sekuat tenaga namun tembok tidak bergeser sedikit pun, biasanya tetap dikatakan "berusaha". Namun, dalam fisika, **usaha** (*work*) memiliki definisi yang jauh lebih ketat dan spesifik.

Usaha didefinisikan sebagai hasil kali antara gaya yang bekerja pada suatu benda dengan perpindahan yang dialami benda tersebut, pada arah yang sejajar dengan gaya.

Definisi ini memiliki konsekuensi penting: jika tidak terjadi perpindahan sama sekali, usaha yang dilakukan bernilai **nol**, berapa pun besar gaya yang diberikan. Inilah sebabnya seseorang yang mendorong tembok kokoh tanpa membuatnya bergeser, secara fisika, tidak melakukan usaha sama sekali – meskipun ia mengeluarkan energi secara biologis dan merasa lelah.

Usaha oleh Gaya Searah Perpindahan

Kasus paling sederhana terjadi ketika gaya F bekerja searah dengan perpindahan s benda. Pada kondisi ini, usaha dirumuskan sebagai

$$W = F \cdot s \quad (3.26)$$

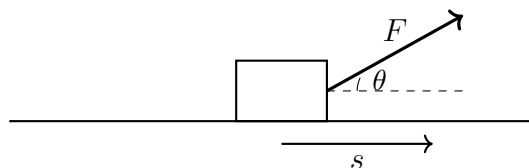
dengan:

- W = usaha (joule, J)
- F = gaya (N)
- s = perpindahan (m)

Satu joule didefinisikan sebagai usaha yang dilakukan oleh gaya sebesar 1 N yang menyebabkan perpindahan sejauh 1 m pada arah yang sama dengan gaya tersebut: $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Usaha oleh Gaya yang Membentuk Sudut

Pada kenyataannya, gaya yang bekerja pada suatu benda tidak selalu searah dengan arah perpindahannya. Misalnya, seseorang menarik koper beroda menggunakan tali yang membentuk sudut θ terhadap arah gerak koper. Pada kasus seperti ini, hanya **komponen gaya yang sejajar dengan perpindahan** yang menghasilkan usaha, sedangkan komponen gaya yang tegak lurus perpindahan tidak menghasilkan usaha sama sekali.



Gambar 3.9: Gaya F membentuk sudut θ terhadap arah perpindahan s .

Secara matematis, usaha dirumuskan sebagai

$$W = F \cos \theta \cdot s \quad (3.27)$$

dengan θ adalah sudut yang dibentuk antara arah gaya F dan arah perpindahan s . Persamaan ini sebenarnya merupakan bentuk umum, sebab ketika $\theta = 0^\circ$ (gaya searah perpindahan), $\cos \theta = 1$, sehingga persamaan ini akan kembali menjadi $W = Fs$ seperti kasus sebelumnya.

Nilai Usaha: Positif, Negatif, dan Nol

Berdasarkan rumus $W = F \cos \theta \cdot s$, usaha dapat bernilai positif, negatif, atau nol, bergantung pada sudut θ :

- **Usaha positif** ($0^\circ \leq \theta < 90^\circ$) terjadi ketika komponen gaya searah dengan perpindahan, sehingga gaya tersebut "menambah" energi gerak benda. Contohnya gaya dorong yang menyebabkan benda bergerak semakin cepat.
- **Usaha negatif** ($90^\circ < \theta \leq 180^\circ$) terjadi ketika komponen gaya berlawanan arah dengan perpindahan, sehingga gaya tersebut "mengurangi" energi gerak benda. Contohnya gaya gesek yang selalu melawan arah gerak benda.
- **Usaha nol** ($\theta = 90^\circ$) terjadi ketika gaya tegak lurus terhadap arah perpindahan. Contoh klasik adalah gaya normal dan gaya berat pada benda yang bergerak pada bidang datar – keduanya tegak lurus terhadap arah gerak benda, sehingga tidak melakukan usaha sama sekali, betapa pun besar nilainya.

Usaha oleh Beberapa Gaya (Usaha Total)

Jika pada suatu benda bekerja lebih dari satu gaya, usaha total dapat dihitung dengan dua cara yang ekuivalen: menjumlahkan usaha yang dilakukan oleh setiap gaya secara individual, atau menghitung usaha yang dilakukan oleh resultan gaya yang bekerja pada benda:

$$W_{\text{total}} = \sum W_i = F_{\text{resultan}} \cdot s \quad (3.28)$$

Usaha pada Gaya yang Berubah (Luas di Bawah Grafik F - s)

Rumus $W = Fs$ hanya berlaku jika gaya F bernilai **konstan** selama perpindahan berlangsung. Pada kenyataannya, banyak gaya yang nilainya berubah terhadap posisi, misalnya gaya pegas. Untuk kasus semacam ini, usaha dapat dihitung sebagai **luas daerah di bawah grafik F terhadap s** :

$$W = \int F ds$$

Pemahaman ini penting karena akan digunakan kembali saat menurunkan rumus energi potensial pegas pada subbab berikutnya.

Contoh Soal

Sebuah balok ditarik dengan gaya 50 N yang membentuk sudut 60° terhadap bidang datar, sehingga balok berpindah sejauh 8 m. Tentukan usaha yang dilakukan oleh gaya tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $F = 50 \text{ N}$, $\theta = 60^\circ$, $s = 8 \text{ m}$

$$W = F \cos \theta \cdot s = 50 \times \cos 60^\circ \times 8 = 50 \times 0,5 \times 8 = 200 \text{ J}$$

3.4.2 Energi Kinetik

Setiap benda yang bergerak memiliki kemampuan untuk melakukan usaha terhadap benda lain yang bersentuhan dengannya – misalnya bola bowling yang bergerak dapat menjektuhkan pin-pin di depannya. Kemampuan ini disebut sebagai **energi**, dan secara spesifik, energi yang dimiliki benda akibat gerakannya disebut **energi kinetik**.

Menurunkan Rumus Energi Kinetik

Rumus energi kinetik dapat diturunkan dengan meninjau usaha yang menyebabkan benda berubah kelajuan. Tinjau sebuah benda bermassa m yang awalnya bergerak dengan kelajuan v_1 , kemudian dikenai gaya F searah gerak benda sehingga kelajuannya berubah menjadi v_2 setelah menempuh perpindahan s .

Menurut Hukum II Newton, $F = ma$. Berdasarkan persamaan GLBB yang telah dipelajari sebelumnya,

$$v_2^2 = v_1^2 + 2as \quad \Rightarrow \quad a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2s}$$

Substitusi ke dalam rumus usaha $W = Fs = mas$:

$$W = m \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2s} \right) s = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

Ruas kanan persamaan ini menunjukkan adanya besaran berbentuk $\frac{1}{2}mv^2$ pada keadaan awal dan akhir. Besaran inilah yang didefinisikan sebagai **energi kinetik** (E_k):

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.29)$$

dengan:

- E_k = energi kinetik (J)
- m = massa benda (kg)
- v = kelajuan benda (m/s)

Karena v^2 selalu bernilai positif (atau nol), energi kinetik **selalu bernilai positif atau nol**, tidak pernah negatif – berbeda dengan usaha yang dapat bernilai negatif.

Teorema Usaha-Energi

Hasil penurunan di atas dapat dituliskan kembali sebagai

$$W_{\text{total}} = E_{k,2} - E_{k,1} = \Delta E_k \quad (3.30)$$

Persamaan ini dikenal sebagai **teorema usaha-energi**, yang menyatakan bahwa **usaha total** yang dilakukan pada suatu benda sama dengan **perubahan energi kinetik** benda tersebut. Teorema ini berlaku secara umum, bahkan untuk gaya yang berubah-ubah sepanjang lintasan, sehingga menjadi salah satu alat analisis paling ampuh dalam mekanika.

Contoh Soal

Sebuah mobil bermassa 800 kg mula-mula bergerak dengan kelajuan 10 m/s, kemudian direm sehingga kelajuannya berkurang menjadi 4 m/s. Tentukan usaha yang dilakukan oleh gaya pengereman!

Penyelesaian:

Diketahui: $m = 800 \text{ kg}$, $v_1 = 10 \text{ m/s}$, $v_2 = 4 \text{ m/s}$

$$E_{k,1} = \frac{1}{2}(800)(10)^2 = 40.000 \text{ J}$$

$$E_{k,2} = \frac{1}{2}(800)(4)^2 = 6.400 \text{ J}$$

$$W = E_{k,2} - E_{k,1} = 6.400 - 40.000 = -33.600 \text{ J}$$

Usaha bernilai negatif karena gaya pengereman berlawanan arah dengan gerak mobil, sehingga mengurangi energi kinetiknya.

3.4.3 Energi Potensial

Berbeda dengan energi kinetik yang berkaitan dengan gerak benda, **energi potensial** adalah energi yang **tersimpan** pada suatu benda akibat posisi atau keadaannya, dan berpotensi diubah menjadi bentuk energi lain (misalnya energi kinetik) di masa mendatang. Pada subbab ini akan dibahas dua jenis energi potensial yang paling umum dijumpai: energi potensial gravitasi dan energi potensial pegas.

Energi Potensial Gravitasi

Sebuah benda yang berada pada ketinggian tertentu di atas suatu acuan (misalnya permukaan tanah) memiliki potensi untuk melakukan usaha ketika benda tersebut jatuh – contohnya buah kelapa yang jatuh dari pohon dapat memberikan dampak (usaha) pada benda yang ditimpanya.

Energi potensial gravitasi dapat diturunkan dengan meninjau usaha yang diperlukan untuk mengangkat benda bermassa m setinggi h melawan gaya berat mg (dengan kelajuan konstan, sehingga seluruh usaha tersimpan sebagai energi potensial, bukan energi kinetik):

$$W = F \cdot h = mg \cdot h$$

Usaha yang "tersimpan" inilah yang didefinisikan sebagai energi potensial gravitasi:

$$E_p = mgh \quad (3.31)$$

dengan:

- E_p = energi potensial gravitasi (J)
- m = massa benda (kg)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- h = ketinggian benda dari acuan (m)

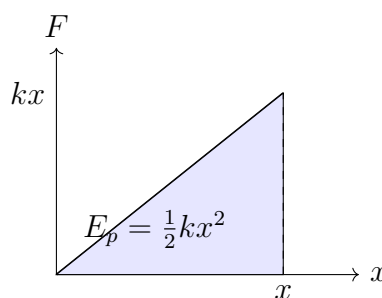
Energi Potensial Bergantung pada Acuan

Berbeda dengan energi kinetik, nilai energi potensial gravitasi **bergantung pada pemilihan titik acuan** ($h = 0$). Sebagai contoh, sebuah buku di atas meja memiliki energi potensial yang berbeda jika diukur dari lantai dibandingkan jika diukur dari atas meja itu sendiri. Meskipun demikian, **perubahan** energi potensial (ΔE_p) antara dua titik akan selalu bernilai sama, tidak peduli acuan mana yang dipilih – sehingga dalam praktiknya, yang benar-benar bermakna secara fisis adalah perubahan energi potensial, bukan nilai mutlaknya.

Energi Potensial Pegas

Pegas yang diregangkan atau ditekan menyimpan energi yang dapat dilepaskan kembali ketika pegas tersebut dibebaskan – inilah yang disebut **energi potensial pegas** atau energi potensial elastis.

Berbeda dengan gaya berat, gaya pegas **tidak konstan**, melainkan berubah sebanding dengan pertambahan panjangnya sesuai Hukum Hooke ($F = kx$). Oleh karena itu, usaha untuk meregangkan pegas tidak dapat dihitung dengan $W = Fx$ secara langsung, melainkan harus dihitung sebagai **luas daerah di bawah grafik F terhadap x** (sesuai prinsip yang telah disinggung pada subbab Usaha sebelumnya).



Gambar 3.10: Luas daerah segitiga di bawah grafik F terhadap x merepresentasikan energi potensial pegas.

Karena grafik F terhadap x berbentuk garis lurus melalui titik asal, luas daerah di bawahnya berbentuk segitiga dengan alas x dan tinggi kx , sehingga

$$E_p = \frac{1}{2} \times \text{alas} \times \text{tinggi} = \frac{1}{2}(x)(kx)$$

$$E_p = \frac{1}{2} kx^2 \quad (3.32)$$

dengan:

- E_p = energi potensial pegas (J)
- k = konstanta pegas (N/m)
- x = pertambahan panjang pegas dari posisi keseimbangan (m)

Contoh Soal

Sebuah benda bermassa 2 kg berada pada ketinggian 5 m di atas tanah. Tentukan energi potensial gravitasi benda tersebut! ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

Penyelesaian:

$$E_p = mgh = (2)(10)(5) = 100 \text{ J}$$

3.4.4 Energi Mekanik

Pada banyak peristiwa fisika, suatu benda dapat memiliki energi kinetik dan energi potensial **secara bersamaan** – misalnya bola yang dilempar ke atas memiliki energi kinetik (karena bergerak) sekaligus energi potensial (karena berada di suatu ketinggian). Gabungan kedua jenis energi ini disebut **energi mekanik**.

$$E_m = E_k + E_p \quad (3.33)$$

dengan E_m menyatakan energi mekanik total benda, yaitu jumlah energi kinetik (E_k) dan energi potensial (E_p) yang dimiliki benda pada suatu saat.

Konsep energi mekanik menjadi sangat penting karena, pada kondisi tertentu, energi mekanik suatu benda dapat bersifat **kekalan** (tidak berubah) meskipun energi kinetik dan energi potensialnya masing-masing berubah seiring waktu. Sifat inilah yang akan dibahas secara khusus pada subbab berikutnya.

3.4.5 Hukum Kekekalan Energi Mekanik

Tinjau sebuah benda yang jatuh bebas dari suatu ketinggian. Ketika benda mulai jatuh, energi potensialnya besar (karena berada tinggi) tetapi energi kinetiknya kecil (karena baru mulai bergerak). Sebaliknya, menjelang benda menyentuh tanah, energi potensialnya kecil (karena ketinggiannya berkurang) tetapi energi kinetiknya besar (karena kelajuannya bertambah). Pengamatan ini mengarah pada sebuah pertanyaan penting: apakah **energi potensial yang hilang** sama persis dengan **energi kinetik yang bertambah**?

Syarat Berlakunya Kekekalan Energi Mekanik

Jawabannya adalah **ya**, tetapi hanya jika berlaku satu syarat penting: **tidak ada gaya non-konservatif** yang bekerja pada benda, seperti gaya gesek atau gaya hambatan udara. Gaya yang melakukan usaha tanpa bergantung pada lintasan yang dilalui (misalnya gaya berat dan gaya pegas) disebut **gaya konservatif**, sedangkan gaya yang usahanya bergantung

pada lintasan dan biasanya menghilangkan energi mekanik dalam bentuk panas (misalnya gaya gesek) disebut **gaya non-konservatif**.

Jika hanya gaya konservatif yang bekerja pada suatu benda (sistem terisolasi secara mekanik), maka berlaku **Hukum Kekekalan Energi Mekanik**:

$$E_{m,1} = E_{m,2} \quad (3.34)$$

atau secara lebih rinci,

$$E_{k,1} + E_{p,1} = E_{k,2} + E_{p,2} \quad (3.35)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa energi mekanik dapat **berubah bentuk** dari energi potensial menjadi energi kinetik (atau sebaliknya), tetapi **jumlah totalnya tidak berubah** sepanjang hanya gaya konservatif yang bekerja.

Jika Terdapat Gaya Non-Konservatif

Jika terdapat gaya non-konservatif (misalnya gaya gesek) yang bekerja pada benda, energi mekanik **tidak lagi kekal**. Pada kondisi ini, berlaku bentuk umum teorema usaha-energi:

$$W_{nk} = E_{m,2} - E_{m,1} \quad (3.36)$$

dengan W_{nk} menyatakan usaha yang dilakukan oleh gaya non-konservatif (umumnya bernilai negatif, karena gaya semacam ini biasanya mengurangi energi mekanik sistem dan mengubahnya menjadi energi panas atau bunyi).

Contoh Soal

Sebuah benda bermassa 1 kg dijatuhkan tanpa kecepatan awal dari ketinggian 20 m. Dengan mengabaikan hambatan udara, tentukan kelajuan benda tersebut tepat saat menyentuh tanah! ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

Penyelesaian:

Karena hambatan udara diabaikan, berlaku Hukum Kekekalan Energi Mekanik. Tetapkan tanah sebagai acuan ($h = 0$).

Pada titik awal (ketinggian 20 m): benda diam, sehingga

$$E_{m,1} = E_{k,1} + E_{p,1} = 0 + mgh_1 = (1)(10)(20) = 200 \text{ J}$$

Pada titik akhir (di tanah, $h_2 = 0$): energi potensial bernilai nol, sehingga seluruh energi mekanik berbentuk energi kinetik,

$$E_{m,2} = E_{k,2} + 0 = \frac{1}{2}mv_2^2$$

Karena $E_{m,1} = E_{m,2}$:

$$200 = \frac{1}{2}(1)v_2^2 \quad \Rightarrow \quad v_2^2 = 400 \quad \Rightarrow \quad v_2 = 20 \text{ m/s}$$

3.4.6 Daya

Konsep usaha menjelaskan **berapa banyak** energi yang dipindahkan oleh suatu gaya, tetapi tidak menjelaskan **seberapa cepat** energi tersebut dipindahkan. Sebagai ilustrasi, dua orang yang masing-masing memindahkan karung beras seberat 50 kg sejauh ketinggian yang sama melakukan usaha yang **sama besar**, tetapi jika salah satu menyelesaikannya dalam waktu 10 detik dan yang lain dalam waktu 1 menit, keduanya jelas memiliki **kemampuan** yang berbeda. Besaran yang membedakan kedua situasi inilah yang disebut **daya**.

Daya didefinisikan sebagai besarnya usaha yang dilakukan per satuan waktu.

$$P = \frac{W}{t} \quad (3.37)$$

dengan:

- P = daya (watt, W)
- W = usaha (J)
- t = waktu (s)

Satu watt didefinisikan sebagai usaha sebesar 1 joule yang dilakukan dalam waktu 1 sekon: $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$.

Daya dalam Bentuk Gaya dan Kelajuan

Pada benda yang bergerak dengan gaya konstan F searah perpindahan, rumus daya dapat dituliskan dalam bentuk lain yang sangat berguna untuk kasus kendaraan bermotor. Karena $W = Fs$, maka

$$P = \frac{W}{t} = \frac{Fs}{t} = F \left(\frac{s}{t} \right)$$

Karena $\frac{s}{t} = v$ (kelajuan rata-rata benda), diperoleh

$$P = Fv \quad (3.38)$$

Bentuk persamaan ini menjelaskan mengapa mesin kendaraan yang memiliki daya tertentu akan menghasilkan gaya dorong yang lebih besar pada kelajuan rendah, dan gaya dorong yang lebih kecil pada kelajuan tinggi – karena untuk daya P yang tetap, F dan v berbanding terbalik.

Efisiensi Daya

Dalam praktiknya, tidak semua daya yang dihasilkan suatu mesin dimanfaatkan secara penuh sebagai daya keluaran yang berguna – sebagian terbuang akibat gesekan, panas,

atau bentuk kerugian energi lainnya. Perbandingan antara daya keluaran yang berguna (P_{keluaran}) dengan daya masukan total (P_{masukan}) disebut **efisiensi** (η):

$$\eta = \frac{P_{\text{keluaran}}}{P_{\text{masukan}}} \times 100\%$$

Contoh Soal

Sebuah motor pompa air mampu memompa air sebanyak 2.000 J usaha dalam waktu 4 detik. Tentukan daya motor pompa tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $W = 2.000 \text{ J}$, $t = 4 \text{ s}$

$$P = \frac{W}{t} = \frac{2.000}{4} = 500 \text{ W}$$

3.4.7 Ringkasan

Tabel 3.5: Persamaan Penting Usaha dan Energi

Konsep	Persamaan
Usaha (gaya searah perpindahan)	$W = Fs$
Usaha (gaya membentuk sudut)	$W = Fs \cos \theta$
Energi kinetik	$E_k = \frac{1}{2}mv^2$
Teorema usaha-energi	$W_{\text{total}} = \Delta E_k$
Energi potensial gravitasi	$E_p = mgh$
Energi potensial pegas	$E_p = \frac{1}{2}kx^2$
Energi mekanik	$E_m = E_k + E_p$
Kekekalan energi mekanik	$E_{m,1} = E_{m,2}$
Daya	$P = \frac{W}{t} = Fv$

Catatan Penting: Kekekalan energi mekanik hanya berlaku jika **tidak ada gaya non-konservatif** (seperti gesekan) yang bekerja pada sistem. Kesalahan yang sering terjadi adalah menerapkan Hukum Kekekalan Energi Mekanik pada kasus yang melibatkan gesekan tanpa memperhitungkan energi yang hilang akibat gesekan tersebut. Selain itu, perlu diingat bahwa energi potensial selalu bergantung pada pemilihan titik acuan, sehingga acuan tersebut harus ditetapkan secara konsisten sejak awal penyelesaian soal.

3.5 Gerak Rotasi dan Keseimbangan Benda Tegar

Pada pembahasan sebelumnya, gerak benda ditinjau sebagai gerak translasi, yaitu gerak yang seluruh bagian benda berpindah dengan perpindahan yang sama. Dalam kajian ter-

sebut, ukuran dan bentuk benda sering diabaikan sehingga benda dapat dianggap sebagai partikel.

Namun, dalam kenyataannya banyak benda tidak hanya bergerak berpindah tempat, tetapi juga berputar. Roda kendaraan, kipas angin, piringan CD, gasing, hingga perputaran Bumi pada porosnya merupakan contoh gerak rotasi. Pada gerak semacam ini, ukuran dan bentuk benda tidak dapat diabaikan karena setiap bagian benda bergerak mengelilingi suatu sumbu putar.

Untuk mempelajari gerak rotasi, diperlukan besaran-besaran baru yang merupakan analogi dari besaran pada gerak translasi. Sebagai contoh, perpindahan linear memiliki pasangan berupa perpindahan sudut, kecepatan linear memiliki pasangan berupa kecepatan sudut, dan massa memiliki pasangan berupa momen inersia. Selain itu, konsep gaya pada gerak translasi digantikan oleh momen gaya atau torsi yang menyebabkan benda berotasi.

Pada bagian ini akan dipelajari berbagai konsep dasar gerak rotasi, hubungan antara gaya dan rotasi, energi kinetik rotasi, momentum sudut, serta syarat-syarat yang harus dipenuhi agar suatu benda tegar berada dalam keadaan setimbang.

3.5.1 Besaran-Besaran Rotasi

Gerak rotasi adalah gerak suatu benda yang berputar terhadap suatu sumbu tertentu. Untuk mendeskripsikan gerak rotasi digunakan beberapa besaran yang merupakan analogi dari besaran pada gerak translasi.

Tabel 3.6: Analogi Besaran Translasi dan Rotasi

Translasi	Rotasi	Satuan SI
Perpindahan (s)	Perpindahan sudut (θ)	rad
Kecepatan (v)	Kecepatan sudut (ω)	rad/s
Percepatan (a)	Percepatan sudut (α)	rad/s ²
Massa (m)	Momen inersia (I)	kg m ²
Gaya (F)	Torsi (τ)	N m
Momentum (p)	Momentum sudut (L)	kg m ² /s

Perpindahan Sudut

Perpindahan sudut menyatakan perubahan posisi sudut suatu benda yang berotasi.

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 \quad (3.39)$$

Satuan SI untuk perpindahan sudut adalah radian (rad). Radian dipilih sebagai satuan "alami" untuk sudut karena radian didefinisikan langsung dari perbandingan dua panjang (panjang busur dibagi radius), sehingga tidak memiliki dimensi fisis dan memudahkan hubungan antara besaran linear dan besaran rotasi.

Hubungan antara panjang busur dan sudut diberikan oleh

$$s = r\theta \quad (3.40)$$

dengan s panjang busur dan r jari-jari lintasan (dengan θ dalam radian).

Kecepatan Sudut

Kecepatan sudut menyatakan laju perubahan posisi sudut terhadap waktu.

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (3.41)$$

Percepatan Sudut

Percepatan sudut menyatakan laju perubahan kecepatan sudut terhadap waktu.

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (3.42)$$

Hubungan Linear dan Rotasi

Besaran-besaran linear dan rotasi saling berhubungan melalui jari-jari lintasan.

$$v = r\omega \quad (3.43)$$

$$a_t = r\alpha \quad (3.44)$$

Perlu diperhatikan bahwa a_t pada persamaan di atas adalah **percepatan tangensial**, yaitu komponen percepatan yang searah dengan arah gerak benda dan timbul akibat **perubahan kelajuan** benda berotasi. Komponen ini hanya muncul jika $\alpha \neq 0$ (kecepatan sudut berubah).

Namun, selama benda berotasi – bahkan ketika kecepatan sudutnya **konstan** ($\alpha = 0$) – benda tersebut tetap mengalami komponen percepatan kedua yang disebut **percepatan sentripetal** (a_s), yaitu percepatan yang arahnya selalu menuju pusat lintasan dan timbul akibat **perubahan arah** kecepatan:

$$a_s = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$$

Dengan demikian, percepatan total yang dialami suatu titik pada benda berotasi merupakan resultan dari kedua komponen tersebut, karena a_t dan a_s selalu tegak lurus satu sama lain:

$$a_{\text{total}} = \sqrt{a_t^2 + a_s^2}$$

Pada gerak rotasi dengan kecepatan sudut konstan (disebut **gerak melingkar beraturan**), hanya komponen a_s yang bekerja, sehingga $a_{\text{total}} = a_s$.

Contoh Soal

Sebuah roda berputar dari keadaan diam dengan percepatan sudut konstan 2 rad/s^2 selama 3 sekon. Jika radius roda $0,5 \text{ m}$, tentukan kecepatan sudut akhir dan kecepatan linear suatu titik di tepi roda!

Penyelesaian:

Diketahui: $\omega_0 = 0$, $\alpha = 2 \text{ rad/s}^2$, $t = 3 \text{ s}$, $r = 0,5 \text{ m}$

$$\omega = \omega_0 + \alpha t = 0 + (2)(3) = 6 \text{ rad/s}$$

$$v = r\omega = (0,5)(6) = 3 \text{ m/s}$$

3.5.2 Momen Gaya (Torsi)

Pada gerak translasi, gaya menyebabkan percepatan linear. Pada gerak rotasi, kemampuan suatu gaya untuk memutar benda dinyatakan oleh besaran yang disebut momen gaya atau torsi.

Semakin besar gaya yang diberikan dan semakin jauh titik kerja gaya dari sumbu putar, semakin besar pula kecenderungan benda untuk berputar.

$$\tau = rF \sin \theta \quad (3.45)$$

dengan:

- τ = torsi (N m)
- r = jarak titik kerja gaya terhadap sumbu putar (m)
- F = gaya (N)
- θ = sudut antara $\vec{r}$ dan $\vec{F}$

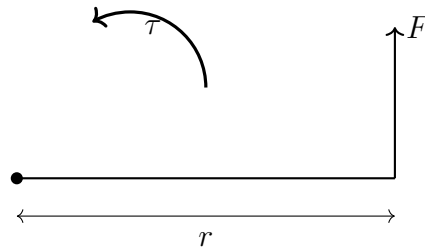
Torsi maksimum terjadi saat gaya bekerja tegak lurus terhadap lengan gaya ($\theta = 90^\circ$).

$$\tau_{\text{max}} = rF \quad (3.46)$$

Konvensi Tanda Torsi

Karena pada suatu benda sering bekerja lebih dari satu gaya sekaligus (terutama pada kasus kesetimbangan), diperlukan **konvensi tanda** agar torsi-torsi tersebut dapat dijumlahkan secara konsisten. Konvensi yang umum digunakan adalah:

- Torsi yang menyebabkan rotasi **berlawanan arah jarum jam** (*counterclockwise*) diberi tanda **positif**.



Gambar 3.11: Torsi yang dihasilkan oleh gaya terhadap sumbu putar.

- Torsi yang menyebabkan rotasi **searah jarum jam** (*clockwise*) diberi tanda **negatif**.

Konvensi ini bersifat kesepakatan (boleh dibalik), tetapi harus digunakan secara konsisten dalam satu penyelesaian soal.

Contoh Soal

Sebuah batang horizontal diputar pada salah satu ujungnya. Sebuah gaya 40 N bekerja tegak lurus pada batang, pada jarak 0,6 m dari sumbu putar. Tentukan besar torsi yang dihasilkan!

Penyelesaian:

Diketahui: $F = 40 \text{ N}$, $r = 0,6 \text{ m}$, $\theta = 90^\circ$

$$\tau = rF \sin 90^\circ = (0,6)(40)(1) = 24 \text{ N m}$$

3.5.3 Momen Inersia

Momen inersia merupakan ukuran kelembaman rotasi suatu benda. Jika massa menyatakan kecenderungan benda mempertahankan keadaan gerak translasi, maka momen inersia menyatakan kecenderungan benda mempertahankan keadaan gerak rotasinya.

Nilai momen inersia dipengaruhi oleh massa benda dan **distribusi** massa terhadap sumbu putar – bukan hanya jumlah total massanya. Hal ini berbeda dengan massa pada gerak translasi, yang nilainya tidak bergantung pada bagaimana massa tersebut "tersebar".

Untuk partikel:

$$I = mr^2 \quad (3.47)$$

Untuk benda tegar (sistem banyak partikel):

$$I = \sum m_i r_i^2 \quad (3.48)$$

Mengapa Distribusi Massa Berpengaruh?

Perhatikan dua benda dengan massa M dan radius R yang sama, yaitu sebuah cincin tipis dan sebuah cakram pejal. Pada cincin, **seluruh** massa terkonsentrasi pada jarak R dari sumbu putar, sehingga $I_{\text{cincin}} = MR^2$. Pada cakram pejal, massa **tersebar** dari pusat ($r = 0$) hingga tepi ($r = R$), sehingga sebagian besar massanya berada pada jarak yang

lebih kecil dari R . Karena momen inersia bergantung pada r^2 , massa yang berada lebih dekat ke sumbu memberikan kontribusi yang lebih kecil, sehingga total momen inersia cakram pejal ($I_{\text{cakram}} = \frac{1}{2}MR^2$) menjadi lebih kecil dibandingkan cincin meskipun massa totalnya sama.

Tabel 3.7: Momen Inersia Beberapa Benda terhadap Sumbu melalui Pusat Massa

Bentuk Benda	Momen Inersia	Sumbu Putar
Cincin tipis berongga	MR^2	Melalui pusat, tegak lurus bidang cincin
Cakram pejal (silinder pejal)	$\frac{1}{2}MR^2$	Sumbu simetri (melalui pusat)
Bola pejal	$\frac{2}{5}MR^2$	Melalui pusat bola
Batang homogen (sumbu di tengah)	$\frac{1}{12}ML^2$	Tegak lurus batang, melalui tengah
Batang homogen (sumbu di ujung)	$\frac{1}{3}ML^2$	Tegak lurus batang, melalui ujung

Catatan Penting: Nilai-nilai momen inersia pada tabel di atas hanya berlaku untuk **sumbu putar tertentu** sebagaimana disebutkan pada kolom ketiga. Jika sumbu putar yang digunakan berbeda – misalnya batang diputar pada ujungnya dibandingkan pada tengahnya – nilai momen inersia akan berbeda pula, sebagaimana tampak pada perbandingan dua baris terakhir tabel. Untuk menghitung momen inersia terhadap sumbu yang sejajar namun tidak melalui pusat massa, terdapat metode yang disebut **Teorema Sumbu Paralel**, yang akan dipelajari lebih lanjut pada jenjang pendidikan berikutnya.

Contoh Soal

Sebuah cakram pejal bermassa 4 kg dan radius 0,3 m berotasi terhadap sumbu yang melalui pusatnya. Tentukan momen inersia cakram tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $M = 4$ kg, $R = 0,3$ m

$$I = \frac{1}{2}MR^2 = \frac{1}{2}(4)(0,3)^2 = \frac{1}{2}(4)(0,09) = 0,18 \text{ kg m}^2$$

3.5.4 Hukum II Newton untuk Rotasi

Pada gerak translasi, Hukum II Newton dinyatakan sebagai

$$F = ma.$$

Bentuk analog untuk gerak rotasi dapat diturunkan dengan meninjau sebuah partikel bermassa m yang berotasi pada radius r dari sumbu putar, dikenai gaya F yang tegak lurus terhadap r (sehingga $\sin \theta = 1$). Gaya tersebut menghasilkan percepatan tangensial a_t sesuai Hukum II Newton:

$$F = ma_t$$

Karena $a_t = r\alpha$, maka

$$F = mr\alpha$$

Mengalikan kedua ruas dengan r untuk mengubah gaya menjadi torsi ($\tau = rF$):

$$rF = mr^2\alpha$$

Karena $\tau = rF$ dan $I = mr^2$ (untuk partikel), diperoleh

$$\sum \tau = I\alpha \quad (3.49)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa percepatan sudut berbanding lurus dengan torsi total yang bekerja dan berbanding terbalik dengan momen inersia benda – sejalan dengan $F = ma$ pada gerak translasi, dengan τ menggantikan F , I menggantikan m , dan α menggantikan a .

Contoh Soal

Sebuah katrol berbentuk cakram pejal bermassa 2 kg dan radius 0,2 m dikenai torsi sebesar 0,8 N m. Tentukan percepatan sudut katrol tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $M = 2$ kg, $R = 0,2$ m, $\tau = 0,8$ N m

$$I = \frac{1}{2}MR^2 = \frac{1}{2}(2)(0,2)^2 = 0,04 \text{ kg m}^2$$

$$\alpha = \frac{\tau}{I} = \frac{0,8}{0,04} = 20 \text{ rad/s}^2$$

3.5.5 Energi Kinetik Rotasi

Benda yang berputar memiliki energi karena gerak rotasinya. Energi tersebut disebut energi kinetik rotasi.

$$E_k = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (3.50)$$

Persamaan ini merupakan analogi dari energi kinetik translasi

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2,$$

dengan I menggantikan m dan ω menggantikan v . Pada benda yang bergerak sekaligus translasi dan rotasi (misalnya bola yang menggelinding), energi kinetik totalnya merupakan jumlah dari kedua jenis energi kinetik tersebut:

$$E_{k,\text{total}} = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

Contoh Soal

Sebuah bola pejal bermassa 2 kg dan radius 0,1 m berotasi dengan kecepatan sudut 10 rad/s. Tentukan energi kinetik rotasi bola tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $M = 2$ kg, $R = 0,1$ m, $\omega = 10$ rad/s

$$I = \frac{2}{5}MR^2 = \frac{2}{5}(2)(0,1)^2 = 0,008 \text{ kg m}^2$$

$$E_k = \frac{1}{2}I\omega^2 = \frac{1}{2}(0,008)(10)^2 = 0,4 \text{ J}$$

3.5.6 Momentum Sudut

Sebagaimana benda yang bergerak translasi memiliki momentum linear ($p = mv$), benda yang berotasi memiliki besaran analog yang disebut **momentum sudut** (L), yang menyatakan kuantitas gerak rotasi suatu benda.

$$L = I\omega \quad (3.51)$$

dengan:

- L = momentum sudut ($\text{kg m}^2/\text{s}$)
- I = momen inersia (kg m^2)
- ω = kecepatan sudut (rad/s)

Hukum Kekekalan Momentum Sudut

Sejalan dengan hukum kekekalan momentum linear yang berlaku ketika tidak ada gaya eksternal (resultan gaya nol), berlaku pula **Hukum Kekekalan Momentum Sudut**: jika tidak ada torsi eksternal yang bekerja pada suatu sistem ($\sum \tau = 0$), maka momentum sudut total sistem tersebut akan tetap (kekal).

$$I_1\omega_1 = I_2\omega_2 \quad (3.52)$$

Salah satu konsekuensi paling menarik dari hukum ini adalah: jika momen inersia suatu benda **berubah** (misalnya karena distribusi massanya berubah), kecepatan sudutnya akan ikut berubah secara otomatis agar momentum sudut totalnya tetap konstan.

Contoh klasik fenomena ini adalah seorang penari es (*ice skater*) yang berputar. Ketika penari merentangkan kedua tangannya, momen inersia tubuhnya menjadi besar (massa

tersebar lebih jauh dari sumbu putar), sehingga kecepatan sudutnya menjadi kecil. Sebaliknya, ketika penari menarik kedua tangannya mendekati tubuh, momen inersianya mengecil, sehingga – agar $L = I\omega$ tetap kekal – kecepatan sudutnya harus **bertambah besar**. Inilah sebabnya penari es berputar jauh lebih cepat ketika tangannya dirapatkan ke tubuh.

Contoh Soal

Seorang penari es berputar dengan kecepatan sudut 2 rad/s saat kedua tangannya terentang, dengan momen inersia 4 kg m^2 . Ketika ia menarik kedua tangannya, momen inersianya berkurang menjadi 1 kg m^2 . Tentukan kecepatan sudut penari es setelah menarik tangannya!

Penyelesaian:

Diketahui: $I_1 = 4 \text{ kg m}^2$, $\omega_1 = 2 \text{ rad/s}$, $I_2 = 1 \text{ kg m}^2$

$$I_1\omega_1 = I_2\omega_2$$

$$(4)(2) = (1)\omega_2$$

$$\omega_2 = 8 \text{ rad/s}$$

Kecepatan sudut penari es bertambah empat kali lipat setelah menarik kedua tangannya.

3.5.7 Keseimbangan Benda Tegar

Suatu benda tegar dikatakan berada dalam keadaan setimbang apabila tidak mengalami percepatan translasi maupun percepatan rotasi. Perlu diperhatikan bahwa keadaan setimbang **tidak harus berarti benda diam**. Terdapat dua jenis keseimbangan:

- **Keseimbangan statis** – benda benar-benar diam, tidak bergerak translasi maupun rotasi sama sekali. Contohnya jembatan, rak buku, atau menara yang berdiri tegak.
- **Keseimbangan dinamis** – benda tetap bergerak dengan kecepatan translasi dan/atau kecepatan sudut yang **konstan** (tidak nol, tetapi tidak berubah). Contohnya pesawat yang terbang lurus dengan kelajuan tetap, atau roda yang berputar dengan kecepatan sudut tetap tanpa gaya pengereman maupun gaya dorong tambahan.

Pada kedua jenis keseimbangan tersebut, syarat matematisnya tetap sama, karena keduanya bukan pada "diam atau bergerak", melainkan pada "tidak ada percepatan".

Syarat keseimbangan translasi adalah

$$\sum \vec{F} = 0 \quad (3.53)$$

Sedangkan syarat keseimbangan rotasi adalah

$$\sum \tau = 0 \quad (3.54)$$

Agar benda benar-benar setimbang, **kedua syarat tersebut harus dipenuhi secara bersamaan**. Benda yang memenuhi syarat kesetimbangan translasi saja (tidak mengalami percepatan linear) masih dapat berputar semakin cepat jika ada torsi total yang tidak nol, sehingga tidak dapat dikatakan benar-benar setimbang.

Contoh Soal

Sebuah batang homogen sepanjang 4 m ditumpu pada salah satu ujungnya (titik tumpu). Sebuah beban 20 N digantungkan pada jarak 1 m dari titik tumpu pada satu sisi. Berapa besar gaya F yang harus diberikan pada jarak 2 m dari titik tumpu pada sisi yang berlawanan, agar batang dalam keadaan setimbang rotasi? (Abaikan berat batang)

Penyelesaian:

Tetapkan torsi berlawanan arah jarum jam sebagai positif.

Diketahui: $w = 20$ N pada $r_1 = 1$ m, $r_2 = 2$ m

Syarat kesetimbangan rotasi: $\sum \tau = 0$

$$F \cdot r_2 - w \cdot r_1 = 0$$

$$F(2) = (20)(1)$$

$$F = 10 \text{ N}$$

3.5.8 Titik Berat

Titik berat adalah titik tempat resultan gaya berat seluruh bagian benda dianggap bekerja. Konsep ini sangat berkaitan dengan kesetimbangan benda tegar, karena posisi titik berat menentukan bagaimana torsi akibat gaya berat memengaruhi kestabilan suatu benda.

Untuk benda homogen yang bentuknya simetris, titik berat terletak tepat di pusat geometrinya. Namun untuk benda yang bentuknya tidak beraturan, atau gabungan dari beberapa benda dengan massa berbeda, titik berat dapat berada pada lokasi yang tidak terduga secara intuitif.

Secara matematis, koordinat titik berat dinyatakan sebagai

$$x_{tb} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} \quad (3.55)$$

$$y_{tb} = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i} \quad (3.56)$$

Titik berat sangat penting dalam analisis keseimbangan benda, perancangan bangunan, kendaraan, jembatan, dan berbagai sistem teknik lainnya.

Contoh Soal

Dua benda titik diletakkan pada satu garis lurus. Benda pertama bermassa 2 kg berada pada posisi $x_1 = 0$ m, dan benda kedua bermassa 3 kg berada pada posisi $x_2 = 5$ m. Tentukan posisi titik berat sistem tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $m_1 = 2 \text{ kg}$, $x_1 = 0 \text{ m}$, $m_2 = 3 \text{ kg}$, $x_2 = 5 \text{ m}$

$$x_{tb} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2} = \frac{(2)(0) + (3)(5)}{2 + 3} = \frac{15}{5} = 3 \text{ m}$$

Titik berat sistem berada pada $x = 3 \text{ m}$, lebih dekat ke benda kedua karena massanya lebih besar.

3.5.9 Ringkasan

Tabel 3.8: Persamaan Penting Gerak Rotasi dan Keseimbangan

Konsep	Persamaan
Hubungan linear-rotasi	$v = r\omega$, $a_t = r\alpha$
Percepatan sentripetal	$a_s = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$
Torsi	$\tau = rF \sin \theta$
Momen inersia partikel	$I = mr^2$
Hukum II Newton rotasi	$\sum \tau = I\alpha$
Energi kinetik rotasi	$E_k = \frac{1}{2} I\omega^2$
Momentum sudut	$L = I\omega$
Kekekalan momentum sudut	$I_1\omega_1 = I_2\omega_2$
Keseimbangan translasi	$\sum \vec{F} = 0$
Keseimbangan rotasi	$\sum \tau = 0$
Titik berat	$x_{tb} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}$

Catatan Penting: Sebuah benda dikatakan setimbang sempurna hanya jika **kedua syarat** keseimbangan (translasi dan rotasi) terpenuhi secara bersamaan. Selain itu, nilai momen inersia selalu bergantung pada pemilihan sumbu putar – pastikan rumus yang digunakan sesuai dengan sumbu putar yang dimaksud dalam soal. Pada kasus momentum sudut, ingatlah bahwa hukum kekekalannya hanya berlaku jika tidak ada torsi eksternal yang bekerja pada sistem.

3.6 Gravitasi

Pada pembahasan sebelumnya telah disinggung bahwa gaya berat ($W = mg$) adalah gaya gravitasi yang dialami suatu benda akibat tarikan Bumi. Namun, pertanyaan yang lebih mendasar belum terjawab: mengapa Bumi dapat menarik benda-benda di sekitarnya? Mengapa Bulan tidak terlepas dari orbitnya mengelilingi Bumi? Dan mengapa planet-planet mengelilingi Matahari tanpa pernah jatuh ke dalamnya?

Pertanyaan-pertanyaan inilah yang mendorong Sir Isaac Newton untuk merumuskan salah satu hukum paling revolusioner dalam sejarah fisika, yaitu **Hukum Gravitasi Newton**. Hukum ini berhasil menyatukan dua fenomena yang sebelumnya dianggap terpisah – gerak benda jatuh di Bumi dan gerak benda-benda langit – ke dalam satu penjelasan tunggal: **setiap benda bermassa menarik benda bermassa lainnya**.

Pada bagian ini akan dipelajari Hukum Gravitasi Newton, konsep medan dan percepatan gravitasi, energi potensial gravitasi secara umum, gerak satelit, serta Hukum Kepler yang menjelaskan gerak planet mengelilingi Matahari.

3.6.1 Hukum Gravitasi Newton

Newton mengamati bahwa gaya yang menyebabkan apel jatuh ke tanah dan gaya yang menjaga Bulan tetap mengelilingi Bumi pada dasarnya adalah gaya yang **sama**, yaitu gaya gravitasi. Berdasarkan pengamatan ini, Newton merumuskan bahwa setiap dua benda bermassa akan saling tarik-menarik dengan gaya yang:

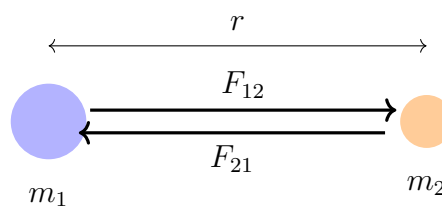
- berbanding lurus dengan hasil kali kedua massa benda, dan
- berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua benda tersebut.

Pernyataan ini dikenal sebagai **Hukum Gravitasi Newton**, dan secara matematis dituliskan sebagai

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (3.57)$$

dengan:

- F = gaya gravitasi antara dua benda (N)
- G = konstanta gravitasi universal ($6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$)
- m_1, m_2 = massa kedua benda (kg)
- r = jarak antara pusat kedua benda (m)



Gambar 3.12: Dua benda bermassa m_1 dan m_2 saling tarik-menarik dengan gaya gravitasi yang sama besar namun berlawanan arah, sesuai Hukum III Newton.

Gravitasi Sebagai Pasangan Aksi-Reaksi

Perlu diperhatikan bahwa gaya gravitasi selalu bekerja **berpasangan** pada kedua benda, sesuai dengan Hukum III Newton: gaya yang dialami m_1 akibat m_2 (F_{12}) sama besar namun berlawanan arah dengan gaya yang dialami m_2 akibat m_1 (F_{21}). Inilah sebabnya Bumi menarik Bulan dengan gaya yang sama besarnya dengan gaya yang Bulan berikan pada Bumi – meskipun efek gerak yang teramati sangat berbeda karena perbedaan massa kedua benda tersebut (sesuai Hukum II Newton, $a = F/m$).

Sifat Berbanding Terbalik dengan Kuadrat Jarak

Sifat $F \propto 1/r^2$ pada Hukum Gravitasi Newton dikenal sebagai **hukum kuadrat terbalik** (*inverse square law*). Sifat ini berarti bahwa jika jarak antara dua benda digandakan, gaya gravitasi di antara keduanya akan berkurang menjadi **seperempat** dari nilai semula – bukan setengahnya. Konsekuensinya, gaya gravitasi melemah dengan sangat cepat seiring bertambahnya jarak, meskipun secara teoritis gaya ini tidak pernah benar-benar menjadi nol pada jarak berapa pun.

Contoh Soal

Dua benda bermassa 4 kg dan 6 kg terpisah pada jarak 2 m. Tentukan besar gaya gravitasi antara kedua benda tersebut! ($G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$)

Penyelesaian:

Diketahui: $m_1 = 4 \text{ kg}$, $m_2 = 6 \text{ kg}$, $r = 2 \text{ m}$

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = (6,67 \times 10^{-11}) \frac{(4)(6)}{(2)^2} = (6,67 \times 10^{-11}) \frac{24}{4}$$

$$F = 4,0 \times 10^{-10} \text{ N}$$

Gaya ini sangat kecil, menjelaskan mengapa gaya gravitasi antar benda berskala manusia (seperti dua orang yang berdiri berdekatan) tidak pernah terasa – gaya tersebut hanya menjadi signifikan ketika salah satu benda memiliki massa sangat besar, seperti planet.

3.6.2 Medan Gravitasi

Pada pembahasan sebelumnya, gaya gravitasi dijelaskan sebagai interaksi langsung antara dua benda. Namun, terdapat cara pandang lain yang lebih bermanfaat untuk memahami gravitasi di sekitar suatu benda bermassa besar (seperti Bumi), yaitu melalui konsep **medan gravitasi**.

Medan gravitasi adalah daerah di sekitar suatu benda bermassa yang masih dapat memengaruhi benda bermassa lain yang berada di dalamnya, tanpa memerlukan kontak langsung.

Dengan kata lain, Bumi dianggap ”menciptakan” suatu medan di sekitarnya, dan benda apa pun yang memasuki medan tersebut akan merasakan gaya gravitasi, meskipun tidak ada benda lain yang secara eksplisit ”menariknya” saat itu. Konsep medan ini sangat berguna karena memungkinkan kita menghitung pengaruh gravitasi pada suatu titik dalam ruang **tanpa harus menentukan dahulu** benda apa yang akan ditempatkan di titik tersebut.

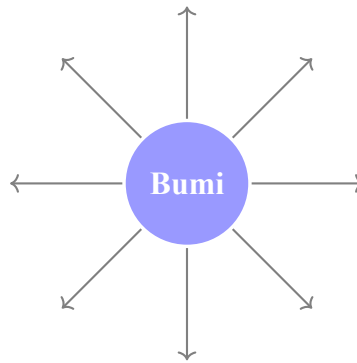
Kuat medan gravitasi pada suatu titik didefinisikan sebagai gaya gravitasi yang dialami oleh setiap satuan massa yang diletakkan pada titik tersebut:

$$g = \frac{F}{m} \quad (3.58)$$

Dengan mensubstitusikan Hukum Gravitasi Newton ($F = GMm/r^2$, dengan M massa sumber medan dan m massa uji), diperoleh kuat medan gravitasi pada jarak r dari benda bermassa M :

$$g = \frac{GM}{r^2} \quad (3.59)$$

Perhatikan bahwa g **tidak bergantung** pada massa benda uji m – ia hanya bergantung pada massa sumber (M) dan jarak (r) dari sumber tersebut. Inilah sebabnya, dalam medan gravitasi yang sama, semua benda (terlepas dari massanya) mengalami percepatan gravitasi yang **sama besar** – prinsip inilah yang menjelaskan mengapa, tanpa hambatan udara, sebutir kerikil dan sebuah bola bowling akan jatuh dengan kecepatan yang sama.



Gambar 3.13: Garis-garis medan gravitasi di sekitar Bumi selalu mengarah ke pusat Bumi, dengan kuat medan yang melemah seiring bertambahnya jarak dari pusat.

Contoh Soal

Sebuah planet memiliki massa 5×10^{24} kg dan radius 6×10^6 m. Tentukan kuat medan gravitasi di permukaan planet tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $M = 5 \times 10^{24}$ kg, $r = 6 \times 10^6$ m

$$g = \frac{GM}{r^2} = \frac{(6,67 \times 10^{-11})(5 \times 10^{24})}{(6 \times 10^6)^2}$$

$$g = \frac{3,335 \times 10^{14}}{3,6 \times 10^{13}} \approx 9,3 \text{ m/s}^2$$

3.6.3 Percepatan Gravitasi

Besaran $g = GM/r^2$ yang diperoleh pada subbab sebelumnya sebenarnya identik dengan **percepatan gravitasi**, yaitu percepatan yang dialami suatu benda akibat gaya gravitasi yang bekerja padanya. Inilah nilai yang sama dengan $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ yang telah digunakan secara konsisten pada bab-bab sebelumnya untuk gaya berat ($W = mg$) – namun kini kita memahami **asal-usulnya** secara lebih mendalam.

Percepatan Gravitasi pada Ketinggian Tertentu

Karena g bergantung pada r (jarak dari pusat planet), percepatan gravitasi akan **berkurang** seiring bertambahnya ketinggian dari permukaan planet. Jika R adalah radius planet dan h adalah ketinggian suatu titik dari permukaan planet, maka jarak totalnya dari pusat planet adalah $r = R + h$, sehingga

$$g_h = \frac{GM}{(R+h)^2} \quad (3.60)$$

dengan g_h menyatakan percepatan gravitasi pada ketinggian h dari permukaan planet.

Perbandingan Percepatan Gravitasi pada Dua Ketinggian

Untuk membandingkan percepatan gravitasi di permukaan planet (g , pada $r = R$) dengan percepatan gravitasi pada ketinggian tertentu (g_h , pada $r = R + h$), kedua persamaan dapat dibagi sehingga GM saling menghilangkan:

$$\frac{g_h}{g} = \left(\frac{R}{R+h} \right)^2 \quad (3.61)$$

Bentuk persamaan ini sangat praktis digunakan karena tidak memerlukan nilai G dan M secara eksplisit – cukup mengetahui radius planet dan ketinggian yang dimaksud.

Contoh Soal

Percepatan gravitasi di permukaan Bumi adalah $9,8 \text{ m/s}^2$. Jika radius Bumi adalah 6.400 km , tentukan percepatan gravitasi pada ketinggian 6.400 km di atas permukaan Bumi!

Penyelesaian:

Diketahui: $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, $R = 6.400 \text{ km}$, $h = 6.400 \text{ km}$

Karena $h = R$, maka $R + h = 2R$, sehingga

$$\begin{aligned} \frac{g_h}{g} &= \left(\frac{R}{2R} \right)^2 = \left(\frac{1}{2} \right)^2 = \frac{1}{4} \\ g_h &= \frac{1}{4}g = \frac{1}{4}(9,8) = 2,45 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

Pada ketinggian satu kali radius Bumi, percepatan gravitasi berkurang menjadi seperempat dari nilainya di permukaan.

3.6.4 Energi Potensial Gravitasi

Pada pembahasan Usaha dan Energi, energi potensial gravitasi dituliskan sebagai $E_p = mgh$. Namun, rumus tersebut hanya **berlaku untuk ketinggian yang relatif kecil** dibandingkan radius planet (sehingga g dapat dianggap konstan). Untuk kasus yang lebih umum – misalnya satelit yang mengorbit jauh dari Bumi, atau perhitungan kecepatan lepas suatu roket – diperlukan rumus energi potensial gravitasi yang lebih umum, yang memperhitungkan perubahan g terhadap jarak.

Dengan meninjau usaha yang diperlukan untuk memindahkan benda bermassa m dari jarak tak terhingga (di mana gaya gravitasi dianggap nol) hingga jarak r dari pusat benda bermassa M , diperoleh energi potensial gravitasi umum:

$$E_p = -\frac{GMm}{r} \quad (3.62)$$

Mengapa Bertanda Negatif?

Berbeda dengan $E_p = mgh$ yang selalu bernilai positif, rumus energi potensial gravitasi umum ini selalu bernilai **negatif**. Tanda negatif ini bukan suatu kesalahan, melainkan konsekuensi dari pemilihan **acuan** energi potensial nol pada jarak tak terhingga ($r = \infty$). Karena gaya gravitasi bersifat **menarik** (bukan menolak), benda yang berada pada jarak berhingga memiliki energi potensial yang **lebih kecil** dibandingkan ketika berada di jarak tak terhingga – sehingga nilainya menjadi negatif relatif terhadap acuan tersebut.

Semakin dekat suatu benda terhadap sumber gravitasi (semakin kecil r), nilai E_p menjadi **semakin negatif** (semakin kecil), yang berarti benda tersebut ”terikat” semakin kuat secara gravitasi.

Contoh Soal

Sebuah satelit bermassa 500 kg mengorbit pada jarak 8×10^6 m dari pusat Bumi. Jika massa Bumi adalah 6×10^{24} kg, tentukan energi potensial gravitasi satelit tersebut!

Penyelesaian:

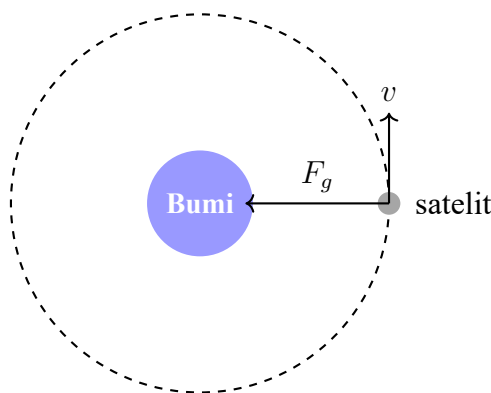
Diketahui: $m = 500$ kg, $M = 6 \times 10^{24}$ kg, $r = 8 \times 10^6$ m

$$E_p = -\frac{GMm}{r} = -\frac{(6,67 \times 10^{-11})(6 \times 10^{24})(500)}{8 \times 10^6}$$

$$E_p \approx -2,5 \times 10^{10} \text{ J}$$

3.6.5 Gerak Satelit

Salah satu penerapan paling penting dari Hukum Gravitasi Newton adalah dalam menjelaskan gerak satelit yang mengorbit suatu planet. Sebuah satelit dapat tetap mengorbit (tidak jatuh ke planet maupun terlempar ke luar angkasa) karena gaya gravitasi yang dialaminya **tepat berperan** sebagai gaya sentripetal yang menjaganya bergerak melingkar.



Gambar 3.14: Gaya gravitasi F_g pada satelit berperan sebagai gaya sentripetal, selalu mengarah tegak lurus terhadap kecepatan v satelit menuju pusat Bumi.

Menurunkan Kecepatan Orbit Satelit

Karena gaya gravitasi berperan sebagai gaya sentripetal, kedua gaya ini dapat disetarakan:

$$F_{\text{gravitasi}} = F_{\text{sentripetal}}$$

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

Massa satelit (m) dapat dicoret dari kedua ruas (menunjukkan bahwa kecepatan orbit **tidak bergantung** pada massa satelit itu sendiri), dan menyisakan satu r pada penyebut ruas kanan:

$$\frac{GM}{r} = v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (3.63)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa semakin jauh jarak orbit satelit dari pusat planet, semakin **kecil** kecepatan orbit yang diperlukan agar satelit tetap pada lintasannya.

Periode Orbit Satelit

Karena satelit menempuh lintasan melingkar dengan keliling $2\pi r$ dalam waktu satu periode T , kecepatan orbit juga dapat dituliskan sebagai $v = 2\pi r/T$. Menyamakan dengan hasil sebelumnya:

$$\frac{2\pi r}{T} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Setelah disusun ulang, diperoleh hubungan antara periode orbit dan radius orbit:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{GM}} \quad (3.64)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa periode orbit satelit hanya bergantung pada radius orbitnya dan massa planet yang diorbit – hasil ini akan tampak kembali pada Hukum III Kepler di subbab berikutnya.

Contoh Soal

Sebuah satelit mengorbit Bumi pada radius 7×10^6 m. Jika massa Bumi adalah 6×10^{24} kg, tentukan kecepatan orbit satelit tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $r = 7 \times 10^6$ m, $M = 6 \times 10^{24}$ kg

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} = \sqrt{\frac{(6,67 \times 10^{-11})(6 \times 10^{24})}{7 \times 10^6}}$$

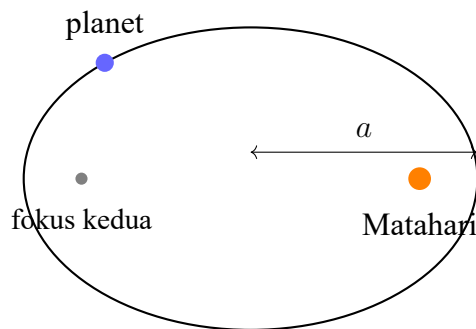
$$v = \sqrt{5,72 \times 10^7} \approx 7.560 \text{ m/s}$$

3.6.6 Hukum Kepler

Sebelum Newton merumuskan hukum gravitasinya, seorang astronom Jerman bernama Johannes Kepler telah menemukan tiga pola matematis yang menggambarkan gerak planet mengelilingi Matahari, berdasarkan data pengamatan astronomis yang sangat teliti. Ketiga pola ini, yang kemudian dikenal sebagai **Hukum Kepler**, ternyata dapat diturunkan secara teoritis dari Hukum Gravitasi Newton – sebuah bukti elegan bahwa kedua tokoh tersebut, meskipun bekerja pada masa yang berbeda, menemukan kebenaran fisis yang konsisten satu sama lain.

Hukum I Kepler – Hukum Orbit Elips

Setiap planet bergerak mengelilingi Matahari dalam lintasan berbentuk elips, dengan Matahari berada pada salah satu titik fokus elips tersebut.



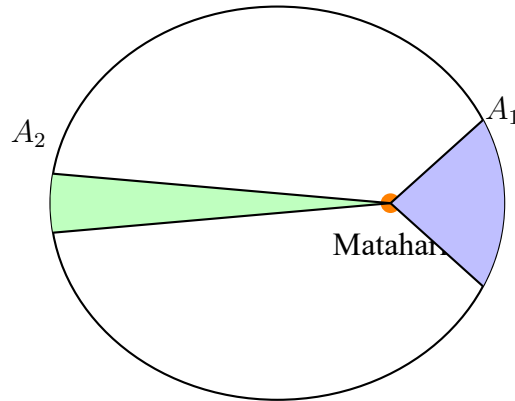
Gambar 3.15: Orbit planet berbentuk elips dengan Matahari berada pada salah satu titik fokus (bukan di pusat elips). Jarak a menyatakan setengah sumbu panjang (*semi-major axis*) elips.

Pada kebanyakan planet di Tata Surya (termasuk Bumi), bentuk elips orbitnya sangat mendekati lingkaran (eksentrisitasnya kecil), sehingga seringkali orbit planet dapat dianggap mendekati lingkaran untuk perhitungan-perhitungan yang tidak memerlukan presisi tinggi.

Hukum II Kepler – Hukum Luas Sama

Garis yang menghubungkan planet dengan Matahari menyapu luasan yang sama dalam selang waktu yang sama.

Konsekuensi penting dari hukum ini adalah: planet bergerak **lebih cepat** ketika berada dekat dengan Matahari (*perihelion*), dan bergerak **lebih lambat** ketika berada jauh dari Matahari (*aphelion*). Hal ini diperlukan agar luas sektor yang disapu tetap sama, karena sektor yang dekat Matahari memiliki "lebar" yang kecil sehingga memerlukan sudut sapuan yang besar (kelajuan tinggi) untuk mencapai luas yang sama dengan sektor yang jauh dari Matahari.



Gambar 3.16: Luasan A_1 (dekat Matahari, disapu dengan sudut besar dalam waktu singkat) dan A_2 (jauh dari Matahari, disapu dengan sudut kecil dalam waktu yang sama) memiliki luas yang sama persis, sesuai Hukum II Kepler.

Hukum ini sebenarnya merupakan konsekuensi dari **Hukum Kekekalan Momentum Sudut** yang telah dipelajari pada bab gerak rotasi – karena tidak ada torsi eksternal yang bekerja pada planet (gaya gravitasi selalu mengarah tepat ke Matahari, sehingga lengan gayanya terhadap Matahari adalah nol), momentum sudut planet terhadap Matahari harus kekal sepanjang orbitnya.

Hukum III Kepler – Hukum Harmonik

Kuadrat periode revolusi planet berbanding lurus dengan pangkat tiga jarak rata-rata planet terhadap Matahari.

$$\frac{T^2}{R^3} = \text{konstan} \quad (3.65)$$

Untuk dua planet yang mengelilingi Matahari yang sama, berlaku

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3} \quad (3.66)$$

dengan T_1, T_2 adalah periode revolusi, dan R_1, R_2 adalah jarak rata-rata kedua planet tersebut terhadap Matahari.

Menghubungkan Hukum III Kepler dengan Hukum Gravitasi Newton

Menariknya, Hukum III Kepler dapat diturunkan langsung dari persamaan periode orbit satelit yang telah diperoleh pada subbab sebelumnya:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM}}$$

Dengan mengkuadratkan kedua ruas:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3 \Rightarrow \frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM} = \text{konstan}$$

Hasil ini membuktikan bahwa Hukum III Kepler – yang ditemukan Kepler secara empiris dari data pengamatan, puluhan tahun sebelum Newton lahir – ternyata merupakan konsekuensi langsung dari Hukum Gravitasi Newton. Kesesuaian ini menjadi salah satu bukti paling kuat yang mendukung kebenaran Hukum Gravitasi Newton pada masanya.

Contoh Soal

Planet A mengorbit Matahari dengan jarak rata-rata 2×10^{11} m dan periode 200 hari. Jika planet B mengorbit pada jarak 8×10^{11} m, tentukan periode orbit planet B!

Penyelesaian:

Diketahui: $R_1 = 2 \times 10^{11}$ m, $T_1 = 200$ hari, $R_2 = 8 \times 10^{11}$ m

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3}$$

$$\frac{(200)^2}{T_2^2} = \left(\frac{2 \times 10^{11}}{8 \times 10^{11}} \right)^3 = \left(\frac{1}{4} \right)^3 = \frac{1}{64}$$

$$T_2^2 = 64 \times (200)^2 = 64 \times 40.000 = 2.560.000$$

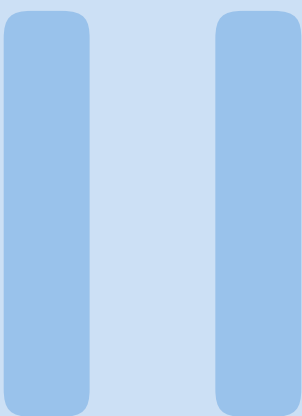
$$T_2 = 1.600 \text{ hari}$$

3.6.7 Ringkasan

Tabel 3.9: Persamaan Penting Gravitasi

Konsep	Persamaan
Hukum Gravitasi Newton	$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$
Kuat medan gravitasi	$g = \frac{GM}{r^2}$
Percepatan gravitasi pada ketinggian h	$g_h = \frac{GM}{(R + h)^2}$
Energi potensial gravitasi umum	$E_p = -\frac{GMm}{r}$
Kecepatan orbit satelit	$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$
Periode orbit satelit	$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{GM}}$
Hukum III Kepler	$\frac{T^2}{R^3} = \text{konstan}$

Catatan Penting: Tanda negatif pada energi potensial gravitasi umum ($E_p = -GMm/r$) bukan menunjukkan bahwa energi tersebut "kurang dari nol" secara fisis, melainkan konsekuensi dari pemilihan titik acuan pada jarak tak terhingga. Selain itu, perlu diingat bahwa kecepatan dan periode orbit satelit **tidak bergantung pada massa satelit itu sendiri** – keduanya hanya ditentukan oleh massa benda yang diorbit (M) dan radius orbit (r).



Semester Dua

4	Fluida	125
4.1	Fluida Statis	
4.2	Fluida Dinamis	
5	Kalor dan Termodinamika	155
5.1	Suhu dan Kalor	
5.2	Teori Kinetik Gas	
5.3	Hukum Termodinamika	
6	Getaran, Gelombang dan Optika	199
6.1	Getaran dan Gelombang Mekanik	
6.2	Gelombang Bunyi	
6.3	Gelombang Cahaya dan Optik Geometri	
	Daftar Bacaan	249
	Al-Qur'an Karim	
	Buku	
	Indeks	251



4. Fluida

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, murid mampu:

- ✓ Mengidentifikasi konsep tekanan hidrostatik pada ruang terbuka dan tertutup sebagai wujud memahami fenomena distribusi tekanan cairan yang diatur secara rapi dan seimbang oleh Allah SWT di alam semesta.
- ✓ Menjelaskan aplikasi Prinsip Archimedes dan fenomena gaya apung dalam kehidupan sehari-hari dengan menunjukkan sikap kritis, teliti, serta rasa ingin tahu yang tinggi.
- ✓ Mengidentifikasi karakteristik tegangan permukaan zat cair dan viskositas (kekentalan) zat cair secara fisis sebagai bentuk pengamatan terhadap keunikan sifat materi (sunnatullah) yang menopang kehidupan.
- ✓ Menerapkan konsep kontinuitas dan Hukum Bernoulli dalam fenomena fluida dinamis secara tepat, logis, dan sistematis dalam memecahkan berbagai permasalahan sains kontekstual.
- ✓ Menunjukkan perilaku jujur, disiplin, bertanggung jawab, dan tekun dalam mengkaji prinsip-prinsip mekanika fluida sebagai implementasi perintah Al-Qur'an untuk senantiasa melakukan *tafakkur* terhadap ciptaan-Nya.

Cakupan Materi

Fluida Statis
Fluida Dinamis

Pengantar

Fluida dalam Perspektif Al-Qur'an

Pernahkah kamu merenungkan mengapa kapal laut yang terbuat dari besi super berat dapat terapung dengan tenang di atas samudera, sementara sebutir batu kecil yang kamu lempar langsung tenggelam ke dasarnya? Atau bagaimana air yang mengalir dari hulu sungai yang lebar tiba-tiba bergerak lebih cepat saat melewati celah bebatuan yang sempit? Allah ﷻ senantiasa mengajak kita untuk memperhatikan sifat zat cair dan gas di sekitar kita sebagai tanda kekuasaan-Nya yang penuh keteraturan:

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَاخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ وَالْفُلْكِ الَّتِي تَجْرِي فِي
 الْبَحْرِ بِمَا يَنْفَعُ النَّاسَ وَمَا أَنْزَلَ اللَّهُ مِنَ السَّمَاءِ مِنْ مَّاءٍ فَأَحْيَا بِهِ الْأَرْضَ بَعْدَ
 مَوْتِهَا وَبَثَّ فِيهَا مِنْ كُلِّ دَابَّةٍ ^طوَتَصْرِيفِ الرِّيْحِ وَالسَّحَابِ الْمُسَخَّرِ بَيْنَ السَّمَاءِ
 وَالْأَرْضِ لَآيَاتٍ لِّقَوْمٍ يَعْقِلُونَ

“Sesungguhnya pada penciptaan langit dan bumi, pergantian malam dan siang, kapal yang berlayar di laut dengan (muatan) yang bermanfaat bagi manusia, apa yang diturunkan Allah dari langit berupa air, lalu dengan air itu Dia hidupan bumi setelah mati (kering)-nya, dan Dia tebarkan di dalamnya bermacam-macam binatang, dan perkisaran angin dan awan yang dikendalikan antara langit dan bumi, (semua itu) sungguh, merupakan tanda-tanda (kebesaran Allah) bagi orang-orang yang mengerti.”
 (QS. Al-Baqarah [2]: 164)

Kata *‘‘kapal yang berlayar di laut’’* dan *‘‘perkisaran angin’’* dalam ayat ini menunjukkan fenomena fisis dari zat yang dapat mengalir. Allah ﷻ tidak hanya menciptakan air dan udara sebagai penopang kehidupan, melainkan melengkapinya dengan hukum-hukum mekanika yang memungkinkan materi seberat kapal laut memanfaatkan ruang pori-pori zat cair untuk menghasilkan gaya angkat, serta memungkinkan massa udara bergerak membawa awan-awan tebal melintasi benua.

Di dalam Fisika, zat yang dapat mengalir dan memberikan sedikit hambatan terhadap perubahan bentuk ketika ditekan dinamakan **fluida**. Istilah fluida mencakup zat cair dan gas. Kajian ini dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu **fluida statis** yang mempelajari sifat-sifat fluida dalam keadaan diam seperti tekanan hidrostatik, hukum Pascal, dan hukum Archimedes serta **fluida dinamis** yang mempelajari perilaku fluida ketika bergerak atau mengalir.

Al-Qur'an sering kali menggunakan karakteristik aliran fluida untuk mengilustrasikan bagaimana dua massa zat alir berinteraksi dengan batas-batas fisis yang sangat rapi. Allah ﷻ berfirman:

وَهُوَ الَّذِي مَرَجَ الْبَحْرَيْنِ هَذَا عَذْبٌ فُرَاتٌ وَهَذَا مِلْحٌ أُجَاجٌ وَجَعَلَ بَيْنَهُمَا
 بَرْزَخًا وَجِجْرًا مَحْجُورًا

“Dan Dialah yang membiarkan dua laut mengalir (berdampingan); yang ini tawar dan segar dan yang lain sangat asin lagi pahit; dan Dia jadikan antara keduanya dinding dan batas yang tidak tembus.”
(QS. Al-Furqan [25]: 53)

Frasa *‘‘mengalir berdampingan’’* dan adanya *‘‘batas yang tidak tembus’’* (*barzakh-an*) jika ditinjau secara mekanika fluida berkaitan erat dengan perbedaan densitas (massa jenis), tegangan permukaan, serta sifat viskositas (kekentalan) dari masing-masing fluida. Karakteristik molekul air yang berbeda menciptakan dinamika aliran yang menjaga kemurnian masing-masing cairan, sebuah keteraturan mekanika mikro yang bekerja pada skala makro.

Sama seperti materi lainnya, fluida tunduk pada hukum-hukum kelestarian yang mengikat. Setiap tetes air yang mengalir dalam pipa atau embusan angin di udara bergerak berdasarkan parameter fisis yang terukur secara matematis. Hal ini sejalan dengan penegasan Allah ﷻ mengenai penciptaan alam semesta:

خَلَقَ السَّمَوَاتِ بِغَيْرِ عَمَدٍ تَرَوْنَهَا وَآلَتْ فِي الْأَرْضِ رَوَاسِي أَنْ تُمِيدَ بِكُمْ وَبَثَّ فِيهَا مِنْ كُلِّ دَابَّةٍ وَأَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَأَنْبَتْنَا فِيهَا مِنْ كُلِّ زَوْجٍ كَرِيمٍ

“Dia menciptakan langit tanpa tiang yang kamu melihatnya dan Dia meletakkan gunung-gunung (di permukaan) bumi agar ia tidak mengguncangkan kamu; dan membiarkan berkembang biak di dalamnya segala macam jenis hewan. Dan Kami turunkan air hujan dari langit, lalu Kami tumbuhkan padanya segala macam tumbuh-tumbuhan yang baik.”
(QS. Luqman [31]: 10)

Konsep penurunan air dari langit dan mekanismenya di bumi melibatkan variasi tekanan udara dan gaya gravitasi. Batasan-batasan alamiah ini dirumuskan oleh para fisikawan menjadi persamaan fundamental fluida, seperti Asas Kontinuitas yang menjelaskan debit aliran zat alir, hingga Asas Bernoulli yang menghubungkan antara kelajuan fluida, tekanan, dan ketinggian pada jalur aliran.

Selain mempelajari besaran tekanan dan gaya apung pada ranah statis, ruang lingkup bab fluida ini juga akan memperluas pemahamanmu pada aplikasi teknologi modern, seperti sistem hidrolik pada rem kendaraan, mekanisme gaya angkat pada sayap pesawat terbang, hingga prinsip kerja venturimeter yang digunakan untuk mengukur laju aliran fluida di industri.

Pada bab ini, kamu akan mempelajari bagaimana memformulasikan besaran-besaran fluida tersebut ke dalam persamaan matematika, menganalisis hubungan antara massa jenis, kedalaman, dan tekanan, serta memahami hukum-hukum utama yang mendasari perilaku zat alir baik dalam kondisi diam maupun bergerak.

لَا
إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَاخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ لَآيَاتٍ لِأُولِي الْأَلْبَابِ

“Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi serta pergantian malam dan siang terdapat tanda-tanda (kebesaran Allah) bagi orang yang berakal,

(QS. Ali Imran [3]: 190)

Mempelajari mekanika fluida adalah langkah konkret bagi kita sebagai *ulul albab* untuk menyingkap rahasia di balik elastisitas dan kekuatan zat alir yang Allah hamparkan di bumi. Setiap variabel, rumus, dan asas konservasi yang akan kamu bedah di dalam bab ini sejatinya adalah instrumen ilmiah manusia untuk mengenali dan mengagumi betapa sempurnanya **sistem pengaliran dan hukum keseimbangan** yang dirancang oleh Sang Maha Pencipta.

4.1 Fluida Statis

Dalam kehidupan sehari-hari, kita sering berinteraksi dengan zat yang dapat mengalir dan menyesuaikan bentuknya dengan wadah yang ditempatinya; air dalam gelas, udara dalam ban, minyak dalam botol. Zat-zat semacam ini disebut **fluida**. Namun, pertanyaan yang lebih mendasar perlu dijawab terlebih dahulu: mengapa kapal yang sangat berat dapat terapung di atas air, sementara sebutir kerikil yang jauh lebih ringan justru tenggelam? Mengapa tekanan udara di puncak gunung lebih rendah dibandingkan di permukaan laut? Dan mengapa dongkrak hidrolik mampu mengangkat mobil hanya dengan gaya tangan yang kecil?

Pertanyaan-pertanyaan inilah yang akan terjawab melalui pembahasan **Fluida Statis**, yaitu cabang fisika yang mempelajari perilaku fluida dalam keadaan diam (tidak mengalir). Pembahasan ini berhasil menyatukan berbagai fenomena yang tampak berbeda – benda yang mengapung, tekanan di kedalaman air, gaya pada sistem hidrolik ke dalam satu kerangka penjelasan yang konsisten: **setiap fluida diam memberikan tekanan ke segala arah, dan tekanan inilah yang menjadi sumber dari berbagai fenomena tersebut**.

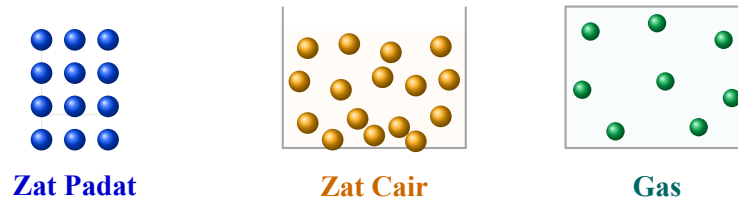
Pada bagian ini akan dipelajari konsep dasar fluida, massa jenis dan berat jenis, tekanan dan tekanan hidrostatik, Hukum Pascal, Hukum Archimedes, tegangan permukaan dan kapilaritas, viskositas, serta penerapan fluida statis dalam kehidupan.

4.1.1 Konsep Fluida

Fluida adalah zat yang dapat mengalir dan menyesuaikan bentuknya dengan wadah yang ditempatinya. Istilah fluida mencakup dua jenis zat, yaitu **zat cair** dan **gas**. Berbeda dengan zat padat yang memiliki bentuk tetap, fluida tidak memiliki bentuk tetap karena partikel-partikel penyusunnya dapat bergerak relatif satu sama lain dengan mudah.

Berdasarkan keadaannya, fluida dibedakan menjadi:

- **Fluida statis**, yaitu fluida dalam keadaan diam (tidak mengalir), sehingga setiap partikel fluida tidak memiliki kecepatan relatif terhadap partikel lainnya.
- **Fluida dinamis**, yaitu fluida yang sedang mengalir atau bergerak.



Gambar 4.1: Susunan partikel pada zat padat, cair, dan gas. Pada fluida (cair dan gas), partikel dapat bergerak relatif lebih bebas dibandingkan zat padat.

Sifat-Sifat Fluida

Beberapa sifat penting fluida adalah:

- Tidak memiliki bentuk yang tetap, mengikuti bentuk wadahnya.
- Dapat mengalir dari satu tempat ke tempat lain.
- Memberikan tekanan ke segala arah pada wadah yang menampungnya.
- Zat cair hampir tidak dapat dimampatkan, sedangkan gas dapat dimampatkan dengan mudah.

4.1.2 Massa Jenis dan Berat Jenis

Sebelum membahas tekanan dan hukum-hukum fluida, perlu dipahami terlebih dahulu satu besaran dasar yang menjelaskan mengapa kayu dan besi dengan ukuran yang sama dapat memiliki massa yang sangat berbeda, yaitu **massa jenis**. Massa jenis (densitas) adalah besaran yang menyatakan perbandingan antara massa suatu zat dengan volumenya, dan menggambarkan seberapa rapat partikel-partikel penyusun suatu zat.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.1)$$

dengan:

- ρ = massa jenis (kg/m^3)
- m = massa zat (kg)
- V = volume zat (m^3)

Satuan massa jenis dalam SI adalah kg/m^3 , meskipun dalam praktiknya sering digunakan satuan g/cm^3 ($1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$). Massa jenis air pada suhu 4°C adalah 1000 kg/m^3 dan digunakan sebagai acuan dalam konsep berat jenis.

Berat Jenis Sebagai Perbandingan terhadap Air

Berat jenis (*specific gravity*) adalah perbandingan antara massa jenis suatu zat dengan massa jenis air. Karena merupakan perbandingan dua besaran yang sejenis, berat jenis tidak memiliki satuan (*dimensionless*).

$$s = \frac{\rho_{\text{zat}}}{\rho_{\text{air}}} \quad (4.2)$$

Berat jenis inilah yang nantinya digunakan secara praktis untuk memperkirakan apakah suatu benda akan mengapung atau tenggelam saat dicelupkan ke dalam air – jika $s < 1$, benda lebih ringan daripada air pada volume yang sama, dan sebaliknya jika $s > 1$.

Contoh Soal

Sebuah balok memiliki massa 2 kg dan volume 0,004 m³. Tentukan massa jenis balok tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $m = 2$ kg, $V = 0,004$ m³

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{2}{0,004}$$

$$\rho = 500 \text{ kg/m}^3$$

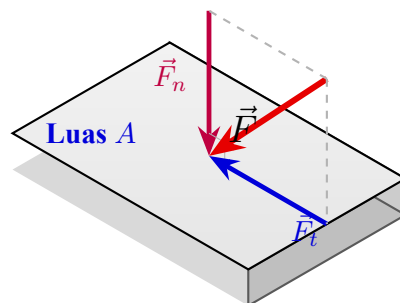
4.1.3 Tekanan

Setelah memahami massa jenis, pertanyaan berikutnya adalah: bagaimana suatu gaya yang bekerja pada permukaan zat dapat menghasilkan efek yang berbeda-beda, bergantung pada luas permukaan tempat gaya tersebut bekerja? Inilah yang dijelaskan oleh besaran **tekanan** (P), yaitu besarnya gaya yang bekerja tegak lurus pada suatu permukaan dibagi dengan luas permukaan tersebut.

$$P = \frac{F_n}{A} \quad (4.3)$$

dengan:

- P = tekanan (Pa atau N/m²)
- F_n = gaya yang bekerja tegak lurus permukaan (N)
- A = luas permukaan (m²)



Gambar 4.2: Analisis komponen vektor gaya datang 3D. Gaya luar $\vec{F}$ menekan miring ke permukaan dan diuraikan menjadi komponen Normal ($\vec{F}_n$) yang tegak lurus menekan bidang dan komponen Tangensial ($\vec{F}_t$) yang sejajar menyapu permukaan bidang. Besar gaya F_n bekerja tegak lurus terhadap permukaan seluas A , menghasilkan tekanan $P = F_n/A$.

Satuan Tekanan

Satuan tekanan dalam SI adalah pascal (Pa), dengan $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$. Satuan lain yang sering digunakan adalah atmosfer (atm), milimeter air raksa (mmHg), dan bar, dengan hubungan:

$$1 \text{ atm} = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa} = 76 \text{ cmHg}$$

Contoh Soal

Sebuah gaya sebesar 200 N bekerja tegak lurus pada permukaan seluas $0,5 \text{ m}^2$. Tentukan tekanan yang dihasilkan!

Penyelesaian:

Diketahui: $F = 200 \text{ N}$, $A = 0,5 \text{ m}^2$

$$P = \frac{F}{A} = \frac{200}{0,5}$$

$$P = 400 \text{ Pa}$$

4.1.4 Tekanan Hidrostatik

Pada pembahasan sebelumnya, tekanan dijelaskan sebagai gaya yang bekerja pada suatu permukaan. Namun, terdapat satu sumber tekanan yang khas pada fluida, yang muncul bukan dari gaya luar, melainkan dari **berat fluida itu sendiri**, yaitu **tekanan hidrostatik**. Inilah sebabnya seorang penyelam merasakan tekanan yang semakin besar ketika menyelam semakin dalam, meskipun tidak ada gaya luar tambahan yang diberikan padanya.

Tekanan hidrostatik adalah tekanan yang disebabkan oleh berat zat cair pada suatu titik di dalam fluida akibat adanya gaya gravitasi.

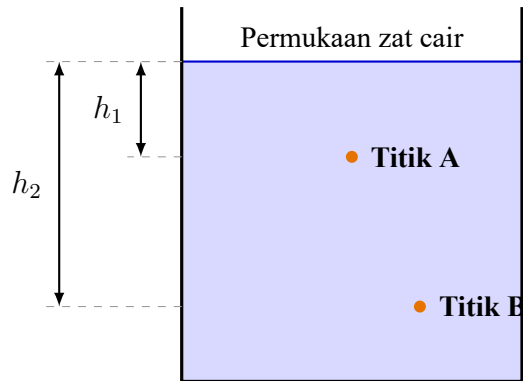
$$P_h = \rho g h \quad (4.4)$$

dengan:

- P_h = tekanan hidrostatik (Pa)
- ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- h = kedalaman titik diukur dari permukaan zat cair (m)

Apabila di atas permukaan zat cair terdapat tekanan atmosfer (P_0), maka tekanan total (tekanan absolut) pada suatu titik merupakan jumlah dari tekanan atmosfer dan tekanan hidrostatik:

$$P = P_0 + \rho g h \quad (4.5)$$



Gambar 4.3: Tekanan hidrostatik bertambah besar terhadap kedalaman. Titik B yang lebih dalam ($h_2 > h_1$) memiliki tekanan hidrostatik yang lebih besar daripada titik A.

Hukum Utama Hidrostatik

Semua titik yang terletak pada kedalaman yang sama di dalam suatu fluida sejenis yang diam memiliki tekanan yang sama besar; tidak bergantung pada bentuk wadahnya.

Sifat inilah yang menjelaskan mengapa bentuk wadah (silinder, kerucut, atau bentuk tidak beraturan sekalipun) tidak memengaruhi besar tekanan pada suatu kedalaman tertentu – yang menentukan hanyalah jenis fluida (ρ) dan kedalamannya (h).

Contoh Soal

Tentukan tekanan hidrostatik pada kedalaman 5 m di bawah permukaan air! ($\rho_{\text{air}} = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 10 \text{ m/s}^2$)

Penyelesaian:

Diketahui: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 10 \text{ m/s}^2$, $h = 5 \text{ m}$

$$P_h = \rho g h = (1000)(10)(5)$$

$$P_h = 50.000 \text{ Pa}$$

4.1.5 Hukum Pascal

Tekanan hidrostatik pada subbab sebelumnya menjelaskan bagaimana tekanan muncul akibat berat fluida itu sendiri. Namun, bagaimana jika tekanan diberikan secara aktif dari luar pada fluida yang terkurung dalam ruang tertutup? Pertanyaan inilah yang dijawab oleh **Hukum Pascal**, yang dirumuskan oleh Blaise Pascal dan menjadi dasar prinsip kerja berbagai peralatan hidrolik.

Tekanan yang diberikan pada suatu fluida dalam ruang tertutup akan diteruskan ke segala arah dengan besar yang sama.

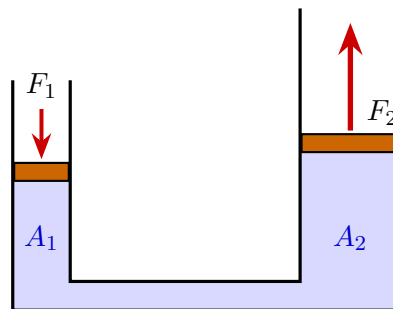
Karena tekanan diteruskan sama besar ke segala arah, tekanan pada penghisap kecil (P_1) akan sama dengan tekanan pada penghisap besar (P_2):

$$P_1 = P_2$$

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (4.6)$$

dengan:

- F_1 = gaya pada penghisap kecil (N)
- F_2 = gaya pada penghisap besar (N)
- A_1 = luas penampang penghisap kecil (m^2)
- A_2 = luas penampang penghisap besar (m^2)



Gambar 4.4: Prinsip kerja dongkrak hidrolik berdasarkan Hukum Pascal. Gaya masukan yang kecil (F_1) pada penampang sempit (A_1) diteruskan oleh fluida untuk menghasilkan gaya angkat yang jauh lebih besar (F_2) pada penampang yang luas (A_2).

Mengapa Gaya Dapat Dilipatgandakan?

Karena tekanan pada kedua sisi harus sama ($P_1 = P_2$), sementara A_2 jauh lebih besar daripada A_1 , maka F_2 juga harus jauh lebih besar daripada F_1 agar perbandingan F/A tetap sama pada kedua sisi. Inilah sebabnya gaya tangan yang kecil pada penghisap sempit dapat menghasilkan gaya yang sangat besar pada penghisap luas, tanpa melanggar hukum kekekalan energi – sebagai konsekuensinya, penghisap kecil harus berpindah jauh lebih besar dibandingkan perpindahan penghisap besar.

Contoh Soal

Sebuah dongkrak hidrolik memiliki penghisap kecil berluas 10 cm^2 dan penghisap besar berluas 100 cm^2 . Jika gaya yang diberikan pada penghisap kecil sebesar 50 N , tentukan gaya yang dihasilkan pada penghisap besar!

Penyelesaian:

Diketahui: $A_1 = 10 \text{ cm}^2$, $A_2 = 100 \text{ cm}^2$, $F_1 = 50 \text{ N}$

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad \Rightarrow \quad F_2 = F_1 \times \frac{A_2}{A_1}$$

$$F_2 = 50 \times \frac{100}{10}$$

$$F_2 = 500 \text{ N}$$

4.1.6 Hukum Archimedes

Hukum Pascal menjelaskan bagaimana tekanan dapat dilipatgandakan dalam sistem tertutup. Namun, pertanyaan awal yang sempat diajukan di pembuka bab – mengapa kapal yang sangat berat dapat terapung di atas air – belum terjawab. Jawabannya terletak pada **Hukum Archimedes**, yang menjelaskan gaya yang dialami benda ketika dicelupkan ke dalam fluida.

Setiap benda yang dicelupkan sebagian atau seluruhnya ke dalam fluida akan mengalami gaya angkat ke atas (gaya apung) yang besarnya sama dengan berat fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut.

$$F_A = \rho_f g V_f \quad (4.7)$$

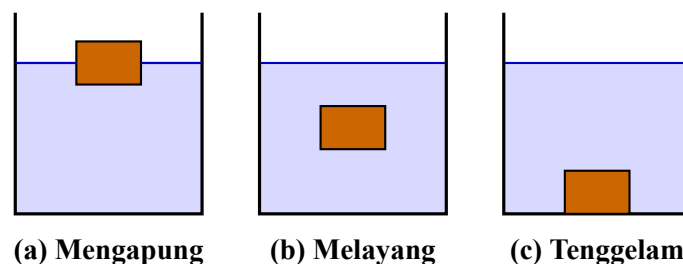
dengan:

- F_A = gaya apung/gaya Archimedes (N)
- ρ_f = massa jenis fluida (kg/m^3)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- V_f = volume fluida yang dipindahkan (m^3)

Tiga Keadaan Benda dalam Fluida

Berdasarkan perbandingan antara massa jenis benda dan massa jenis fluida, terdapat tiga keadaan yang mungkin dialami oleh suatu benda:

- **Mengapung** – Terjadi jika $\rho_b < \rho_f$. Hanya sebagian volume benda yang tercelup di bawah permukaan fluida.
- **Melayang** – Terjadi jika $\rho_b = \rho_f$. Seluruh volume benda tercelup dan berada dalam kesetimbangan di dalam fluida.
- **Tenggelam** – Terjadi jika $\rho_b > \rho_f$. Benda tidak mampu ditahan oleh gaya apung dan jatuh kandas hingga ke dasar wadah.



Gambar 4.5: Tiga keadaan benda dalam fluida: (a) mengapung, (b) melayang, dan (c) tenggelam, bergantung pada perbandingan massa jenis benda (ρ_b) terhadap massa jenis fluida (ρ_f).

Pada keadaan mengapung, benda tidak memerlukan seluruh volumenya tercelup untuk menyeimbangkan beratnya – inilah sebabnya kapal logam yang berongga dapat mengapung meskipun massa jenis logam penyusunnya lebih besar daripada air: dengan bentuk berongga, volume air yang dipindahkan menjadi sangat besar sehingga gaya apung yang dihasilkan mampu menyeimbangkan berat total kapal.

Contoh Soal

Sebuah benda bervolume $0,002 \text{ m}^3$ dicelupkan seluruhnya ke dalam air. Tentukan besar gaya apung yang dialami benda tersebut! ($\rho_{\text{air}} = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 10 \text{ m/s}^2$)

Penyelesaian:

Diketahui: $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 10 \text{ m/s}^2$, $V_f = 0,002 \text{ m}^3$

$$F_A = \rho_f g V_f = (1000)(10)(0,002)$$

$$F_A = 20 \text{ N}$$

4.1.7 Tegangan Permukaan dan Kapilaritas

Hukum Archimedes menjelaskan gaya apung pada benda yang tercelup dalam fluida. Namun, terdapat fenomena fluida lain yang tidak dapat dijelaskan oleh tekanan maupun gaya apung saja: mengapa serangga tertentu dapat berjalan di atas permukaan air tanpa tenggelam, dan mengapa air dapat naik sendiri melalui sumbu kompor melawan arah gravitasi? Kedua fenomena ini dijelaskan oleh **tegangan permukaan** dan **kapilaritas**.

Tegangan permukaan adalah kecenderungan permukaan zat cair untuk berkontraksi sehingga luas permukaannya menjadi seminimal mungkin, akibat adanya gaya kohesi antarmolekul zat cair pada lapisan permukaannya.

$$\gamma = \frac{F}{d} \quad (4.8)$$

dengan:

- γ = tegangan permukaan (N/m)
- F = gaya yang bekerja sepanjang permukaan (N)
- d = panjang permukaan tempat gaya bekerja (m)

Tegangan permukaan inilah yang menyebabkan jarum dapat mengapung di permukaan air meskipun massa jenisnya lebih besar daripada air – selama beratnya tidak melebihi gaya tegangan permukaan yang menahannya.

Kapilaritas: Pertarungan Kohesi dan Adhesi

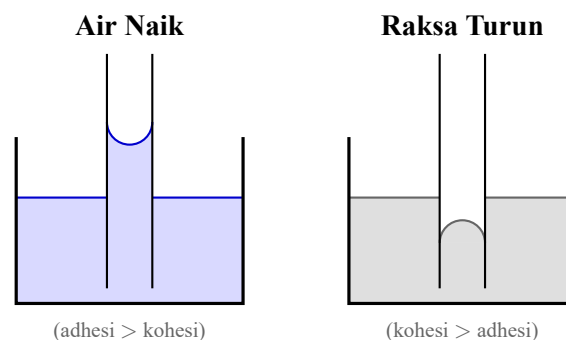
Kapilaritas adalah peristiwa naik atau turunnya permukaan zat cair pada pipa berukuran sangat kecil (pipa kapiler), sebagai akibat dari interaksi antara dua gaya: gaya **kohesi** (tarik-menarik antarmolekul zat cair) dan gaya **adhesi** (tarik-menarik antara molekul zat cair dan dinding pipa).

- Jika adhesi $>$ kohesi, zat cair akan **naik** pada pipa kapiler (misalnya air pada pipa kaca).
- Jika kohesi $>$ adhesi, zat cair akan **turun** pada pipa kapiler (misalnya air raksa pada pipa kaca).

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r} \quad (4.9)$$

dengan:

- h = kenaikan/penurunan zat cair pada pipa kapiler (m)
- γ = tegangan permukaan zat cair (N/m)
- θ = sudut kontak antara zat cair dan dinding pipa
- ρ = massa jenis zat cair (kg/m^3)
- r = jari-jari pipa kapiler (m)



Gambar 4.6: Peristiwa kapilaritas: permukaan air naik pada pipa kapiler dan membentuk meniskus cekung karena gaya adhesi $>$ kohesi. Sebaliknya, permukaan raksa turun pada pipa kapiler dan membentuk meniskus cembung karena gaya kohesi $>$ adhesi.

Perlu diperhatikan bahwa h berbanding terbalik dengan jari-jari pipa r – artinya semakin kecil/sempit pipa kapiler, semakin besar kenaikan (atau penurunan) zat cair yang terjadi. Sifat inilah yang menjelaskan mengapa pori-pori sangat sempit pada akar dan batang tanaman justru sangat efektif untuk mengangkut air hingga ke bagian tanaman yang tinggi.

4.1.8 Viskositas

Tegangan permukaan dan kapilaritas menjelaskan perilaku fluida pada lapisan permukaannya. Namun, ketika suatu benda bergerak *di dalam* fluida – misalnya sebutir kelereng yang dijatuhkan ke dalam madu – mengapa benda tersebut bergerak lebih lambat dibandingkan jika dijatuhkan di udara? Jawabannya terletak pada **viskositas**, yaitu ukuran kekentalan suatu fluida yang menyatakan besarnya gaya gesek internal antara lapisan-lapisan fluida saat fluida tersebut mengalir atau saat suatu benda bergerak di dalamnya.

Gaya Stokes pada Bola yang Bergerak dalam Fluida

Ketika sebuah bola bergerak di dalam fluida kental, bola tersebut akan mengalami gaya gesek yang disebut **gaya Stokes**, sesuai dengan Hukum Stokes:

$$F_s = 6\pi\eta rv \quad (4.10)$$

dengan:

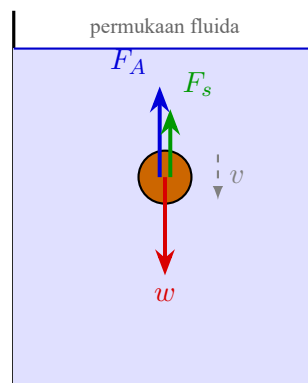
- F_s = gaya gesek Stokes (N)
- η = koefisien viskositas fluida (Pa·s)
- r = radius bola (m)
- v = kelajuan bola relatif terhadap fluida (m/s)

Kecepatan Terminal

Ketika sebuah bola dijatuhkan ke dalam fluida kental, bola tersebut mula-mula akan mengalami percepatan. Namun, karena gaya gesek Stokes (F_s) bertambah besar seiring bertambahnya kelajuan v , pada suatu saat gaya berat bola akan tepat seimbang dengan jumlah gaya apung dan gaya gesek Stokes. Pada keadaan ini, bola bergerak dengan kelajuan konstan yang disebut **kecepatan terminal** (v_t).

$$v_t = \frac{2r^2g(\rho_b - \rho_f)}{9\eta} \quad (4.11)$$

dengan ρ_b adalah massa jenis bola dan ρ_f adalah massa jenis fluida.



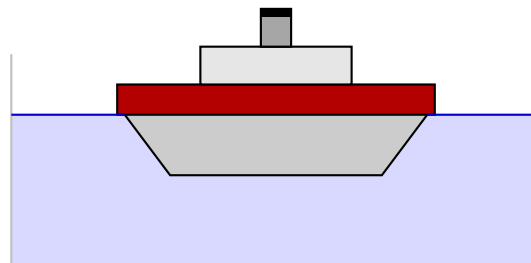
Gambar 4.7: Sebuah bola yang bergerak jatuh di dalam fluida kental mengalami tiga gaya utama: gaya berat w (ke bawah), gaya apung F_A (ke atas), dan gaya gesek Stokes F_s (ke atas yang melawan arah gerak benda v).

Perhatikan bahwa v_t berbanding lurus dengan r^2 – artinya bola yang lebih besar akan mencapai kecepatan terminal yang jauh lebih besar dibandingkan bola yang lebih kecil, meskipun terbuat dari material yang sama. Sifat inilah yang menjelaskan mengapa butiran debu jatuh sangat lambat di udara, sementara batu kerikil dengan massa jenis yang sama jatuh jauh lebih cepat.

4.1.9 Penerapan Fluida Statis dalam Kehidupan

Setelah mempelajari konsep, hukum, dan sifat-sifat fluida statis, seluruh prinsip tersebut dapat dirangkai untuk menjelaskan berbagai teknologi dan fenomena alam yang dijumpai sehari-hari:

- **Dongkrak hidrolik dan rem hidrolik**, yang memanfaatkan Hukum Pascal untuk melipatgandakan gaya menggunakan perbedaan luas penampang.
- **Kapal laut dan kapal selam**, yang memanfaatkan Hukum Archimedes agar dapat mengapung atau menyelam dengan mengatur volume air yang dipindahkan.
- **Balon udara**, yang memanfaatkan prinsip gaya apung pada fluida gas (udara).
- **Jembatan ponton**, yaitu jembatan yang disangga oleh drum-drum terapung berdasarkan prinsip Archimedes.
- **Hidrometer**, alat untuk mengukur massa jenis zat cair berdasarkan kedalaman benda yang terapung.
- **Sumbu kompor dan penyerapan air oleh akar tanaman**, sebagai penerapan peristiwa kapilaritas.
- **Pelumas (oli) mesin kendaraan**, yang memanfaatkan sifat viskositas fluida untuk mengurangi gesekan antarkomponen mesin.
- **Tekanan ban kendaraan dan alat ukur tekanan darah (*sphygmomanometer*)**, yang bekerja berdasarkan prinsip tekanan fluida.



$$\text{Gaya Apung } (F_A) \geq \text{Berat Total Kapal } (w)$$

Gambar 4.8: Kapal laut dapat mengapung meskipun terbuat dari logam (massa jenis lebih besar dari air) karena bentuknya dirancang berongga sehingga volume air yang dipindahkan menghasilkan gaya apung yang sangat besar.

Dari seluruh penerapan ini, terlihat bahwa fluida statis bukan sekadar konsep abstrak, melainkan dasar dari berbagai teknologi yang digunakan secara luas – mulai dari peralatan sederhana di rumah tangga hingga moda transportasi laut dan udara berskala besar.

4.1.10 Ringkasan

Tabel 4.1: Persamaan Penting Fluida Statis

Konsep	Persamaan
Massa jenis	$\rho = \frac{m}{V}$
Berat jenis	$s = \frac{\rho_{\text{zat}}}{\rho_{\text{air}}}$
Tekanan	$P = \frac{F}{A}$
Tekanan hidrostatik	$P_h = \rho gh$
Tekanan absolut	$P = P_0 + \rho gh$
Hukum Pascal	$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$
Hukum Archimedes	$F_A = \rho_f g V_f$
Tegangan permukaan	$\gamma = \frac{F}{d}$
Kenaikan/penurunan kapiler	$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r}$
Gaya Stokes	$F_s = 6\pi\eta r v$
Kecepatan terminal	$v_t = \frac{2r^2 g (\rho_b - \rho_f)}{9\eta}$

Catatan Penting: Tiga keadaan benda dalam fluida (mengapung, melayang, tenggelam) ditentukan oleh perbandingan massa jenis benda terhadap massa jenis fluida, **bukan** oleh massa maupun berat benda secara mutlak – inilah sebabnya kapal yang sangat berat tetap dapat mengapung selama bentuknya dirancang agar volume fluida yang dipindahkan cukup besar. Selain itu, perlu diingat bahwa tekanan hidrostatik ($P_h = \rho gh$) hanya bergantung pada kedalaman dan jenis fluida – **tidak bergantung** pada bentuk maupun luas permukaan wadah yang menampungnya.

4.2 Fluida Dinamis

Pada bab sebelumnya telah dipelajari bagaimana fluida yang diam memberikan tekanan ke segala arah, menjelaskan mengapa kapal dapat mengapung dan mengapa dongkrak hidrolik mampu mengangkat beban yang sangat berat. Namun, dalam kehidupan sehari-hari, fluida jarang benar-benar diam – air mengalir dari keran, darah mengalir dalam pembuluh, udara mengalir di sekitar sayap pesawat. Pertanyaan baru pun muncul: mengapa air yang mengalir melalui selang akan menyembur lebih kencang ketika ujung selang dijepit

hingga menyempit? Mengapa pesawat seberat puluhan ton dapat terangkat ke udara hanya karena bentuk sayapnya? Dan mengapa cerobong asap pabrik dirancang tinggi dan ramping?

Pertanyaan-pertanyaan inilah yang akan terjawab melalui pembahasan **Fluida Dinamis**, yaitu cabang fisika yang mempelajari perilaku fluida dalam keadaan mengalir (bergerak). Sama seperti fluida statis yang disatukan oleh konsep tekanan, fluida dinamis disatukan oleh satu gagasan utama: **ketika fluida mengalir, terdapat hubungan timbal balik antara kelajuan aliran, tekanan, dan ketinggian fluida, yang bersumber dari hukum kekekalan massa dan hukum kekekalan energi.**

Pada bagian ini akan dipelajari karakteristik fluida dinamis, laju aliran dan debit, Persamaan Kontinuitas, Persamaan Bernoulli, Teorema Torricelli, Efek Venturi, gaya angkat berdasarkan prinsip Bernoulli, viskositas dan Hukum Stokes, serta penerapan fluida dinamis dalam kehidupan.

4.2.1 Karakteristik Fluida Dinamis

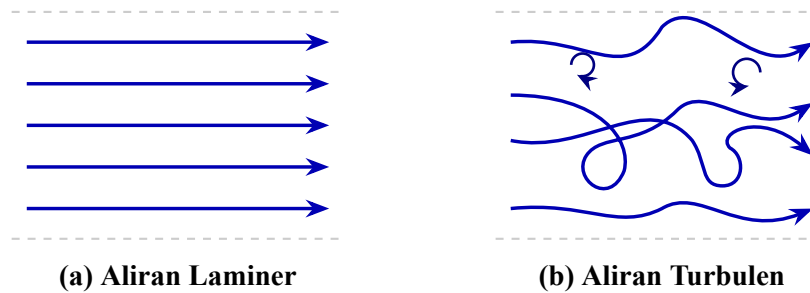
Fluida nyata yang mengalir di alam sangatlah kompleks – kelajuannya dapat berubah-ubah, alirannya dapat berputar membentuk pusaran, dan gesekan internalnya dapat menghambat aliran dengan cara yang rumit untuk dianalisis secara matematis. Agar fenomena aliran fluida dapat dipelajari dengan persamaan yang sederhana, fisikawan menggunakan model yang disebut **fluida ideal**.

Fluida ideal adalah fluida yang dianggap memenuhi empat karakteristik berikut: aliran tunak, tidak kompresibel, tidak kental, dan mengalir mengikuti garis arus.

Empat Ciri Fluida Ideal

- **Aliran tunak** (*steady flow*), yaitu kecepatan partikel fluida pada suatu titik tertentu selalu sama dari waktu ke waktu, meskipun pada titik lain kecepatannya bisa berbeda.
- **Tidak kompresibel** (*incompressible*), artinya massa jenis fluida dianggap tetap selama mengalir, walaupun fluida tersebut mengalami tekanan.
- **Tidak kental** (*non-viscous*), yaitu fluida dianggap tidak mengalami gesekan internal, sehingga tidak ada energi yang hilang akibat gesekan selama aliran berlangsung.
- **Aliran garis arus** (*streamline*), yaitu aliran fluida bersifat laminar, mengikuti suatu lintasan tertentu yang disebut garis arus, dan tidak membentuk pusaran.

Garis arus (*streamline*) adalah lintasan yang dilalui oleh partikel-partikel fluida yang bergerak, di mana arah garis singgung pada setiap titik garis arus menyatakan arah kecepatan partikel fluida pada titik tersebut. Pada aliran laminar, garis-garis arus tidak saling berpotongan; sebaliknya, pada aliran turbulen, garis arus menjadi tidak beraturan dan membentuk pusaran (*eddy*).



Gambar 4.9: Perbandingan aliran laminar dengan aliran turbulen. Pada aliran turbulen, garis arus saling bercampur, berfluktuasi secara acak, dan pecah menjadi struktur pusaran (*eddy*) multi-skala.

Mengapa Model Ideal Tetap Berguna?

Aliran fluida nyata pada umumnya berada di antara kedua kondisi tersebut – tidak sepenuhnya laminar maupun sepenuhnya turbulen. Meskipun demikian, model fluida ideal dengan aliran laminar memberikan pendekatan yang cukup baik untuk banyak kasus aliran berkecepatan rendah, seperti air yang mengalir perlahan dalam pipa atau udara yang mengalir di sekitar benda pada kelajuan rendah. Inilah yang menjadi dasar bagi seluruh persamaan yang akan dibahas pada bab ini.

4.2.2 Laju Aliran dan Debit

Sebelum membahas hukum-hukum fluida dinamis, perlu dipahami terlebih dahulu satu besaran dasar yang menjelaskan mengapa bak mandi besar membutuhkan waktu lebih lama untuk terisi penuh dibandingkan gelas kecil meskipun keran air yang digunakan sama, yaitu **debit**. Debit adalah besaran yang menyatakan volume fluida yang mengalir melalui suatu penampang per satuan waktu.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (4.12)$$

dengan:

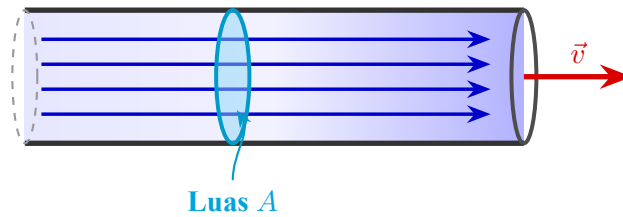
- Q = debit aliran (m^3/s)
- V = volume fluida yang mengalir (m^3)
- t = selang waktu (s)

Debit dalam Bentuk Luas Penampang dan Kelajuan

Debit aliran juga dapat dinyatakan dalam bentuk luas penampang pipa dan kelajuan aliran fluida. Jika fluida mengalir melalui pipa berpenampang luas A dengan kelajuan v , maka dalam selang waktu t , fluida menempuh jarak vt , sehingga volume fluida yang mengalir adalah $V = A v t$. Dengan demikian, debit dapat dituliskan sebagai:

$$Q = A v \quad (4.13)$$

dengan A adalah luas penampang pipa (m^2) dan v adalah kelajuan aliran fluida (m/s).



Gambar 4.10: Fluida mengalir melalui pipa berpenampang A dengan kelajuan v . Debit aliran $Q = Av$ menyatakan volume fluida yang melewati penampang tiap satuan waktu.

Satuan debit dalam SI adalah m^3/s , meskipun dalam praktiknya sering pula digunakan satuan liter/sekon (L/s), dengan hubungan $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ liter}$.

Contoh Soal

Air mengalir melalui sebuah pipa berdiameter 4 cm dengan kelajuan 2 m/s. Tentukan debit aliran air tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $r = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$, $v = 2 \text{ m/s}$

$$A = \pi r^2 = 3,14 \times (0,02)^2 = 1,256 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$Q = Av = 1,256 \times 10^{-3} \times 2$$

$$Q = 2,512 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \approx 2,51 \text{ L/s}$$

4.2.3 Persamaan Kontinuitas

Debit menjelaskan seberapa banyak fluida yang mengalir melalui suatu penampang per satuan waktu. Namun, apa yang terjadi jika fluida mengalir melalui pipa yang luas penampangnya berubah-ubah, misalnya menyempit di salah satu bagian? Apakah debitnya juga berubah? Pertanyaan inilah yang dijawab oleh **Persamaan Kontinuitas**, yang merupakan penerapan langsung dari hukum kekekalan massa pada aliran fluida.

Karena fluida ideal bersifat tidak kompresibel dan alirannya tunak, massa fluida yang masuk ke dalam suatu pipa pada selang waktu tertentu harus sama dengan massa fluida yang keluar pada selang waktu yang sama, sehingga tidak ada fluida yang terkumpul atau hilang di sepanjang pipa.

Konsekuensinya, debit aliran fluida ideal harus tetap (konstan) di sepanjang pipa, sehingga pada pipa dengan dua penampang berbeda (A_1 dan A_2) berlaku:

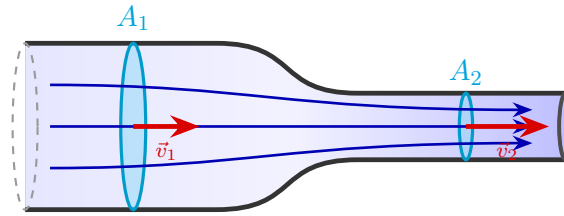
$$Q_1 = Q_2$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

(4.14)

dengan:

- A_1, A_2 = luas penampang pipa pada posisi 1 dan 2 (m^2)
- v_1, v_2 = kelajuan aliran fluida pada posisi 1 dan 2 (m/s)



Gambar 4.11: Pipa dengan penampang tidak seragam. Pada bagian pipa yang menyempit ($A_2 < A_1$), kelajuan aliran fluida menjadi lebih besar ($v_2 > v_1$) agar debit aliran (Q) tetap konstan di setiap titik.

Mengapa Aliran Lebih Cepat di Bagian yang Sempit?

Persamaan ini menjelaskan secara langsung mengapa air yang mengalir dari selang menyembur lebih kencang ketika ujung selang dijepit hingga menyempit: karena A mengecil sementara Q harus tetap konstan, maka v harus membesar agar perkalian Av tidak berubah. Sebaliknya, pada bagian pipa yang penampangnya lebih luas, kelajuan aliran fluida akan lebih kecil.

Persamaan kontinuitas dapat pula dikembangkan untuk pipa bercabang. Apabila sebuah pipa dengan penampang A_1 bercabang menjadi beberapa pipa dengan penampang $A_2, A_3, \dots$, maka debit total fluida yang masuk sama dengan jumlah debit fluida yang keluar melalui seluruh cabang:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 + A_3 v_3 + \dots$$

Contoh Soal

Sebuah pipa memiliki dua penampang berbeda. Penampang pertama berjari-jari 6 cm dan penampang kedua berjari-jari 2 cm. Jika kelajuan air pada penampang pertama adalah 1 m/s, tentukan kelajuan air pada penampang kedua!

Penyelesaian:

Diketahui: $r_1 = 6 \text{ cm}$, $r_2 = 2 \text{ cm}$, $v_1 = 1 \text{ m/s}$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad \Rightarrow \quad \pi r_1^2 v_1 = \pi r_2^2 v_2$$

$$v_2 = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 v_1 = \left(\frac{6}{2} \right)^2 \times 1$$

$$v_2 = 9 \text{ m/s}$$

4.2.4 Persamaan Bernoulli

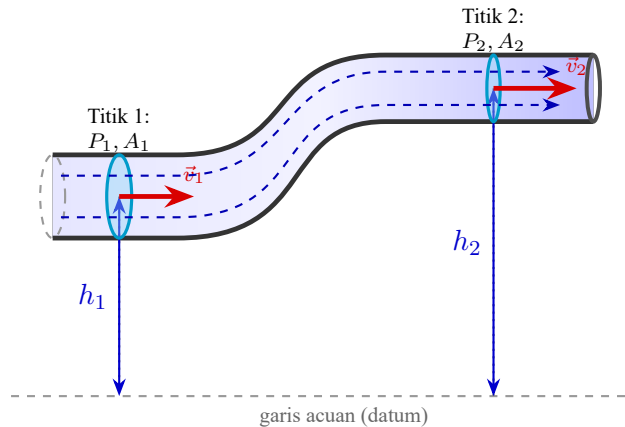
Persamaan kontinuitas menjelaskan hubungan antara luas penampang dan kelajuan aliran, namun belum menjelaskan bagaimana *tekanan* fluida berubah ketika kelajuannya berubah. Padahal, perubahan tekanan inilah yang nantinya menjelaskan berbagai fenomena penting – mulai dari semburan air dari tangki bocor hingga gaya angkat pada sayap pesawat. Hubungan ini dijelaskan oleh **Persamaan Bernoulli**, yang dirumuskan oleh Daniel Bernoulli berdasarkan hukum kekekalan energi mekanik pada aliran fluida ideal.

Pada aliran fluida ideal, jumlah antara tekanan, energi kinetik per satuan volume, dan energi potensial per satuan volume bersifat konstan di setiap titik sepanjang garis arus.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 \quad (4.15)$$

dengan:

- P_1, P_2 = tekanan fluida pada titik 1 dan 2 (Pa)
- ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)
- v_1, v_2 = kelajuan fluida pada titik 1 dan 2 (m/s)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- h_1, h_2 = ketinggian titik 1 dan 2 terhadap acuan tertentu (m)



Gambar 4.12: Aliran fluida pada pipa dengan ketinggian (h) dan luas penampang (A) yang berubah. Hukum Bernoulli menyatakan hubungan kekekalan energi antara tekanan (P), kelajuan aliran ($\vec{v}$), dan elevasi ketinggian (h).

Dua Kasus Khusus yang Penting

- **Fluida diam** ($v_1 = v_2 = 0$): persamaan Bernoulli akan tereduksi menjadi persamaan tekanan hidrostatik pada fluida statis, yaitu $P_1 - P_2 = \rho g(h_2 - h_1)$ – menunjukkan bahwa Persamaan Bernoulli sesungguhnya adalah perluasan dari konsep tekanan hidrostatik yang telah dipelajari sebelumnya.
- **Pipa mendatar** ($h_1 = h_2$): suku energi potensial pada kedua ruas saling meniadakan, sehingga persamaan menjadi:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Dari kasus pipa mendatar inilah diperoleh kesimpulan penting: jika kelajuan fluida **bertambah besar**, maka tekanan fluida pada titik tersebut akan **berkurang**, dan sebaliknya. Sifat inilah yang menjadi dasar dari Efek Venturi dan gaya angkat pesawat terbang yang akan dibahas pada subbab berikutnya.

Contoh Soal

Air mengalir melalui pipa mendatar dengan penampang menyempit. Pada penampang besar ($A_1 = 8 \text{ cm}^2$), kelajuan air adalah 2 m/s dan tekanannya $P_1 = 1,5 \times 10^5 \text{ Pa}$. Jika penampang kecil memiliki luas $A_2 = 2 \text{ cm}^2$, tentukan tekanan air pada penampang kecil tersebut! ($\rho_{\text{air}} = 1000 \text{ kg/m}^3$)

Penyelesaian:

Kelajuan pada penampang kecil (Persamaan Kontinuitas):

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 = \frac{8}{2} \times 2 = 8 \text{ m/s}$$

Karena pipa mendatar ($h_1 = h_2$), Persamaan Bernoulli menjadi:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$P_2 = P_1 + \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2) = 1,5 \times 10^5 + \frac{1}{2} (1000)(2^2 - 8^2)$$

$$P_2 = 1,5 \times 10^5 + 500(4 - 64) = 1,5 \times 10^5 - 3 \times 10^4$$

$$P_2 = 1,2 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Tekanan pada penampang kecil lebih rendah daripada penampang besar, sesuai dengan sifat yang baru saja dijelaskan.

4.2.5 Teorema Torricelli

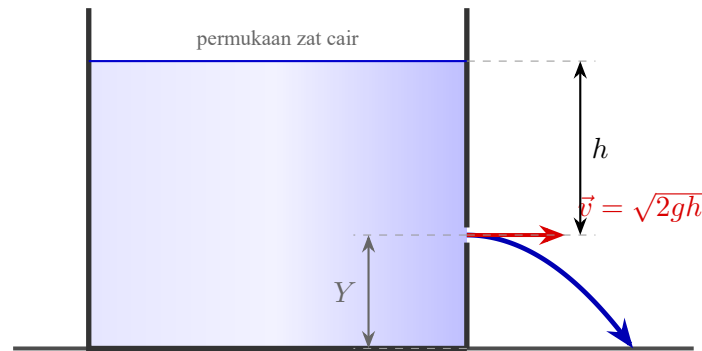
Persamaan Bernoulli menjelaskan hubungan umum antara tekanan, kelajuan, dan ketinggian fluida. Salah satu penerapan paling sederhana namun menarik dari persamaan ini adalah untuk menjawab pertanyaan: seberapa kencang air akan menyembur keluar dari sebuah lubang kecil pada dinding tangki yang bocor? Jawaban atas pertanyaan inilah yang dikenal sebagai **Teorema Torricelli**, yang dikemukakan oleh Evangelista Torricelli, seorang murid Galileo Galilei.

Tinjau sebuah tangki besar berisi zat cair dengan permukaan terbuka ke udara (tekanan atmosfer P_0), yang memiliki lubang kecil pada kedalaman h di bawah permukaan zat cair. Karena luas penampang tangki jauh lebih besar daripada luas lubang, kelajuan turunnya permukaan zat cair pada tangki dapat dianggap sangat kecil ($v_1 \approx 0$). Dengan menerapkan Persamaan Bernoulli antara permukaan zat cair dan lubang kebocoran – yang sama-sama berhubungan dengan tekanan atmosfer P_0 – diperoleh kelajuan semburan zat cair:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (4.16)$$

dengan:

- v = kelajuan semburan zat cair keluar dari lubang (m/s)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- h = kedalaman lubang diukur dari permukaan zat cair (m)



Gambar 4.13: Zat cair menyembur keluar melalui lubang kecil pada kedalaman h di bawah permukaan dengan kelajuan awal horizontal $\vec{v} = \sqrt{2gh}$, kemudian bergerak jatuh bebas mengikuti lintasan parabola akibat pengaruh gaya gravitasi.

Mengapa Bentuknya Sama dengan Jatuh Bebas?

Hasil ini menarik karena bentuknya sama persis dengan kelajuan benda yang jatuh bebas dari ketinggian h , meskipun mekanisme fisisnya berbeda – pada jatuh bebas, energi potensial benda diubah menjadi energi kinetik benda itu sendiri, sedangkan pada kebocoran tangki, energi potensial fluida pada kedalaman h diubah menjadi energi kinetik aliran fluida yang menyembur. Karena kesamaan bentuk inilah, teorema ini sering disebut juga sebagai **hukum Torricelli untuk kebocoran tangki**.

Setelah keluar dari lubang, zat cair akan bergerak mengikuti lintasan parabola seperti gerak peluru, karena dipengaruhi oleh kecepatan awal mendatar v dan percepatan gravitasi g yang bekerja ke bawah. Jarak mendatar (jangkauan) yang dicapai zat cair sebelum menyentuh lantai dapat dihitung menggunakan persamaan gerak parabola, sebagaimana telah dipelajari pada bab gerak.

Contoh Soal

Sebuah tangki air memiliki lubang kebocoran pada dinding, terletak 80 cm di bawah permukaan air dalam tangki. Tentukan kelajuan semburan air yang keluar dari lubang tersebut! ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

Penyelesaian:

Diketahui: $h = 0,8 \text{ m}$

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 10 \times 0,8} = \sqrt{16}$$

$$v = 4 \text{ m/s}$$

4.2.6 Efek Venturi

Teorema Torricelli menjelaskan kelajuan semburan fluida akibat perbedaan ketinggian. Namun, bagaimana jika perbedaan tekanan muncul bukan dari ketinggian, melainkan dari perubahan luas penampang pipa pada ketinggian yang sama? Fenomena inilah yang disebut **Efek Venturi**, yaitu peristiwa penurunan tekanan fluida yang terjadi ketika fluida mengalir melalui suatu penampang pipa yang menyempit.

Efek Venturi merupakan konsekuensi langsung dari Persamaan Kontinuitas (kelajuan fluida meningkat pada penampang sempit) yang dikombinasikan

dengan *Persamaan Bernoulli* (kelajuan yang lebih tinggi menyebabkan tekanan yang lebih rendah).

Alat yang memanfaatkan prinsip ini disebut **tabung Venturi** (*venturimeter*), yang digunakan untuk mengukur kelajuan aliran fluida dalam pipa.

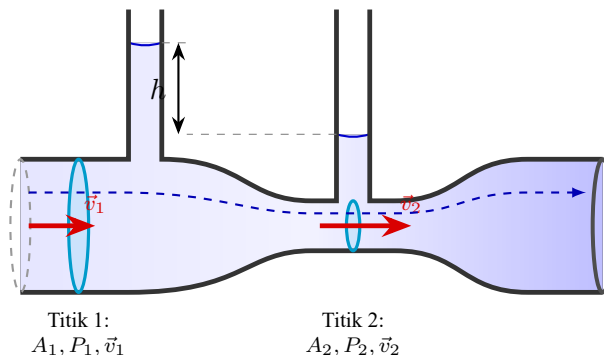
Venturimeter Tanpa Manometer

Jenis venturimeter ini menggunakan pipa-pipa vertikal terbuka untuk mengukur perbedaan ketinggian permukaan fluida (h) sebagai akibat perbedaan tekanan antara penampang besar dan penampang sempit.

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2gh}{A_1^2 - A_2^2}} \quad (4.17)$$

dengan:

- v_1 = kelajuan fluida pada pipa berpenampang besar A_1 (m/s)
- A_1, A_2 = luas penampang besar dan penampang sempit (m^2)
- h = selisih ketinggian permukaan fluida pada kedua pipa vertikal (m)



Gambar 4.14: Aliran fluida pada Tabung Venturi (Venturimeter). Pada penampang sempit ($A_2 < A_1$), kelajuan aliran meningkat drastis ($\vec{v}_2 > \vec{v}_1$) sehingga tekanan hidrostatiknya turun ($P_2 < P_1$). Penurunan tekanan ini terbaca akurat lewat selisih ketinggian cairan (h) pada pipa manometer.

Venturimeter Dengan Manometer

Pada beda ketinggian h yang sangat kecil, venturimeter tanpa manometer menjadi kurang presisi untuk dibaca. Untuk mengatasinya, digunakan pipa berbentuk U berisi fluida lain (misalnya air raksa) dengan massa jenis ρ_r yang lebih besar daripada massa jenis fluida yang mengalir (ρ_f), sehingga beda ketinggian yang terbaca menjadi lebih besar dan lebih mudah diukur:

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2gh \left(\frac{\rho_r}{\rho_f} - 1 \right)}{A_1^2 - A_2^2}} \quad (4.18)$$

dengan ρ_r adalah massa jenis fluida pengisi manometer dan ρ_f adalah massa jenis fluida yang mengalir dalam pipa.

Penerapan Efek Venturi

Prinsip Venturi banyak diterapkan pada karburator kendaraan bermotor (untuk mencampur udara dan bahan bakar), alat penyemprot parfum atau obat nyamuk, serta pengukuran debit aliran pada sistem perpipaan industri.

Contoh Soal

Sebuah pipa venturimeter tanpa manometer memiliki luas penampang besar $A_1 = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ dan luas penampang kecil $A_2 = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$. Jika selisih ketinggian zat cair pada kedua pipa vertikal adalah 20 cm, tentukan kelajuan air pada penampang besar! ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

Penyelesaian:

Diketahui: $A_1 = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $A_2 = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $h = 0,2 \text{ m}$

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2gh}{A_1^2 - A_2^2}} = (3 \times 10^{-3}) \sqrt{\frac{2(10)(0,2)}{(5 \times 10^{-3})^2 - (3 \times 10^{-3})^2}}$$

$$v_1 = (3 \times 10^{-3}) \sqrt{\frac{4}{1,6 \times 10^{-5}}} = (3 \times 10^{-3})(500)$$

$$v_1 = 1,5 \text{ m/s}$$

4.2.7 Gaya Angkat (Prinsip Bernoulli)

Efek Venturi menunjukkan bahwa perbedaan kelajuan aliran dapat menghasilkan perbedaan tekanan dalam pipa tertutup. Pertanyaan yang sempat diajukan di pembuka bab pun kini dapat dijawab: mengapa pesawat seberat puluhan ton dapat terangkat ke udara hanya karena bentuk sayapnya? Jawabannya terletak pada penerapan prinsip yang sama pada aliran udara di sekitar sayap pesawat, yang menghasilkan **gaya angkat** (*lift force*).

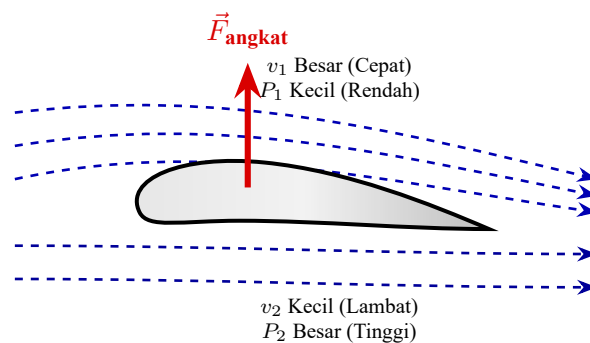
Penampang sayap pesawat dirancang khusus (disebut *airfoil*) sedemikian rupa sehingga permukaan atas sayap lebih melengkung daripada permukaan bawahnya. Ketika pesawat bergerak maju, udara yang mengalir melewati permukaan atas sayap menempuh jarak yang lebih panjang dalam selang waktu yang sama dibandingkan udara yang mengalir di permukaan bawah, sehingga kelajuan udara di atas sayap (v_1) menjadi lebih besar daripada kelajuan udara di bawah sayap (v_2).

Berdasarkan Persamaan Bernoulli untuk aliran mendatar ($h_1 \approx h_2$), kelajuan yang lebih besar di permukaan atas sayap menyebabkan tekanan di permukaan atas (P_1) menjadi lebih kecil daripada tekanan di permukaan bawah (P_2). Perbedaan tekanan inilah yang menghasilkan gaya angkat ke atas pada sayap pesawat.

$$F_{\text{angkat}} = (P_2 - P_1)A = \frac{1}{2}\rho_{\text{udara}}(v_1^2 - v_2^2)A \quad (4.19)$$

dengan:

- F_{angkat} = gaya angkat pada sayap pesawat (N)
- P_1, P_2 = tekanan udara di permukaan atas dan bawah sayap (Pa)
- ρ_{udara} = massa jenis udara (kg/m^3)
- v_1, v_2 = kelajuan aliran udara di permukaan atas dan bawah sayap (m/s)
- A = luas permukaan sayap (m^2)



Gambar 4.15: Aliran udara di permukaan atas sayap pesawat ($\vec{v}_1$) melengkung memadat dan bergerak lebih cepat daripada di permukaan bawah ($\vec{v}_2$). Berdasarkan Asas Bernoulli, perbedaan kecepatan ini menimbulkan selisih tekanan ($P_2 > P_1$) yang menghasilkan gaya angkat aerodinamis ($\vec{F}_{\text{angkat}}$) ke atas.

Penerapan Lain Gaya Angkat

Prinsip yang sama – gaya akibat perbedaan kelajuan aliran fluida – juga diterapkan pada beberapa peristiwa lain, meskipun dengan tujuan yang berbeda:

- **Spoiler pada mobil balap**, yang dirancang terbalik dari sayap pesawat untuk menghasilkan gaya tekan ke bawah (*downforce*) agar mobil lebih stabil pada kecepatan tinggi, bukan untuk mengangkatnya.
- **Atap rumah yang terangkat saat angin kencang**, karena udara yang bergerak cepat di atas atap menghasilkan tekanan lebih rendah dibandingkan tekanan udara di dalam rumah yang relatif diam.
- **Bola yang melengkung saat dilempar dengan efek spin** (efek Magnus), seperti pada bola sepak atau bola tenis, yang juga berkaitan dengan perbedaan kelajuan aliran udara akibat putaran bola.

4.2.8 Viskositas dan Hukum Stokes

Seluruh persamaan yang telah dibahas sejauh ini mengasumsikan fluida ideal yang tidak memiliki viskositas. Namun, dalam kenyataannya, hampir semua fluida nyata memiliki viskositas yang menyebabkan adanya gesekan internal antarlapisan fluida saat mengalir, maupun gesekan antara fluida dan benda yang bergerak di dalamnya – inilah sebabnya oli terasa lebih sulit dituang dibandingkan air.

Viskositas adalah ukuran kekentalan fluida yang menyatakan besarnya hambatan suatu fluida terhadap aliran atau terhadap gerak suatu benda di dalamnya.

Fluida dengan viskositas tinggi (seperti oli atau madu) mengalir lebih lambat dan memberikan hambatan yang lebih besar dibandingkan fluida dengan viskositas rendah (seperti air).

Gaya Stokes pada Bola yang Bergerak dalam Fluida

Ketika sebuah benda berbentuk bola bergerak relatif terhadap fluida kental, benda tersebut akan mengalami gaya gesek fluida yang disebut **gaya Stokes**, sesuai dengan Hukum Stokes:

$$F_s = 6\pi\eta rv \quad (4.20)$$

dengan:

- F_s = gaya gesek Stokes (N)
- η = koefisien viskositas fluida (Pa·s)
- r = jari-jari bola (m)
- v = kelajuan bola relatif terhadap fluida (m/s)

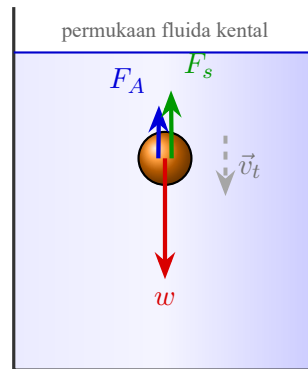
Hukum Stokes berlaku untuk aliran fluida yang bersifat laminar di sekitar benda berbentuk bola yang bergerak dengan kelajuan relatif rendah.

Kecepatan Terminal

Ketika sebuah bola dijatuhkan ke dalam fluida kental, pada mulanya bola akan dipercepat oleh gaya beratnya. Namun, seiring bertambahnya kelajuan, gaya gesek Stokes yang melawan arah gerak juga semakin besar, hingga akhirnya bola mencapai keadaan setimbang di mana resultan gaya yang bekerja sama dengan nol. Kelajuan konstan yang dicapai pada keadaan ini disebut **kecepatan terminal** (v_t), yaitu saat gaya berat bola tepat seimbang dengan jumlah gaya apung (Archimedes) dan gaya gesek Stokes.

$$v_t = \frac{2r^2g(\rho_b - \rho_f)}{9\eta} \quad (4.21)$$

dengan ρ_b adalah massa jenis bola dan ρ_f adalah massa jenis fluida.



Gambar 4.16: Bola yang jatuh dalam fluida kental mencapai kecepatan terminal $\vec{v}_t$ ketika gaya berat w seimbang dengan jumlah gaya apung F_A dan gaya gesek Stokes F_s ($\Sigma F = 0$).

Pengaruh Suhu terhadap Viskositas

Viskositas fluida umumnya dipengaruhi oleh suhu, namun dengan arah yang berlawanan antara zat cair dan gas: pada zat cair, viskositas akan **menurun** seiring kenaikan suhu (misalnya oli menjadi lebih encer saat dipanaskan), sedangkan pada gas, viskositas justru cenderung **meningkat** seiring kenaikan suhu.

Contoh Soal

Sebuah kelereng kecil berjari-jari 0,5 cm dan massa jenis 2700 kg/m^3 dijatuhkan ke dalam sebuah tabung berisi oli dengan massa jenis 880 kg/m^3 dan koefisien viskositas $0,8 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Tentukan kecepatan terminal kelereng tersebut! ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

Penyelesaian:

Diketahui: $r = 0,005 \text{ m}$, $\rho_b = 2700 \text{ kg/m}^3$, $\rho_f = 880 \text{ kg/m}^3$, $\eta = 0,8 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

$$v_t = \frac{2r^2 g (\rho_b - \rho_f)}{9\eta} = \frac{2(0,005)^2 (10) (2700 - 880)}{9(0,8)}$$

$$v_t = \frac{2(2,5 \times 10^{-5})(10)(1820)}{7,2} = \frac{0,91}{7,2}$$

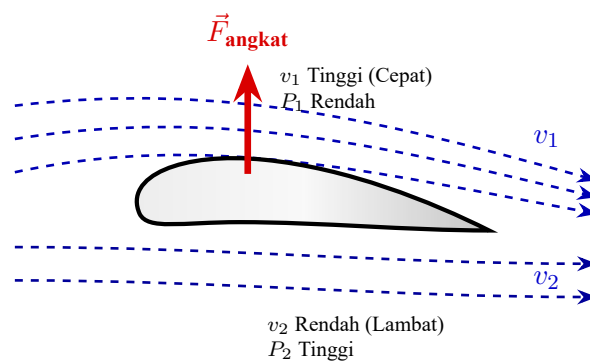
$$v_t \approx 0,126 \text{ m/s}$$

4.2.9 Penerapan Fluida Dinamis dalam Kehidupan

Setelah mempelajari karakteristik, hukum, dan persamaan fluida dinamis, seluruh prinsip tersebut dapat dirangkai untuk menjelaskan berbagai teknologi dan fenomena alam yang dijumpai sehari-hari:

- **Sayap pesawat terbang**, yang memanfaatkan prinsip Bernoulli untuk menghasilkan gaya angkat akibat perbedaan kelajuan aliran udara di permukaan atas dan bawah sayap.
- **Karburator dan injektor bahan bakar kendaraan bermotor**, yang memanfaatkan Efek Venturi untuk mencampur udara dan bahan bakar dalam perbandingan yang tepat.
- **Penyemprot parfum dan obat nyamuk**, yang bekerja berdasarkan prinsip Venturi, di mana aliran udara cepat menimbulkan tekanan rendah yang menyedot cairan ke atas.

- **Kebocoran tangki air atau bendungan**, yang dapat dianalisis kelajuan dan jarak semburannya menggunakan Teorema Torricelli.
- **Sistem perpipaan distribusi air (PDAM)**, yang dirancang menggunakan Persamaan Kontinuitas dan Bernoulli untuk memastikan debit dan tekanan air sesuai kebutuhan di setiap titik distribusi.
- **Venturimeter**, alat ukur kelajuan dan debit aliran fluida dalam pipa industri berdasarkan prinsip Venturi.
- **Aliran darah dalam pembuluh darah manusia**, yang dapat dianalisis menggunakan prinsip kontinuitas dan Bernoulli, misalnya untuk memahami perubahan tekanan darah pada pembuluh yang menyempit akibat penumpukan plak (aterosklerosis).
- **Turbin air pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)**, yang memanfaatkan energi aliran fluida (debit dan kelajuan air) untuk menghasilkan energi listrik.
- **Viskometer**, alat ukur viskositas fluida yang memanfaatkan Hukum Stokes, misalnya dengan mengukur kecepatan terminal bola yang jatuh dalam fluida uji.



Gambar 4.17: Prinsip Bernoulli pada sayap pesawat terbang. Aliran udara di bagian atas memiliki kelajuan tinggi (v_1) sehingga tekanannya rendah (P_1). Sebaliknya, aliran udara bawah lambat (v_2) menghasilkan tekanan tinggi (P_2), menghasilkan gaya angkat neto ($\vec{F}_{angkat}$).

Dari seluruh penerapan ini, terlihat bahwa fluida dinamis – sama seperti fluida statis – bukan sekadar konsep abstrak, melainkan dasar dari berbagai teknologi yang digunakan secara luas, mulai dari peralatan rumah tangga sederhana hingga moda transportasi udara dan sistem kelistrikan berskala besar.

4.2.10 Ringkasan

Tabel 4.2: Persamaan Penting Fluida Dinamis

Konsep / Fenomena	Persamaan Utama	Keterangan Variabel
Debit Aliran	$Q = \frac{V}{t} = Av$	V : volume, t : waktu, A : luas, v : kelajuan.
Persamaan Kontinuitas	$A_1v_1 = A_2v_2$	Berlaku pada fluida tak termampatkan (<i>incompressible</i>).
Persamaan Bernoulli	$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2$	Hukum kekekalan energi mekanik pada fluida ideal.
Bernoulli (Pipa Mendatar)	$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$	Kondisi ketinggian sama ($h_1 = h_2$).
Teorema Torricelli	$v = \sqrt{2gh}$	v : kelajuan semburan lubang bocor, h : kedalaman lubang.
Venturimeter (Tanpa Manometer)	$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2gh}{A_1^2 - A_2^2}}$	h : selisih tinggi cairan tabung vertikal, v_1 : kelajuan di penampang besar.
Gaya Angkat Sayap	$F_{\text{angkat}} = \frac{1}{2}\rho_{\text{udara}}(v_1^2 - v_2^2)A$	v_1 : kelajuan udara atas, v_2 : kelajuan bawah, A : luas sayap.
Viskositas (Gaya Stokes)	$F_s = 6\pi\eta rv$	η : koefisien viskositas fluida, r : jari-jari bola.
Kecepatan Terminal	$v_t = \frac{2r^2g(\rho_b - \rho_f)}{9\eta}$	ρ_b : massa jenis benda, ρ_f : massa jenis fluida kental.

Catatan Penting: Hampir seluruh persamaan fluida dinamis di atas berakar dari dua hukum kekekalan yang sama – Persamaan Kontinuitas berasal dari hukum kekekalan massa, sedangkan Persamaan Bernoulli, Teorema Torricelli, Efek Venturi, dan gaya angkat seluruhnya merupakan bentuk khusus atau turunan dari hukum kekekalan energi mekanik. Perlu diingat pula bahwa hubungan “kelajuan tinggi menyebabkan tekanan rendah” **hanya berlaku untuk pipa atau aliran mendatar** ($h_1 = h_2$) – apabila terdapat perbedaan ketinggian yang signifikan, suku ρgh pada Persamaan Bernoulli tidak boleh diabaikan. Selain itu, seluruh persamaan tersebut diturunkan dengan asumsi fluida ideal (tidak kental);

pada fluida nyata yang memiliki viskositas, sebagian energi akan hilang akibat gesekan internal, sebagaimana dijelaskan oleh Hukum Stokes.



5. Kalor dan Termodinamika

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, murid mampu:

- ✓ Menjelaskan besaran suhu, konversi satuan, dan fenomena pemuain materi, serta menerapkan teori kinetik gas dalam menganalisis hukum gas ideal sebagai wujud mengagumi keteraturan ukuran materi ciptaan Allah SWT.
- ✓ Menganalisis konsep kalor (kalor jenis dan kalor laten) serta menerapkan Asas Black dalam peristiwa perubahan suhu dan wujud zat dengan menunjukkan sikap teliti, kritis, dan jujur dalam perhitungan fisis.
- ✓ Membedakan tiga mekanisme perpindahan kalor (konduksi, konveksi, dan radiasi) serta penerapannya dalam kehidupan sehari-hari sebagai bentuk refleksi terhadap cara Allah mendistribusikan energi di alam semesta.
- ✓ Menganalisis proses-proses termodinamika melalui diagram p - V dan menerapkan Hukum I Termodinamika dalam penyelesaian masalah keseimbangan energi secara logis, disiplin, dan sistematis.
- ✓ Menelaah pernyataan Hukum II Termodinamika (konsep entropi) serta menjelaskan cara kerja dan efisiensi pada mesin kalor dan pompa kalor melalui perwujudan sikap tekun dan bijaksana dalam memanfaatkan energi.

Cakupan Materi

Suhu & Kalor
Teori Kinetik Gas
Hukum-Hukum Termodinamika

Pengantar

Kalor dan Termodinamika dalam Perspektif Al-Qur'an

Pernahkah kamu merenungkan bagaimana sebatang kayu yang semula basah dan dingin bisa menyimpan potensi energi yang begitu besar hingga mampu menghasilkan api yang panas saat dibakar? Atau bagaimana hamparan es di kutub dapat mencair, lalu menguap menjadi awan, dan kembali turun menjadi butiran air hujan yang menyejukkan bumi? Allah ﷻ senantiasa mengajak manusia untuk mengamati perpindahan energi termal dan perubahan wujud zat di alam semesta sebagai bukti keteraturan ciptaan-Nya:

الَّذِي جَعَلَ لَكُم مِّنَ الشَّجَرِ الْأَخْضَرِ نَارًا فَإِذَا أَنتُم مِّنْهُ تُوقِدُونَ

“Yaitu (Allah) yang menjadikan api untukmu dari kayu yang hijau, maka seketika itu kamu menyalakan (api) dari kayu itu.”
(QS. Yasin [36]: 80)

Frasa *“menjadikan api dari kayu yang hijau”* dalam ayat ini menyimpan isyarat fisis yang sangat mendalam mengenai penyimpanan dan konversi energi. Allah ﷻ tidak hanya menciptakan materi, melainkan juga menyisipkan hukum-hukum termal di dalamnya. Sesuatu yang tampak dingin dan basah pada dasarnya memiliki ikatan energi internal yang dapat dilepaskan menjadi energi termal (panas) melalui proses transformasi energi yang teratur dan terukur.

Di dalam Fisika, ilmu yang mempelajari konsep suhu, kalor (panas), serta bagaimana energi termal tersebut berpindah dan berubah menjadi bentuk energi lain (seperti usaha mekanik) dinamakan **Termodinamika**. Kajian ini dimulai dari pemahaman makroskopis tentang suhu dan pemuai zat, pengaruh kalor terhadap perubahan wujud materi, hingga hukum-hukum universal termodinamika yang mengatur efisiensi energi dan arah aliran kalor di jagat raya.

Al-Qur'an secara menakjubkan sering kali menggunakan fenomena perubahan fase zat dan perambatan panas untuk mengilustrasikan perpindahan energi makro di atmosfer. Allah ﷻ berfirman:

أَلَمْ تَرَ أَنَّ اللَّهَ يَزْجِي سَحَابًا ثُمَّ يُؤَلِّفُ بَيْنَهُ ثُمَّ يَجْعَلُهُ رُكَّامًا فَتَرَى الْوَدْقَ يَخْرُجُ مِنْ خِلَالِهِ وَيَنْزِلُ مِنَ السَّمَاءِ مِنْ جِبَالٍ فِيهَا مِنْ بَرَدٍ فَيُصِيبُ بِهِ مَنْ يَشَاءُ وَيَصْرِفُهُ عَنِ مَنْ يَشَاءُ يَكَادُ سَنَا بَرْقُهُ يَذْهَبُ بِالْأَبْصَارِ

“Tidakkah engkau melihat bahwa Allah mengarahkan awan, kemudian mengumpulkannya, lalu menjadikannya bertumpuk-tumpuk, maka engkau lihat hujan keluar dari celah-celahnya dan Dia (juga) menurunkan (butiran-butiran) es dari langit, (yaitu) dari gumpalan-gumpalan awan seperti gunung-gunung, maka ditimpakan-Nya (butiran-butiran es) itu kepada siapa yang Dia kehendaki dan Dipalingkan-Nya dari siapa yang Dia kehendaki. Kilauan kilatnya hampir-hampir menghilangkan penglihatan.”
(QS. An-Nur [24]: 43)

Proses pembentukan awan, kondensasi menjadi air hujan, hingga pembekuan menjadi *“butiran-butiran es”* merupakan contoh nyata dari pelepasan dan penyerapan **kalor laten** dalam fisika. Dinamika termal di atmosfer ini melibatkan hukum kekekalan energi yang sangat ketat, di mana total energi yang diserap saat penguapan akan sama dengan energi yang dilepaskan kembali ke lingkungan saat pengembunan dan pembekuan terjadi.

Keteraturan arah aliran energi termal ini juga berjalan di atas ketetapan (*sunnatullah*) yang mutlak. Kalor secara alami hanya akan mengalir dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu lebih rendah, sebuah prinsip dasar yang menjaga stabilitas iklim di bumi melalui pancaran energi matahari. Allah ﷻ mengisyaratkan mekanisme perambatan energi radiasi ini dalam firman-Nya:

أَلَمْ تَرَ إِلَىٰ رَبِّكَ كَيْفَ مَدَّ الظِّلَّ وَلَوْ شَاءَ لَجَعَلَهُ سَائِكًا تُمُّ جَعَلْنَا الشَّمْسُ عَلَيْهِ
 دَلِيلًا

“Tidakkah engkau memperhatikan (penciptaan) Tuhanmu, bagaimana Dia memanjangkan bayang-bayang? Sekiranya Dia menghendaki, niscaya Dia menjadikannya tetap diam. Kemudian, Kami menjadikan matahari sebagai petunjuk atasnya,”

(QS. Al-Furqan [25]: 45)

Kehadiran matahari sebagai *“petunjuk”* atas dinamika bayang-bayang juga menjadi pemicu utama perbedaan suhu di berbagai belahan bumi. Variasi suhu inilah yang menggerakkan hukum termodinamika global: menciptakan angin melalui ekspansi termal udara, menggerakkan arus laut, dan mendasari Hukum Pertama Termodinamika (Kekekalan Energi) serta Hukum Kedua Termodinamika mengenai konsep entropi dan arah proses alami alam semesta.

Selain mempelajari perhitungan kalor untuk menaikkan suhu ($Q = mc\Delta T$) dan azas Black tentang keseimbangan termal, ruang lingkup bab ini akan membimbingmu memahami cara kerja teknologi yang mengubah peradaban manusia, seperti mesin kalor (mesin kendaraan), mesin pendingin (*refrigerator*), hingga konsep efisiensi mesin ideal Siklus Carnot.

Pada bab ini, kamu akan mempelajari bagaimana memformulasikan besaran-besaran termal tersebut ke dalam persamaan matematika, menganalisis grafik hubungan tekanan (P) dan volume (V) pada proses gas ideal, serta memahami hukum-hukum termodinamika yang mendasari konversi energi panas menjadi usaha mekanik.

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَاخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ لَآيَاتٍ لِأُولِي الْأَلْبَابِ

“Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi serta pergantian malam dan siang terdapat tanda-tanda (kebesaran Allah) bagi orang yang berakal,
 (QS. Ali Imran [3]: 190)

Mempelajari Kalor dan Termodinamika adalah jalan ilmiah bagi kita sebagai *ulul albab* untuk menyingkap rahasia di balik aliran energi kehidupan yang Allah tebarkan di alam

semesta. Setiap rumus, konversi satuan, dan hukum termal yang akan kamu bedah di dalam bab ini sejatinya adalah metode manusia untuk mengagumi betapa adil, seimbang, dan sempurnanya **sistem distribusi energi dan hukum kelestarian** yang dirancang oleh Sang Maha Memelihara.

5.1 Suhu dan Kalor

Setiap hari kita merasakan perbedaan antara benda yang terasa panas dan yang terasa dingin – namun apakah perasaan tersebut selalu dapat dipercaya? Sebuah batang logam dan sepotong kayu yang diletakkan di ruangan yang sama akan terasa berbeda suhunya ketika disentuh, padahal keduanya berada pada suhu ruang yang sama. Mengapa es batu yang dimasukkan ke dalam segelas air panas dapat mendinginkan air tersebut? Mengapa besi rel kereta api diberi celah antarpotongan? Dan mengapa rumah dengan tembok tebal terasa lebih sejuk di siang hari?

Pertanyaan-pertanyaan inilah yang akan terjawab melalui pembahasan **Suhu dan Kalor**, dua konsep yang berkaitan erat namun berbeda secara mendasar. Suhu menyatakan *derajat panas* suatu benda, sedangkan kalor adalah *energi* yang berpindah akibat perbedaan suhu tersebut. Pemahaman tentang keduanya menjadi dasar dari berbagai teknologi penting – mulai dari mesin pendingin, sistem pemanas ruangan, hingga desain bangunan dan kendaraan.

Pada bagian ini akan dipelajari konsep suhu dan pengukurannya, berbagai skala suhu, pemuai zat, konsep kalor, kalor jenis, Asas Black, perubahan wujud zat, serta mekanisme perpindahan kalor secara konduksi, konveksi, dan radiasi, beserta penerapannya dalam kehidupan sehari-hari.

5.1.1 Konsep Suhu

Dalam percakapan sehari-hari, kata “panas” dan “dingin” merujuk pada **suhu** – ukuran derajat kepanasan atau kedinginan suatu benda. Namun secara fisika, suhu memiliki definisi yang lebih tepat: suhu adalah besaran yang menyatakan tingkat energi kinetik rata-rata partikel penyusun suatu zat.

Suhu adalah besaran yang menyatakan derajat panas atau dinginnya suatu benda, dan secara mikroskopis mencerminkan energi kinetik rata-rata partikel penyusunnya.

Ketika dua benda yang berbeda suhunya saling bersentuhan, energi akan berpindah dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah. Proses ini berlangsung terus sampai kedua benda mencapai suhu yang sama, yaitu keadaan yang disebut **kesetimbangan termal**. Prinsip inilah yang menjadi fondasi dari pengukuran suhu.

Hukum Ke-Nol Termodinamika

Jika benda A berada dalam kesetimbangan termal dengan benda C, dan benda B juga berada dalam kesetimbangan termal dengan benda C, maka benda A dan benda B berada dalam kesetimbangan termal satu sama lain.

Hukum ini tampak sederhana, namun memiliki implikasi penting: ia memungkinkan konsep pengukuran suhu menggunakan termometer (benda C) sebagai perantara perbandingan suhu dua benda lain (A dan B). Tanpa prinsip ini, pengukuran suhu secara konsisten tidak mungkin dilakukan.

5.1.2 Pengukuran Suhu dan Termometer

Karena indera perasa manusia tidak dapat diandalkan untuk mengukur suhu secara objektif, diperlukan alat ukur yang disebut **termometer**. Termometer bekerja berdasarkan sifat fisik suatu zat yang berubah secara teratur seiring perubahan suhu – sifat seperti ini disebut **sifat termometrik**.

Beberapa contoh sifat termometrik yang dimanfaatkan dalam termometer antara lain:

- **Pemuaian zat cair** (termometer raksa dan alkohol): volume zat cair bertambah saat suhu naik, sehingga kolom zat cair dalam pipa kapiler bergerak naik.
- **Pemuaian gas** (termometer gas): tekanan atau volume gas berubah proporsional terhadap suhu, memberikan ketelitian yang sangat tinggi.
- **Hambatan listrik** (termometer hambatan / RTD): hambatan logam berubah teratur terhadap suhu.
- **Radiasi panas** (termometer inframerah / pirometer): intensitas radiasi yang dipancarkan benda bergantung pada suhunya, memungkinkan pengukuran tanpa kontak.

Titik Tetap Termometer

Agar termometer dapat dikalibrasi secara universal, diperlukan **titik tetap**: dua acuan suhu yang dapat direproduksi di mana saja. Secara tradisional digunakan:

- **Titik beku air** (es murni dalam kesetimbangan dengan air pada tekanan 1 atm): sebagai titik bawah.
- **Titik didih air** (air murni mendidih pada tekanan 1 atm): sebagai titik atas.

Jarak antara kedua titik tetap ini dibagi menjadi sejumlah bagian yang sama (tergantung skala yang digunakan), menghasilkan satuan suhu yang konsisten.

5.1.3 Skala Suhu

Berbagai skala suhu telah dikembangkan berdasarkan pilihan titik tetap dan jumlah pembagiannya. Empat skala suhu yang paling umum digunakan adalah Celsius, Fahrenheit, Reamur, dan Kelvin.

Tabel 5.1: Perbandingan Skala Suhu

Skala	Titik Beku Air	Titik Didih Air	Rentang
Celsius ($^{\circ}\text{C}$)	0°C	100°C	100
Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$)	32°F	212°F	180
Reamur ($^{\circ}\text{R}$)	0°R	80°R	80
Kelvin (K)	$273,15\text{ K}$	$373,15\text{ K}$	100

Konversi Antarskalal

Dari perbandingan rentang skala antara titik beku dan titik didih air, diperoleh hubungan konversi berikut:

$$\frac{T_C}{100} = \frac{T_F - 32}{180} = \frac{T_R}{80} = \frac{T_K - 273}{100} \quad (5.1)$$

Hubungan yang sering digunakan secara praktis:

$$T_K = T_C + 273$$

$$T_F = \frac{9}{5} T_C + 32$$

$$T_R = \frac{4}{5} T_C$$

Skala Kelvin: Suhu Mutlak

Skala Kelvin berbeda dari skala lainnya karena menggunakan **nol mutlak** ($0 \text{ K} = -273,15^\circ\text{C}$) sebagai titik awal – yaitu suhu di mana gerak termal partikel secara teoritis berhenti sepenuhnya. Oleh karena itu, Kelvin disebut skala suhu mutlak (*absolute temperature scale*) dan merupakan satuan suhu dalam sistem SI. Tidak ada suhu di bawah 0 K.

Contoh Soal

Suhu suatu benda adalah 60°C . Tentukan suhu benda tersebut dalam skala Fahrenheit dan Kelvin!

Penyelesaian:

Diketahui: $T_C = 60^\circ\text{C}$

$$T_F = \frac{9}{5} T_C + 32 = \frac{9}{5}(60) + 32 = 108 + 32$$

$$T_F = 140^\circ\text{F}$$

$$T_K = T_C + 273 = 60 + 273$$

$$T_K = 333 \text{ K}$$

5.1.4 Pemuaian Zat

Hampir semua zat akan memuai ketika dipanaskan dan menyusut ketika didinginkan. Fenomena ini terjadi karena peningkatan suhu menyebabkan partikel-partikel penyusun zat bergetar lebih kencang, sehingga jarak rata-rata antarpartikel menjadi lebih besar. Inilah yang disebut **pemuaian termal**, dan pemahaman tentangnya sangat penting dalam rekayasa – mulai dari celah ekspansi pada rel kereta api hingga desain jembatan dan gedung bertingkat.

Pemuaian Panjang (Linear)

Untuk zat padat berbentuk batang atau kawat, perubahan panjang yang terjadi akibat perubahan suhu dinyatakan sebagai:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta T \quad (5.2)$$

sehingga panjang akhir menjadi:

$$L = L_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

dengan:

- ΔL = pertambahan panjang (m)
- L_0 = panjang mula-mula (m)
- α = koefisien muai panjang ($^{\circ}\text{C}^{-1}$ atau K^{-1})
- ΔT = perubahan suhu ($^{\circ}\text{C}$ atau K)

Pemuaian Luas

Untuk benda yang memiliki dua dimensi dominan (pelat tipis), pemuaian termal memengaruhi luas permukaannya:

$$\Delta A = A_0 \beta \Delta T \quad (5.3)$$

dengan β adalah koefisien muai luas dan berlaku hubungan $\beta = 2\alpha$.

Pemuaian Volume

Untuk zat padat tiga dimensi, zat cair, maupun gas, pemuaian dinyatakan dalam perubahan volume:

$$\Delta V = V_0 \gamma \Delta T \quad (5.4)$$

dengan γ adalah koefisien muai volume. Untuk zat padat berlaku $\gamma = 3\alpha$. Gas memiliki koefisien muai volume yang jauh lebih besar dan perilakunya dijelaskan oleh hukum gas ideal.

Tabel 5.2: Hubungan Koefisien Muai Termal Zat Padat

Jenis Pemuaian	Koefisien	Hubungan
Panjang	α	—
Luas	β	$\beta = 2\alpha$
Volume	γ	$\gamma = 3\alpha$

Anomali Air

Air memiliki perilaku pemuaian yang tidak biasa: antara 0°C dan 4°C , air justru **menyusut** seiring kenaikan suhu (berlawanan dari kebanyakan zat). Di atas 4°C , air baru mulai memuai seperti biasa. Akibatnya, air memiliki massa jenis tertinggi pada 4°C . Sifat anomali

ini menjadi alasan mengapa ikan dapat tetap hidup di dasar danau yang membeku: lapisan air terbawah tetap bersuhu sekitar 4°C sementara lapisan atasnya membeku menjadi es.

Contoh Soal

Sebuah batang besi memiliki panjang 2 m pada suhu 20°C . Tentukan pertambahan panjangnya ketika dipanaskan hingga 120°C ! ($\alpha_{\text{besi}} = 1,2 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Penyelesaian:

Diketahui: $L_0 = 2 \text{ m}$, $\Delta T = 120 - 20 = 100^{\circ}\text{C}$, $\alpha = 1,2 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta T = (2)(1,2 \times 10^{-5})(100)$$

$$\Delta L = 2,4 \times 10^{-3} \text{ m} = 2,4 \text{ mm}$$

5.1.5 Konsep Kalor

Setelah memahami bahwa suhu adalah ukuran derajat panas suatu benda, pertanyaan berikutnya adalah: apa yang sebenarnya berpindah ketika sebuah benda panas disentuh ke benda dingin sehingga keduanya akhirnya mencapai suhu yang sama?

Jawabannya adalah **kalor** – yaitu energi yang berpindah dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah akibat perbedaan suhu di antara keduanya. Penting untuk dipahami bahwa kalor *bukan* merupakan kandungan panas suatu benda, melainkan *energi yang sedang berpindah*. Ketika perpindahan energi berhenti (kesetimbangan termal tercapai), tidak ada lagi yang disebut sebagai kalor.

Kalor adalah energi yang berpindah antara dua benda atau sistem akibat perbedaan suhu. Kalor selalu mengalir dari benda bersuhu tinggi menuju benda bersuhu rendah.

Satuan kalor dalam SI adalah **joule (J)**. Satuan lama yang masih sering dijumpai adalah **kalori (kal)**, dengan hubungan:

$$1 \text{ kal} = 4,2 \text{ J}$$

5.1.6 Kalor Jenis dan Kapasitas Kalor

Mengapa air memerlukan waktu yang jauh lebih lama untuk mendidih dibandingkan minyak goreng, meskipun keduanya dipanaskan di atas kompor yang sama? Perbedaan ini dijelaskan oleh besaran yang disebut **kalor jenis**.

Kalor jenis (c) adalah banyaknya kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 kg zat sebesar 1°C (atau 1 K). Semakin besar kalor jenis suatu zat, semakin banyak energi yang dibutuhkan untuk mengubah suhunya.

$$Q = m c \Delta T \quad (5.5)$$

dengan:

- Q = kalor yang diserap atau dilepaskan (J)
- m = massa zat (kg)
- c = kalor jenis zat ($\text{J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ atau $\text{J/kg}\cdot\text{K}$)
- ΔT = perubahan suhu ($^{\circ}\text{C}$ atau K)

Kapasitas Kalor

Selain kalor jenis (yang merupakan sifat zat per satuan massa), dikenal pula besaran **kapasitas kalor** (C), yaitu banyaknya kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu suatu benda (bukan per kg, melainkan secara keseluruhan) sebesar 1°C :

$$C = m c \quad \Rightarrow \quad Q = C \Delta T \quad (5.6)$$

Kapasitas kalor bersifat ekstensif (bergantung pada jumlah zat), sedangkan kalor jenis bersifat intensif (tidak bergantung pada jumlah zat, merupakan sifat material).

Tabel 5.3: Kalor Jenis Beberapa Zat

Zat	Kalor Jenis ($\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$)
Air	4.200
Alkohol	2.400
Es	2.100
Aluminium	900
Besi/Baja	450
Tembaga	390
Timbal	130

Contoh Soal

Berapa kalor yang diperlukan untuk memanaskan 2 kg air dari 25°C hingga 75°C ? ($c_{\text{air}} = 4.200 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$)

Penyelesaian:

Diketahui: $m = 2 \text{ kg}$, $\Delta T = 75 - 25 = 50^\circ\text{C}$, $c = 4.200 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$

$$Q = m c \Delta T = (2)(4.200)(50)$$

$$Q = 420.000 \text{ J} = 420 \text{ kJ}$$

5.1.7 Asas Black

Ketika dua zat dengan suhu berbeda dicampur dalam wadah yang terisolasi (tidak ada kalor yang keluar ke lingkungan), kalor yang dilepaskan oleh zat yang lebih panas akan seluruhnya diserap oleh zat yang lebih dingin. Prinsip ini, yang dikenal sebagai **Asas Black**, merupakan penerapan langsung dari hukum kekekalan energi pada sistem termal.

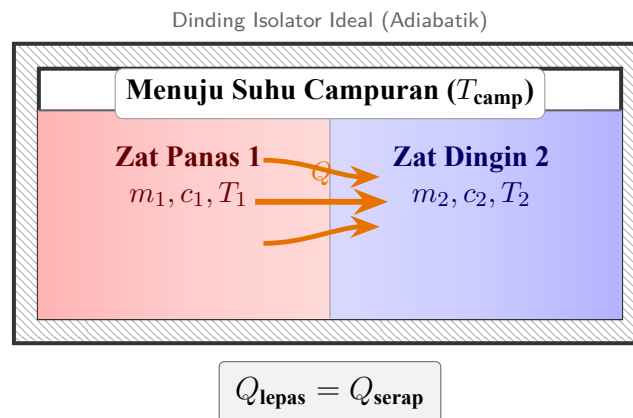
Banyaknya kalor yang dilepaskan oleh zat bersuhu tinggi sama dengan banyaknya kalor yang diserap oleh zat bersuhu rendah, dengan syarat sistem terisolasi dari lingkungan.

$$Q_{\text{lepas}} = Q_{\text{serap}} \quad (5.7)$$

atau secara lebih eksplisit:

$$m_1 c_1 (T_1 - T_{\text{camp}}) = m_2 c_2 (T_{\text{camp}} - T_2)$$

dengan $T_1 > T_2$ dan T_{camp} adalah suhu akhir campuran (suhu kesetimbangan termal).



Gambar 5.1: Diagram fisis Asas Black dalam sistem tertutup adiabatik. Kalor (Q) secara spontan berpindah dari zat bernilai termal tinggi (T_1) menuju zat bernilai termal rendah (T_2) sampai kedua substansi mencapai titik kesetimbangan termal (T_{camp}).

Contoh Soal

Sebanyak 200 g air bersuhu 80°C dicampur dengan 300 g air bersuhu 20°C . Tentukan suhu akhir campuran! ($c_{\text{air}} = 4.200 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$)

Penyelesaian:

Diketahui: $m_1 = 0,2 \text{ kg}$, $T_1 = 80^\circ\text{C}$, $m_2 = 0,3 \text{ kg}$, $T_2 = 20^\circ\text{C}$

Gunakan Asas Black:

$$m_1 c (T_1 - T_c) = m_2 c (T_c - T_2)$$

Karena kalor jenis sama, c saling menghilangkan:

$$(0,2)(80 - T_c) = (0,3)(T_c - 20)$$

$$16 - 0,2 T_c = 0,3 T_c - 6$$

$$22 = 0,5 T_c$$

$$T_c = 44^\circ\text{C}$$

5.1.8 Perubahan Wujud Zat

Sejauh ini, pembahasan kalor hanya mencakup perubahan suhu zat. Namun ada situasi di mana pemberian kalor pada suatu zat *tidak* menyebabkan perubahan suhu sama sekali – melainkan menyebabkan perubahan wujud. Ketika es sedang meleleh pada 0°C , seluruh kalor yang diberikan digunakan untuk memutus ikatan antarmolekul, bukan untuk menaikkan suhu. Fenomena ini dijelaskan oleh konsep **kalor laten**.

Kalor laten adalah kalor yang diperlukan atau dilepaskan oleh suatu zat saat mengalami perubahan wujud pada suhu dan tekanan yang tetap, tanpa disertai perubahan suhu.

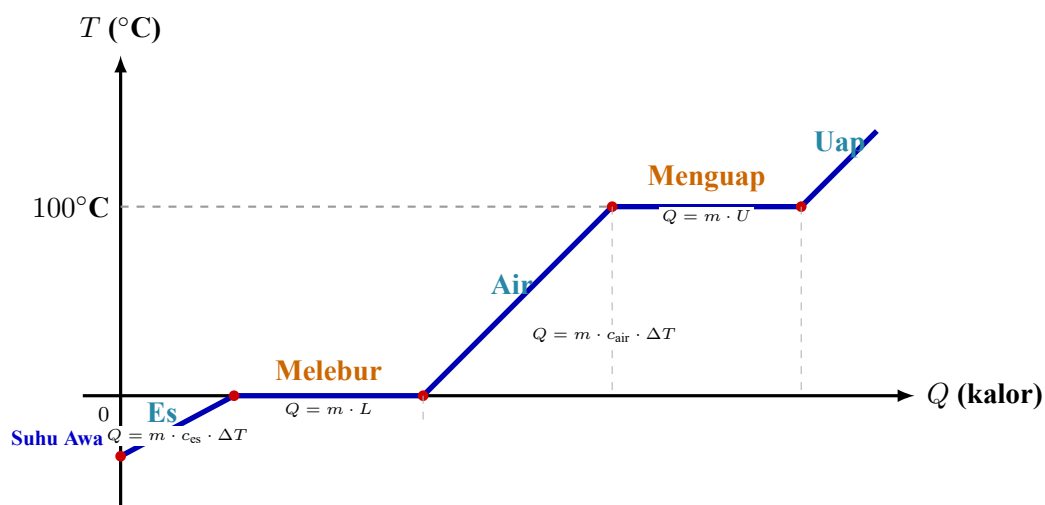
$$Q = m L \quad (5.8)$$

dengan:

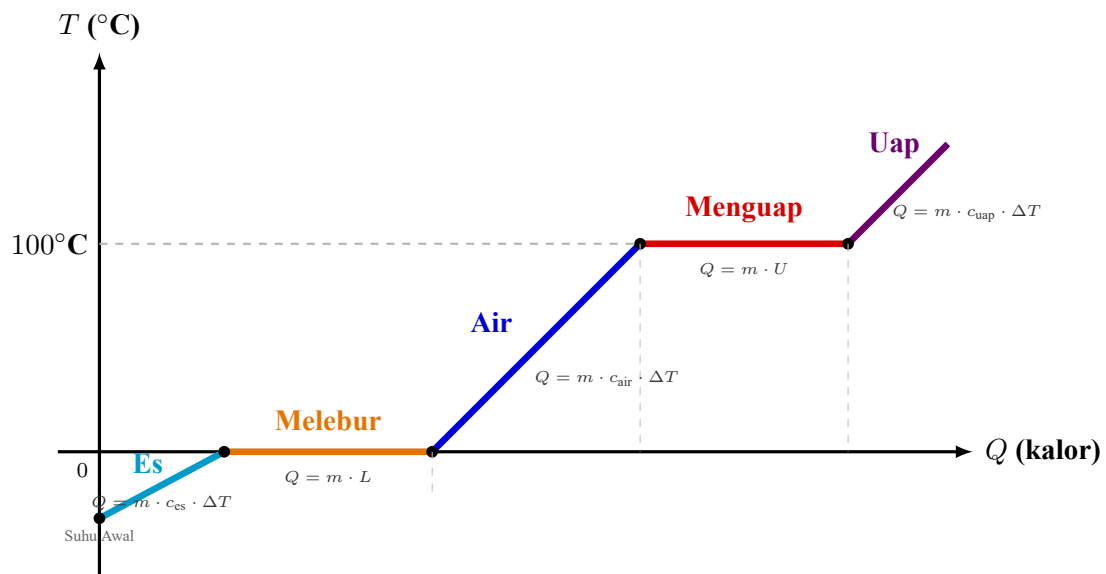
- Q = kalor yang diserap/dilepaskan (J)
- m = massa zat (kg)
- L = kalor laten (J/kg)

Terdapat dua jenis kalor laten yang paling penting:

- **Kalor lebur** (L_f): kalor yang diperlukan untuk mengubah wujud dari padat menjadi cair (atau dilepaskan saat membekukannya). Untuk air: $L_f = 336.000 \text{ J/kg}$.
- **Kalor uap** (L_v): kalor yang diperlukan untuk mengubah wujud dari cair menjadi gas (atau dilepaskan saat mengembunnya). Untuk air: $L_v = 2.260.000 \text{ J/kg}$.



Gambar 5.2: Grafik hubungan kalor terhadap perubahan suhu dan wujud air. Pada kondisi laten mendatar (0°C dan 100°C), seluruh energi kalor diserap sepenuhnya untuk memutus ikatan antarmolekul zat (perubahan wujud) tanpa memicu kenaikan suhu sistem.



Gambar 5.3: Grafik hubungan kalor terhadap perubahan suhu dan wujud air. Perbedaan warna garis mempertegas transisi wujud zat dari padat (es), cair (air), hingga gas (uap), serta dua fase laten (melebur dan menguap).

Perubahan Wujud dan Arahnya

Perubahan wujud zat dapat terjadi dalam berbagai arah:

- **Mencair (peleburan):** padat $\rightarrow$ cair, menyerap kalor sebesar $Q = m L_f$.
- **Membeku (pembekuan):** cair $\rightarrow$ padat, melepaskan kalor sebesar $Q = m L_f$.
- **Menguap (penguapan/penggolahan):** cair $\rightarrow$ gas, menyerap kalor sebesar $Q = m L_v$.
- **Mengembun (kondensasi):** gas $\rightarrow$ cair, melepaskan kalor sebesar $Q = m L_v$.
- **Menyublim:** padat $\rightarrow$ gas langsung (misalnya es kering/karbon dioksida padat).
- **Mengkristal (deposisi):** gas $\rightarrow$ padat langsung.

5.1.9 Perpindahan Kalor

Hingga kini telah dipelajari seberapa banyak kalor yang dibutuhkan untuk mengubah suhu atau wujud suatu zat. Pertanyaan berikutnya adalah: *bagaimana* kalor tersebut berpindah dari satu tempat ke tempat lain? Terdapat tiga mekanisme perpindahan kalor, masing-masing dengan prinsip yang berbeda dan relevan pada situasi yang berbeda.

Konduksi

Konduksi adalah perpindahan kalor melalui suatu zat perantara tanpa disertai perpindahan materi zat itu sendiri. Konduksi terjadi karena partikel berenergi tinggi (yang bergetar lebih kencang) mentransfer energinya ke partikel tetangga yang berenergi lebih rendah melalui tumbukan antarmolekul. Mekanisme ini paling efektif pada zat padat, terutama logam.

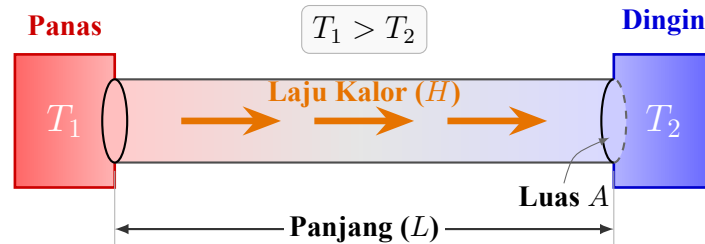
Laju aliran kalor secara konduksi sebanding dengan perbedaan suhu dan luas penampang, serta berbanding terbalik dengan panjang penghantar.

$$\frac{Q}{t} = k A \frac{\Delta T}{d} \quad (5.9)$$

dengan:

- Q/t = laju perpindahan kalor (W atau J/s)
- k = konduktivitas termal bahan (W/m·K)
- A = luas penampang melintang (m^2)
- ΔT = perbedaan suhu antara dua ujung (K atau $^{\circ}\text{C}$)
- d = panjang/tebal penghantar (m)

Bahan dengan konduktivitas termal k besar (seperti tembaga dan aluminium) disebut **konduktor termal** yang baik, sedangkan bahan dengan k kecil (seperti kayu, karet, dan udara) disebut **isolator termal**. Perbedaan inilah yang menjelaskan mengapa gagang panci dibuat dari kayu atau plastik, bukan logam.



Gambar 5.4: Konduksi kalor pada batang penghantar silindris. Kalor mengalir dari ujung bersuhu tinggi (T_1) ke ujung bersuhu rendah (T_2) dengan laju konduksi ($H = \frac{Q}{t}$) yang sebanding dengan konduktivitas termal k , luas penampang A , selisih suhu ΔT , dan berbanding terbalik dengan panjang batang L .

Konveksi

Konveksi adalah perpindahan kalor yang disertai perpindahan materi (massa fluida). Ketika suatu bagian fluida dipanaskan, massa jenisnya berkurang sehingga fluida tersebut naik, sementara fluida yang lebih dingin dan lebih rapat turun untuk mengisi kekosongannya. Sirkulasi ini membawa kalor dari daerah panas ke daerah dingin secara terus-menerus.

Terdapat dua jenis konveksi:

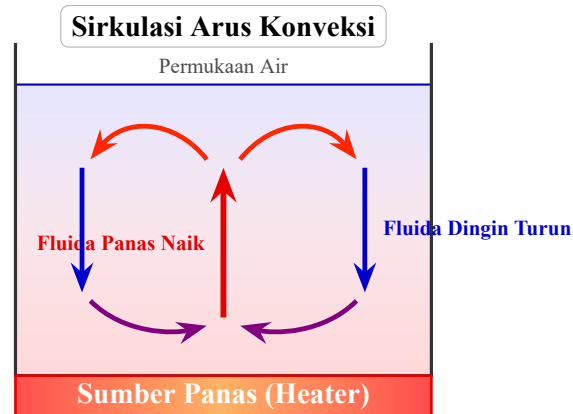
- **Konveksi alami:** terjadi secara spontan akibat perbedaan massa jenis yang disebabkan oleh perbedaan suhu (angin darat dan angin laut, siklus air di danau).
- **Konveksi paksa:** fluida digerakkan secara mekanis menggunakan pompa atau kipas untuk mempercepat perpindahan kalor (sistem pendingin mesin, kipas angin, radiator mobil).

Laju perpindahan kalor secara konveksi dinyatakan oleh Hukum Pendinginan Newton:

$$\frac{Q}{t} = h A (T_s - T_f) \quad (5.10)$$

dengan:

- h = koefisien konveksi termal ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
- A = luas permukaan benda (m^2)
- T_s = suhu permukaan benda (K)
- T_f = suhu fluida di sekitar benda (K)



Gambar 5.5: Konveksi alami dalam fluida yang dipanaskan dari bawah. Fluida di dasar yang menerima panas akan memuai sehingga massa jenisnya mengecil dan bergerak naik. Posisinya segera digantikan oleh fluida dingin dari bagian atas yang memiliki massa jenis lebih besar, membentuk arus sirkulasi kontinu.

Radiasi

Radiasi adalah perpindahan kalor dalam bentuk gelombang elektromagnetik (terutama inframerah) tanpa memerlukan medium perantara. Berbeda dengan konduksi dan konveksi yang memerlukan materi sebagai perantara, radiasi dapat terjadi di ruang hampa sekalipun – inilah mengapa panas dari matahari dapat sampai ke bumi meskipun antaranya terdapat ruang hampa antariksa.

Semua benda memancarkan dan menyerap radiasi termal secara bersamaan. Laju radiasi yang dipancarkan oleh suatu benda dinyatakan oleh **Hukum Stefan-Boltzmann**:

$$\frac{Q}{t} = e \sigma A T^4 \quad (5.11)$$

dengan:

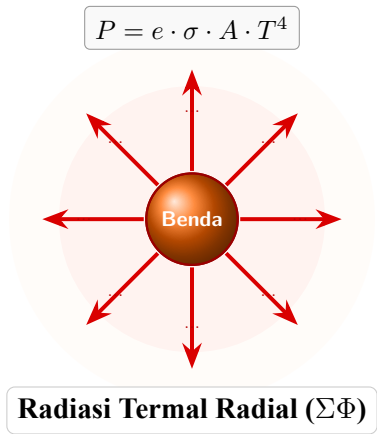
- e = emisivitas benda ($0 \leq e \leq 1$, tanpa satuan)
- σ = konstanta Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$
- A = luas permukaan benda (m^2)
- T = suhu mutlak permukaan benda (K)

Emisivitas (e) menyatakan seberapa efektif suatu benda memancarkan radiasi dibandingkan dengan benda hitam sempurna (*blackbody*, $e = 1$). Benda berwarna gelap dan permukaan kasar mendekati $e = 1$, sedangkan permukaan mengkilap memiliki e mendekati nol (dan sebaliknya, permukaan mengkilap juga merupakan pemantul radiasi yang baik).

Laju kalor netto yang dipancarkan oleh benda ke lingkungannya:

$$\frac{Q_{\text{neto}}}{t} = e \sigma A (T^4 - T_{\text{lingk}}^4)$$

(5.12)



Gambar 5.6: Benda memancarkan radiasi termal dalam bentuk gelombang elektromagnetik ke segala arah secara radial. Laju pancaran energi (Daya Radiasi P) patuh pada Hukum Stefan-Boltzmann, yang nilainya sebanding dengan emisivitas (e), konstanta σ , luas permukaan (A), dan pangkat empat dari suhu mutlaknya (T^4).

Perbandingan Tiga Mekanisme Perpindahan Kalor

Tabel 5.4: Perbandingan Mekanisme Perpindahan Kalor

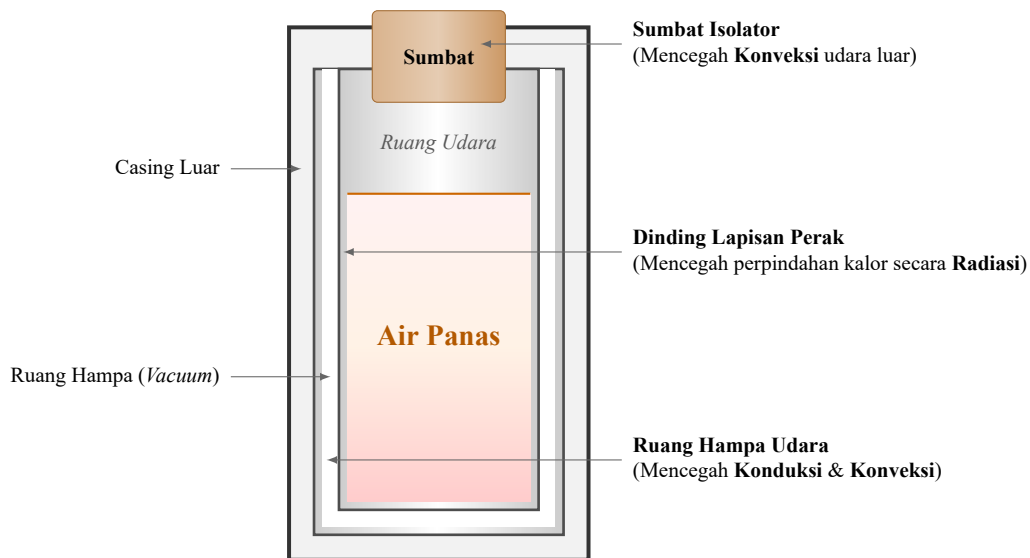
Aspek	Konduksi	Konveksi	Radiasi
Medium	Diperlukan (padat)	Diperlukan (fluida)	Tidak diperlukan
Perpindahan materi	Tidak	Ya	Tidak
Medium terbaik	Logam	Fluida	Ruang hampa
Contoh	Sendok di minuman panas	Angin, air mendidih	Sinar matahari

5.1.10 Penerapan Suhu dan Kalor dalam Kehidupan

Setelah mempelajari seluruh konsep dan prinsip suhu dan kalor, berbagai penerapannya dapat ditemukan dalam teknologi dan fenomena alam sehari-hari:

- **Termos/vacuum flask**, yang mengurangi ketiga mekanisme perpindahan kalor: dinding ganda dengan ruang hampa (mencegah konduksi dan konveksi), serta dinding berlapis perak (memantulkan radiasi) untuk menjaga suhu isi termos.

- **Mesin pendingin (kulkas dan AC)**, yang memanfaatkan kalor laten penguapan dan kondensasi refrigeran untuk menyerap kalor dari ruangan dan melepaskannya ke luar.
- **Celah ekspansi pada rel kereta api dan jembatan**, yang sengaja dibuat untuk mengakomodasi pemuaian termal pada siang hari agar struktur tidak bengkok.
- **Panel surya termal**, yang memanfaatkan radiasi matahari melalui permukaan berwarna gelap (emisivitas tinggi) untuk menyerap kalor dan memanaskan air.
- **Pakaian warna terang di daerah panas**, yang memantulkan sebagian besar radiasi inframerah matahari dibandingkan warna gelap, sehingga tubuh tidak mudah kepanasan.
- **Kalorimeter**, alat yang menggunakan Asas Black untuk mengukur kalor jenis zat atau kalor laten, dengan cara mengukur perubahan suhu dalam sistem terisolasi.
- **Sistem pendingin mesin kendaraan**, yang menggunakan konveksi paksa (pompa air) dan radiator (konduksi dan konveksi) untuk membuang kalor sisa pembakaran dari mesin.
- **Angin darat dan angin laut**, fenomena alam yang terjadi akibat perbedaan kalor jenis antara daratan (kecil) dan lautan (besar), menyebabkan perbedaan suhu yang menghasilkan arus konveksi udara.
- **Termometer klinis**, yang bekerja berdasarkan pemuaian raksa atau alkohol dan dikalibrasi pada skala Celsius untuk memantau suhu tubuh.



Gambar 5.7: Analisis struktur penampang termos ideal. Kombinasi tiga fitur utama—sumbat isolator, celah hampa udara ganda (*vacuum space*), dan dinding berlapis perak reflektif—bekerja bersama untuk memutus rantai perpindahan kalor secara konduksi, konveksi, maupun radiasi.

5.1.11 Ringkasan

Tabel 5.5: Persamaan Penting Suhu dan Kalor

Konsep	Persamaan
Konversi suhu	$\frac{T_C}{100} = \frac{T_F - 32}{180} = \frac{T_R}{80} = \frac{T_K - 273}{100}$
Suhu Kelvin	$T_K = T_C + 273$
Pemuaian panjang	$\Delta L = L_0 \alpha \Delta T$
Pemuaian luas	$\Delta A = A_0 \beta \Delta T$
Pemuaian volume	$\Delta V = V_0 \gamma \Delta T$
Kalor sensibel	$Q = m c \Delta T$
Kapasitas kalor	$Q = C \Delta T$
Kalor laten	$Q = m L$
Asas Black	$Q_{\text{lepas}} = Q_{\text{serap}}$
Konduksi	$Q/t = k A \Delta T/d$
Konveksi	$Q/t = h A (T_s - T_f)$
Radiasi	$Q/t = e \sigma A T^4$

Catatan Penting: Suhu dan kalor adalah dua besaran yang berbeda – suhu adalah **keadaan** (sifat intensif zat), sedangkan kalor adalah **proses perpindahan energi** yang terjadi akibat perbedaan suhu. Kalor laten terjadi tanpa perubahan suhu, sedangkan kalor sensibel mengubah suhu tanpa perubahan wujud. Ketiga mekanisme perpindahan kalor (konduksi, konveksi, radiasi) dapat terjadi secara bersamaan, namun dominasi masing-masing bergantung pada sifat medium dan kondisi sistemnya.

5.2 Teori Kinetik Gas

Ketika memompa ban sepeda, udara yang dimasukkan ke dalam ban terasa semakin sulit dipompa seiring meningkatnya jumlah udara di dalamnya – mengapa demikian? Ketika balon dipanaskan, balon mengembang; ketika didinginkan, balon mengempis. Dan mengapa bunyi ledakan terjadi saat ban meletus? Semua fenomena ini melibatkan gas, namun penjelasannya tidak dapat ditemukan hanya dengan mengamati gas dari luar.

Jawaban atas pertanyaan-pertanyaan tersebut memerlukan pendekatan yang berbeda: kita perlu “masuk ke dalam” gas dan memahami perilakunya dari sudut pandang molekuler. Inilah yang dilakukan oleh **Teori Kinetik Gas** – sebuah kerangka teoritis yang menjelaskan sifat-sifat gas (tekanan, suhu, energi) berdasarkan gerak acak molekul-molekul penyusunnya. Teori ini berhasil menyatukan dunia yang tampak (tekanan dan suhu yang terukur) dengan dunia yang tak tampak (gerak molekul) ke dalam satu penjelasan yang konsisten dan elegan.

Pada bagian ini akan dipelajari model gas ideal dan asumsi-asumsi dasarnya, hubungan antara gerak molekul dengan tekanan gas, persamaan gas ideal, energi kinetik rata-rata molekul, kelajuan molekul, derajat kebebasan, energi dalam gas ideal, serta berbagai penerapannya dalam kehidupan dan teknologi.

5.2.1 Model Gas Ideal

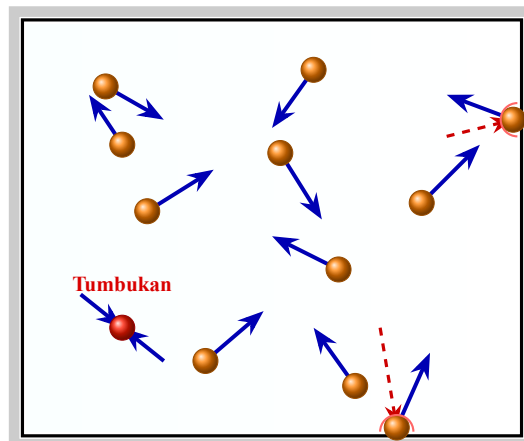
Untuk membangun teori yang dapat menghasilkan persamaan matematis yang dapat diuji, diperlukan penyederhanaan sistem. Dalam fisika, penyederhanaan ini dilakukan melalui pembuatan **model**. Model gas yang paling sederhana namun sangat berguna adalah **gas ideal** – sebuah gas hipotetis yang memenuhi seperangkat asumsi tertentu sehingga perilakunya dapat dihitung secara analitis.

Gas ideal adalah gas yang terdiri dari molekul-molekul titik bermassa yang bergerak secara acak, tidak berinteraksi satu sama lain kecuali melalui tumbukan lenting sempurna, dan mematuhi hukum-hukum mekanika Newton.

Asumsi-Asumsi Gas Ideal

- Gas terdiri dari sejumlah besar molekul yang bergerak secara acak ke segala arah.
- Ukuran molekul dapat diabaikan dibandingkan jarak antarmolekul (molekul dianggap sebagai partikel titik).
- Tidak ada gaya interaksi antarmolekul, kecuali saat terjadi tumbukan.
- Setiap tumbukan antarmolekul maupun antara molekul dan dinding wadah bersifat **lenting sempurna** – energi kinetik total terpelihara.
- Molekul mematuhi hukum-hukum gerak Newton.

Karakteristik Mikroskopis Gas Ideal



Variabel Keadaan (Makroskopis):

Volume Bejana = V | Tekanan Gas = P | Suhu Mutlak = T

Gambar 5.8: Model partikel gas ideal di dalam wadah tertutup. Representasi mikroskopis menunjukkan gerak acak partikel dan peristiwa tumbukan. Gabungan efek tumbukan partikel pada seluruh dinding menghasilkan parameter makroskopis berupa Tekanan (P) pada Volume (V).

Meskipun tidak ada gas nyata yang benar-benar ideal, gas-gas seperti helium, neon, hidrogen, dan nitrogen pada suhu ruang dan tekanan rendah mendekati perilaku gas ideal

dengan sangat baik. Model ini menjadi fondasi dari seluruh pembahasan Teori Kinetik Gas.

5.2.2 Tekanan Gas dan Gerak Molekul

Tekanan gas pada dinding wadah terasa nyata – ban yang dipompa menjadi keras, balon yang ditiup menjadi tegang. Namun dari mana asalnya tekanan ini? Jawabannya tersembunyi dalam gerak molekul: **tekanan gas adalah akibat dari tumbukan molekul-molekul gas pada dinding wadah.**

Setiap kali sebuah molekul menumbuk dinding dan memantul kembali, molekul tersebut mengalami perubahan momentum. Berdasarkan hukum ketiga Newton, dinding juga mendapat gaya yang sama besar dan berlawanan arah. Bila jumlah tumbukan per satuan waktu sangat besar (karena jumlah molekul sangat banyak), gaya rata-rata yang bekerja pada dinding menjadi tekanan yang dapat diukur.

Penurunan Persamaan Tekanan

Pertimbangkan N molekul gas bermassa m dalam wadah kubus bersisi L (volume $V = L^3$). Untuk satu molekul dengan komponen kecepatan v_x searah sumbu- x :

- Perubahan momentum saat menumbuk dinding tegak lurus- x : $\Delta p = 2mv_x$
- Waktu antara dua tumbukan berurutan dengan dinding yang sama: $\Delta t = 2L/v_x$
- Gaya rata-rata satu molekul pada dinding: $F = \Delta p / \Delta t = mv_x^2 / L$

Dengan menjumlahkan kontribusi seluruh N molekul dan menggunakan rata-rata kuadrat kecepatan, diperoleh persamaan tekanan gas:

$$P = \frac{1}{3} \frac{N m \overline{v^2}}{V} \quad (5.13)$$

atau ekuivalen:

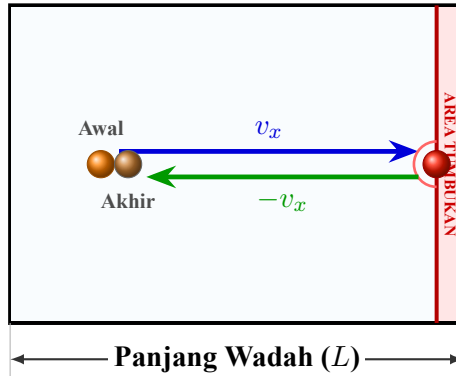
$$P V = \frac{1}{3} N m \overline{v^2} \quad (5.14)$$

dengan:

- P = tekanan gas (Pa)
- V = volume gas (m^3)
- N = jumlah molekul
- m = massa satu molekul (kg)
- $\overline{v^2}$ = rata-rata kuadrat kecepatan molekul (m^2/s^2)

Faktor $\frac{1}{3}$ muncul karena gerak molekul diasumsikan isotropis (sama ke segala arah), sehingga kontribusi ke masing-masing dari tiga sumbu koordinat sama besar, yakni $\frac{1}{3} \overline{v^2}$ untuk setiap komponen.

$$\text{Perubahan Momentum: } \Delta p = p_{\text{akhir}} - p_{\text{awal}} = 2mv_x$$



Gambar 5.9: Diagram mekanika tumbukan satu molekul gas ideal pada dinding. Molekul bermassa m bergerak dalam arah aksial x dengan kecepatan v_x , mengalami tumbukan lenting sempurna pada dinding kanan, sehingga kecepatannya berbalik arah menjadi $-v_x$. Transfer momentum sebesar $\Delta p = 2mv_x$ per partikel inilah yang secara makroskopis menyumbang gaya konstan terhadap luas dinding ($P = \frac{F}{A}$).

5.2.3 Persamaan Gas Ideal

Sebelum Teori Kinetik Gas dirumuskan secara lengkap, para ilmuwan telah menemukan secara empiris bahwa tekanan, volume, suhu, dan jumlah mol gas memiliki hubungan yang teratur. Hubungan-hubungan ini ditemukan oleh Boyle, Charles, dan Gay-Lussac, dan akhirnya disatukan ke dalam satu persamaan tunggal yang dikenal sebagai **persamaan gas ideal**.

$$PV = nRT \quad (5.15)$$

dengan:

- P = tekanan gas (Pa)
- V = volume gas (m^3)
- n = jumlah mol gas (mol)
- R = konstanta gas universal = $8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$
- T = suhu mutlak gas (K)

Persamaan ini juga dapat dituliskan dalam bentuk yang melibatkan jumlah molekul N secara langsung, dengan menggantikan $n = N/N_A$ (di mana $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ adalah bilangan Avogadro):

$$PV = Nk_B T \quad (5.16)$$

dengan $k_B = R/N_A = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ adalah **konstanta Boltzmann**.

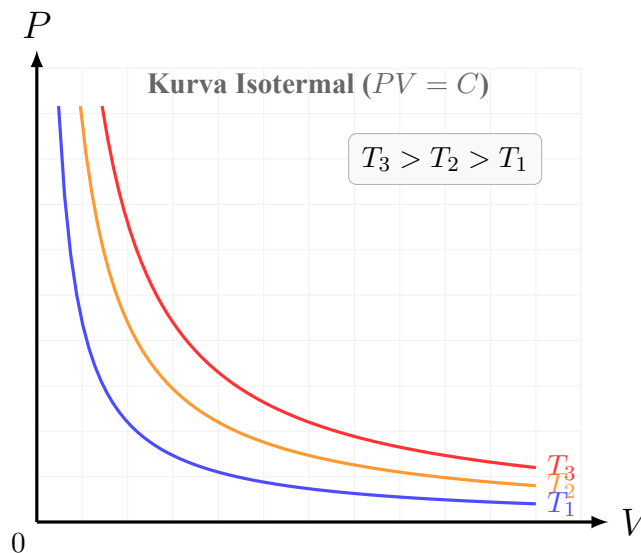
Hukum-Hukum Gas Empiris

Persamaan $PV = nRT$ mencakup tiga hukum empiris sebagai kasus khusus:

- **Hukum Boyle** (T tetap / isothermal): $PV = \text{konstan}$, sehingga $P_1V_1 = P_2V_2$.
- **Hukum Charles** (P tetap / isobarik): $V/T = \text{konstan}$, sehingga $V_1/T_1 = V_2/T_2$.
- **Hukum Gay-Lussac** (V tetap / isovolumik): $P/T = \text{konstan}$, sehingga $P_1/T_1 = P_2/T_2$.

Untuk proses yang melibatkan perubahan dua atau lebih besaran sekaligus, digunakan **Hukum Gas Gabungan**:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (5.17)$$



Gambar 5.10: Grafik isothermal proses termodinamika gas ideal pada diagram $P - V$ untuk tiga tingkat suhu yang berbeda. Berdasarkan Hukum Boyle ($PV = nRT$), kurva berbentuk hiperbola segi empat di mana posisi kurva yang semakin menjauhi titik origin $(0, 0)$ merepresentasikan sistem dengan suhu mutlak (T) yang lebih tinggi.

Contoh Soal

Suatu gas ideal memiliki volume 2 L pada suhu 27°C dan tekanan 1 atm. Jika gas dipanaskan hingga 127°C pada tekanan tetap, tentukan volume akhir gas!

Penyelesaian:

Diketahui: $V_1 = 2 \text{ L}$, $T_1 = 300 \text{ K}$, $T_2 = 400 \text{ K}$, P tetap

Gunakan Hukum Charles:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} = 2 \times \frac{400}{300}$$

$$V_2 = \frac{8}{3} \approx 2,67 \text{ L}$$

5.2.4 Energi Kinetik Molekul Gas

Dari persamaan tekanan yang diturunkan secara kinetik ($PV = \frac{1}{3}Nm\overline{v^2}$) dan persamaan gas ideal ($PV = Nk_B T$), dapat diperoleh hubungan langsung antara energi kinetik molekul dan suhu gas.

Perhatikan bahwa energi kinetik translasi rata-rata satu molekul adalah:

$$\overline{E_k} = \frac{1}{2} m \overline{v^2}$$

Dari kedua persamaan PV , diperoleh:

$$\frac{1}{3} N m \overline{v^2} = N k_B T$$

$$\frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} k_B T$$

$$\overline{E_k} = \frac{3}{2} k_B T \quad (5.18)$$

Hasil ini memiliki implikasi yang sangat mendalam: **energi kinetik translasi rata-rata setiap molekul gas ideal hanya bergantung pada suhu mutlak**, tidak pada jenis gas, massa molekul, maupun tekanan gas. Semua molekul gas – baik molekul hidrogen yang ringan maupun molekul oksigen yang lebih berat – memiliki energi kinetik rata-rata yang sama pada suhu yang sama.

5.2.5 Hubungan Suhu dan Energi Kinetik

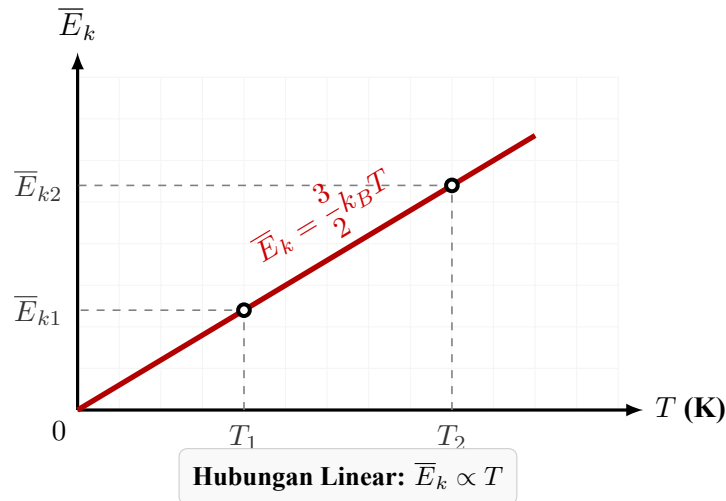
Hasil pada subbab sebelumnya, $\overline{E_k} = \frac{3}{2}k_B T$, mengungkapkan makna fisis dari suhu yang jauh lebih dalam dari sekadar angka pada termometer:

Suhu mutlak suatu gas adalah ukuran langsung dari energi kinetik translasi rata-rata molekul-molekulnya. Semakin tinggi suhu gas, semakin cepat gerak rata-rata molekulnya.

Pada suhu nol mutlak ($T = 0$ K), energi kinetik translasi molekul secara klasik bernilai nol – artinya seluruh gerak termal berhenti. Inilah yang menjadi dasar fisis dari nol mutlak pada skala Kelvin.

Energi kinetik total seluruh molekul gas (N molekul):

$$E_{k,\text{total}} = N \overline{E_k} = \frac{3}{2} N k_B T = \frac{3}{2} n R T \quad (5.19)$$



Gambar 5.11: Grafik hubungan fungsi linear antara energi kinetik translasi rata-rata molekul gas ideal ($\overline{E}_k$) terhadap suhu mutlaknya (T). Sesuai hukum mekanika statistik, grafik berupa garis lurus yang memotong titik origin (0, 0), membuktikan secara fisis bahwa pada saat suhu mencapai nol mutlak (0 K), seluruh gerak translasi partikel gas akan berhenti total.

Contoh Soal

Tentukan energi kinetik rata-rata sebuah molekul gas pada suhu 27°C ! ($k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)

Penyelesaian:

Diketahui: $T = 27 + 273 = 300 \text{ K}$

$$\overline{E}_k = \frac{3}{2} k_B T = \frac{3}{2} (1,38 \times 10^{-23})(300)$$

$$\overline{E}_k = 6,21 \times 10^{-21} \text{ J}$$

5.2.6 Kelajuan Molekul Gas

Telah diketahui bahwa molekul-molekul gas bergerak secara acak dengan berbagai kecepatan yang berbeda-beda. Namun untuk keperluan praktis, dapat ditentukan beberapa nilai kelajuan yang merepresentasikan gas tersebut. Dari hubungan $\overline{E}_k = \frac{3}{2} k_B T = \frac{1}{2} m \overline{v^2}$, diperoleh **kelajuan rms** (*root mean square*):

$$v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad (5.20)$$

dengan M adalah massa molar gas (kg/mol).

Selain v_{rms} , terdapat dua kelajuan lain yang penting dalam deskripsi statistik gas:

$$v_p = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \quad (\text{kelajuan paling mungkin}) \quad (5.21)$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (\text{kelajuan rata-rata}) \quad (5.22)$$

Ketiga kelajuan ini memiliki urutan:

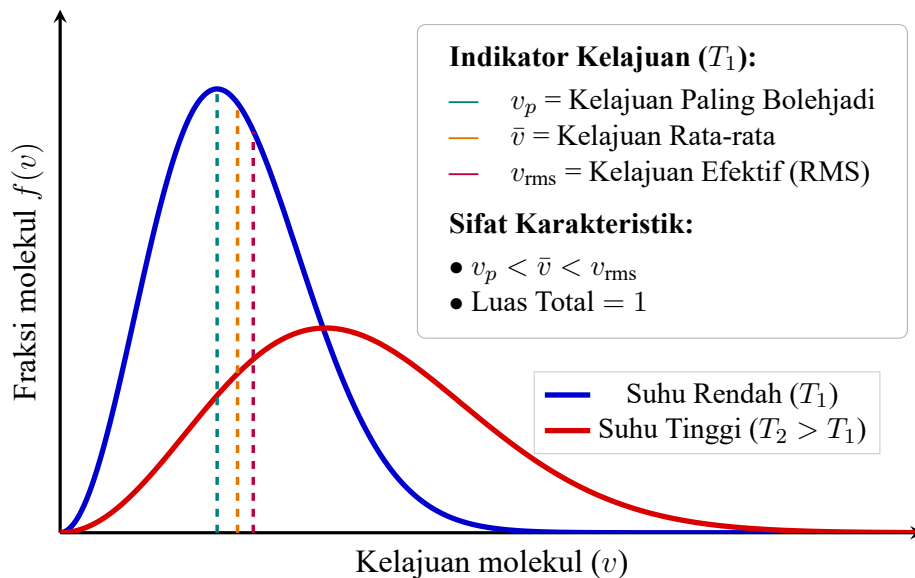
$$v_p < \bar{v} < v_{rms}$$

dengan perbandingan numerik:

$$v_p : \bar{v} : v_{rms} = \sqrt{2} : \sqrt{\frac{8}{\pi}} : \sqrt{3} \approx 1,41 : 1,60 : 1,73$$

Distribusi Maxwell-Boltzmann

Kelajuan molekul-molekul gas tidak seragam, melainkan tersebar mengikuti **distribusi Maxwell-Boltzmann**. Distribusi ini menggambarkan fraksi molekul yang memiliki kelajuan dalam selang tertentu:



Gambar 5.12: Distribusi Maxwell-Boltzmann untuk dua suhu ($T_1 < T_2$). Ketika suhu meningkat, puncak distribusi bergeser ke arah kelajuan yang lebih besar, menjadi lebih rendah, dan distribusi melebar. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak molekul memiliki kelajuan tinggi. Untuk setiap suhu berlaku $v_p < \bar{v} < v_{rms}$.

Contoh Soal

Tentukan kelajuan rms molekul gas oksigen (O_2) pada suhu 27°C ! ($M_{O_2} = 32 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$, $R = 8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$)

Penyelesaian:

Diketahui: $T = 300 \text{ K}$, $M = 32 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3(8,314)(300)}{32 \times 10^{-3}}}$$

$$v_{rms} = \sqrt{233.831} \approx 483 \text{ m/s}$$

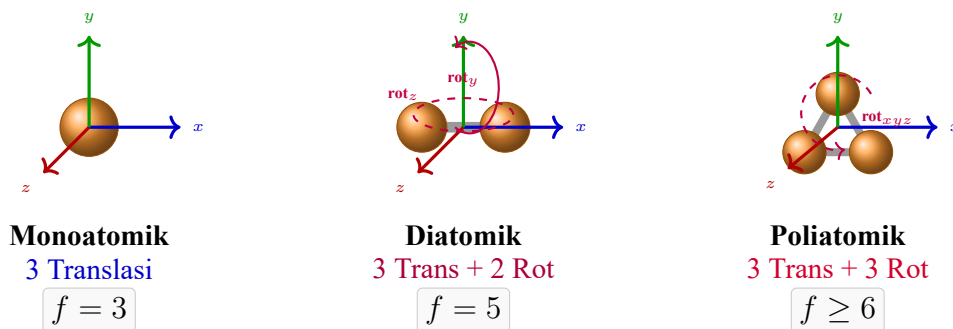
5.2.7 Derajat Kebebasan Molekul

Sejauh ini, energi kinetik molekul hanya dihitung dari gerak *translasi* (berpindah tempat). Namun molekul nyata juga dapat **berotasi** dan **bervibrasi** – dan setiap mode gerak ini menyimpan energi. Konsep yang menghitung banyaknya mode penyimpanan energi independen ini disebut **derajat kebebasan** (f).

Derajat kebebasan adalah jumlah cara independen yang dapat digunakan oleh molekul untuk menyimpan energi kinetik (dan potensial) termal.

Berdasarkan struktur molekulnya, nilai f bervariasi:

- **Gas monoatomik** (He, Ne, Ar): hanya memiliki gerak translasi dalam 3 arah sumbu (x, y, z), sehingga $f = 3$.
- **Gas diatomik** (H_2 , O_2 , N_2) pada suhu rendah-sedang: translasi 3 arah + rotasi 2 arah (di sekitar dua sumbu tegak lurus sumbu molekul), sehingga $f = 5$.
- **Gas diatomik** pada suhu sangat tinggi: ditambah vibrasi, sehingga $f = 7$.
- **Gas poliatomik** (CO_2 , NH_3 , H_2O): translasi 3 arah + rotasi 3 arah (umumnya), $f \geq 6$.



Gambar 5.13: Derajat kebebasan (f) molekul gas ideal berdasarkan kompleksitas geometrinya pada suhu kamar. Gas monoatomik hanya memiliki mode gerak translasi 3-dimensi ($f = 3$). Gas diatomik mengalami penambahan 2 mode gerak rotasi ($f = 5$), sedangkan gas poliatomik memiliki kebebasan bergerak penuh baik secara translasi maupun rotasi di seluruh sumbu ruang ($f \geq 6$).

Teorema Ekipartisi Energi

Prinsip yang menghubungkan derajat kebebasan dengan energi kinetik disebut **Teorema Ekipartisi Energi**:

Setiap derajat kebebasan suatu molekul menyimpan energi rata-rata sebesar $\frac{1}{2}k_B T$.

Dengan demikian, energi kinetik rata-rata per molekul untuk gas dengan f derajat kebebasan:

$$\overline{E_k} = \frac{f}{2} k_B T \quad (5.23)$$

Untuk gas monoatomik ($f = 3$), hasil ini kembali ke $\overline{E_k} = \frac{3}{2} k_B T$ yang telah diperoleh sebelumnya, yang merupakan konsistensi internal teori ini.

5.2.8 Energi Dalam Gas Ideal

Seluruh energi kinetik yang tersimpan dalam gerak acak (translasi, rotasi, vibrasi) seluruh molekul gas disebut **energi dalam** (U). Untuk gas ideal – di mana tidak ada gaya interaksi antarmolekul – tidak ada energi potensial antarmolekul, sehingga energi dalam *hanya* terdiri dari energi kinetik total seluruh molekul.

Dengan menggunakan teorema ekipartisi, energi dalam N molekul gas ideal dengan f derajat kebebasan:

$$U = N \frac{f}{2} k_B T = \frac{f}{2} n R T \quad (5.24)$$

Ini adalah hasil yang sangat penting: **energi dalam gas ideal hanya bergantung pada suhu** – bukan pada tekanan, volume, atau riwayat proses yang dilalui gas. Ketika suhu gas berubah sebesar ΔT , perubahan energi dalam selalu:

$$\Delta U = \frac{f}{2} n R \Delta T \quad (5.25)$$

tanpa memandang bagaimana proses perubahan suhu itu terjadi (apakah melalui pemanasan isobarik, isovolumik, atau proses lain sekalipun).

Tabel 5.6: Ringkasan Besaran Termal Gas Ideal untuk Berbagai Jenis Gas

Jenis Gas	Contoh	f	$\overline{E_k}$	U (per mol)
Monoatomik	He, Ne, Ar	3	$\frac{3}{2} k_B T$	$\frac{3}{2} R T$
Diatomik	H ₂ , O ₂	5	$\frac{5}{2} k_B T$	$\frac{5}{2} R T$
Poliatomik	CO ₂ , NH ₃	6	$3 k_B T$	$3 R T$

Contoh Soal

Tentukan energi dalam 2 mol gas nitrogen (N₂, diatomik) pada suhu 300 K! ($R = 8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$)

Penyelesaian:

Diketahui: $n = 2 \text{ mol}$, $f = 5$ (diatomik), $T = 300 \text{ K}$

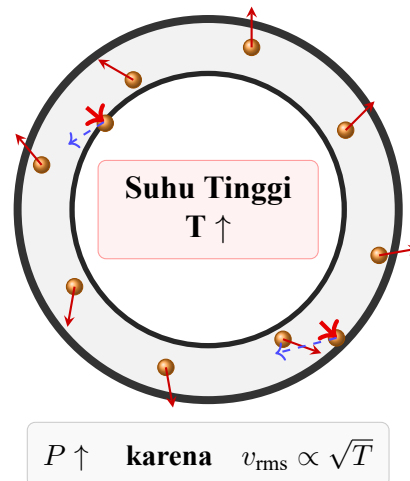
$$U = \frac{f}{2} n R T = \frac{5}{2} (2) (8,314) (300)$$

$$U = 12.471 \text{ J} \approx 12,5 \text{ kJ}$$

5.2.9 Penerapan Teori Kinetik Gas

Teori Kinetik Gas bukan sekadar konstruksi matematis – ia menjadi penjelasan mendasar dari berbagai teknologi dan fenomena alam yang dijumpai sehari-hari:

- **Mesin dan kompresor gas**, seperti kompresor udara, pompa vakum, dan motor pembakaran dalam, yang bekerja dengan memanfaatkan hubungan antara tekanan, volume, dan suhu gas ideal dalam proses termodinamika.
- **Balon udara panas**, yang mengangkat beban karena pemanasan udara di dalam balon meningkatkan energi kinetik molekul, sehingga udara memuai, massa jenis berkurang, dan gaya apung (Archimedes terhadap udara dingin luar) melebihi berat total balon.
- **Difusi gas**, yaitu penyebaran molekul gas dari konsentrasi tinggi ke rendah, yang lajunya berbanding lurus dengan kelajuan rms molekul – menjelaskan mengapa gas ringan (H_2 , He) berdifusi jauh lebih cepat daripada gas berat (O_2 , CO_2).
- **Pemisahan isotop uranium** (teknik difusi gas dalam produksi bahan bakar nuklir), yang memanfaatkan perbedaan kelajuan rms antara UF_6 yang mengandung ^{235}U dan ^{238}U akibat perbedaan massanya.
- **Suara dan perambatannya**: kecepatan rambat bunyi dalam gas bergantung pada kelajuan rms molekul gas tersebut – mengapa suara merambat lebih cepat di udara panas dibandingkan udara dingin.
- **Tekanan ban kendaraan**, yang meningkat saat ban panas akibat gesekan dengan jalan, karena peningkatan suhu menaikkan energi kinetik rata-rata molekul udara di dalam ban, sehingga tekanan bertambah sesuai $P \propto T$ (volume tetap).
- **Pengukur vakum dan tekanan gas mulia dalam lampu pijar**, di mana tekanan rendah gas di dalam lampu dihitung berdasarkan persamaan gas ideal untuk memastikan umur filamen yang panjang.



Gambar 5.14: Peningkatan tekanan udara di dalam ban akibat kenaikan suhu ($T \uparrow$). Kenaikan suhu mutlak menyebabkan energi kinetik dan kelajuan efektif (v_{rms}) molekul gas meningkat drastis. Akibatnya, frekuensi dan impuls tumbukan partikel udara terhadap dinding interior ban menjadi jauh lebih kuat, memicu lonjakan tekanan makroskopis ($P \uparrow$) pada volume konstan.

5.2.10 Ringkasan

Tabel 5.7: Persamaan Penting Teori Kinetik Gas

Konsep / Parameter Gas	Formulasi dan Persamaan
Tekanan gas (mikroskopik)	$P = \frac{1}{3} \frac{Nm\overline{v^2}}{V}$
Persamaan keadaan gas ideal	$PV = nRT = Nk_B T$
Hukum gas ideal gabungan	$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$
Energi kinetik translasi rata-rata	$\overline{E_k} = \frac{f}{2} k_B T$
– Gas monoatomik ($f = 3$)	$\overline{E_k} = \frac{3}{2} k_B T$
Kelajuan efektif (<i>Root Mean Square</i>)	$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}}$
Kelajuan paling bolehjadi (paling mungkin)	$v_p = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}}$
Kelajuan rata-rata aritmatika	$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}$
Energi dalam gas (U)	$U = \frac{f}{2} nRT = \frac{f}{2} Nk_B T$
Perubahan energi dalam (ΔU)	$\Delta U = \frac{f}{2} nR \Delta T$

Catatan Penting: Tiga kelajuan molekul memiliki urutan $v_p < \bar{v} < v_{rms}$ – ketiganya berbeda namun saling berhubungan melalui faktor numerik yang tetap. Energi dalam gas ideal **hanya bergantung pada suhu** dan jumlah molekulnya, bukan pada tekanan maupun volume. Semakin besar derajat kebebasan (f) suatu molekul, semakin banyak cara molekul tersebut menyimpan energi termal, dan semakin besar energi dalamnya pada suhu yang sama – inilah sebabnya gas poliatomik memerlukan lebih banyak kalor untuk menaikkan suhunya dibandingkan gas monoatomik pada jumlah mol yang sama.

5.3 Hukum Termodinamika

Pada bab sebelumnya telah dipelajari bagaimana kalor berpindah akibat perbedaan suhu, baik melalui konduksi, konveksi, maupun radiasi. Namun, sejumlah pertanyaan baru kini muncul: bagaimana mesin kendaraan dapat mengubah panas hasil pembakaran bahan bakar menjadi gerakan piston yang menggerakkan roda? Mengapa kulkas membutuhkan listrik untuk dapat memindahkan kalor dari dalam ke luar, padahal kalor seharusnya mengalir secara alami dari benda panas ke benda dingin? Dan mengapa tidak ada satu pun mesin di dunia ini – betapapun canggihnya – yang mampu mengubah seluruh kalor menjadi usaha tanpa ada yang terbuang sama sekali?

Pertanyaan-pertanyaan inilah yang akan terjawab melalui pembahasan **Hukum Termodinamika**, yaitu cabang fisika yang mempelajari hubungan antara kalor, usaha, dan energi dalam suatu sistem. Pembahasan ini berhasil menyatukan berbagai fenomena yang tampak berbeda – mesin pembakaran, lemari es, arah aliran kalor yang selalu satu arah – ke dalam satu kerangka penjelasan yang konsisten: **energi total alam semesta selalu kekal, namun kualitas energi tersebut untuk dapat dimanfaatkan menjadi usaha akan selalu berkurang pada setiap proses yang terjadi.**

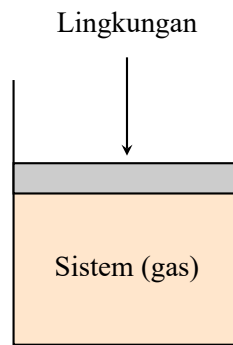
Pada bagian ini akan dipelajari sistem dan lingkungan, usaha pada gas, proses-proses termodinamika, Hukum I Termodinamika, Hukum II Termodinamika, mesin kalor, siklus Carnot, mesin pendingin dan pompa kalor, serta entropi.

5.3.1 Sistem dan Lingkungan

Sebelum membahas hukum-hukum termodinamika, perlu dipahami terlebih dahulu bagaimana fisikawan membatasi objek yang sedang dianalisis dari segala sesuatu di luarnya. Tanpa pembatasan yang jelas, akan sangat sulit menentukan ke mana kalor mengalir atau usaha dilakukan oleh apa terhadap apa. Pembatasan inilah yang dijelaskan melalui konsep **sistem** dan **lingkungan**.

Sistem adalah bagian alam semesta yang menjadi pusat perhatian dan sedang dianalisis, sedangkan lingkungan adalah segala sesuatu di luar sistem yang dapat memengaruhi atau dipengaruhi oleh sistem tersebut.

Sebagai contoh, ketika menganalisis gas yang terkurung dalam silinder bertutup piston, gas tersebut berperan sebagai sistem, sedangkan piston, dinding silinder, dan udara luar berperan sebagai lingkungan.



Gambar 5.15: Gas yang terkurung dalam silinder berperan sebagai sistem, sedangkan piston dan udara di luar silinder berperan sebagai lingkungan.

Tiga Jenis Sistem Berdasarkan Pertukaran dengan Lingkungan

- **Sistem terbuka**, dapat saling bertukar materi maupun energi (kalor dan usaha) dengan lingkungannya, seperti secangkir kopi panas yang terbuka.
- **Sistem tertutup**, hanya dapat bertukar energi (kalor dan usaha) dengan lingkungannya, namun tidak dapat bertukar materi, seperti gas yang terkurung dalam silinder bertutup piston.
- **Sistem terisolasi**, sama sekali tidak dapat bertukar materi maupun energi dengan lingkungannya, seperti zat di dalam termos ideal.

Pembahasan Hukum Termodinamika pada bab ini akan banyak berfokus pada sistem tertutup, yaitu gas yang terkurung dalam ruang tertentu, karena jenis sistem inilah yang paling banyak diterapkan pada mesin kalor dan mesin pendingin.

5.3.2 Usaha pada Gas

Setelah memahami batas antara sistem dan lingkungan, pertanyaan berikutnya adalah: bagaimana sistem (gas) dapat memengaruhi lingkungannya, atau sebaliknya? Salah satu caranya adalah melalui **usaha**, yaitu energi yang dipindahkan ketika gas memuai atau dimampatkan oleh suatu gaya, seperti yang terjadi ketika gas panas mendorong piston pada mesin kendaraan.

Usaha pada gas adalah energi yang dilakukan oleh gas terhadap lingkungannya (atau sebaliknya) akibat adanya perubahan volume gas pada tekanan tertentu.

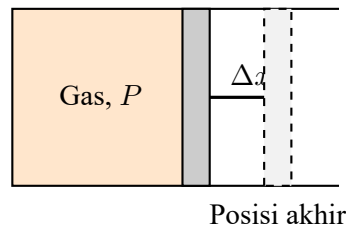
Tinjau gas yang berada dalam silinder bertutup piston dengan luas penampang A . Ketika gas memuai dan mendorong piston sejauh Δx , usaha yang dilakukan gas terhadap piston adalah $W = F\Delta x$. Karena $F = PA$, usaha tersebut dapat dituliskan dalam bentuk perubahan volume gas ($\Delta V = A\Delta x$):

$$W = P \Delta V \quad (5.26)$$

dengan:

- W = usaha yang dilakukan gas (J)

- P = tekanan gas (Pa), dianggap tetap selama proses
- $\Delta V = V_2 - V_1$ = perubahan volume gas (m^3)



Gambar 5.16: Ketika gas memuai dan mendorong piston sejauh Δx , gas melakukan usaha $W = P\Delta V$ terhadap piston (lingkungan).

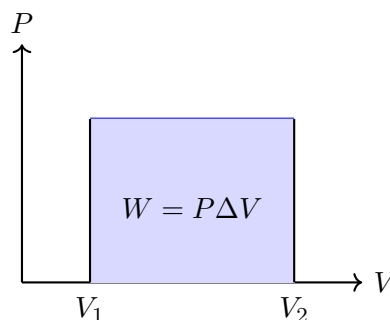
Tanda Usaha: Memuai atau Dimampatkan

Tanda positif/negatif pada usaha gas memiliki makna fisis yang penting untuk dipahami dengan benar:

- Jika gas **memuai** ($\Delta V > 0$), maka $W > 0$ – gas **melakukan usaha terhadap lingkungan** (gas kehilangan energi melalui usaha yang dilakukannya).
- Jika gas **dimampatkan** ($\Delta V < 0$), maka $W < 0$ – lingkungan **melakukan usaha terhadap gas** (gas menerima energi dari usaha yang dilakukan lingkungan).

Usaha sebagai Luas di Bawah Grafik P-V

Untuk proses di mana tekanan gas tidak konstan, usaha gas dapat ditentukan secara umum sebagai luas daerah di bawah kurva pada grafik tekanan (P) terhadap volume (V), yang dikenal sebagai **diagram P-V**. Representasi grafis inilah yang akan banyak digunakan untuk menganalisis berbagai proses termodinamika pada subbab berikutnya.



Gambar 5.17: Pada proses tekanan konstan, usaha gas $W = P\Delta V$ sama dengan luas daerah persegi panjang di bawah kurva P - V .

Contoh Soal

Sejumlah gas berada dalam silinder pada tekanan tetap 2×10^5 Pa. Jika gas memuai dari volume $0,002 \text{ m}^3$ menjadi $0,005 \text{ m}^3$, tentukan usaha yang dilakukan gas tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $P = 2 \times 10^5$ Pa, $V_1 = 0,002 \text{ m}^3$, $V_2 = 0,005 \text{ m}^3$

$$\Delta V = V_2 - V_1 = 0,005 - 0,002 = 0,003 \text{ m}^3$$

$$W = P \Delta V = 2 \times 10^5 \times 0,003$$

$$W = 600 \text{ J}$$

Karena gas memuai ($\Delta V > 0$), nilai W positif, menunjukkan bahwa gas melakukan usaha terhadap lingkungannya.

5.3.3 Proses-Proses Termodinamika

Usaha gas $W = P \Delta V$ berlaku untuk proses dengan tekanan konstan. Namun, dalam praktiknya, gas dapat mengalami proses dengan berbagai cara: ada kalanya volume gas yang dijaga tetap, ada kalanya suhunya yang dijaga tetap, dan ada pula proses yang berlangsung begitu cepat sehingga gas tidak sempat bertukar kalor dengan lingkungannya sama sekali. Keempat proses khusus inilah yang disebut **proses-proses termodinamika**.

Proses termodinamika adalah proses perubahan keadaan gas (tekanan, volume, dan suhu) dari satu kondisi ke kondisi lainnya, yang dapat digolongkan berdasarkan besaran apa yang dijaga tetap (konstan) selama proses berlangsung.

Proses Isobarik (Tekanan Tetap)

Proses **isobarik** adalah proses perubahan keadaan gas pada tekanan yang tetap (konstan). Pada proses ini, usaha gas dihitung langsung menggunakan $W = P \Delta V$ sebagaimana telah dibahas pada subbab sebelumnya.

Proses Isokhorik (Volume Tetap)

Proses **isokhorik** (isovolumetrik) adalah proses perubahan keadaan gas pada volume yang tetap (konstan), misalnya gas yang dipanaskan dalam wadah tertutup rapat yang tidak dapat berubah ukurannya. Karena $\Delta V = 0$ pada proses ini, maka:

$$W = 0 \quad (5.27)$$

Tidak ada usaha yang dilakukan gas pada proses isokhorik, karena usaha hanya dapat dilakukan jika terjadi perubahan volume.

Proses Isotermal (Suhu Tetap)

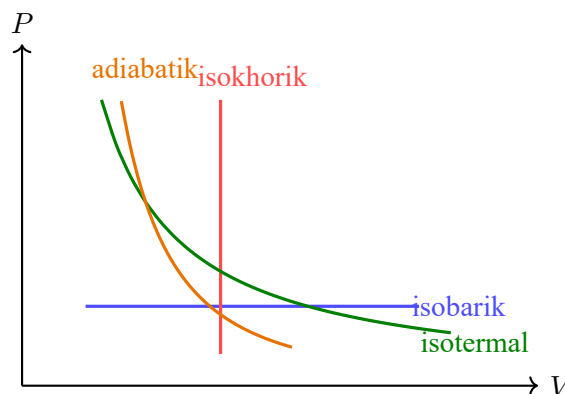
Proses **isotermal** adalah proses perubahan keadaan gas pada suhu yang tetap (konstan). Karena suhu gas ideal berbanding lurus dengan energi dalamnya, pada proses isotermal energi dalam gas tidak berubah, sehingga seluruh kalor yang diserap gas akan diubah sepenuhnya menjadi usaha (akan dibahas lebih lanjut pada subbab Hukum I Termodinamika). Usaha pada proses isotermal dihitung dengan:

$$W = nRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (5.28)$$

dengan n adalah jumlah mol gas, R adalah konstanta gas umum (8,31 J/mol K), dan T adalah suhu mutlak gas (K).

Proses Adiabatik (Tanpa Pertukaran Kalor)

Proses **adiabatik** adalah proses yang berlangsung tanpa ada kalor yang masuk maupun keluar dari sistem ($Q = 0$), baik karena sistem terisolasi secara termal, maupun karena proses berlangsung sangat cepat sehingga tidak ada waktu yang cukup bagi kalor untuk berpindah. Pada proses ini, usaha yang dilakukan gas sepenuhnya berasal dari perubahan energi dalam gas itu sendiri.



Gambar 5.18: Perbandingan keempat proses termodinamika pada diagram P - V : isobarik (garis mendatar), isokhorik (garis tegak), isothermal, dan adiabatik (lebih curam daripada isothermal).

Mengapa Kurva Adiabatik Lebih Curam daripada Isothermal?

Pada proses isothermal, gas yang dimampatkan akan melepaskan kalor ke lingkungan agar suhunya tetap konstan, sehingga tekanannya naik secara lebih landai. Sebaliknya, pada proses adiabatik, gas yang dimampatkan tidak dapat melepaskan kalor sama sekali, sehingga seluruh usaha yang diterima gas akan meningkatkan energi dalam (dan suhu) gas tersebut secara signifikan, menyebabkan tekanan naik jauh lebih tajam untuk perubahan volume yang sama. Sifat inilah yang menjelaskan mengapa pompa sepeda terasa panas ketika digunakan memompa dengan cepat – udara yang dimampatkan secara cepat (mendekati adiabatik) mengalami kenaikan suhu yang nyata.

Contoh Soal

Sebanyak 2 mol gas ideal mengalami proses isothermal pada suhu 300 K, dengan volume gas berubah dari $0,01 \text{ m}^3$ menjadi $0,02 \text{ m}^3$. Tentukan usaha yang dilakukan gas tersebut! ($R = 8,31 \text{ J/mol K}$, $\ln 2 = 0,693$)

Penyelesaian:

Diketahui: $n = 2 \text{ mol}$, $T = 300 \text{ K}$, $V_1 = 0,01 \text{ m}^3$, $V_2 = 0,02 \text{ m}^3$

$$W = nRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = 2 \times 8,31 \times 300 \times \ln \left(\frac{0,02}{0,01} \right)$$

$$W = 2 \times 8,31 \times 300 \times \ln(2)$$

$$W = 4986 \times 0,693$$

$$W \approx 3455 \text{ J}$$

5.3.4 Hukum I Termodinamika

Keempat proses termodinamika menjelaskan berbagai cara gas dapat berubah keadaan. Namun, pertanyaan yang lebih mendasar belum terjawab: ke mana sebenarnya kalor yang diserap oleh gas itu pergi jika tidak seluruhnya diubah menjadi usaha? Apakah ada energi yang hilang begitu saja? Jawaban atas pertanyaan inilah yang dijelaskan oleh **Hukum I Termodinamika**, yang merupakan penerapan langsung dari hukum kekekalan energi pada sistem gas.

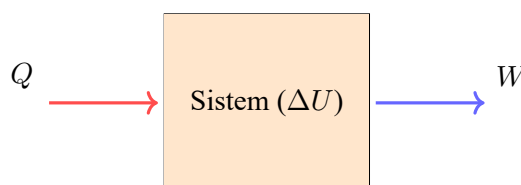
Kalor yang diberikan kepada suatu sistem akan digunakan untuk dua hal sekaligus: mengubah energi dalam sistem dan/atau melakukan usaha terhadap lingkungan – energi tidak ada yang hilang, melainkan hanya berubah bentuk atau berpindah.

$$Q = \Delta U + W \quad (5.29)$$

dengan:

- Q = kalor yang diserap (+) atau dilepas (–) sistem (J)
- ΔU = perubahan energi dalam sistem (J)
- W = usaha yang dilakukan sistem (+) atau diterima sistem (–) (J)

Energi dalam (U) adalah jumlah seluruh energi kinetik dan energi potensial partikel-partikel penyusun gas. Untuk gas ideal, energi dalam hanya bergantung pada suhu gas – semakin tinggi suhu gas, semakin besar pula energi dalamnya, terlepas dari tekanan maupun volume gas tersebut.



Gambar 5.19: Kalor Q yang masuk ke dalam sistem digunakan untuk mengubah energi dalam sistem (ΔU) dan melakukan usaha (W) terhadap lingkungan.

Konvensi Tanda dalam Hukum I Termodinamika

Agar persamaan ini dapat digunakan secara konsisten, diperlukan kesepakatan tanda untuk setiap besaran:

- Q bernilai **positif** jika kalor **diserap** sistem, dan **negatif** jika kalor **dilepas** sistem.
- W bernilai **positif** jika sistem **memuai** (melakukan usaha terhadap lingkungan), dan **negatif** jika sistem **dimampatkan** (menerima usaha dari lingkungan).
- ΔU bernilai **positif** jika suhu sistem **naik**, dan **negatif** jika suhu sistem **turun**.

Penerapan pada Proses-Proses Termodinamika

Hukum I Termodinamika dapat disederhanakan untuk setiap proses khusus yang telah dibahas sebelumnya:

- **Isokhorik** ($W = 0$): seluruh kalor yang diserap digunakan untuk mengubah energi dalam, $Q = \Delta U$.
- **Isothermal** ($\Delta U = 0$, karena suhu tetap): seluruh kalor yang diserap diubah sepenuhnya menjadi usaha, $Q = W$.
- **Adiabatik** ($Q = 0$): usaha yang dilakukan gas sepenuhnya berasal dari penurunan energi dalamnya, $W = -\Delta U$.

Mengapa Tidak Ada Energi yang Hilang?

Inilah jawaban atas pertanyaan di awal subbab: kalor yang diserap gas tidak pernah hilang begitu saja, melainkan selalu terbagi secara pasti antara perubahan energi dalam (yang berkaitan dengan perubahan suhu gas) dan usaha (yang berkaitan dengan perubahan volume gas). Prinsip kekekalan inilah yang menjadi dasar perhitungan pada seluruh mesin kalor yang akan dibahas pada subbab berikutnya.

Contoh Soal

Suatu gas menyerap kalor sebesar 800 J dan melakukan usaha sebesar 300 J terhadap lingkungannya. Tentukan perubahan energi dalam gas tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $Q = 800$ J (diserap, positif), $W = 300$ J (gas memuai, positif)

$$Q = \Delta U + W$$

$$\Delta U = Q - W = 800 - 300$$

$$\Delta U = 500 \text{ J}$$

Karena ΔU bernilai positif, energi dalam (dan suhu) gas tersebut mengalami kenaikan.

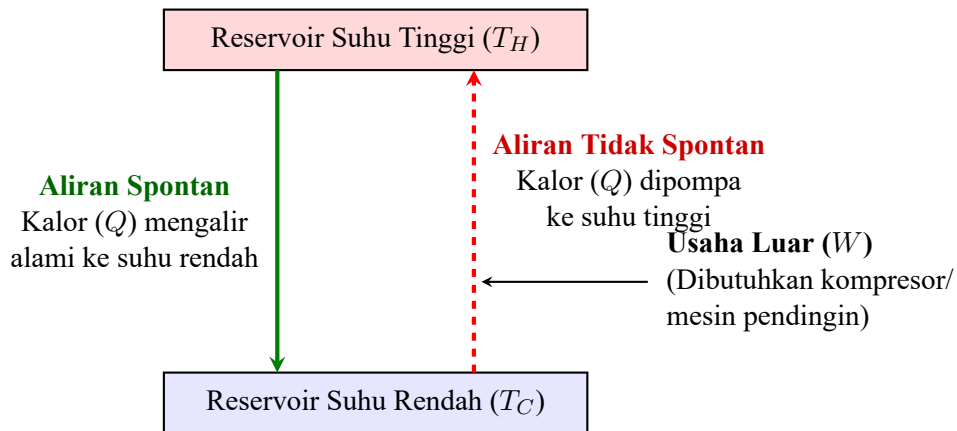
5.3.5 Hukum II Termodinamika

Hukum I Termodinamika menjelaskan bahwa energi senantiasa kekal – tidak ada yang hilang maupun tercipta. Namun, jika demikian, mengapa kalor tidak pernah mengalir secara spontan dari es batu menuju air panas di sekitarnya, padahal hal tersebut tidak melanggar hukum kekekalan energi sama sekali? Dan mengapa secangkir kopi yang tumpah tidak pernah dengan sendirinya berkumpul kembali ke dalam cangkir? Pertanyaan-pertanyaan inilah yang menunjukkan bahwa hukum kekekalan energi saja **tidak cukup** untuk menjelaskan arah alami suatu proses. Jawabannya terletak pada **Hukum II Termodinamika**.

Kalor mengalir secara spontan hanya dari benda bersuhu tinggi menuju benda bersuhu rendah, dan tidak pernah terjadi secara spontan sebaliknya, tanpa disertai perubahan lain di lingkungannya.

Pernyataan inilah yang dikenal sebagai **rumusan Clausius** untuk Hukum II Termodinamika. Hukum ini menunjukkan bahwa terdapat suatu "arah panah waktu" pada proses-proses alami: meskipun secara matematis kalor dapat saja berpindah dari benda dingin ke

benda panas tanpa melanggar kekekalan energi, hal tersebut tidak pernah teramati terjadi secara spontan di alam.



Gambar 5.20: Perbandingan arah aliran kalor berdasarkan Hukum Kedua Termodinamika. Aliran alami (spontan) terjadi dari reservoir panas ke dingin, sedangkan aliran sebaliknya (tidak spontan) memerlukan intervensi usaha luar (W).

Rumusan Kelvin-Planck

Selain rumusan Clausius, Hukum II Termodinamika juga memiliki rumusan lain yang setara secara fisis namun berfokus pada keterbatasan mesin kalor, yang dikenal sebagai **rumusan Kelvin-Planck**:

Tidak mungkin dibuat suatu mesin yang bekerja dalam satu siklus yang semata-mata menyerap kalor dari suatu reservoir dan mengubahnya seluruhnya menjadi usaha, tanpa ada kalor yang dibuang ke reservoir lain yang bersuhu lebih rendah.

Rumusan ini menjelaskan secara langsung mengapa tidak ada satu pun mesin di dunia ini yang mampu mengubah seluruh kalor menjadi usaha tanpa ada yang terbuang – sebagaimana sempat dipertanyakan di awal bab. Konsekuensi pentingnya adalah: **tidak ada mesin kalor yang dapat memiliki efisiensi 100%**, karena sebagian kalor yang diserap mesin harus selalu dibuang ke lingkungan yang lebih dingin. Sifat inilah yang akan dibahas secara kuantitatif pada subbab Mesin Kalor.

Mengapa Diperlukan Dua Rumusan?

Kedua rumusan tersebut – Clausius dan Kelvin-Planck – tampak membahas hal yang berbeda (arah aliran kalor versus batasan efisiensi mesin), namun keduanya secara matematis dapat dibuktikan saling ekuivalen: jika salah satu rumusan dilanggar, rumusan yang lain juga otomatis akan dilanggar. Inilah sebabnya Hukum II Termodinamika dianggap sebagai salah satu hukum alam yang paling mendasar, karena membatasi seluruh proses alami menuju satu arah tertentu yang tidak dapat dibalik begitu saja (*irreversible*).

Mengapa Hukum II Termodinamika Penting?

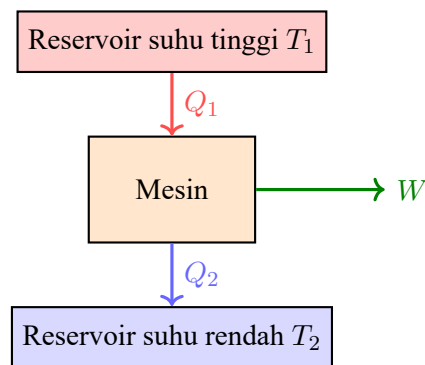
Hukum II Termodinamika tidak hanya membatasi mesin kalor, tetapi juga menjadi dasar bagi konsep **entropi** (akan dibahas pada subbab terakhir), yang menjelaskan mengapa alam semesta secara keseluruhan cenderung bergerak menuju keadaan yang semakin tidak

teratur. Hukum inilah yang menjelaskan mengapa proses-proses alami – seperti pencampuran zat, perpindahan kalor, dan gesekan – bersifat satu arah dan tidak dapat dibalik secara spontan.

5.3.6 Mesin Kalor

Hukum II Termodinamika menyatakan bahwa tidak ada mesin yang dapat mengubah seluruh kalor menjadi usaha. Namun, bagaimana sebenarnya mesin kendaraan, pembangkit listrik tenaga uap, dan berbagai mesin lainnya dapat menghasilkan usaha dari kalor, meskipun tidak seluruhnya? Jawabannya terletak pada prinsip kerja **mesin kalor** (*heat engine*), yaitu perangkat yang mengubah sebagian kalor menjadi usaha melalui suatu siklus berulang.

Mesin kalor adalah alat yang menyerap kalor dari reservoir bersuhu tinggi, mengubah sebagian kalor tersebut menjadi usaha, dan membuang sisa kalor yang tidak terpakai ke reservoir bersuhu rendah.



Gambar 5.21: Skema kerja mesin kalor: kalor Q_1 diserap dari reservoir bersuhu tinggi, sebagian diubah menjadi usaha W , dan sisanya (Q_2) dibuang ke reservoir bersuhu rendah.

Karena mesin bekerja dalam siklus berulang (kembali ke keadaan awal setelah satu putaran kerja), energi dalam mesin tidak berubah dalam satu siklus penuh ($\Delta U = 0$). Berdasarkan Hukum I Termodinamika, usaha yang dihasilkan mesin sama dengan selisih antara kalor yang diserap dan kalor yang dibuang:

$$W = Q_1 - Q_2 \quad (5.30)$$

dengan Q_1 adalah kalor yang diserap dari reservoir suhu tinggi (J) dan Q_2 adalah kalor yang dibuang ke reservoir suhu rendah (J).

Efisiensi Mesin Kalor

Karena tidak seluruh kalor Q_1 dapat diubah menjadi usaha, diperlukan suatu besaran yang menyatakan seberapa baik mesin tersebut "memanfaatkan" kalor yang diserapnya, yang disebut **efisiensi** (η).

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) \times 100\% \quad (5.31)$$

Mengapa Efisiensi Tidak Pernah Mencapai 100%?

Berdasarkan rumusan Kelvin-Planck pada Hukum II Termodinamika, Q_2 tidak pernah dapat bernilai nol – selalu ada kalor yang harus dibuang ke reservoir bersuhu rendah. Akibatnya, efisiensi mesin kalor manapun **selalu kurang dari** 100%. Dalam praktiknya, mesin kendaraan bermotor bahkan hanya memiliki efisiensi sekitar 25%-35%, dengan sebagian besar energi terbuang sebagai kalor melalui sistem pembuangan dan radiator.

Contoh Soal

Sebuah mesin kalor menyerap kalor 5000 J dari reservoir bersuhu tinggi dan membuang kalor 3000 J ke reservoir bersuhu rendah. Tentukan usaha yang dihasilkan mesin dan efisiensinya!

Penyelesaian:

Diketahui: $Q_1 = 5000 \text{ J}$, $Q_2 = 3000 \text{ J}$

$$W = Q_1 - Q_2 = 5000 - 3000$$

$$W = 2000 \text{ J}$$

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\% = \frac{2000}{5000} \times 100\%$$

$$\eta = 40\%$$

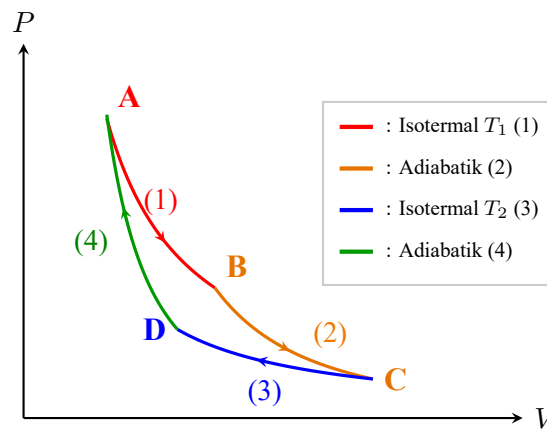
5.3.7 Siklus Carnot

Efisiensi mesin kalor dapat dihitung jika Q_1 dan Q_2 diketahui. Namun, pertanyaan yang lebih mendasar muncul: berapakah efisiensi **terbaik** yang secara teoritis mungkin dicapai oleh sebuah mesin kalor, dan bagaimana cara mencapainya? Pertanyaan inilah yang dijawab oleh **Siklus Carnot**, yang dirumuskan oleh Sadi Carnot sebagai mesin kalor ideal yang memiliki efisiensi maksimum secara teoritis.

Siklus Carnot adalah siklus mesin kalor ideal yang terdiri atas dua proses isothermal dan dua proses adiabatik secara bergantian, dan merupakan siklus dengan efisiensi tertinggi yang mungkin dicapai oleh mesin kalor manapun yang bekerja di antara dua reservoir suhu tertentu.

Empat Tahap Siklus Carnot

1. **Pemuaian isothermal:** gas menyerap kalor Q_1 dari reservoir bersuhu tinggi T_1 dan memuai pada suhu tetap.
2. **Pemuaian adiabatik:** gas terus memuai tanpa pertukaran kalor, sehingga suhunya turun dari T_1 menjadi T_2 .
3. **Pemampatan isothermal:** gas membuang kalor Q_2 ke reservoir bersuhu rendah T_2 dan dimampatkan pada suhu tetap.
4. **Pemampatan adiabatik:** gas terus dimampatkan tanpa pertukaran kalor, sehingga suhunya naik kembali dari T_2 menjadi T_1 , kembali ke keadaan semula.



Gambar 5.22: Diagram P - V Siklus Carnot: pemuaian isotermal $A \rightarrow B$ (1), pemuaian adiabatik $B \rightarrow C$ (2), pemampatan isotermal $C \rightarrow D$ (3), dan pemampatan adiabatik $D \rightarrow A$ (4), yang membentuk satu siklus tertutup searah jarum jam.

Karena seluruh proses pada Siklus Carnot bersifat ideal dan dapat dibalik (*reversible*), perbandingan kalor yang diserap dan dibuang sama dengan perbandingan suhu mutlak kedua reservoir:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (5.32)$$

Dengan mensubstitusikan hubungan ini ke persamaan efisiensi mesin kalor, diperoleh efisiensi maksimum (efisiensi Carnot):

$$\eta_{\text{Carnot}} = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\% \quad (5.33)$$

dengan T_1 dan T_2 masing-masing adalah suhu mutlak (Kelvin) reservoir suhu tinggi dan reservoir suhu rendah.

Mengapa Siklus Carnot Bersifat Ideal?

Siklus Carnot tidak dapat diwujudkan secara nyata, karena mengasumsikan seluruh proses berlangsung secara perlahan tanpa gesekan maupun kehilangan energi (*reversible*) – suatu keadaan yang hanya dapat didekati, namun tidak pernah benar-benar dicapai oleh mesin nyata. Meskipun demikian, efisiensi Carnot tetap sangat berguna sebagai **batas atas teoretis**: efisiensi mesin kalor nyata manapun yang bekerja di antara suhu T_1 dan T_2 tidak akan pernah dapat melebihi efisiensi Carnot pada kedua suhu tersebut.

Mengapa Memperbesar Perbedaan Suhu Meningkatkan Efisiensi?

Dari persamaan efisiensi Carnot, terlihat bahwa efisiensi akan semakin tinggi jika T_2 semakin kecil dibandingkan T_1 – artinya, semakin besar perbedaan suhu antara reservoir panas dan reservoir dingin, semakin tinggi pula efisiensi maksimum yang dapat dicapai. Sifat inilah yang menjelaskan mengapa pembangkit listrik tenaga uap dirancang untuk

menghasilkan uap pada suhu setinggi mungkin, serta menggunakan sistem pendingin untuk menjaga reservoir buangnya tetap pada suhu serendah mungkin.

Contoh Soal

Sebuah mesin Carnot bekerja di antara reservoir bersuhu 227°C dan 27°C . Tentukan efisiensi maksimum mesin tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $T_1 = 227 + 273 = 500\text{ K}$, $T_2 = 27 + 273 = 300\text{ K}$

$$\eta_{\text{Carnot}} = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{300}{500}\right) \times 100\%$$

$$\eta_{\text{Carnot}} = (1 - 0,6) \times 100\%$$

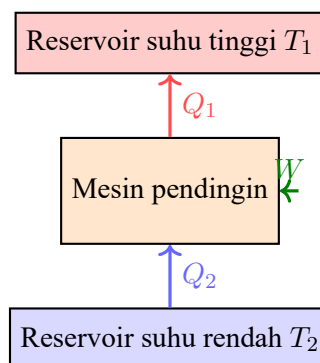
$$\eta_{\text{Carnot}} = 40\%$$

5.3.8 Mesin Pendingin dan Pompa Kalor

Mesin kalor memanfaatkan aliran kalor alami (dari suhu tinggi ke suhu rendah) untuk menghasilkan usaha. Namun, bagaimana kulkas dapat memindahkan kalor dari bagian dalamnya yang dingin menuju udara dapur yang lebih panas, padahal Hukum II Termodinamika (rumusan Clausius) menyatakan bahwa kalor tidak pernah mengalir secara spontan dari benda dingin ke benda panas? Jawabannya terletak pada **mesin pendingin** (*refrigerator*), yang pada dasarnya merupakan mesin kalor yang bekerja secara terbalik.

Mesin pendingin adalah alat yang memindahkan kalor dari reservoir bersuhu rendah menuju reservoir bersuhu tinggi, dengan bantuan usaha dari luar (misalnya energi listrik), sehingga tidak melanggar Hukum II Termodinamika.

Perhatikan bahwa kata kunci pada definisi tersebut adalah **”dengan bantuan usaha dari luar”** – inilah yang membedakan mesin pendingin dari pelanggaran Hukum II Termodinamika: kalor memang dipindahkan dari dingin ke panas, namun hanya dapat terjadi karena ada usaha (kerja kompresor) yang dimasukkan ke dalam sistem, bukan terjadi secara spontan dengan sendirinya.



Gambar 5.23: Skema kerja mesin pendingin: dengan bantuan usaha W dari luar, kalor Q_2 diserap dari reservoir bersuhu rendah dan dibuang sebagai Q_1 ke reservoir bersuhu tinggi.

Berdasarkan Hukum I Termodinamika untuk siklus tertutup, besar usaha yang harus diberikan kepada mesin pendingin adalah:

$$W = Q_1 - Q_2 \quad (5.34)$$

dengan Q_2 adalah kalor yang diserap dari ruang dingin (J) dan Q_1 adalah kalor yang dibuang ke ruang panas (J).

Koefisien Performa (Performansi)

Berbeda dengan mesin kalor yang dinilai berdasarkan efisiensi, mesin pendingin dinilai berdasarkan **koefisien performa** (C_p atau *coefficient of performance, COP*), yaitu perbandingan antara kalor yang berhasil dipindahkan dari ruang dingin terhadap usaha yang harus diberikan:

$$C_p = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (5.35)$$

Mengapa Koefisien Performa Bisa Lebih dari Satu?

Berbeda dengan efisiensi mesin kalor yang nilainya selalu kurang dari 1 (atau 100%), koefisien performa mesin pendingin justru **dapat bernilai lebih besar dari satu**, bahkan untuk mesin pendingin yang baik nilainya bisa mencapai 3 hingga 5. Hal ini wajar karena C_p bukan mengukur "efisiensi pengubahan energi", melainkan mengukur seberapa banyak kalor yang dapat dipindahkan *per satuan usaha* yang diberikan – semakin kecil usaha yang dibutuhkan untuk memindahkan sejumlah kalor tertentu, semakin baik (semakin besar) nilai C_p mesin tersebut.

Pompa Kalor: Mesin Pendingin yang "Dibalik Tujuannya"

Pompa kalor (*heat pump*) pada dasarnya memiliki prinsip kerja yang identik dengan mesin pendingin – keduanya memindahkan kalor dari reservoir dingin ke reservoir panas dengan bantuan usaha. Perbedaannya hanya terletak pada **tujuan pemanfaatannya**: mesin pendingin (kulkas, AC) dimanfaatkan untuk mendinginkan ruang dingin (dengan membuang kalor Q_1 yang dianggap "limbah" ke lingkungan), sedangkan pompa kalor dimanfaatkan untuk memanaskan ruang panas (dengan kalor Q_1 yang dibuang dianggap sebagai "hasil yang diinginkan" untuk menghangatkan ruangan, seperti pada sistem pemanas ruangan di negara beriklim dingin).

Contoh Soal

Sebuah kulkas bekerja di antara suhu ruang dingin -3°C dan suhu ruang dapur 27°C . Tentukan koefisien performa maksimum kulkas tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $T_2 = -3 + 273 = 270 \text{ K}$, $T_1 = 27 + 273 = 300 \text{ K}$

$$C_p = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{270}{300 - 270}$$

$$C_p = \frac{270}{30}$$

$$C_p = 9$$

Artinya, untuk setiap 1 J usaha yang diberikan, kulkas tersebut mampu memindahkan 9 J kalor dari ruang dingin.

5.3.9 Entropi

Hukum II Termodinamika telah menjelaskan bahwa kalor mengalir secara spontan hanya dari benda panas ke benda dingin. Namun, adakah suatu besaran yang dapat **mengukur secara kuantitatif** arah alami proses-proses tersebut, sebagaimana energi mengukur besarnya kuantitas yang kekal? Mengapa secangkir kopi yang tumpah tidak pernah berkumpul kembali dengan sendirinya, dan mengapa gas yang dilepaskan di sudut ruangan akan selalu menyebar memenuhi seluruh ruangan, tidak pernah sebaliknya? Besaran yang menjawab pertanyaan inilah yang disebut **entropi**.

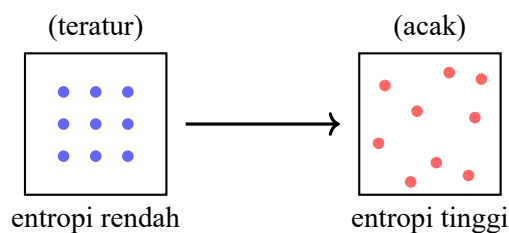
Entropi adalah besaran yang menyatakan derajat ketidakteraturan (kekacauan) suatu sistem – semakin tinggi entropi suatu sistem, semakin tidak teratur susunan partikel penyusunnya.

Perubahan entropi suatu sistem yang menyerap atau melepas kalor secara reversibel pada suhu mutlak tertentu dirumuskan sebagai:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad (5.36)$$

dengan:

- ΔS = perubahan entropi (J/K)
- Q = kalor yang diserap (+) atau dilepas (–) (J)
- T = suhu mutlak saat proses berlangsung (K)



Gambar 5.24: Sistem dengan susunan partikel teratur memiliki entropi rendah, sedangkan sistem dengan susunan partikel acak (tidak teratur) memiliki entropi tinggi.

Hukum II Termodinamika dalam Bahasa Entropi

Dengan diperkenalkannya konsep entropi, Hukum II Termodinamika dapat dinyatakan ulang dalam bentuk yang lebih ringkas dan umum:

Pada setiap proses alami yang terjadi dalam sistem terisolasi, entropi total sistem tersebut tidak pernah berkurang – entropi akan tetap (pada proses reversibel ideal) atau selalu bertambah (pada proses ireversibel, sebagaimana seluruh proses nyata yang terjadi di alam).

$$\Delta S_{\text{total}} \geq 0 \quad (5.37)$$

Mengapa Kopi Tumpah Tidak Pernah Berkumpul Kembali?

Inilah jawaban atas pertanyaan di awal subbab: keadaan kopi yang tumpah dan menyebar memiliki jumlah susunan partikel acak yang jauh lebih banyak (entropi lebih tinggi) dibandingkan keadaan kopi yang masih terkumpul rapi dalam cangkir (entropi lebih rendah). Karena alam selalu bergerak menuju keadaan dengan entropi yang sama atau lebih besar, proses kopi tumpah berkumpul kembali dengan sendirinya secara statistik mungkin terjadi, namun kemungkinannya sedemikian kecil sehingga praktis tidak pernah teramati terjadi.

Entropi dan Mesin Kalor

Konsep entropi juga menjelaskan secara lebih mendalam mengapa efisiensi mesin kalor tidak pernah mencapai 100%: pada Siklus Carnot (siklus reversibel ideal), entropi total tetap ($\Delta S_{\text{total}} = 0$), sehingga seluruh kalor yang dipindahkan dapat dimanfaatkan secara maksimal. Namun, pada mesin nyata yang selalu mengalami gesekan dan proses ireversibel, entropi total selalu bertambah ($\Delta S_{\text{total}} > 0$), yang berarti sebagian energi "berkualitas tinggi" (yang dapat diubah menjadi usaha) selalu terdegradasi menjadi energi "berkualitas rendah" (kalor terbuang) yang tidak dapat lagi dimanfaatkan sepenuhnya.

Contoh Soal

Sebanyak 1000 J kalor mengalir dari reservoir bersuhu 400 K menuju reservoir bersuhu 300 K. Tentukan perubahan entropi total yang terjadi!

Penyelesaian:

Diketahui: $Q = 1000 \text{ J}$, $T_1 = 400 \text{ K}$ (melepas kalor), $T_2 = 300 \text{ K}$ (menyerap kalor)

$$\Delta S_1 = \frac{-Q}{T_1} = \frac{-1000}{400} = -2,5 \text{ J/K}$$

$$\Delta S_2 = \frac{+Q}{T_2} = \frac{1000}{300} \approx 3,33 \text{ J/K}$$

$$\Delta S_{\text{total}} = \Delta S_1 + \Delta S_2 = -2,5 + 3,33$$

$$\Delta S_{\text{total}} \approx 0,83 \text{ J/K}$$

Karena $\Delta S_{\text{total}} > 0$, proses perpindahan kalor ini bersifat alami (spontan) dan sesuai dengan Hukum II Termodinamika.

5.3.10 Ringkasan

Tabel 5.8: Persamaan Penting Hukum Termodinamika

Konsep	Persamaan
Usaha gas (tekanan tetap)	$W = P \Delta V$
Usaha gas (isothermal)	$W = nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$
Hukum I Termodinamika	$Q = \Delta U + W$
Usaha mesin kalor	$W = Q_1 - Q_2$
Efisiensi mesin kalor	$\eta = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) \times 100\%$
Efisiensi Carnot	$\eta_{\text{Carnot}} = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\%$
Koefisien performa	$Cp = \frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$
Perubahan entropi	$\Delta S = \frac{Q}{T}$
Hukum II Termodinamika	$\Delta S_{\text{total}} \geq 0$

Catatan Penting: Hukum I dan Hukum II Termodinamika menjelaskan dua aspek energi yang berbeda namun saling melengkapi – Hukum I menjamin bahwa **kuantitas** energi selalu kekal (tidak ada yang hilang), sedangkan Hukum II menjelaskan bahwa **kualitas** energi (kemampuannya untuk diubah menjadi usaha) senantiasa berkurang pada setiap proses alami. Perlu diingat pula bahwa efisiensi Carnot (η_{Carnot}) merupakan **batas atas teoritis** yang tidak pernah benar-benar dicapai oleh mesin nyata, sehingga efisiensi mesin kalor sesungguhnya selalu memenuhi $\eta \leq \eta_{\text{Carnot}}$. Selain itu, seluruh perhitungan yang melibatkan suhu pada persamaan efisiensi, koefisien performa, dan entropi **wajib** menggunakan skala Kelvin (suhu mutlak), karena besaran-besaran ini berkaitan langsung dengan energi kinetik partikel, bukan sekadar selisih suhu.



6. Getaran, Gelombang dan Optika

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, murid mampu:

- ✓ Menentukan persamaan cepat rambat gelombang bunyi dan hubungan antara besaran yang memengaruhi frekuensi gelombang pada dawai serta pipa organa sebagai wujud memahami harmoni dan keteraturan getaran ciptaan Allah SWT.
- ✓ Menerapkan persamaan Efek Doppler dan menghitung jumlah layangan bunyi tiap detik dalam pemecahan masalah dengan menunjukkan sikap teliti, kritis, dan jujur dalam menganalisis data fisis.
- ✓ Menentukan intensitas bunyi serta taraf intensitas bunyi untuk menggambarkan batasan pendengaran makhluk hidup sebagai bentuk perenungan terhadap kesempurnaan rancangan Sang Maha Mendengar.
- ✓ Menerapkan konsep beda fase serta sifat-sifat fisis gelombang cahaya (interferensi dan difraksi) dalam pemecahan masalah sains secara logis, sistematis, dan bertanggung jawab.
- ✓ Menganalisis aplikasi konsep gelombang bunyi dan gelombang cahaya pada berbagai bidang teknologi mutakhir secara kreatif dengan menunjukkan ketekunan dan semangat *tafakkur* terhadap fenomena alam.

Cakupan Materi

Getaran
Gelombang Mekanik
Gelombang Bunyi
Gelombang Cahaya
Optik Geometri

Pengantar

Getaran, Gelombang, dan Optika dalam Perspektif Al-Qur'an

Pernahkah kamu merenungkan bagaimana suara dawai yang dipetik atau ketukan teratur pada permukaan gendang dapat merambat sejauh puluhan meter hingga terdengar jelas oleh telingamu? Atau bagaimana cahaya matahari yang melintasi ruang hampa jutaan kilometer dapat menembus beningnya air laut, menciptakan kilauan warna-warni yang indah di terumbu karang? Allah ﷻ senantiasa mengajak kita untuk memperhatikan fenomena usikan, rambatan energi, dan hakikat cahaya di sekitar kita sebagai tanda keagungan-Nya:

مَا يَنْظُرُونَ إِلَّا صَيْحَةً وَاحِدَةً تَأْخُذُهُمْ وَهُمْ يَخِصِّمُونَ

“Mereka tidak menunggu melainkan satu teriakan saja yang akan membinasakan mereka ketika mereka sedang bertengkar.”

(QS. Yasin [36]: 49)

Kata *‘teriakan’* (*saihatan*) dalam ayat ini secara fisis merujuk pada fenomena akustik ekstrem, yaitu ekspresi dari energi mekanik berupa getaran hebat yang merambat. Allah ﷻ tidak hanya menciptakan suara sebagai alat komunikasi, melainkan menyusunnya dari partikel-partikel medium yang berosilasi maju-mundur secara periodik. Ketika getaran ini memiliki energi yang teramat besar, ia mampu menjelma menjadi gelombang kejut berkekuatan dahsyat yang dapat memengaruhi keteraturan materi di sekitarnya.

Di dalam Fisika, keterkaitan antara gangguan periodik dan rambatannya dipelajari secara komprehensif dalam domain **Getaran dan Gelombang**. Getaran adalah gerak bolak-balik secara berkala di sekitar titik kesetimbangan, sementara gelombang adalah getaran yang merambat dengan membawa energi tanpa memindahkan partikel mediumnya. Ketika kajian ini diperluas pada gelombang elektromagnetik yang kasat mata, kita memasuki ranah **Optik**—ilmu yang mendalami perilaku cahaya, sifat-sifat perambatannya, serta interaksinya dengan alat-alat optik.

Al-Qur'an secara visual menceritakan bagaimana gelombang mekanik bekerja di samudra luas, berlapis-lapis membawa energi kinetik yang masif. Allah ﷻ berfirman:

أَوْ كَظَلَمْتَ فِي بَحْرِ لَجِي يَغْشَاهُ مَوْجٌ مِّنْ فَوْقِهِ مَوْجٌ مِّنْ فَوْقِهِ سَحَابٌ ظَلَمْتَ
بَعْضَهَا فَوْقَ بَعْضٍ إِذَا أَخْرَجَ يَدَهُ لَمْ يَكْدِ يَرَهَا وَمَنْ لَّ مَجْعَلِ اللَّهِ لَهُ نُورًا فَمَا
لَهُ مِنْ نُورٍ

“Atau (keadaan orang-orang kafir) seperti gelap gulita di lautan yang dalam, yang diliputi oleh gelombang, yang di atasnya ada gelombang (pula), di atasnya (lagi) ada awan. Gelap gulita yang berlapis-lapis. Apabila dia mengeluarkan tangannya, hampir tidak dapat melihatnya. Siapa yang tidak diberi cahaya oleh Allah, maka dia tidak mempunyai cahaya sedikit pun.”

(QS. An-Nur [24]: 40)

Gambaran fisis mengenai *‘‘gelombang yang di atasnya ada gelombang’’* selaras dengan penemuan oseanografi modern tentang keberadaan gelombang internal (*internal waves*) di bawah permukaan laut dalam, selain gelombang permukaan yang biasa kita lihat. Ayat ini juga secara eksplisit menghubungkan antara fenomena gelombang dan prinsip optik dasar: hilangnya intensitas **cahaya** akibat proses absorpsi dan hamburan di kedalaman air, yang memicu terjadinya kondisi gelap gulita (*shadow zone*).

Cahaya itu sendiri diatur oleh hukum optika yang sangat geometris. Di dalam Al-Qur’an, karakteristik cahaya, pembiasan, dan material transparan diumpamakan secara indah:

اللَّهُ نُورُ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ مِثْلُ نُورِهِ كَمِشْكُوتٍ فِيهَا مِصْبَاحٌ الْمِصْبَاحُ فِي زُجَاجَةٍ
الزُّجَاجَةُ كَأَنَّهَا كَوْكَبٌ دُرِّيٌّ

‘‘Allah (pemberi) cahaya (kepada) langit dan bumi. Perumpamaan cahaya-Nya seperti sebuah lubang yang tidak tembus yang di dalamnya ada pelita besar. Pelita itu di dalam tabung kaca (dan) tabung kaca itu bagaikan bintang yang berkilauan...’’
(QS. An-Nur [24]: 35)

Penyebutan *‘‘tabung kaca’’* (*zujajah*) yang memancarkan cahaya bagaikan *‘‘bintang yang berkilauan’’* adalah analogi fisis yang sempurna untuk menjelaskan sifat optis materi. Kaca bertindak sebagai medium transparan yang mampu meneruskan, membiaskan (*refraksi*), dan memantulkan (*refleksi*) berkas cahaya secara teratur, menghasilkan penguatan intensitas visual yang memukau mata pengamat.

Lebih jauh lagi, pembahasan optik fisis di dalam Al-Qur’an juga membedakan secara tegas antara sumber gelombang cahaya mandiri dan objek yang hanya memantulkan cahaya dari sumber lain. Allah ﷻ menegaskan perbedaan karakteristik fisis kedua benda langit ini:

هُوَ الَّذِي جَعَلَ الشَّمْسَ ضِيَاءً وَالْقَمَرَ نُورًا وَقَدَرَهُ مَنَازِلَ لِتَعْلَمُوا عَدَدَ السِّنِينَ
وَالْحِسَابَ مَا خَلَقَ اللَّهُ ذَلِكَ إِلَّا بِالْحَقِّ يُفَصِّلُ الْآيَاتِ لِقَوْمٍ يَعْلَمُونَ

‘‘Dialah yang menjadikan matahari bersinar dan bulan bercahaya, dan Dialah yang menetapkan tempat-tempat peredarannya, agar kamu mengetahui bilangan tahun dan perhitungan (waktu). Allah tidak menciptakan yang demikian itu melainkan dengan hak. Dia menjelaskan tanda-tanda (kebesaran-Nya) kepada orang-orang yang mengetahui.’’
(QS. Yunus [10]: 5)

Penggunaan istilah *‘‘bersinar’’* (*dhiya’*) untuk matahari dan *‘‘bercahaya’’* (*nur*) untuk bulan secara ilmiah membedakan antara benda luminisens yang bertindak sebagai sumber energi radiasi aktif dan benda non-luminisens yang pasif. Sinar bulan yang kita lihat di malam hari sejatinya merupakan manifestasi hukum pemantulan cahaya matahari pada permukaan material bulan—sebuah konsep optika geometris dasar yang mendasari cara kita melihat seluruh benda di dunia.

Dalam bab ini, ruang lingkup belajarmu akan mencakup formulasi matematika dari Getaran Harmonis Sederhana, hukum pemantulan dan pembiasan Snellius, karakteristik gelombang bunyi (termasuk Efek Doppler dan resonansi), hingga analisis pembentukan bayangan pada cermin dan lensa. Kamu juga akan diajak membedah prinsip kerja alat-alat optik tiruan manusia, seperti kacamata, mikroskop, dan teleskop, yang meniru prinsip kerja lensa alami pada mata kita.

Pada bab ini, kamu akan mempelajari bagaimana memformulasikan besaran-besaran gelombang ke dalam persamaan matematika, menghitung frekuensi, periode, dan panjang gelombang, serta menganalisis fenomena difraksi dan interferensi cahaya yang mendasari sifat gelombang pada cahaya.

ﻻ

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَاخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ لَآيَاتٍ لِأُولِي الْأَلْبَابِ

“Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi serta pergantian malam dan siang terdapat tanda-tanda (kebesaran Allah) bagi orang yang berakal, (QS. Ali Imran [3]: 190)

Mempelajari Getaran, Gelombang, dan Optik adalah cara ilmiah bagi kita sebagai *ulul albab* untuk menyingkap bagaimana informasi, energi, dan keindahan dihantarkan di alam raya ini. Setiap variabel frekuensi, indeks bias, dan persamaan gelombang yang akan kamu bedah di dalam bab ini sejatinya adalah metode manusia untuk mengagumi betapa elastis, presisi, dan terstrukturanya **mekanisme penyebaran energi dan spektrum cahaya** yang dirancang oleh Sang Maha Melihat lagi Maha Mendengar.

6.1 Getaran dan Gelombang Mekanik

Dalam kehidupan sehari-hari, kita sering menjumpai benda yang bergerak bolak-balik secara teratur di sekitar suatu titik tertentu – bandul jam yang berayun, senar gitar yang dipetik, atau ranting pohon yang bergoyang tertiuip angin. Namun, sejumlah pertanyaan mendasar perlu dijawab terlebih dahulu: mengapa gerakan bolak-balik semacam ini selalu memiliki waktu tempuh yang sama persis setiap kali berulang, tidak peduli seberapa besar simpangannya (untuk simpangan kecil)? Bagaimana getaran pada satu titik dapat merambat dan memengaruhi titik-titik lain yang jauh, seperti riak air yang menyebar dari satu titik jatuhnya batu? Dan mengapa sebuah gelas kaca dapat pecah hanya karena mendengar nada suara tertentu yang sangat spesifik?

Pertanyaan-pertanyaan inilah yang akan terjawab melalui pembahasan **Getaran dan Gelombang Mekanik**. Pembahasan ini berhasil menyatukan dua fenomena yang erat berkaitan namun sering dianggap terpisah – gerakan bolak-balik suatu titik (getaran), dan perambatan gangguan dari titik tersebut ke titik-titik lain (gelombang) – ke dalam satu kerangka penjelasan yang konsisten: **gelombang mekanik pada dasarnya adalah getaran yang merambat, membawa energi dari satu tempat ke tempat lain tanpa memin-dahkan materi penyusun medium itu sendiri.**

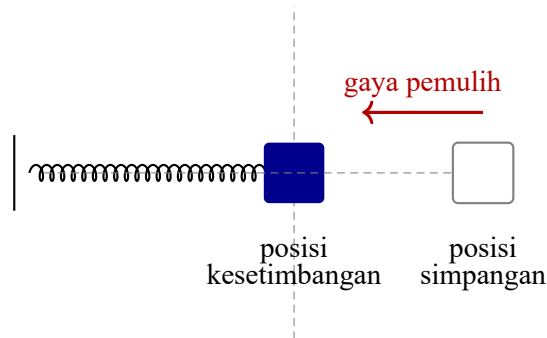
Pada bagian ini akan dipelajari konsep getaran, besaran-besaran getaran, gerak harmonik sederhana (pada pegas dan bandul), energi pada gerak harmonik sederhana, konsep dan besaran-besaran gelombang mekanik, persamaan gelombang berjalan, gelombang transversal dan longitudinal, prinsip superposisi, gelombang stasioner, resonansi, serta penerapan gelombang mekanik dalam kehidupan.

6.1.1 Konsep Getaran

Getaran (*vibration*) adalah gerak bolak-balik suatu benda di sekitar suatu titik kesetimbangan tertentu, yang terjadi secara berulang dalam selang waktu yang tetap.

Titik kesetimbangan adalah posisi di mana resultan gaya yang bekerja pada benda sama dengan nol, sehingga benda yang berada tepat pada titik tersebut tidak memiliki kecenderungan untuk bergerak ke arah mana pun.

Ketika benda yang sedang bergetar disimpangkan dari titik kesetimbangannya, akan timbul suatu gaya yang selalu berusaha **mengembalikan** benda tersebut ke posisi kesetimbangannya. Gaya inilah yang disebut **gaya pemulih** (*restoring force*), dan keberadaannya merupakan syarat mutlak agar suatu sistem dapat bergetar.



Gambar 6.1: Ketika benda disimpangkan dari posisi kesetimbangannya, timbul gaya pemulih yang selalu mengarah kembali menuju posisi kesetimbangan.

Contoh Getaran dalam Kehidupan

Getaran dapat dijumpai pada bandul jam dinding yang berayun, penggaris plastik yang dijepit di tepi meja dan disentil ujungnya, senar gitar yang dipetik, membran drum yang dipukul, hingga getaran atom-atom penyusun zat padat di sekitar posisi kesetimbangannya akibat energi termal.

Mengapa Gaya Pemulih Begitu Penting?

Tanpa adanya gaya pemulih, suatu benda yang disimpangkan dari posisi awalnya tidak akan pernah kembali, melainkan akan terus bergerak menjauh atau berhenti begitu saja akibat efek disipasi (gesekan). Gaya pemulih inilah yang "memaksa" benda untuk terus bergerak kembali dan melewati titik kesetimbangan secara berulang, menghasilkan pola gerak bolak-balik yang menjadi ciri khas getaran. Sifat gaya pemulih inilah yang akan dibahas secara matematis lebih lanjut pada subbab Gerak Harmonik Sederhana.

6.1.2 Simpangan, Amplitudo, Periode, dan Frekuensi

Untuk mendeskripsikan getaran secara kuantitatif, diperlukan beberapa besaran dasar yang menjelaskan "seberapa jauh", "seberapa sering", dan "seberapa lama" suatu benda bergetar.

Simpangan dan Amplitudo

Simpangan (y) adalah jarak benda yang bergetar dari titik kesetimbangannya pada suatu saat tertentu, yang nilainya selalu berubah terhadap waktu. **Amplitudo** (A) adalah simpangan **maksimum** yang dicapai benda selama bergetar, yang nilainya tetap untuk getaran ideal tanpa hambatan (gesekan diabaikan).

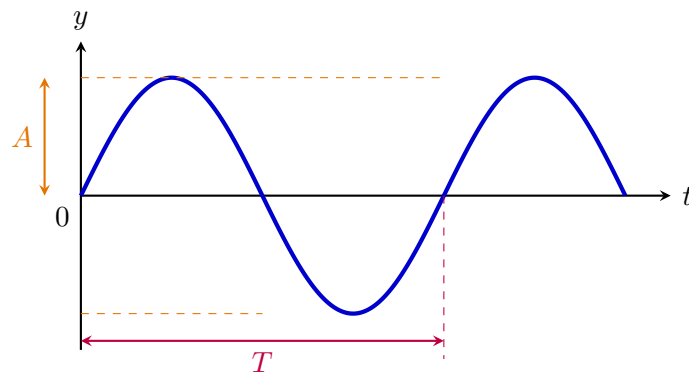
Periode dan Frekuensi

Periode (T) adalah waktu yang diperlukan benda untuk menyelesaikan satu getaran penuh (kembali ke posisi dan arah gerak yang semula). **Frekuensi** (f) adalah banyaknya getaran penuh yang terjadi dalam satu satuan waktu (umumnya tiap satu detik).

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{atau} \quad T = \frac{1}{f} \quad (6.1)$$

dengan keterangan:

- T = periode getaran (s)
- f = frekuensi getaran (Hz, dengan $1 \text{ Hz} = 1 \text{ getaran/s}$)



Gambar 6.2: Grafik simpangan (y) terhadap waktu (t) pada gerak harmonik. Amplitudo (A) merepresentasikan simpangan maksimum, sedangkan periode (T) merepresentasikan durasi untuk menempuh satu siklus getaran penuh.

Frekuensi Angular (Kecepatan Sudut)

Selain frekuensi biasa (f), analisis getaran juga sering menggunakan **frekuensi angular** (ω). Besaran ini menyatakan laju perubahan sudut fase getaran dalam satuan radian per detik (rad/s), mengingat gerak harmonik sederhana memiliki analogi matematis yang erat dengan proyeksi Gerak Melingkar Beraturan (GMB).

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (6.2)$$

Contoh Soal

Sebuah bandul melakukan 20 getaran penuh dalam selang waktu 10 detik. Tentukan periode dan frekuensi getaran dari bandul tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $n = 20$ getaran, $t = 10$ s

$$T = \frac{t}{n} = \frac{10}{20} = 0,5 \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ Hz}$$

6.1.3 Gerak Harmonik Sederhana

Besaran-besaran getaran yang telah dibahas sebelumnya berlaku umum untuk segala jenis getaran. Namun, sebuah pertanyaan yang lebih mendalam perlu dijawab: apakah ada bentuk getaran yang paling sederhana dan "ideal", sehingga dapat dijadikan sebagai model dasar untuk memahami getaran-getaran lain yang lebih kompleks? Jawabannya terletak pada **Gerak Harmonik Sederhana (GHS)**, yaitu jenis getaran ideal yang paling banyak dijumpai dan paling mudah dianalisis secara matematis.

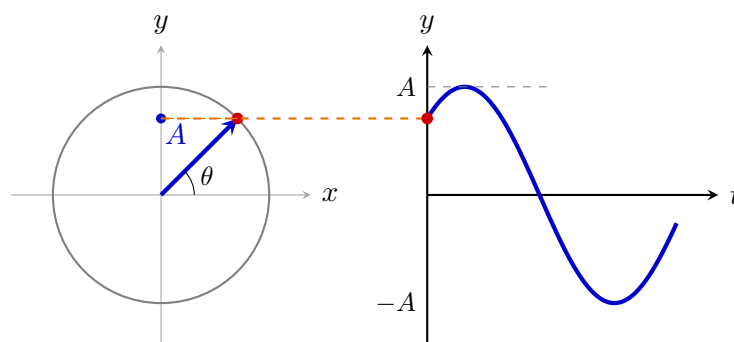
Gerak Harmonik Sederhana adalah getaran yang terjadi akibat pengaruh gaya pemulih yang besarnya berbanding lurus dengan posisi simpangan benda, namun arahnya selalu berlawanan dengan arah simpangan tersebut. Konsekuensinya, fungsi simpangan benda terhadap waktu akan membentuk grafik sinusoidal (sinus atau kosinus).

Secara matematis, syarat gaya pemulih pada gerak harmonik sederhana dituliskan melalui Hukum Hooke sebagai $F = -kx$, dengan tanda negatif menunjukkan bahwa gaya selalu bekerja berlawanan arah dengan simpangan (selalu mengarah kembali ke titik kesetimbangan). Akibat karakteristik gaya pemulih semacam ini, posisi simpangan benda terhadap waktu dapat dirumuskan sebagai:

$$y(t) = A \sin(\omega t + \theta_0) \quad (6.3)$$

dengan keterangan besaran:

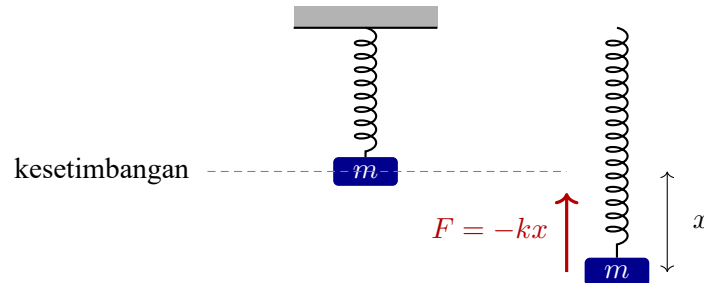
- A = amplitudo atau simpangan maksimum (m)
- ω = frekuensi angular atau kecepatan sudut (rad/s)
- t = selang waktu pengamatan (s)
- θ_0 = sudut fase awal getaran saat $t = 0$ (rad atau derajat)



Gambar 6.3: Gerak Harmonik Sederhana (GHS) yang dipandang sebagai hasil proyeksi Gerak Melingkar Beraturan (GMB) pada sumbu-nya. Garis proyeksi horizontal menunjukkan kesetaraan nilai simpangan fungsi sinusoidal terhadap waktu.

Getaran pada Pegas

Tinjau sebuah pegas yang digantungkan secara vertikal dengan sebuah beban bermassa m pada ujungnya. Ketika beban ditarik ke bawah sejauh x dari posisi kesetimbangan, lalu dilepaskan, pegas akan memberikan gaya pemulih sesuai Hukum Hooke yang menyebabkan beban bergetar naik turun secara periodik.



Gambar 6.4: Beban pada pegas vertikal: posisi kesetimbangan (kiri) dan posisi tersimpangkan sejauh x (kanan), dengan gaya pemulih $F = -kx$ yang mengarah kembali ke posisi kesetimbangan.

Menurunkan Periode Getaran Pegas

Berdasarkan Hukum II Newton, gaya pemulih pegas menyebabkan percepatan pada beban:

$$F = ma \quad \Rightarrow \quad -kx = ma$$

Tanpa menjabarkan kalkulus secara penuh (di luar lingkup SMA), penyelesaian persamaan gerak ini menghasilkan hubungan antara periode getaran dengan massa beban dan konstanta pegas:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (6.4)$$

dengan:

- T = periode getaran (s)
- m = massa beban (kg)
- k = konstanta pegas (N/m)

Makna Fisis Persamaan Periode Pegas

Persamaan ini menunjukkan dua hal penting yang sering diuji dalam soal:

- Semakin **besar massa** beban, periode getaran semakin **besar** (getaran semakin lambat) – benda yang lebih berat memiliki inersia yang lebih besar sehingga lebih sulit diubah arah geraknya.
- Semakin **besar konstanta pegas** (pegas semakin kaku), periode getaran semakin **kecil** (getaran semakin cepat) – pegas yang lebih kaku memberikan gaya pemulih yang lebih besar untuk simpangan yang sama, sehingga mempercepat gerak kembali ke kesetimbangan.

- Periode getaran pegas **tidak bergantung pada amplitudo** – baik disimpangkan sedikit maupun banyak, waktu yang diperlukan untuk satu getaran penuh tetap sama. Inilah sifat khas yang membedakan GHS dari getaran pada umumnya.

Contoh Soal

Sebuah pegas dengan konstanta 200 N/m digantungi beban bermassa 2 kg. Tentukan periode getaran sistem tersebut!

Penyelesaian:

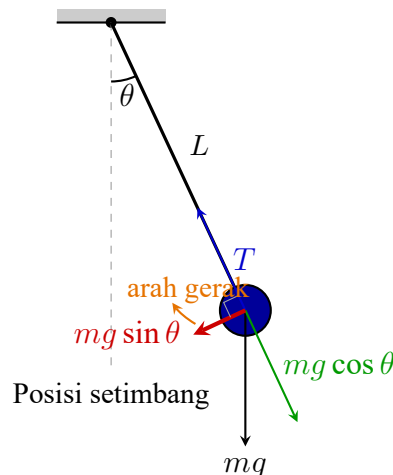
Diketahui: $k = 200 \text{ N/m}$, $m = 2 \text{ kg}$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{2}{200}} = 2\pi\sqrt{0,01} = 2\pi(0,1)$$

$$T \approx 0,63 \text{ s}$$

Getaran pada Bandul Sederhana

Bandul sederhana (*simple pendulum*) adalah sistem yang terdiri atas sebuah beban kecil yang digantungkan pada ujung seutas tali ringan (massa tali diabaikan) yang tidak dapat mulur, dan dapat berayun bebas pada ujung lainnya.



Gambar 6.5: Diagram gaya pada bandul sederhana yang disimpangkan sebesar sudut θ dari posisi setimbang. Gaya yang bekerja pada massa adalah tegangan tali T dan gaya berat mg . Komponen tangensial gaya berat, $mg \sin \theta$, bertindak sebagai gaya pemulih yang selalu mengarah ke posisi setimbang, sedangkan komponen radial $mg \cos \theta$ bekerja sepanjang arah tali.

Menurunkan Periode Bandul Sederhana

Ketika bandul disimpangkan sejauh sudut θ , gaya berat mg dapat diuraikan menjadi dua komponen: komponen sejajar tali (diimbangi oleh tegangan tali) dan komponen tegak lurus tali sebesar $mg \sin \theta$, yang berperan sebagai gaya pemulih yang mengembalikan bandul ke posisi kesetimbangannya.

Untuk sudut simpangan yang **kecil** (umumnya $\theta < 10^\circ$), berlaku pendekatan $\sin \theta \approx \theta$ (dalam radian), sehingga gaya pemulihnya menjadi sebanding dengan simpangan – memenuhi syarat GHS sebagaimana pada pegas. Dengan pendekatan ini, penyelesaian persamaan geraknya menghasilkan periode bandul sederhana:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \quad (6.5)$$

dengan:

- T = periode bandul (s)
- L = panjang tali bandul (m)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Catatan Penting: Persamaan ini hanya berlaku secara akurat untuk **sudut simpangan kecil**. Untuk sudut yang besar, periode bandul sebenarnya akan sedikit lebih besar daripada yang diprediksi oleh rumus ini, dan getarannya tidak lagi murni GHS.

Makna Fisis Persamaan Periode Bandul

- Periode bandul **hanya bergantung pada panjang tali (L)** dan percepatan gravitasi (g) – **tidak bergantung pada massa beban**. Inilah sebabnya dua bandul dengan panjang tali yang sama akan memiliki periode yang identik, meskipun massa bebannya berbeda jauh.
- Semakin **panjang** tali bandul, periode getarannya semakin **besar** (semakin lambat berayun).
- Semakin **besar** percepatan gravitasi suatu tempat, periode bandul semakin **kecil** (semakin cepat berayun). Sifat inilah yang dimanfaatkan untuk mengukur percepatan gravitasi suatu lokasi menggunakan bandul sederhana.

Contoh Soal

Sebuah bandul sederhana memiliki panjang tali 0,4 m. Tentukan periode getaran bandul tersebut! ($g = 10 \text{ m/s}^2$, $\pi \approx 3,14$)

Penyelesaian:

Diketahui: $L = 0,4 \text{ m}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} = 2(3,14)\sqrt{\frac{0,4}{10}} = 6,28\sqrt{0,04} = 6,28(0,2)$$

$$T \approx 1,256 \text{ s}$$

6.1.4 Energi pada Gerak Harmonik Sederhana

Pada pembahasan Usaha dan Energi, telah dipelajari bahwa pegas yang tertekan atau terentang menyimpan energi potensial elastis sebesar $E_p = \frac{1}{2}kx^2$. Pada sistem GHS, energi ini terus berubah bentuk secara periodik antara energi potensial dan energi kinetik, selama tidak ada gaya non-konservatif (seperti gesekan) yang bekerja pada sistem.

Energi Potensial, Kinetik, dan Mekanik pada GHS

Pada saat benda berada di posisi simpangan maksimum (amplitudo), kelajuannya sama dengan nol, sehingga seluruh energi mekaniknya berbentuk energi potensial maksimum:

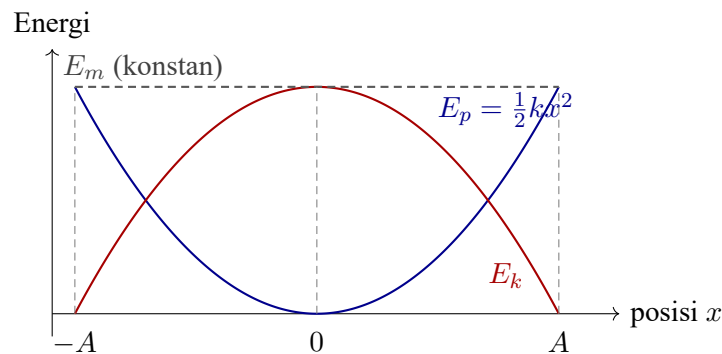
$$E_{p,\text{maks}} = \frac{1}{2}kA^2$$

Sebaliknya, pada saat benda melewati posisi kesetimbangan ($x = 0$), energi potensialnya nol, sehingga seluruh energi mekaniknya berbentuk energi kinetik maksimum, dan benda mencapai kelajuan maksimumnya (v_{maks}):

$$E_{k,\text{maks}} = \frac{1}{2}mv_{\text{maks}}^2$$

Karena sistem bersifat konservatif (Hukum Kekekalan Energi Mekanik berlaku), energi mekanik total pada GHS bernilai **tetap** di sepanjang getaran, dan selalu sama dengan energi potensial maksimumnya:

$$E_m = E_k + E_p = \frac{1}{2}kA^2 \quad (6.6)$$



Gambar 6.6: Grafik energi potensial (E_p) dan energi kinetik (E_k) terhadap posisi x pada GHS. Energi mekanik total (E_m) selalu konstan, berpindah bentuk antara E_p dan E_k .

Persamaan Umum Energi pada Posisi Sembarang

Pada posisi simpangan x sembarang (di antara 0 dan A), energi kinetik dan energi potensial dapat dihitung sebagai

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2, \quad E_k = E_m - E_p = \frac{1}{2}kA^2 - \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}k(A^2 - x^2)$$

Contoh Soal

Sebuah benda bermassa 0,5 kg terpasang pada pegas dengan konstanta 80 N/m dan bergetar dengan amplitudo 0,1 m. Tentukan energi mekanik total sistem, serta energi kinetik benda saat berada pada simpangan 0,06 m!

Penyelesaian:

Diketahui: $k = 80 \text{ N/m}$, $A = 0,1 \text{ m}$, $x = 0,06 \text{ m}$

$$E_m = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}(80)(0,1)^2 = \frac{1}{2}(80)(0,01) = 0,4 \text{ J}$$

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}(80)(0,06)^2 = \frac{1}{2}(80)(0,0036) = 0,144 \text{ J}$$

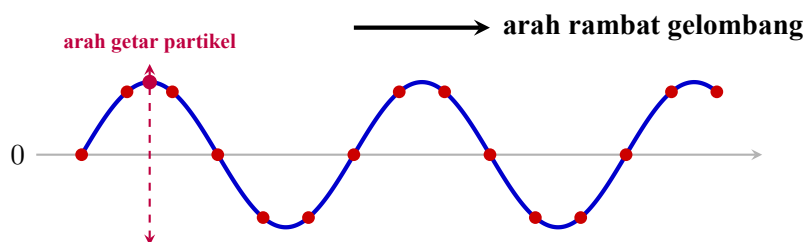
$$E_k = E_m - E_p = 0,4 - 0,144 = 0,256 \text{ J}$$

6.1.5 Konsep Gelombang Mekanik

Getaran yang telah dibahas sejauh ini berfokus pada gerakan satu titik atau satu benda saja secara lokal. Namun, pertanyaan yang diajukan di pembuka bab belum terjawab: bagaimana getaran pada satu titik spesifik dapat memengaruhi titik-titik lain yang berjauhan, seperti riak air yang menyebar luas dari titik jatuhnya batu? Jawabannya terletak pada konsep **gelombang mekanik**.

Gelombang mekanik adalah usikan (getaran) yang merambat melalui suatu medium kontinu, yang memindahkan energi dan momentum dari satu titik ke titik lain tanpa disertai perpindahan partikel-partikel medium itu sendiri secara permanen.

Kata kunci pada definisi ini adalah **”tanpa memindahkan partikel medium secara permanen”**. Setiap partikel medium yang dilalui oleh gelombang hanya berosilasi (bergetar) di sekitar posisi kesetimbangannya masing-masing (mengikuti karakteristik Gerak Harmonik Sederhana), namun tidak ikut hanyut berpindah bersama arah rambat gelombang. Yang berpindah dan menjalar melintasi medium hanyalah **energi dan pola gangguan (usikan)**-nya.



Gambar 6.7: Gelombang merambat ke arah kanan, namun setiap elemen partikel medium (ditandai dengan titik) hanya bergerak berosilasi naik-turun di sekitar posisi kesetimbangannya. Partikel ungu menegaskan arah osilasi yang tegak lurus dengan arah rambat.

Mengapa Diperlukan Medium pada Gelombang Mekanik?

Berbeda dengan gelombang elektromagnetik (seperti cahaya atau gelombang radio) yang dapat merambat mandiri melintasi ruang hampa udara (vakum), gelombang mekanik **mutlak memerlukan medium** (zat perantara, baik berupa zat padat, cair, maupun gas) sebagai jalur rambatannya.

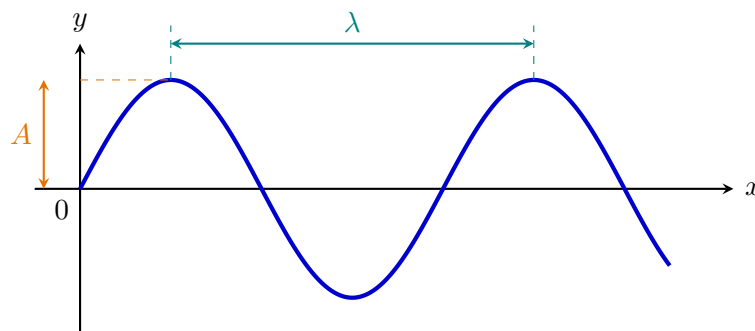
Hal ini terjadi karena mekanisme perambatan energi pada gelombang mekanik bertumpu pada gaya interaksi antarpartikel penyusun medium (gaya elastisitas atau kohesi). Ketika partikel pertama diberi usikan luar hingga bergetar, gaya antarpartikel akan "menarik" atau "mendorong" partikel kedua di sebelahnya agar ikut bergetar. Proses transfer mekanik ini berlanjut secara berantai ke partikel-partikel berikutnya di sepanjang medium.

Konsekuensinya, di dalam ruang hampa ekstrem (seperti ruang antar-galaksi), ketiadaan partikel materi menyebabkan interaksi mekanik ini mustahil terjadi. Oleh karena itu, gelombang mekanik seperti akustik (suara) sama sekali tidak dapat merambat maupun terdengar di ruang angkasa yang vakum.

6.1.6 Besaran-Besaran Gelombang

Untuk mendeskripsikan gelombang secara kuantitatif, beberapa besaran pada getaran yang telah dibahas sebelumnya (seperti periode, frekuensi, dan amplitudo) tetap berlaku. Namun, terdapat satu besaran fisis baru yang khas hanya ditemukan pada fenomena gelombang, yaitu **panjang gelombang**.

Panjang gelombang (λ) adalah jarak spasial yang ditempuh oleh satu siklus gelombang penuh, yang secara geometris setara dengan jarak antara dua titik terdekat yang memiliki fase getaran identik (misalnya jarak antara dua puncak berurutan, atau dua lembah berurutan).



Gambar 6.8: Grafik simpangan (y) terhadap posisi (x) pada gelombang transversal. Panjang gelombang (λ) ditunjukkan secara presisi sebagai jarak spasial dari puncak ke puncak yang berurutan.

Cepat Rambat Gelombang

Karena gelombang menempuh jarak sejauh satu panjang gelombang (λ) dalam selang waktu satu periode (T), maka rasio laju linier perambatan energi atau **cepat rambat gelombang** (v) dapat dirumuskan secara matematis sebagai:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \quad (6.7)$$

dengan keterangan besaran dan satuan (SI):

- v = cepat rambat gelombang (m/s)
- λ = panjang gelombang (m)
- T = periode gelombang (s)
- f = frekuensi gelombang (Hz)

Mengapa Cepat Rambat Bergantung pada Medium, Bukan Sumber?

Salah satu asas fundamental yang perlu dipahami dalam mekanika gelombang adalah bahwa cepat rambat gelombang v sepenuhnya ditentukan oleh **sifat fisis karakteristik medium** yang dilaluinya (misalnya tegangan dan massa jenis linear pada tali, elastisitas bulk dan kerapatan pada zat cair/padat, serta suhu dan jenis gas pada medium udara), **bukan** oleh frekuensi sumber usikannya.

Sebagai konsekuensinya, apabila frekuensi sumber getaran (f) diperbesar pada suatu medium yang sama (di mana nilai v konstan), maka nilai panjang gelombang (λ) akan mengecil secara proporsional. Mekanisme kompensasi ini menjaga agar hasil perkalian λf selalu bernilai konstan dan setara dengan nilai karakteristik kecepatan v dari medium tersebut.

Contoh Soal

Sebuah gelombang mekanik pada permukaan air memiliki panjang gelombang 0,4 m dan beresilasi dengan frekuensi 5 Hz. Tentukan cepat rambat perambatan gelombang tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $\lambda = 0,4 \text{ m}$, $f = 5 \text{ Hz}$

$$v = \lambda f$$

$$v = (0,4)(5) = 2 \text{ m/s}$$

6.1.7 Persamaan Gelombang Berjalan

Besaran-besaran gelombang yang telah dibahas sebelumnya menjelaskan sifat gelombang secara makroskopis pada satu waktu tertentu. Namun, untuk mengetahui posisi simpangan suatu titik medium pada **sembarang waktu** (t) dan **sembarang posisi** (x), diperlukan suatu pemodelan matematis yang lebih komprehensif, yang dikenal sebagai **persamaan gelombang berjalan**.

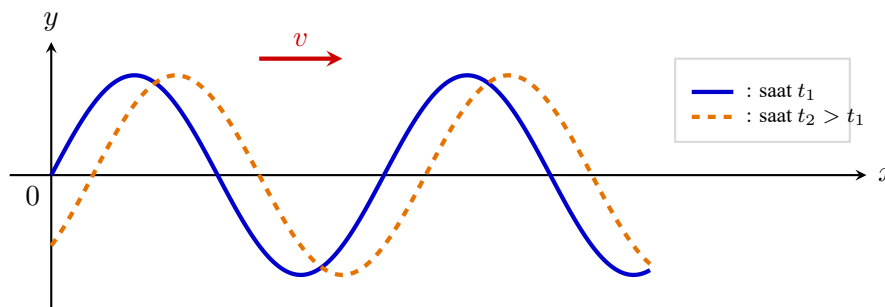
Gelombang berjalan adalah gelombang yang merambat secara kontinu ke satu arah tertentu tanpa mengalami pemantulan (refleksi) di ujung mediumnya, sehingga nilai amplitudonya konstan atau tetap sama di setiap titik yang dilaluinya.

Untuk sebuah gelombang berjalan ideal yang merambat ke arah sumbu- x positif, fungsi simpangan y pada posisi x dan waktu t dirumuskan melalui persamaan sinusoidal:

$$y(x, t) = A \sin(\omega t - kx) \quad (6.8)$$

dengan keterangan besaran dan satuan (SI):

- $y(x, t)$ = simpangan titik medium pada posisi x dan waktu t (m)
- A = amplitudo atau simpangan maksimum gelombang (m)
- $\omega = 2\pi f$ = frekuensi angular atau kecepatan sudut (rad/s)
- $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ = bilangan gelombang atau konstanta propagasi (rad/m)



Gambar 6.9: Mekanisme perambatan gelombang berjalan. Seiring bertambahnya waktu dari t_1 ke t_2 , seluruh profil spasial gelombang bergeser mulus ke arah kanan (searah vektor kecepatan v) dengan mempertahankan bentuk fungsional dan amplitudo yang tetap.

Makna Tanda pada Persamaan Gelombang

Tanda operasi di antara suku frekuensi angular (ωt) dan suku bilangan gelombang (kx) menentukan orientasi arah perambatan spasial dari gelombang tersebut:

- Tanda **negatif** ($\omega t - kx$) merepresentasikan gelombang yang menjalar menuju arah ****sumbu- x positif**** (ke kanan).
- Tanda **positif** ($\omega t + kx$) merepresentasikan gelombang yang menjalar menuju arah ****sumbu- x negatif**** (ke kiri).

Pemahaman mengenai konvensi tanda ini sangat krusial, karena prinsip ini akan melandasi formulasi superposisi matematis pada bab selanjutnya mengenai gelombang stasioner (gelombang berdiri).

Contoh Soal

Sebuah gelombang berjalan memiliki amplitudo 0,2 m, frekuensi 4 Hz, dan panjang gelombang 0,5 m. Gelombang ini menjalar sepanjang tali menuju arah sumbu- x positif. Tentukan persamaan fungsi simpangan dari gelombang berjalan tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui data fisis gelombang: $A = 0,2$ m, $f = 4$ Hz, $\lambda = 0,5$ m

Langkah 1: Menghitung nilai frekuensi angular (ω)

$$\omega = 2\pi f = 2\pi(4) = 8\pi \text{ rad/s}$$

Langkah 2: Menghitung nilai konstanta bilangan gelombang (k)

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{0,5} = 4\pi \text{ rad/m}$$

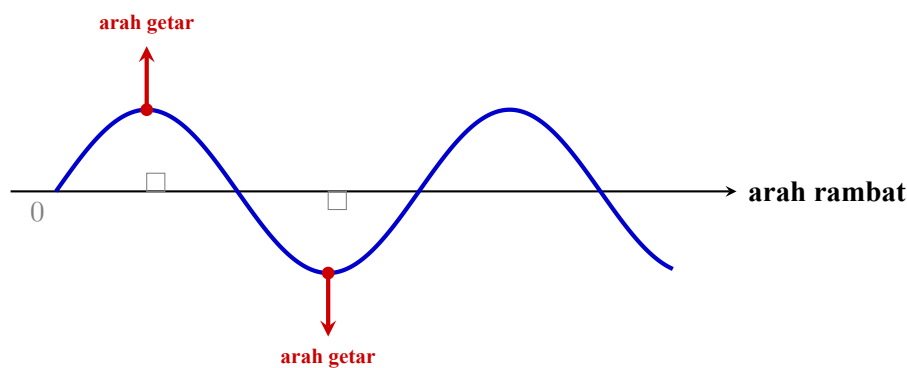
Langkah 3: Menyusun persamaan umum gelombang Karena arah rambat gelombang menuju sumbu- x positif, maka digunakan tanda hubungan operasi negatif ($-$) di dalam fungsi sinus:

$$y(x, t) = 0,2 \sin(8\pi t - 4\pi x) \text{ m}$$

6.1.8 Gelombang Transversal

Persamaan gelombang berjalan yang telah dibahas sebelumnya berlaku secara umum untuk menjelaskan dinamika rambatan, namun belum meninjau satu aspek kinematika penting: ke arah mana sebenarnya elemen-elemen partikel medium berosilasi jika dibandingkan dengan arah rambat gelombang itu sendiri? Karakteristik arah getar inilah yang mengklasifikasikan gelombang mekanik menjadi dua jenis, yang diawali dengan pembahasan **gelombang transversal**.

Gelombang transversal adalah jenis gelombang di mana arah osilasi (getaran) dari partikel-partikel mediumnya tegak lurus (perpendikular) terhadap arah perambatan energi gelombang tersebut.



Gambar 6.10: Mekanisme gelombang transversal. Partikel medium berosilasi naik-turun secara vertikal, tegak lurus terhadap arah penjalaran gelombang yang merambat secara horizontal ke kanan.

Bukit dan Lembah Gelombang

Pada struktur morfologi gelombang transversal, terdapat dua daerah ekstrem yang khas:

- **Bukit Gelombang:** Bagian gelombang yang melengkung ke atas, mencapai titik koordinat tertinggi dengan nilai simpangan maksimum positif ($+A$).
- **Lembah Gelombang:** Bagian gelombang yang melengkung ke bawah, mencapai titik koordinat terendah dengan nilai simpangan maksimum negatif ($-A$).

Satu siklus gelombang transversal penuh didefinisikan sebagai kombinasi berurutan dari satu bukit gelombang dan satu lembah gelombang. Jarak spasial untuk menempuh satu siklus penuh inilah yang setara dengan satu panjang gelombang (λ).

Contoh Gelombang Transversal dalam Fenomena Alam

Fenomena gelombang transversal sangat luas dijumpai dalam fisika, di antaranya meliputi:

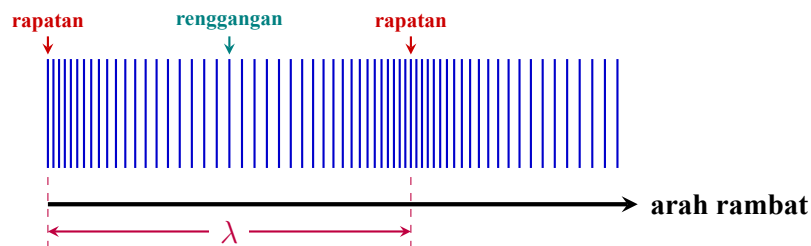
1. Gelombang mekanik pada tali yang dihentak secara vertikal naik-turun.
2. Gelombang riak pada permukaan zat cair (seperti air yang tenang saat dijatuhkan kerikil).
3. Gelombang seismik S (sekunder) yang menjalar di dalam kerak bumi saat terjadi gempa tektonik.

4. Gelombang elektromagnetik (seperti cahaya tampak, gelombang radio, dan sinar-X). Meskipun gelombang ini dapat merambat tanpa medium mekanik, arah osilasi medan listrik ($\vec{E}$) dan medan magnetik ($\vec{B}$)-nya selalu tegak lurus terhadap arah rambat energinya.

6.1.9 Gelombang Longitudinal

Berbeda dengan gelombang transversal, terdapat jenis gelombang mekanik lain yang karakteristik arah getarannya justru **searah** atau sejajar dengan arah rambat energinya, yang dikenal sebagai **gelombang longitudinal**. Pemodelan gelombang inilah yang mampu menjelaskan bagaimana fenomena akustik (suara)—yang tidak memiliki morfologi "bukit" maupun "lembah" yang kasat mata—tetap dikategorikan secara sah sebagai fenomena gelombang.

Gelombang longitudinal adalah jenis gelombang di mana arah osilasi (getaran) dari partikel-partikel mediumnya berlangsung secara paralel (sejajar) dengan arah perambatan gelombang, yang secara fisik ditandai dengan terbentuknya pola rapatan (compression) dan renggangan (rarefaction) secara periodik.



Gambar 6.11: Mekanisme perambatan gelombang longitudinal. Daerah rapatan memiliki kerapatan partikel lebih besar, sedangkan daerah renggangan memiliki kerapatan partikel lebih kecil. Jarak antara dua rapatan berurutan sama dengan satu panjang gelombang (λ).

Rapatan dan Renggangan

Dalam analisis struktur gelombang longitudinal, dikenal dua area fisis yang berulang secara periodik:

- **Rapatan (Compression):** Daerah di mana partikel-partikel medium memadat dan berkumpul dengan tingkat kerapatan (dan tekanan) yang lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi kesetimbangan normalnya.
- **Renggangan (Rarefaction):** Daerah di mana partikel-partikel medium merenggang dan tersebar dengan tingkat kerapatan (dan tekanan) yang lebih rendah dibandingkan dengan kondisi kesetimbangan normalnya.

Satu siklus gelombang longitudinal penuh didefinisikan sebagai kombinasi dari satu daerah rapatan dan satu daerah renggangan yang berurutan. Elemen satu pasangan rapatan-renggangan ini memegang peran mekanis yang analog (setara) dengan satu pasangan bukit-lembah pada konstruksi gelombang transversal.

Contoh Gelombang Longitudinal dalam Berbagai Medium

Aplikasi fisis dari gelombang longitudinal dapat diidentifikasi melalui fenomena-fenomena berikut:

1. **Gelombang Bunyi (Akustik):** Contoh paling fundamental di mana bunyi merambat melintasi medium fluida (seperti udara atau air) maupun zat padat dalam bentuk fluktuasi tekanan lokal berupa rapatan dan renggangan molekul-molekul medium.
2. **Gelombang pada Pegas (Slinki):** Ketika salah satu ujung pegas slinki dihentak secara horizontal (didorong dan ditarik maju-mundur searah panjangnya), pola rapatan dan renggangan kawat pegas akan merambat di sepanjang slinki.
3. **Gelombang Seismik P (Primary/Pressure Wave):** Komponen gelombang badan (*body wave*) yang dilepaskan saat gempa bumi. Gelombang P merupakan gelombang tercepat yang menjalar melalui interior bumi dan bertindak sebagai gelombang longitudinal yang mampu melintasi lapisan batuan padat maupun inti luar bumi yang cair.

6.1.10 Prinsip Superposisi Gelombang

Sejauh ini, analisis kita baru berfokus pada dinamika satu gelombang tunggal yang merambat secara terisolasi. Namun, apa yang akan terjadi ketika **dua** gelombang atau lebih bertemu pada titik ruang dan selang waktu yang sama, seperti bertemunya riak gelombang air permukaan dari dua batu yang dijatuhkan secara berdekatan? Fenomena interaksi inilah yang dijawab oleh **prinsip superposisi linear gelombang**.

Ketika dua atau lebih gelombang merambat melintasi medium yang sama dan saling bertemu pada suatu titik, maka simpangan total (resultan) pada titik tersebut merupakan jumlah aljabar (penjumlahan linear dengan memperhatikan tanda positif-negatif) dari simpangan masing-masing komponen gelombang penyusunnya.

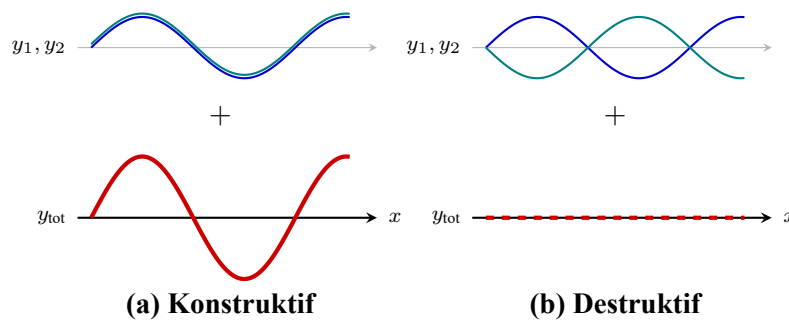
Secara matematis, untuk dua komponen gelombang berjalan $y_1(x, t)$ dan $y_2(x, t)$, simpangan hasil superposisinya dirumuskan sebagai:

$$y_{\text{total}}(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) \quad (6.9)$$

Interferensi Konstruktif dan Destruktif

Konsekuensi langsung dari prinsip superposisi aljabar ini menghasilkan fenomena **interferensi**, yang secara fisis dibagi menjadi dua kasus ekstrem:

- **Interferensi Konstruktif (Saling Memperkuat):** Terjadi apabila kedua gelombang yang bertemu di suatu titik memiliki fase yang sama (*sefase*). Karena tanda simpangannya selalu searah, keduanya saling menjumlahkan secara maksimum dan menghasilkan amplitudo gabungan yang lebih besar dari gelombang asalnya.
- **Interferensi Destruktif (Saling Melemahkan):** Terjadi apabila kedua gelombang yang bertemu memiliki fase yang berlawanan (*berlawanan fase*, selisih fase $\Delta\phi = 180^\circ$ atau π rad). Karena arah simpangannya saling berlawanan, keduanya saling mengurangi, bahkan dapat saling menghilangkan secara total (amplitudo resultan nol) jika kedua gelombang asal memiliki nilai amplitudo yang identik.



Gambar 6.12: Visualisasi prinsip superposisi linear. (a) Interferensi konstruktif: dua gelombang yang sefase (biru dan teal) berinteraksi menghasilkan gelombang resultan (merah) dengan amplitudo dua kali lipat. (b) Interferensi destruktif: dua gelombang dengan fase berlawanan saling meniadakan, menghasilkan simpangan total beramplitudo nol (garis putus-putus merah).

Mengapa Prinsip Ini Sangat Mendasar?

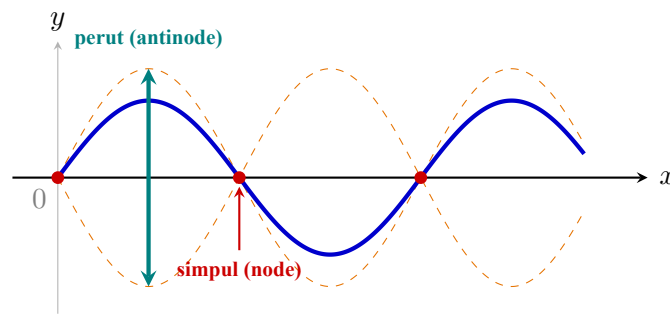
Prinsip superposisi merupakan pilar fundamental bagi berbagai fenomena gelombang tingkat lanjut. Di dalam mekanika gelombang, prinsip ini melandasi pembentukan **gelombang stasioner** (gelombang berdiri) yang akan dibahas secara mendalam pada subbab berikutnya, di mana gelombang tersebut dihasilkan dari superposisi kontinu antara dua gelombang berjalan beramplitudo sama namun arah rambatnya berlawanan. Selain itu, dalam ranah optika fisis dan akustik, prinsip ini menjelaskan fenomena interferensi cahaya yang menghasilkan pola gelap-terang (frinji) serta fenomena interferensi bunyi yang menghasilkan fenomena layangan bunyi (keras-lemah suara).

6.1.11 Gelombang Stasioner

Salah satu penerapan paling penting dari prinsip superposisi linear adalah ketika sebuah gelombang berjalan dipantulkan oleh suatu penghalang (misalnya ujung tali yang terikat erat), sehingga gelombang pantul tersebut bertemu dan berinteraksi secara kontinu dengan gelombang datangnya sendiri yang merambat ke arah berlawanan. Pertemuan dua gelombang ini menghasilkan fenomena **gelombang stasioner** (gelombang berdiri atau *standing wave*).

Gelombang stasioner adalah gelombang hasil superposisi dari dua gelombang berjalan yang memiliki amplitudo dan frekuensi yang sama, namun merambat dalam arah yang saling berlawanan. Akibatnya, profil gelombang yang dihasilkan tampak "diam" atau menetap di tempat (tidak merambat secara spasial), dengan amplitudo osilasi yang bervariasi secara periodik dari titik ke titik.

Pada struktur gelombang stasioner, terdapat titik-titik khusus yang selalu memiliki nilai simpangan nol sepanjang waktu, yang disebut **simpul** (*node*), serta titik-titik yang selalu berosilasi dengan simpangan maksimum (amplitudo terbesar), yang disebut **perut** (*antinode*).



Gambar 6.13: Morfologi gelombang stasioner. Letak simpul (titik dengan simpangan selalu nol, ditandai merah) dan perut (titik dengan simpangan maksimum, ditandai garis hijau) memiliki posisi spasial yang tetap, terkungkung di dalam selubung batas amplitudo ekstrem (garis putus-putus oranye).

Dua Jenis Gelombang Stasioner

Berdasarkan karakteristik fisis pada ujung pemantulnya, gelombang stasioner pada tali diklasifikasikan menjadi dua jenis utama yang memiliki formulasi matematis serta distribusi letak simpul/perut yang berbeda:

- **Gelombang Stasioner Ujung Tetap (Terikat):** Ujung tempat terjadinya pemantulan dikunci rapat sehingga tidak dapat bergerak (simpangan dipaksa bernilai nol sepanjang waktu). Oleh karena itu, posisi ujung pantul selalu bertindak sebagai **simpul**.
- **Gelombang Stasioner Ujung Bebas:** Ujung tempat terjadinya pemantulan dibiarkan bebas bergerak tanpa hambatan, sehingga cincin tali dapat berosilasi dengan keleluasaan maksimum. Oleh karena itu, posisi ujung pantul selalu bertindak sebagai **perut**.

Untuk kasus gelombang stasioner pada tali dengan ujung tetap, formulasi superposisi simpangan resultannya dapat dinyatakan melalui persamaan:

$$y(x, t) = 2A \sin(kx) \cos(\omega t) \quad (6.10)$$

Berdasarkan persamaan di atas, komponen amplitudo efektif gelombang stasioner pada posisi spasial x adalah $A_s = 2A \sin(kx)$. Nilai ini akan bernilai nol pada posisi-posisi simpul dan mencapai nilai ekstrem maksimum ($\pm 2A$) pada posisi-posisi perut.

Mengapa Pola Gelombang Tampak "Diam"?

Kondisi inilah yang mendasari penamaan istilah "stasioner". Meskipun gelombang stasioner ini sejatinya dibangun oleh dua gelombang berjalan yang terus bergerak saling menrobos dengan arah berlawanan, interferensi kontinu di antara keduanya menghasilkan visualisasi spasial di mana letak simpul dan perut **sama sekali tidak bergeser atau berpindah posisi** seiring berjalannya waktu. Fenomena yang terjadi hanyalah perubahan besar simpangan secara lokal pada setiap elemen medium di antara simpul-simpul tersebut yang berosilasi naik-turun secara periodik. Hal ini sangat kontras dengan gelombang berjalan yang seluruh profil gelombangnya bergeser maju searah vektor kecepatannya.

Contoh Soal

Seutas tali digetarkan secara kontinu hingga membentuk pola gelombang stasioner ujung terikat yang memenuhi persamaan

$$y = 4 \sin(0,5\pi x) \cos(20\pi t) \text{ cm},$$

dengan x dan t dinyatakan dalam satuan SI. Tentukan posisi letak simpul-simpul gelombang tersebut!

Penyelesaian:

Simpul terjadi ketika amplitudo gelombang stasioner bernilai nol. Karena amplitudo stasioner diberikan oleh

$$A_s = 4 \sin(0,5\pi x),$$

maka syarat terbentuknya simpul adalah

$$\sin(0,5\pi x) = 0.$$

Fungsi sinus bernilai nol apabila argumennya merupakan kelipatan bulat dari π , sehingga

$$0,5\pi x = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Menyederhanakan persamaan diperoleh

$$0,5x = n$$

atau

$$x = 2n \text{ m}.$$

Dengan memasukkan nilai n secara berurutan diperoleh posisi simpul:

$$x = 0 \text{ m}, 2 \text{ m}, 4 \text{ m}, 6 \text{ m}, \dots$$

Jadi, simpul-simpul gelombang terletak pada setiap kelipatan 2 m.

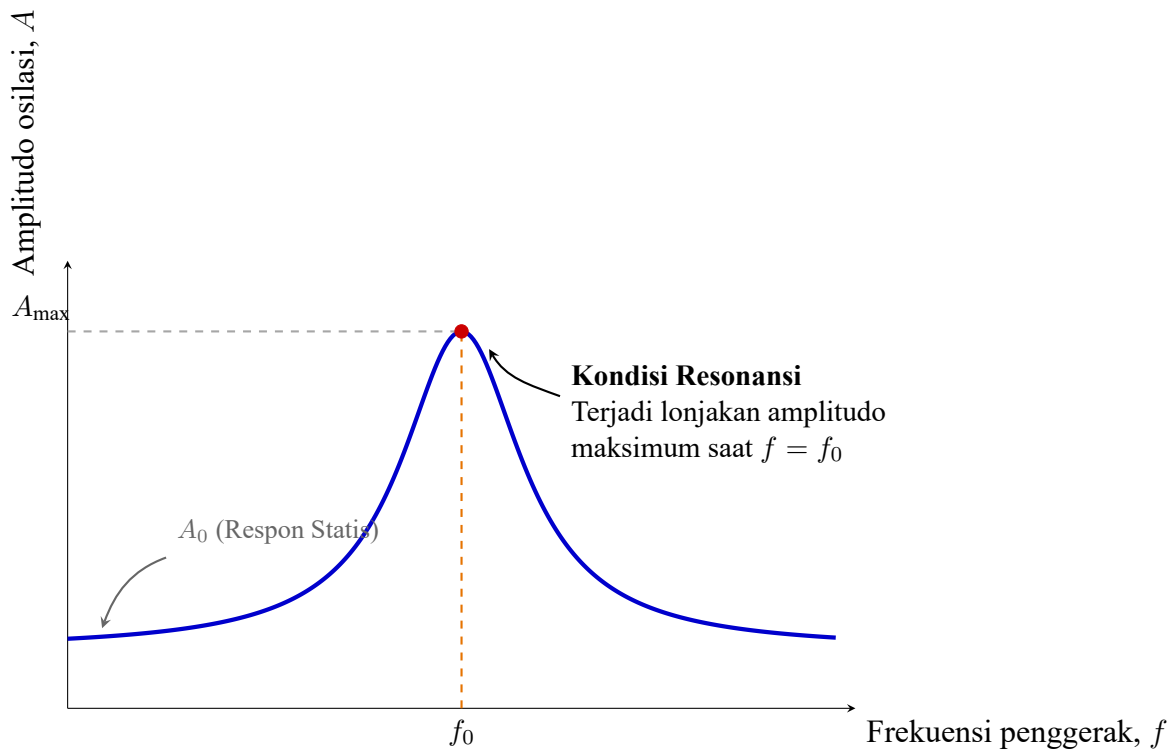
6.1.12 Resonansi

Pertanyaan yang diajukan pada pembuka bab kini dapat dijawab: mengapa sebuah gelas kaca dapat pecah hanya karena menerima bunyi dengan nada tertentu, sedangkan bunyi lain tidak menimbulkan efek yang sama? Jawabannya terletak pada fenomena **resonansi**.

Resonansi adalah peristiwa bertambah besarnya amplitudo getaran suatu sistem akibat menerima gaya pemaksa yang frekuensinya sama atau sangat dekat dengan frekuensi alamiah sistem tersebut.

Setiap benda yang dapat bergetar memiliki **frekuensi alamiah** (*natural frequency*), yaitu frekuensi khas yang ditentukan oleh massa, kekakuan, bentuk, dan ukuran benda tersebut.

Apabila suatu benda menerima getaran paksa dari luar dengan frekuensi yang mendekati frekuensi alamiahnya, energi dari sumber getaran akan ditransfer secara sangat efisien sehingga amplitudo getaran bertambah besar. Pada kondisi inilah terjadi resonansi.



Gambar 6.14: Kurva respons amplitudo sistem osilasi paksa sebagai fungsi dari frekuensi penggerak luar f . Resonansi ditandai dengan puncak tajam amplitudo ($A_{\max}$) ketika frekuensi penggerak sinkron dengan frekuensi alamiah sistem (f_0).

Contoh Resonansi dalam Kehidupan

Resonansi dapat dijumpai dalam berbagai peristiwa sehari-hari, antara lain:

- Anak yang mengayunkan ayunan dengan dorongan yang diberikan secara periodik pada saat yang tepat sehingga ayunan semakin tinggi.
- Kaca jendela yang bergetar kuat ketika menerima bunyi dengan frekuensi yang mendekati frekuensi alamiahnya.
- Kolom udara pada alat musik tiup seperti seruling, klarinet, dan terompet yang beresonansi untuk menghasilkan nada tertentu.
- Senar gitar yang ikut bergetar ketika senar lain dengan frekuensi yang sama dipetik.
- Struktur jembatan atau gedung yang dapat mengalami getaran besar apabila menerima gaya periodik dengan frekuensi mendekati frekuensi alamiahnya.

Mengapa Resonansi Dapat Berbahaya?

Walaupun banyak dimanfaatkan dalam teknologi dan alat musik, resonansi juga dapat menimbulkan kerusakan apabila amplitudo getaran yang dihasilkan menjadi terlalu besar.

Jika amplitudo melebihi batas elastis material, struktur dapat mengalami retak, deformasi, bahkan keruntuhan.

Karena alasan tersebut, para insinyur harus memperhitungkan frekuensi alamiah jembatan, gedung, menara, maupun struktur lainnya agar tidak bertepatan dengan frekuensi getaran yang mungkin muncul akibat angin, gempa bumi, mesin, atau aktivitas manusia.

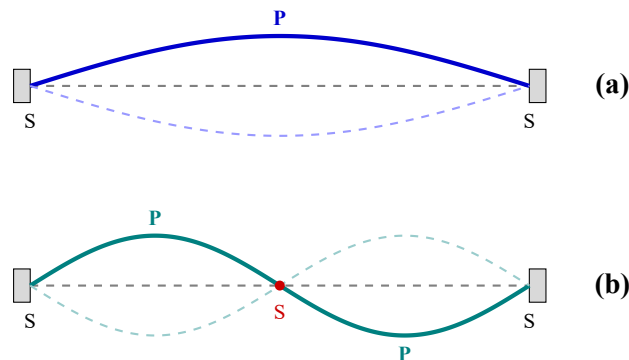
Sebagai contoh, pasukan militer biasanya diperintahkan untuk tidak melangkah serempak ketika melintasi jembatan guna menghindari kemungkinan terjadinya resonansi yang dapat memperbesar getaran struktur.

6.1.13 Penerapan Gelombang Mekanik

Setelah mempelajari hierarki konsep dari getaran, kinematika gelombang berjalan, hingga fenomena superposisi dan resonansi, seluruh prinsip fisis tersebut dapat dirangkai untuk menjelaskan berbagai mekanisme teknologi modern serta fenomena alamiah yang dijumpai sehari-hari:

- **Alat Musik Akustik:** Memanfaatkan pembentukan gelombang stasioner pada media senar atau dawai (gitar, biola, piano) serta resonansi kolom udara pada pipa organa (seruling, terompet, klarinet) untuk memproduksi nada-nada dengan frekuensi harmonik tertentu.
- **Sistem Sonar dan Ultrasonografi (USG):** Menggunakan pancaran gelombang bunyi ultrasonik (gelombang longitudinal mekanik) untuk mendeteksi kontur objek di bawah permukaan laut atau melakukan pencitraan non-destruktif (*imaging*) pada organ dalam tubuh manusia.
- **Seismograf dan Eksplorasi Interior Bumi:** Memanfaatkan perambatan gelombang seismik, baik gelombang primer/P (longitudinal) maupun gelombang sekunder/S (transversal), untuk mencatat aktivitas tektonik dan memetakan batas-batas lapisan penyusun interior Bumi.
- **Jam Bandul dan Osilator Kristal:** Memanfaatkan sifat isokronisme (periode getaran yang konstan dan stabil) pada ayunan bandul matematis atau vibrasi piezoelektrik kristal kuarsa untuk menjaga akurasi sistem penunjuk waktu.
- **Peredam Getaran Konvensional (*Shock Absorber*):** Sistem suspensi kendaraan yang dirancang berdasarkan integrasi antara pegas linear dan fluida viskos guna meredam osilasi akibat gaya kejut dari permukaan jalan secara kritis (*critically damped*).
- **Rekayasa Anti-Resonansi pada Infrastruktur Sipil:** Penerapan sistem mekanik seperti *Tuned Mass Damper* (TMD) pada gedung pencakar langit dan jembatan gantung guna menggeser frekuensi alamiah struktur agar tidak sinkron dengan frekuensi usikan eksternal (seperti gempa bumi atau beban angin konvektif).
- **Oven Gelombang Mikro (*Microwave Oven*):** Memanfaatkan fenomena resonansi molekuler, di mana frekuensi gelombang mikro eksternal diatur tepat sama dengan frekuensi alamiah rotasi molekul air (H_2O) dalam makanan untuk memicu kenaikan energi kinetik termal secara cepat.
- **Sistem Penalaan (*Tuning*) Radio:** Penerapan prinsip resonansi listrik pada rangkaian LC (induktor-kapasitor) untuk memilih dan mengisolasi satu frekuensi gelombang.

bang elektromagnetik pembawa pesan dari stasiun pemancar tertentu.



Gambar 6.15: Visualisasi pola spasial gelombang stasioner pada dawai gitar berujung terikat: (a) mode dasar (nada dasar) yang menghasilkan satu perut gelombang di pusat bentangan, dan (b) harmonik kedua (nada atas pertama) yang membentuk dua perut terpisah dan menghasilkan satu titik simpul mati tepat di titik tengah senar.

Melalui representasi berbagai aplikasi praktis di atas, dapat ditarik konklusi fisis bahwa bahasan mengenai getaran dan gelombang mekanik bukan sekadar pemodelan matematis teoretis yang abstrak, melainkan pilar fondasi teknologi modern yang menjembatani instrumen seni, peralatan diagnostik medis, hingga teknik proteksi keselamatan infrastruktur skala besar.

6.1.14 Ringkasan

Tabel 6.1: Kompilasi Formulasi Teoretis Getaran dan Gelombang Mekanik

Konsep Fisis	Formulasi Matematis
Frekuensi dan Periode Dasar	$f = \frac{1}{T}$
Kecepatan Sudut (Frekuensi Angular)	$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$
Fungsi Simpangan Gerak Harmonis Sederhana (GHS)	$y(t) = A \sin(\omega t + \theta_0)$
Periode Osilasi Sistem Pegas-Massa Ideal	$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$
Periode Osilasi Ayunan Bandul Matematis Sederhana	$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}$
Energi Mekanik Total Konservatif GHS	$E = \frac{1}{2}kA^2 = E_p(t) + E_k(t)$
Hubungan Cepat Rambat Linier Gelombang	$v = \lambda f$
Fungsi Kinematika Gelombang Berjalan Sempurna	$y(x, t) = A \sin(\omega t \mp kx)$
Prinsip Superposisi Linier Aljabar	$y_{\text{total}}(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t)$
Fungsi Gelombang Stasioner (Ujung Terikat)	$y(x, t) = 2A \sin(kx) \cos(\omega t)$

Catatan Pedagogis Penting:

1. ****Diferensiasi Konseptual:**** Getaran merupakan representasi dinamika gerak periodik lokal pada **satu titik spesifik** di sekitar koordinat kesetimbangannya, sedangkan gelombang merepresentasikan fenomena gangguan periodik yang **merambat dan menjalar** melintasi medium ruang, memindahkan kuantitas energi kinetik tanpa memindahkan massa partikel medium secara permanen.
2. ****Kemandirian Amplitudo:**** Nilai periode fisis pada osilator pegas murni ($T = 2\pi\sqrt{m/k}$) dan ayunan bandul amplitudo kecil ($T = 2\pi\sqrt{\ell/g}$) ****sempurnya independen** (tidak bergantung) terhadap nilai amplitudo awal (A). Karakteristik isokronisme inilah yang melandasi mekanikanya sebagai standar instrumen ketepatan waktu.
3. ****Kriteria Klasifikasi:**** Pembagian gelombang menjadi tipe transversal dan longitudinal semata-mata didasarkan pada ****orientasi geometris antara arah osilasi partikel terhadap sumbu vektor penjalaran energinya****, bukan didasarkan pada besarnya energi transfer ataupun jenis fasa mekanik medium penjalarannya.

6.2 Gelombang Bunyi

Ketika sebuah gitar dipetik, mengapa suaranya dapat terdengar dari sudut ruangan yang berbeda? Mengapa klakson mobil yang mendekat terdengar lebih tinggi nadanya dibandingkan saat mobil itu menjauh? Mengapa dokter mengetuk-ngetuk dada pasien saat pemeriksaan, dan mengapa kapal selam menggunakan sonar untuk mendeteksi objek di bawah laut? Semua fenomena ini melibatkan **gelombang bunyi** – salah satu bentuk gelombang yang paling akrab dalam kehidupan manusia sehari-hari.

Berbeda dengan cahaya yang dapat merambat di ruang hampa, bunyi memerlukan medium untuk merambat. Bunyi adalah gangguan mekanik yang merambat melalui suatu medium berupa daerah-daerah bertekanan tinggi dan rendah yang silih berganti. Pemahaman tentang sifat-sifat bunyi tidak hanya penting untuk memahami musik dan komunikasi, tetapi juga menjadi fondasi dari teknologi ultrasonografi, pengujian material, navigasi sonar, dan rekayasa akustik bangunan.

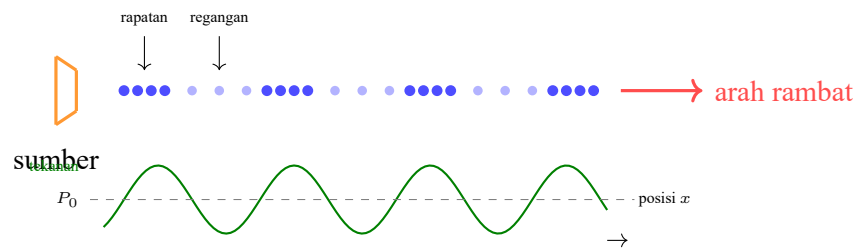
Pada bagian ini akan dipelajari hakikat gelombang bunyi, cepat rambatnya, intensitas dan taraf intensitas, Efek Doppler, resonansi, pelayangan, serta bunyi yang dihasilkan dawai dan kolom udara, beserta penerapannya yang luas dalam teknologi modern.

6.2.1 Hakikat Gelombang Bunyi

Ketika senar gitar dipetik, senar tersebut bergetar dan mendorong molekul-molekul udara di sekitarnya. Molekul-molekul ini kemudian mendorong molekul di sebelahnya, dan seterusnya – membentuk pola gangguan yang merambat menjauhi sumber. Inilah hakikat gelombang bunyi: bukan perpindahan materi, melainkan perambatan **gangguan tekanan** melalui medium.

Gelombang bunyi adalah gelombang mekanik longitudinal yang merambat melalui suatu medium berupa rapatan dan regangan partikel medium secara bergantian, searah dengan arah perambatan gelombang.

Kata kunci di sini adalah **longitudinal**: arah getaran partikel medium *sejajar* dengan arah perambatan gelombang – berbeda dengan gelombang tali yang bersifat transversal (arah getaran tegak lurus arah rambat).



Gambar 6.16: Hakikat gelombang bunyi longitudinal: daerah **rapatan** (partikel rapat, tekanan tinggi) dan **regangan** (partikel renggang, tekanan rendah) berselang-seling merambat ke kanan menjauhi sumber. Grafik hijau di bawah menunjukkan variasi tekanan sebagai fungsi posisi – berbentuk sinusoidal.

Sifat-Sifat Gelombang Bunyi

- **Memerlukan medium:** bunyi tidak dapat merambat di ruang hampa – berbeda dengan gelombang elektromagnetik.
- **Dapat dipantulkan (*refleksi*):** menghasilkan gema (*echo*) bila medium pemantul cukup jauh.
- **Dapat dibiaskan (*refraksi*):** kecepatan bunyi berubah saat memasuki medium berbeda, menyebabkan pembelokan arah rambat.
- **Dapat diliturkan (*difraksi*):** bunyi dapat “membelok” melewati celah atau sudut – itulah mengapa suara dapat terdengar dari balik tembok.
- **Dapat berinterferensi:** dua gelombang bunyi dapat saling memperkuat (interferensi konstruktif) atau melemahkan (interferensi destruktif).

Klasifikasi Bunyi Berdasarkan Frekuensi

- **Infrasonik:** $f < 20 \text{ Hz}$ – di bawah batas pendengaran manusia; dihasilkan gempa bumi, digunakan gajah dan paus untuk berkomunikasi.
- **Audiosonik:** $20 \text{ Hz} \leq f \leq 20.000 \text{ Hz}$ – rentang pendengaran manusia normal.
- **Ultrasonik:** $f > 20.000 \text{ Hz}$ – di atas batas pendengaran; digunakan kelelawar, lumba-lumba, serta teknologi USG dan sonar.

6.2.2 Cepat Rambat Bunyi

Seberapa cepat bunyi merambat? Kita sering mengalami bahwa kilat terlihat lebih dahulu sebelum gunturnya terdengar – mengisyaratkan bahwa cepat rambat bunyi jauh lebih lambat dari cahaya. Namun cepat rambat bunyi bukan besaran tetap: ia bergantung pada **sifat medium** tempat bunyi merambat, bukan pada sumber atau frekuensi bunyi itu sendiri.

Cepat Rambat Bunyi dalam Zat Padat dan Cair

Dalam medium padat dan cair, cepat rambat bunyi bergantung pada **modulus elastisitas** (B atau E) dan **massa jenis** (ρ) medium:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (6.11)$$

Karena modulus elastisitas zat padat dan cair jauh lebih besar daripada gas (zat lebih sukar dimampatkan), bunyi merambat jauh lebih cepat dalam zat padat dan cair daripada dalam gas.

Cepat Rambat Bunyi dalam Gas

Dalam gas ideal, cepat rambat bunyi:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}} \quad (6.12)$$

dengan:

- γ = rasio kalor jenis (C_p/C_v)
- R = konstanta gas ($8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$)
- T = suhu mutlak (K)
- M = massa molar gas (kg/mol)

Untuk udara pada suhu 0°C , $v \approx 331 \text{ m/s}$. Hubungan praktis cepat rambat bunyi di udara:

$$v \approx 331 + 0,6 T_C \quad (\text{m/s}) \quad (6.13)$$

dengan T_C adalah suhu dalam $^\circ\text{C}$. Sehingga pada suhu 20°C : $v \approx 331 + 0,6(20) = 343 \text{ m/s}$.

Tabel 6.2: Cepat Rambat Bunyi dalam Berbagai Medium (suhu sekitar 20°C)

Medium	Wujud	Cepat Rambat (m/s)
Udara (20°C)	Gas	343
Udara (0°C)	Gas	331
Air laut	Cair	1.522
Air tawar	Cair	1.480
Kayu (ek)	Padat	3.850
Besi / Baja	Padat	5.100
Aluminium	Padat	6.400

Contoh Soal

Kilat terlihat, dan 3 s kemudian guntur terdengar. Berapa jarak petir dari pengamat? (suhu udara 20°C , $v_{\text{bunyi}} = 343 \text{ m/s}$)

Penyelesaian:

$$d = v \times t = 343 \times 3 = 1.029 \text{ m} \approx 1 \text{ km}$$

6.2.3 Intensitas dan Taraf Intensitas Bunyi

Sebuah bisikan dan suara jet yang sedang lepas landas sama-sama merupakan bunyi – namun keduanya terasa sangat berbeda “kerasnya”. Perbedaan ini diukur melalui dua besaran yang terkait erat namun berbeda: **intensitas bunyi** dan **taraf intensitas bunyi**.

Intensitas Bunyi

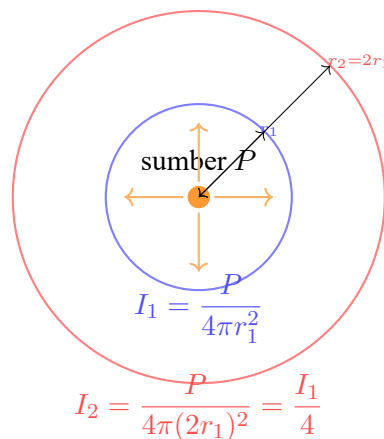
Intensitas bunyi (I) adalah daya gelombang bunyi yang melewati satu satuan luas permukaan yang tegak lurus terhadap arah perambatan:

$$I = \frac{P}{A} \quad (6.14)$$

dengan P adalah daya sumber (W) dan A adalah luas permukaan (m^2). Untuk sumber bunyi titik yang memancar ke segala arah secara merata (isotropis), pada jarak r dari sumber:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (6.15)$$

Hubungan ini menunjukkan bahwa intensitas berbanding terbalik dengan kuadrat jarak: jika jarak digandakan, intensitas menjadi seperempatnya (**hukum kuadrat terbalik**). Ini menjelaskan mengapa suara terdengar semakin lemah saat sumbernya menjauh.



Gambar 6.17: Hukum kuadrat terbalik intensitas bunyi: sumber bunyi titik memancarkan daya P ke segala arah secara merata. Pada jarak $r_2 = 2r_1$, intensitas menjadi $I_2 = I_1/4$ karena daya yang sama kini tersebar pada luas permukaan empat kali lebih besar.

Taraf Intensitas Bunyi

Telinga manusia bekerja secara **logaritmik** – bukan linear. Untuk menaikkan persepsi kekerasan suara sebesar dua kali lipat, diperlukan intensitas kira-kira sepuluh kali lebih besar. Oleh karena itu, digunakan skala logaritmik yang disebut **taraf intensitas** (TI) dengan satuan desibel (dB):

$$TI = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (\text{dB}) \quad (6.16)$$

dengan $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ adalah **intensitas ambang pendengaran** manusia – intensitas terkecil yang masih dapat didengar telinga normal.

Tabel 6.3: Taraf Intensitas Berbagai Sumber Bunyi

Sumber Bunyi	$I \text{ (W/m}^2\text{)}$	$TI \text{ (dB)}$
Ambang pendengaran	10^{-12}	0
Gemerisik daun	10^{-11}	10
Percakapan normal	10^{-6}	60
Lalu lintas padat	10^{-4}	80
Konser rock	10^{-1}	110
Mesin jet (dekat)	10^2	140

Jika terdapat n sumber identik masing-masing berintensitas I_1 , maka intensitas total $I = nI_1$ dan taraf intensitas total:

$$TI_{\text{total}} = TI_1 + 10 \log n \quad (6.17)$$

Contoh Soal

Taraf intensitas satu mesin adalah 70 dB. Jika 100 mesin identik dinyalakan bersamaan, tentukan taraf intensitas totalnya!

Penyelesaian:

$$TI_{\text{total}} = 70 + 10 \log 100 = 70 + 10(2) = 90 \text{ dB}$$

6.2.4 Efek Doppler

Siapa yang belum pernah memperhatikan bahwa klakson ambulans terdengar bernada lebih tinggi ketika mendekat dan lebih rendah ketika menjauh? Perubahan frekuensi yang didengar pengamat akibat gerakan relatif antara sumber bunyi dan pengamat inilah yang dikenal sebagai **Efek Doppler**.

Efek Doppler adalah perubahan frekuensi bunyi yang diterima pengamat akibat adanya gerak relatif antara sumber bunyi dan pengamat.

$$f_p = f_s \cdot \frac{v \pm v_p}{v \mp v_s} \quad (6.18)$$

dengan:

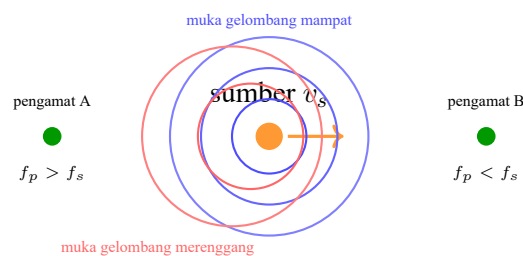
- f_p = frekuensi yang didengar pengamat (Hz)
- f_s = frekuensi yang dipancarkan sumber (Hz)
- v = cepat rambat bunyi di udara (m/s)
- v_p = kecepatan pengamat (m/s)
- v_s = kecepatan sumber (m/s)

Aturan Tanda Efek Doppler

Tabel 6.4: Konvensi Tanda pada Persamaan Efek Doppler

Kondisi	Pembilang	Penyebut
Pengamat mendekati sumber	$v + v_p$	—
Pengamat menjauhi sumber	$v - v_p$	—
Sumber mendekati pengamat	—	$v - v_s$
Sumber menjauhi pengamat	—	$v + v_s$

Aturan mudah untuk mengingat: tanda yang **menaikkan** f_p (pengamat mendekat atau sumber mendekat) menggunakan tanda yang membuat pecahan *lebih besar*; tanda yang **menurunkan** f_p membuat pecahan *lebih kecil*.



Gambar 6.18: Efek Doppler sumber bergerak ke kanan: muka gelombang di depan sumber (kiri) termampatkan sehingga pengamat A mendengar frekuensi lebih tinggi ($f_p > f_s$); muka gelombang di belakang sumber (kanan) meregang sehingga pengamat B mendengar frekuensi lebih rendah ($f_p < f_s$).

Contoh Soal

Sebuah ambulans bergerak mendekati seorang pengamat diam dengan kecepatan 30 m/s sambil membunyikan sirine berfrekuensi 800 Hz. Tentukan frekuensi yang didengar pengamat! ($v = 340$ m/s)

Penyelesaian:

Diketahui: $f_s = 800$ Hz, $v_s = 30$ m/s (mendekati), $v_p = 0$

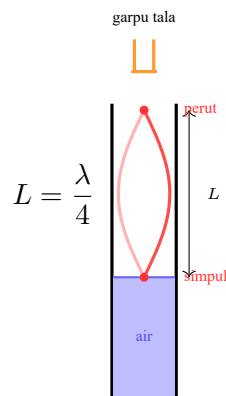
$$f_p = f_s \cdot \frac{v}{v - v_s} = 800 \times \frac{340}{340 - 30} = 800 \times \frac{340}{310}$$

$$f_p \approx 877 \text{ Hz}$$

6.2.5 Resonansi Bunyi

Setiap benda memiliki **frekuensi alami** – frekuensi di mana benda tersebut paling mudah bergetar. Ketika bunyi dengan frekuensi yang tepat mengenai benda, getaran benda menjadi sangat besar. Fenomena ini disebut **resonansi**, dan merupakan dasar dari cara alat musik menghasilkan bunyi yang keras dan merdu.

Resonansi adalah peristiwa ikut bergetarnya suatu benda dengan amplitudo maksimum ketika dikenai gelombang bunyi yang frekuensinya sama dengan atau kelipatan frekuensi alami benda tersebut.



Gambar 6.19: Resonansi pertama pada tabung berisi air (pipa organa tertutup efektif): kolom udara setinggi L beresonansi saat $L = \lambda/4$. Simpul gelombang berdiri terbentuk di permukaan air (ujung tertutup) dan perut di ujung terbuka atas.

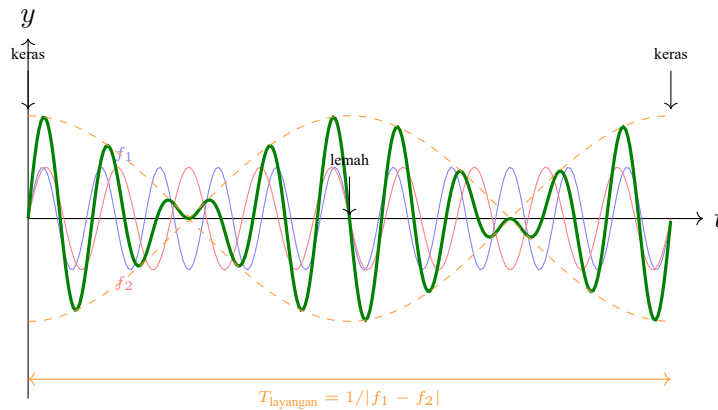
Resonansi memiliki dua sisi: sisi positif (alat musik, filter frekuensi, pencitraan MRI) dan sisi negatif (jembatan Tacoma Narrows yang runtuh pada 1940 akibat resonansi angin, jendela yang bergetar saat ada suara keras).

6.2.6 Pelayangan Bunyi

Ketika dua garpu tala dengan frekuensi yang hampir sama dibunyikan bersamaan, terdengar bunyi yang kekuatannya berubah-ubah secara berkala – kadang keras, kadang hampir hilang. Fenomena ini adalah **pelayangan bunyi**, yang merupakan manifestasi dari interferensi dua gelombang yang frekuensinya sedikit berbeda.

Pelayangan bunyi adalah variasi amplitudo (dan intensitas) bunyi yang terdengar secara berkala akibat superposisi dua gelombang bunyi yang frekuensinya hampir sama. Frekuensi pelayangan sama dengan selisih frekuensi kedua sumber.

$$f_{\text{layangan}} = |f_1 - f_2| \quad (6.19)$$



Gambar 6.20: Pelayangan bunyi: superposisi gelombang f_1 (biru) dan f_2 (merah) yang hampir sama menghasilkan gelombang resultan (hijau) dengan amplitudo yang bervariasi secara berkala (diselubungi kurva oranye putus-putus). Bunyi terdengar keras saat kedua gelombang sefase, dan lemah saat berlawanan fase.

Pelayangan bunyi dimanfaatkan oleh pemain musik untuk **menala** instrumen: saat alat musik disamakan frekuensinya dengan alat lain, pelayangan semakin lambat dan akhirnya menghilang ($f_1 = f_2$, $f_{\text{layangan}} = 0$).

Contoh Soal

Dua garpu tala dibunyikan bersamaan menghasilkan 6 pelayangan per detik. Jika frekuensi garpu tala pertama 440 Hz, tentukan kemungkinan frekuensi garpu tala kedua!

Penyelesaian:

$$f_{\text{layangan}} = |f_1 - f_2| = 6 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 440 + 6 = 446 \text{ Hz} \quad \text{atau} \quad f_2 = 440 - 6 = 434 \text{ Hz}$$

6.2.7 Dawai dan Kolom Udara

Ketika senar gitar dipetik atau tiupan masuk ke dalam seruling, terbentuk pola gelombang yang sangat istimewa: gelombang berdiri (*standing wave*). Berbeda dengan gelombang berjalan yang merambat maju, gelombang berdiri tampak “diam” dengan titik-titik yang tidak pernah bergerak (**simpul**) dan titik-titik dengan amplitudo maksimum (**perut**). Gelombang berdiri inilah yang menjadi dasar seluruh musik – menentukan frekuensi-frekuensi alami yang dapat dihasilkan alat musik.

Dawai Bergetar

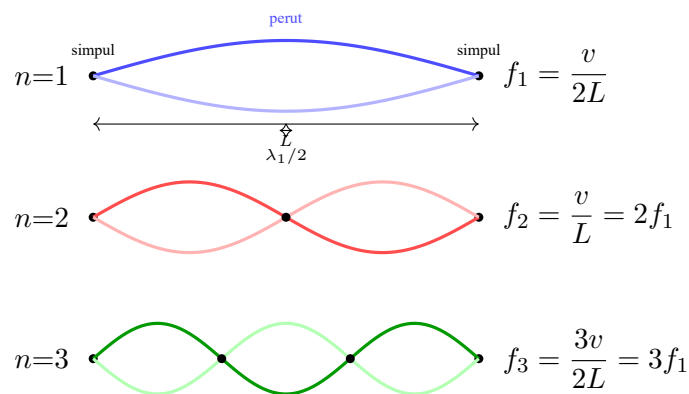
Pada dawai (senar gitar, biola, piano), kedua ujung dawai terikat – sehingga keduanya merupakan **simpul**. Kondisi batas ini mengharuskan panjang dawai L harus menampung sejumlah *setengah panjang gelombang* secara bulat:

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

sehingga frekuensi-frekuensi yang dapat beresonansi pada dawai:

$$f_n = \frac{nv}{2L} = n f_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (6.20)$$

dengan $v = \sqrt{F/\mu}$ adalah cepat rambat gelombang pada dawai (F = tegangan, μ = massa per satuan panjang), dan $f_1 = v/2L$ disebut **frekuensi dasar** (nada dasar, harmonik ke-1). Frekuensi-frekuensi $f_2, f_3, \dots$ disebut **harmonik ke-2, ke-3**, dan seterusnya (atau nada atas ke-1, ke-2, ...).

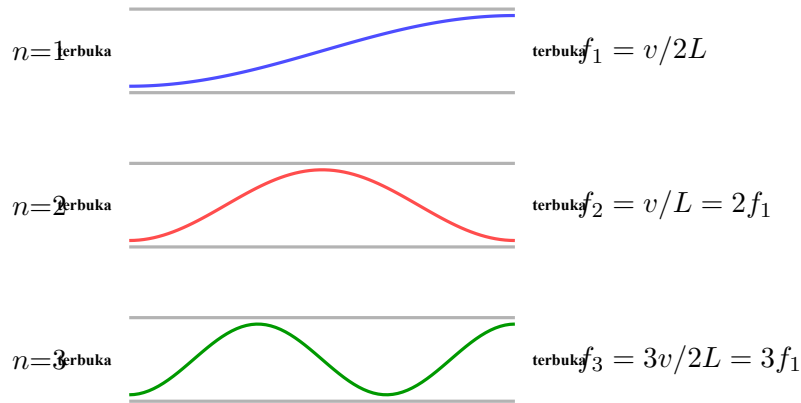


Gambar 6.21: Tiga harmonik pertama gelombang berdiri pada dawai (kedua ujung simpul). Harmonik ke- n memiliki n perut dan $(n+1)$ simpul. Frekuensi berbanding lurus dengan n : $f_n = n f_1$.

Pipa Organa Terbuka

Pipa organa terbuka adalah pipa yang **kedua ujungnya terbuka**. Di ujung terbuka, molekul udara bebas bergetar dengan amplitudo maksimum, sehingga kedua ujung merupakan **perut**. Pola ini identik dengan dawai (dari sisi kondisi batas), dan menghasilkan semua harmonik:

$$f_n = \frac{nv}{2L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (6.21)$$



Gambar 6.22: Gelombang berdiri pada pipa organa terbuka (kedua ujung perut). Semua harmonik ($n = 1, 2, 3, \dots$) dapat terbentuk, dengan $f_n = n f_1$.

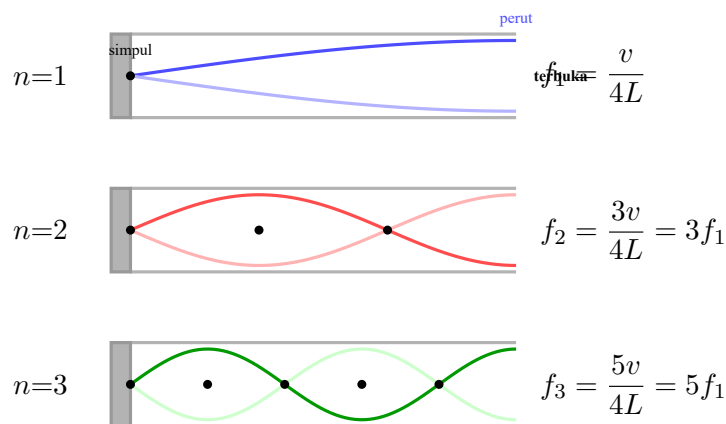
Pipa Organa Tertutup

Pipa organa tertutup adalah pipa yang **satu ujungnya tertutup dan satu ujungnya terbuka**. Ujung tertutup merupakan **simpul** (molekul tidak dapat bergerak); ujung terbuka merupakan **perut**. Kondisi ini jauh lebih membatasi: panjang pipa harus menampung jumlah *ganjil* dari seperempat panjang gelombang:

$$L = (2n - 1) \frac{\lambda_n}{4} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

$$f_n = \frac{(2n - 1) v}{4L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (6.22)$$

Pipa organa tertutup **hanya menghasilkan harmonik ganjil**: $f_1, 3f_1, 5f_1, \dots$ – harmonik genap tidak mungkin terbentuk. Ini yang memberikan warna bunyi (*timbre*) khas pada instrumen seperti klarinet.



Gambar 6.23: Gelombang berdiri pada pipa organa tertutup (kiri tertutup = simpul, kanan terbuka = perut). Hanya harmonik ganjil yang terbentuk: $f_1, 3f_1, 5f_1, \dots$. Ini yang membedakan timbre alat musik tiup tertutup dari yang terbuka.

Tabel 6.5: Perbandingan Pola Harmonik Dawai, Pipa Terbuka, dan Pipa Tertutup

Sistem	Kondisi Ujung	Harmonik	Frekuensi
Dawai	simpul – simpul	Semua ($n = 1, 2, 3, \dots$)	$f_n = nv/2L$
Pipa terbuka	perut – perut	Semua ($n = 1, 2, 3, \dots$)	$f_n = nv/2L$
Pipa tertutup	simpul – perut	Ganjil saja ($n = 1, 3, 5, \dots$)	$f_n = (2n - 1)v/4L$

Contoh Soal

Sebuah pipa organa tertutup memiliki panjang 0,85 m. Tentukan tiga frekuensi harmonik terendah yang dapat dihasilkan! ($v = 340$ m/s)

Penyelesaian:

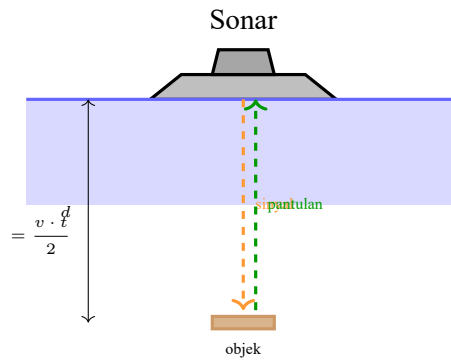
$$f_1 = \frac{v}{4L} = \frac{340}{4 \times 0,85} = \frac{340}{3,4} = 100 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 3f_1 = 300 \text{ Hz}, \quad f_3 = 5f_1 = 500 \text{ Hz}$$

6.2.8 Penerapan Gelombang Bunyi

Pemahaman tentang sifat dan perilaku gelombang bunyi telah menghasilkan berbagai teknologi penting yang memengaruhi kehidupan modern secara mendalam:

- **Ultrasonografi (USG)**, yang menggunakan gelombang ultrasonik berfrekuensi 1–20 MHz untuk memantulkan gelombang dari jaringan tubuh dan merekonstruksi gambar internal – dari pemeriksaan kandungan hingga diagnosis organ dalam.
- **Sonar** (*Sound Navigation and Ranging*), yang digunakan kapal selam dan kapal laut untuk mendeteksi objek bawah air dan mengukur kedalaman laut berdasarkan waktu tempuh pantulan gelombang bunyi ($d = v \cdot t/2$).
- **Pemeriksaan material tak merusak** (*ultrasonic testing*), untuk mendeteksi retakan atau cacat tersembunyi di dalam logam, sambungan las, dan beton tanpa merusaknya.
- **Efek Doppler dalam kedokteran** (*Doppler ultrasonography*), untuk mengukur kecepatan aliran darah dan mendeteksi penyempitan pembuluh darah berdasarkan pergeseran frekuensi bunyi yang dipantulkan sel darah merah.
- **Akustik ruangan dan rekayasa bunyi**: desain gedung konser, studio rekaman, dan bioskop memanfaatkan prinsip pemantulan, penyerapan, dan difraksi bunyi untuk menghasilkan kualitas akustik yang optimal.
- **Alat musik**: seluruh prinsip harmonik dawai dan kolom udara menjadi dasar desain gitar, piano, biola, seruling, terompet, dan organ – menentukan nada dasar dan warna bunyi (*timbre*) masing-masing instrumen.
- **Pengukur kecepatan radar/pistol kecepatan** yang digunakan polisi memanfaatkan Efek Doppler gelombang elektromagnetik, namun prinsip dasarnya identik dengan Efek Doppler bunyi.
- **Terapi ultrasonik**, yang menggunakan gelombang ultrasonik intensitas tinggi untuk menghancurkan batu ginjal (*lithotripsy*) tanpa pembedahan.



Gambar 6.24: Prinsip kerja sonar: kapal memancarkan gelombang ultrasonik ke bawah (oranye) yang dipantulkan oleh dasar laut atau objek (hijau). Dengan mengukur waktu tempuh bolak-balik t dan mengetahui cepat rambat bunyi dalam air v , kedalaman dihitung sebagai $d = vt/2$.

6.2.9 Ringkasan

Tabel 6.6: Persamaan Penting Gelombang Bunyi

Konsep	Persamaan
Cepat rambat bunyi di udara	$v \approx 331 + 0,6 T_C \text{ (m/s)}$
Cepat rambat dalam medium	$v = \sqrt{B/\rho}$
Intensitas bunyi	$I = P/A = P/(4\pi r^2)$
Taraf intensitas	$TI = 10 \log(I/I_0) \text{ (dB)}$
TI gabungan n sumber	$TI_{\text{tot}} = TI_1 + 10 \log n$
Efek Doppler	$f_p = f_s \cdot (v \pm v_p)/(v \mp v_s)$
Frekuensi pelayangan	$f_{\text{lay}} = f_1 - f_2 $
Harmonik dawai/pipa terbuka	$f_n = nv/2L \text{ (} n = 1, 2, 3, \dots \text{)}$
Harmonik pipa tertutup	$f_n = (2n - 1)v/4L \text{ (} n = 1, 2, 3, \dots \text{)}$

Catatan Penting: Pipa organa tertutup hanya menghasilkan **harmonik ganjil**, sedangkan dawai dan pipa terbuka menghasilkan **semua harmonik** – perbedaan inilah yang menentukan warna bunyi (*timbre*) berbeda antar alat musik, meskipun nada dasarnya sama. Dalam Efek Doppler, selalu perhatikan *arah gerak* sumber dan pengamat terhadap satu sama lain – bukan kecepatan absolutnya – dan gunakan tanda yang secara logis menaikkan atau menurunkan frekuensi yang didengar.

6.3 Gelombang Cahaya dan Optik Geometri

Cahaya adalah fenomena yang paling akrab sekaligus paling misterius dalam fisika. Setiap pagi kita terbangun oleh cahaya matahari; kita melihat warna pelangi setelah hujan;

kita menggunakan kacamata untuk membaca; dan kita memotret momen berharga menggunakan kamera. Namun, apa sebenarnya cahaya itu? Mengapa kita melihat bayangan kita di cermin? Mengapa pensil yang dimasukkan ke dalam gelas air terlihat patah? Dan bagaimana teleskop Hubble dapat melihat galaksi yang jaraknya miliaran tahun cahaya?

Pertanyaan-pertanyaan ini dijawab oleh dua pendekatan yang saling melengkapi. **Optik geometri** memperlakukan cahaya sebagai **berkas garis lurus** (sinar) yang mengikuti aturan-aturan sederhana saat memantul dan dibiaskan – cukup untuk menjelaskan cara kerja cermin, lensa, dan semua alat optik. Pendekatan ini mengabaikan sifat gelombang cahaya, dan hasilnya tetap sangat akurat untuk benda-benda yang ukurannya jauh lebih besar dari panjang gelombang cahaya.

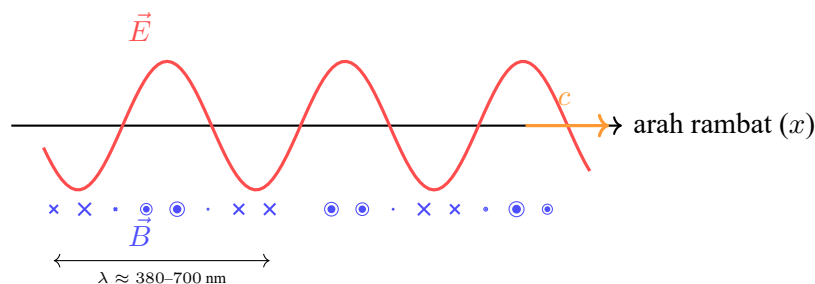
Pada bagian ini akan dipelajari hakikat cahaya, pemantulan pada cermin (datar, cekung, cembung), pembiasan dan Hukum Snellius, pemantulan sempurna, lensa (cembung dan cekung), kekuatan lensa, berbagai alat optik (mata, kacamata, lup, mikroskop, teropong), serta dispersi cahaya.

6.3.1 Hakikat Cahaya

Cahaya memiliki sifat yang unik dalam fisika: ia dapat berperilaku sebagai **gelombang elektromagnetik** maupun sebagai **partikel (foton)**, bergantung pada konteks eksperimen. Dualisme ini dikenal sebagai **dualitas gelombang-partikel**.

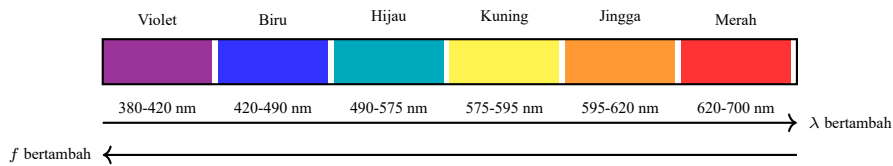
Cahaya adalah gelombang elektromagnetik transversal yang dapat merambat di ruang hampa dengan kecepatan $c = 3 \times 10^8$ m/s. Cahaya tampak memiliki panjang gelombang antara 380 nm (violet) hingga 700 nm (merah).

Berbeda dengan gelombang bunyi, cahaya **tidak memerlukan medium** untuk merambat – itulah mengapa cahaya matahari dapat menembus ruang hampa antariksa. Dalam optik geometri, sifat gelombang diabaikan dan cahaya direpresentasikan sebagai **sinar** (garis lurus dengan arah rambat).



Gambar 6.25: Cahaya sebagai gelombang elektromagnetik: medan listrik $\vec{E}$ (merah, vertikal) dan medan magnet $\vec{B}$ (biru, tegak lurus $\vec{E}$) berosilasi saling tegak lurus dan tegak lurus terhadap arah rambat x , merambat dengan kecepatan $c = 3 \times 10^8$ m/s.

Spektrum Cahaya Tampak



Gambar 6.26: Spektrum cahaya tampak: panjang gelombang dari ≈ 380 nm (violet) hingga ≈ 700 nm (merah). Frekuensi dan panjang gelombang berbanding terbalik ($c = \lambda f$); cahaya violet memiliki frekuensi tertinggi dan energi foton terbesar.

6.3.2 Pemantulan Cahaya

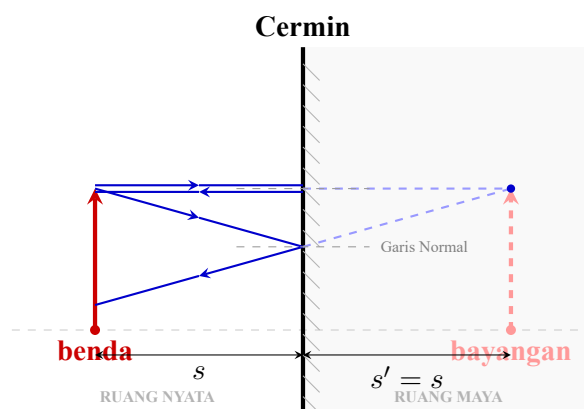
Ketika cahaya mengenai permukaan yang mengkilap, sebagian atau seluruh cahaya dipantulkan kembali. Pemantulan ini mengikuti **Hukum Pemantulan**:

- (1) Sinar datang, garis normal, dan sinar pantul terletak pada satu bidang datar. (2) Sudut datang (θ_i) sama dengan sudut pantul (θ_r): $\theta_i = \theta_r$.

Sudut datang dan sudut pantul selalu diukur terhadap **garis normal** (tegak lurus permukaan), bukan terhadap permukaan itu sendiri.

Cermin Datar

Cermin datar merupakan permukaan optik teoretis paling dasar yang menghasilkan bayangan dengan karakteristik geometris yang khas. Sifat-sifat bayangan pada cermin datar meliputi: **maya** (terbentuk di belakang cermin dan tidak dapat ditangkap oleh layar), **tegak** (tidak terbalik), **sama besar** (magnifikasi $M = 1$), dan memiliki **jarak yang sama** terhadap cermin seperti halnya jarak benda asli ke cermin ($s' = s$).



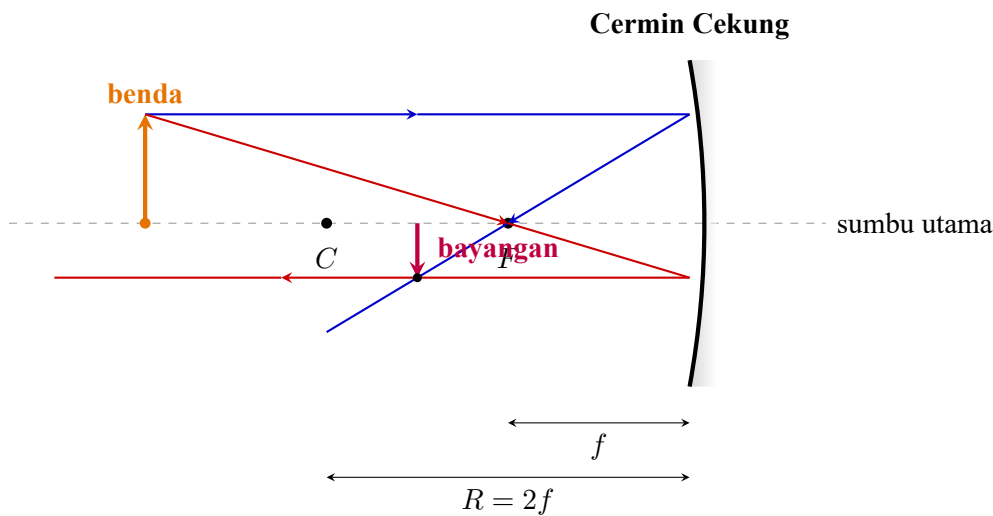
Gambar 6.27: Mekanisme pembentukan bayangan geometris pada cermin datar. Dua berkas sinar yang memancar dari ujung atas benda dipantulkan di permukaan cermin sesuai dengan Hukum Snellius tentang pemantulan ($\theta_i = \theta_r$). Sinar pertama yang datang tegak lurus dipantulkan kembali ke lintasannya, sedangkan sinar kedua yang datang miring dipantulkan secara simetris. Perpanjangan virtual berkas sinar pantul tersebut (garis putus-putus biru muda) berpotongan secara presisi di belakang cermin, membentuk bayangan maya dengan dimensi tegak dan berukuran sama ($s' = s$).

Cermin Cekung

Cermin cekung (konkaf) adalah cermin dengan permukaan pemantul di bagian dalam lengkungan. Cermin ini bersifat **konvergen** – mengumpulkan berkas sinar sejajar ke satu titik yang disebut **titik fokus** (F).

Tiga sinar istimewa pada cermin cekung:

- Sinar sejajar sumbu utama $\rightarrow$ dipantulkan melalui F .
- Sinar melalui $F \rightarrow$ dipantulkan sejajar sumbu utama.
- Sinar melalui pusat kelengkungan $M \rightarrow$ dipantulkan kembali melalui M .



Gambar 6.28: Pembentukan bayangan nyata pada cermin cekung melalui berkas sinar istimewa paraksial dengan visualisasi bayangan buram (*shading fill*) profesional di bagian belakang cermin.

Hubungan antara jarak benda (s), jarak bayangan (s'), dan jarak fokus (f) dinyatakan oleh **persamaan cermin**:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \quad \text{dengan} \quad f = \frac{R}{2} \quad (6.23)$$

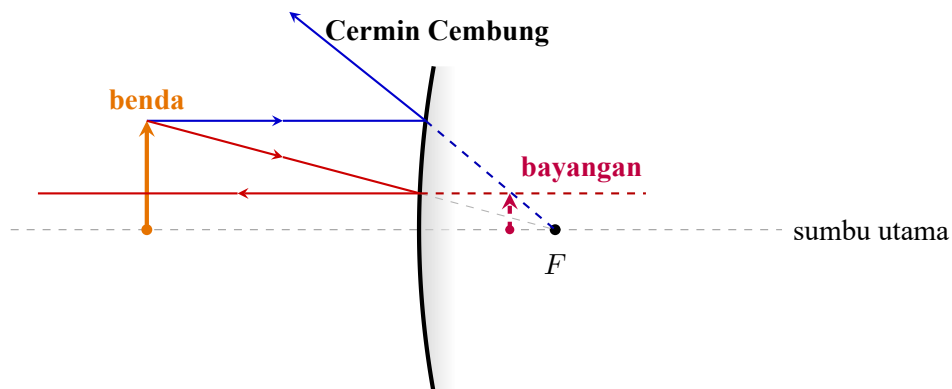
Perbesaran linear bayangan:

$$M = -\frac{s'}{s} \quad (6.24)$$

Tanda: $s' > 0$ (bayangan nyata, di depan cermin); $s' < 0$ (bayangan maya, di belakang cermin). $M > 0$ (bayangan tegak); $M < 0$ (bayangan terbalik). $|M| > 1$ (diperbesar); $|M| < 1$ (diperkecil).

Cermin Cembung

Cermin cembung (konveks) adalah cermin dengan permukaan pemantul di bagian luar lengkungan. Bersifat **divergen** – menyebarkan berkas sinar. Cermin cembung selalu membentuk bayangan **maya, tegak, dan diperkecil**, serta memiliki jangkauan pandang yang lebih luas – itulah mengapa digunakan sebagai kaca spion dan cermin pengawas di tikungan jalan.



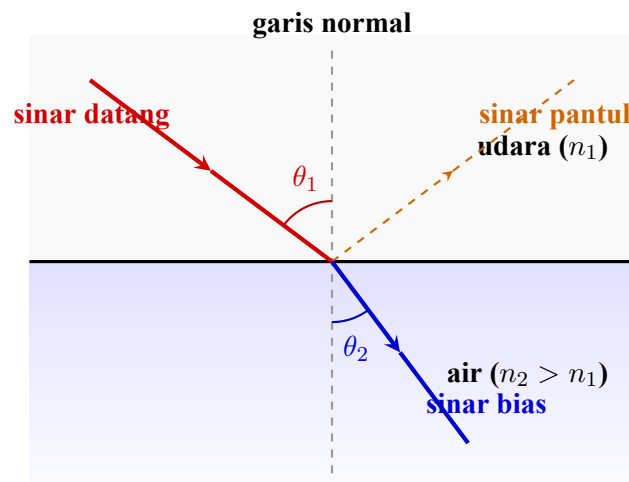
Gambar 6.29: Pembentukan bayangan pada cermin cembung. Sinar pantul 1 (biru) seolah-olah berasal dari titik fokus maya F di belakang cermin. Perpanjangan kedua sinar pantul ke belakang cermin (garis putus-putus) bertemu secara sah membentuk bayangan maya, tegak, dan diperkecil.

Untuk cermin cembung, fokus bersifat maya sehingga dalam persamaan cermin digunakan $f < 0$ (atau $s' < 0$ menghasilkan bayangan maya tegak).

6.3.3 Pembiasan Cahaya

Ketika cahaya memasuki medium yang berbeda – misalnya dari udara ke air – ia mengalami perubahan kecepatan rambat. Perubahan kecepatan ini menyebabkan **pembelokan arah rambat** yang disebut **pembiasan** (refraksi). Inilah yang membuat pensil terlihat patah di dalam air, dan mengapa kolam renang tampak lebih dangkal dari yang sebenarnya.

Pembiasan cahaya adalah peristiwa pembelokan arah rambat cahaya saat melewati batas antara dua medium yang memiliki kerapatan optik berbeda (indeks bias berbeda).



Gambar 6.30: Pembiasan cahaya dari udara (n_1) ke air ($n_2 > n_1$): sinar bias mendekati garis normal karena indeks bias medium tujuan lebih besar, sehingga sudut bias $\theta_2 < \theta_1$. Sebagian intensitas cahaya juga mengalami pemantulan sebagian (garis putus-putus).

6.3.4 Hukum Snellius

Hubungan kuantitatif antara sudut datang dan sudut bias dinyatakan oleh **Hukum Snellius** (Willebrord Snell, 1621):

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (6.25)$$

dengan:

- n_1, n_2 = indeks bias medium pertama dan kedua (tanpa satuan)
- θ_1 = sudut datang (terhadap normal)
- θ_2 = sudut bias (terhadap normal)

Indeks bias suatu medium didefinisikan sebagai perbandingan cepat rambat cahaya di vakum (c) terhadap cepat rambat di medium tersebut (v):

$$n = \frac{c}{v} \quad (6.26)$$

Tabel 6.7: Indeks Bias Beberapa Medium (cahaya tampak)

Medium	Indeks Bias (n)	v (m/s)
Vakum / udara	1,000	$3,00 \times 10^8$
Air (20°C)	1,333	$2,25 \times 10^8$
Kaca mahkota	1,523	$1,97 \times 10^8$
Kaca flint	1,650	$1,82 \times 10^8$
Intan	2,417	$1,24 \times 10^8$

Contoh Soal

Seberkas cahaya datang dari udara ($n_1 = 1$) ke kaca ($n_2 = 1,5$) dengan sudut datang 30° . Tentukan sudut biasnya!

Penyelesaian:

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

$$(1) \sin 30^\circ = (1,5) \sin \theta_2 \quad \Rightarrow \quad \sin \theta_2 = \frac{0,5}{1,5} = \frac{1}{3}$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{1}{3}\right) \approx 19,5^\circ$$

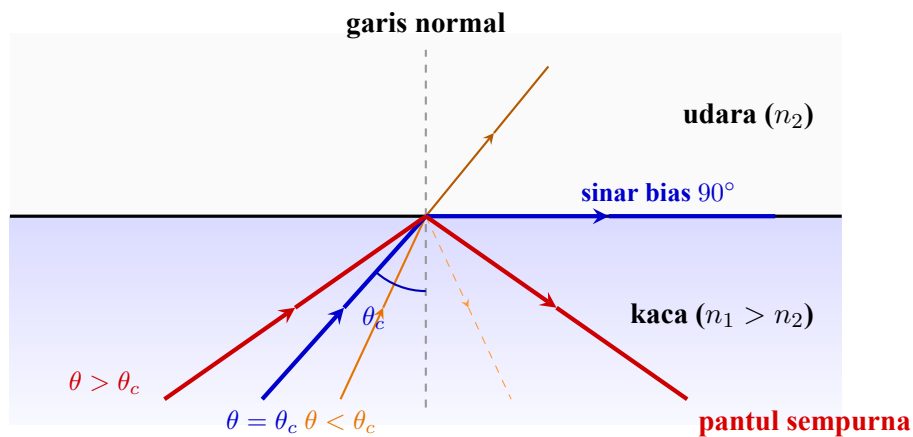
6.3.5 Pemantulan Sempurna

Ada situasi istimewa yang terjadi saat cahaya bergerak dari medium **rapat ke renggang** ($n_1 > n_2$): jika sudut datang cukup besar, berkas bias menghilang sepenuhnya dan **seluruh** cahaya dipantulkan kembali ke medium pertama. Inilah **pemantulan sempurna** (total internal reflection).

Pemantulan sempurna terjadi ketika sudut datang melebihi sudut kritis (θ_c), yaitu sudut yang menghasilkan sudut bias 90° .

Dari Hukum Snellius saat $\theta_2 = 90^\circ$:

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (6.27)$$



Gambar 6.31: Visualisasi tiga kondisi perambatan gelombang cahaya dari medium optik rapat (kaca) ke medium renggang (udara). Saat $\theta < \theta_c$ (oranye), terjadi pembiasan menjauhi normal. Saat $\theta = \theta_c$ (biru), sinar bias menyusuri batas medium ($\theta_2 = 90^\circ$). Saat $\theta > \theta_c$ (merah), seluruh energi sinar dipantulkan sempurna kembali ke dalam kaca.

Pemantulan sempurna dimanfaatkan dalam **serat optik** (*fiber optic*): cahaya terkurung di dalam inti serat kaca dan merambat ratusan kilometer dengan hampir tanpa kerugian energi, menjadi tulang punggung komunikasi data internet modern.

6.3.6 Lensa

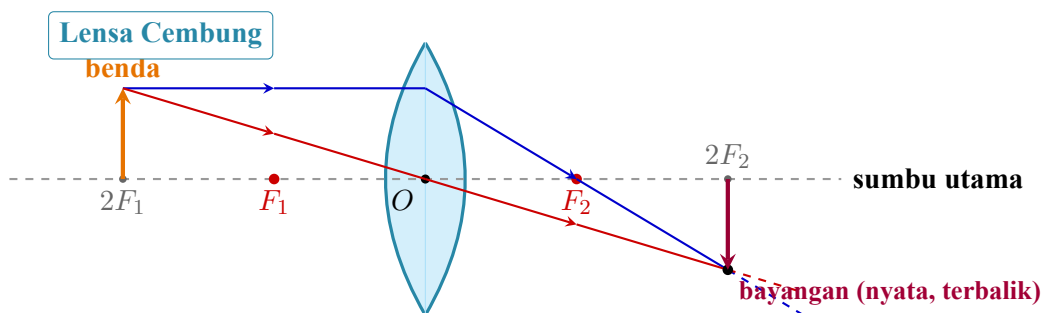
Lensa adalah benda transparan dengan dua permukaan lengkung (atau satu datar dan satu lengkung) yang memanfaatkan pembiasan untuk mengumpulkan atau menyebarkan berkas cahaya. Dalam optik geometri, lensa tipis mengikuti persamaan yang sama bentuknya dengan persamaan cermin.

Lensa Cembung

Lensa cembung (konvergen, positif) lebih tebal di tengah daripada di tepi. Lensa ini mengumpulkan berkas sinar sejajar ke titik fokus F di seberang lensa.

Tiga sinar istimewa pada lensa cembung:

- Sinar sejajar sumbu $\rightarrow$ dibiaskan melalui F_2 .
- Sinar melalui pusat optik $O \rightarrow$ diteruskan tanpa dibelokkan.
- Sinar menuju $F_1 \rightarrow$ keluar sejajar sumbu.



Gambar 6.32: Pembentukan bayangan pada lensa cembung (benda di luar $2F$). Berkas sinar istimewa dibiaskan dan berpotongan secara eksak di sisi belakang lensa, menghasilkan bayangan yang bersifat nyata, terbalik, dan diperkecil.

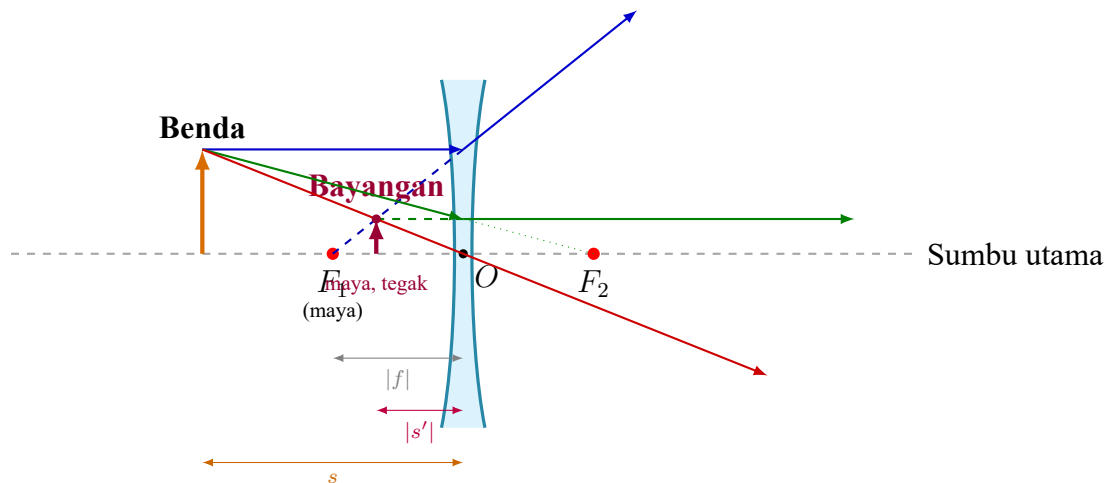
Persamaan lensa tipis (identik bentuknya dengan persamaan cermin):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \quad (6.28)$$

Untuk lensa cembung, $f > 0$. Perbesaran: $M = -s'/s$ (tanda negatif berarti terbalik untuk bayangan nyata).

Lensa Cekung

Lensa cekung (divergen, negatif) lebih tipis di tengah daripada di tepi. Lensa ini menyebarkan berkas sinar sehingga seolah berasal dari titik fokus maya F_1 di sisi yang sama dengan sumber cahaya. Lensa cekung **selalu** membentuk bayangan maya, tegak, dan diperkecil.



Gambar 6.33: Pembentukan bayangan pada lensa cekung ($f < 0$). Sinar sejajar sumbu utama dibiaskan memencar seolah berasal dari F_1 , sinar yang menuju F_2 keluar sejajar sumbu utama, dan sinar yang melalui pusat optik O tidak dibelokkan. Perpanjangan ketiga sinar bertemu pada bayangan maya yang bersifat tegak dan diperkecil.

Untuk lensa cekung berlaku $f < 0$. Persamaan lensa tipis:

$$\frac{1}{s'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{s}$$

selalu menghasilkan $s' < 0$ (maya), $M > 0$ (tegak), dan $|M| < 1$ (diperkecil) untuk semua benda nyata ($s > 0$).

6.3.7 Kekuatan Lensa

Dalam optik klinis (pembuatan kacamata dan lensa kontak), lensa lebih mudah dideskripsikan melalui **kekuatan lensa** (P) daripada jarak fokus. Kekuatan lensa menyatakan kemampuan lensa untuk membiaskan (mengumpulkan atau menyebarkan) cahaya:

$$P = \frac{1}{f} \quad (\text{satuan: dioptri, D}) \quad (6.29)$$

Satu dioptri (D) didefinisikan sebagai kekuatan lensa yang memiliki jarak fokus $f = 1$ m. Lensa cembung memiliki $P > 0$; lensa cekung memiliki $P < 0$.

Jika dua lensa tipis dengan kekuatan P_1 dan P_2 disusun berdekatan (bersentuhan), kekuatan totalnya:

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 \quad (6.30)$$

Contoh Soal

Sebuah lensa memiliki jarak fokus $f = 25$ cm. Tentukan kekuatan lensa tersebut!

Penyelesaian:

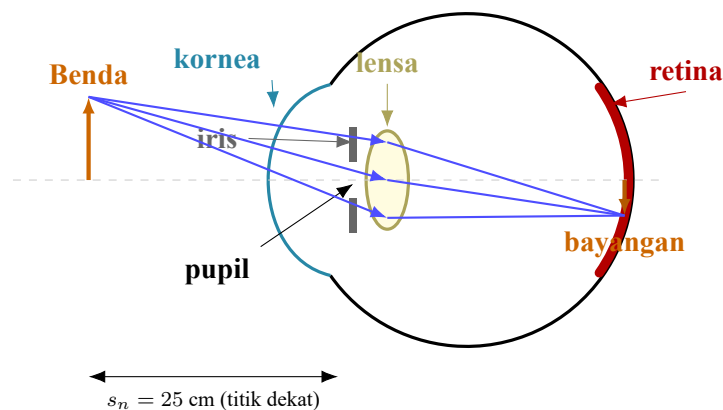
$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,25 \text{ m}} = +4 \text{ D}$$

6.3.8 Alat-Alat Optik

Penerapan prinsip pemantulan dan pembiasan cahaya menghasilkan berbagai alat optik yang sangat berguna – dari alat yang paling personal (mata dan kacamata) hingga yang paling canggih (mikroskop elektron dan teleskop bintang).

Mata

Mata manusia adalah sistem optik biologis yang luar biasa. Komponen utama optiknya adalah **kornea** dan **lensa mata** (keduanya berfungsi sebagai lensa cembung), serta **retina** sebagai layar penerima bayangan.



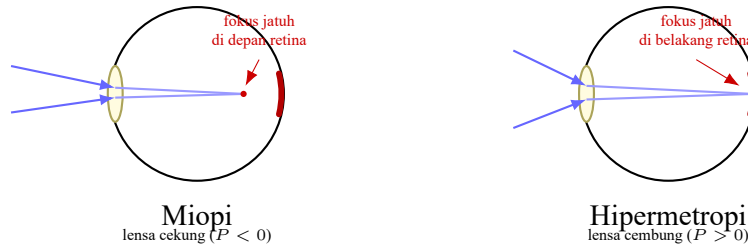
Gambar 6.34: Penampang mata manusia. Kornea dan lensa mata membentuk sistem lensa cembung yang memfokuskan bayangan benda tepat pada retina. Bayangan di retina bersifat nyata dan terbalik.

Mata normal (*emetropi*) dapat melihat jelas dari jarak 25 cm (**titik dekat**, s_n) hingga tak terhingga (**titik jauh**, $s_f = \infty$). Kemampuan lensa mata berubah-ubah fokus disebut **daya akomodasi**.

Kacamata

Dua cacat mata yang paling umum adalah:

- **Miopi** (rabun jauh): bayangan benda jauh jatuh *di depan* retina. Dikoreksi dengan **lensa cekung** ($P < 0$).
- **Hipermetropi** (rabun dekat): bayangan benda dekat jatuh *di belakang* retina. Dikoreksi dengan **lensa cembung** ($P > 0$).



Gambar 6.35: Cacat mata miopi (kiri) dan hipermetropi (kanan). Pada miopi, fokus jatuh di depan retina – dikoreksi lensa cekung. Pada hipermetropi, fokus jatuh di belakang retina – dikoreksi lensa cembung.

Kekuatan lensa kacamata untuk **miopi** (titik jauh sf terbatas):

$$P_{\text{miopi}} = -\frac{1}{sf} \quad (\text{dalam meter}) \quad (6.31)$$

Kekuatan lensa kacamata untuk **hipermetropi** (titik dekat sn' lebih jauh dari normal $sn = 25$ cm):

$$P_{\text{hipermetropi}} = \frac{1}{sn} - \frac{1}{sn'} \quad (\text{dalam meter}) \quad (6.32)$$

Lup

Lup (kaca pembesar) adalah lensa cembung tunggal yang digunakan untuk mengamati benda kecil. Benda diletakkan di antara F dan O (di dalam jarak fokus) sehingga menghasilkan bayangan maya, tegak, dan diperbesar.

Perbesaran angular lup:

- **Pengamatan dengan akomodasi maksimum** (bayangan di titik dekat $sn = 25$ cm):

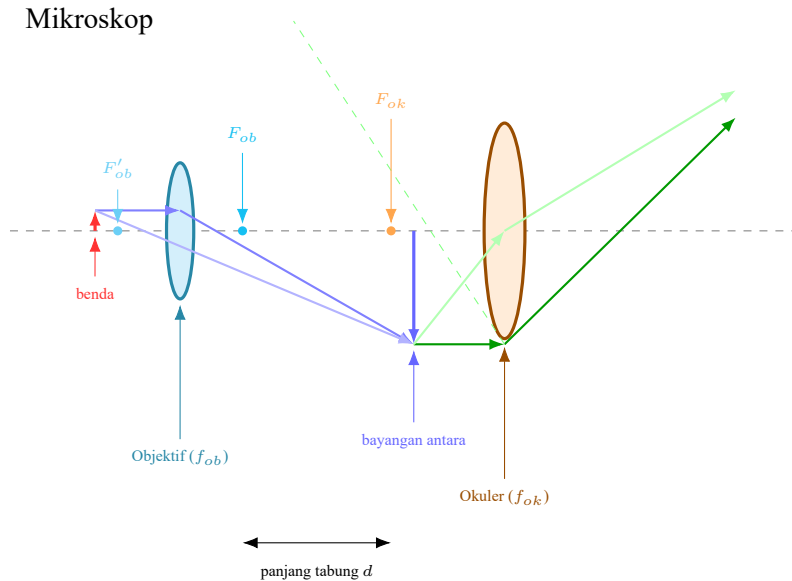
$$M_{\text{maks}} = \frac{sn}{f} + 1 \quad (6.33)$$

- **Pengamatan tanpa akomodasi** (bayangan di tak terhingga, benda tepat di F):

$$M_{\min} = \frac{sn}{f} \quad (6.34)$$

Mikroskop

Mikroskop menggunakan dua lensa cembung untuk mencapai perbesaran sangat tinggi yang tidak mungkin dilakukan lensa tunggal. Lensa yang menghadap benda disebut **objektif** (f_{ob} , sangat kecil); lensa yang menghadap mata disebut **okuler** (f_{ok}).



Gambar 6.36: Skema optik mikroskop. Lensa objektif membentuk bayangan antara yang nyata, terbalik, dan diperbesar di dekat titik fokus okuler. Okuler kemudian memperbesarnya lagi seperti lup, menghasilkan bayangan akhir maya yang sangat besar.

Perbesaran total mikroskop (tanpa akomodasi):

$$M_{\text{mikro}} = \frac{d}{f_{ob}} \times \frac{sn}{f_{ok}} \quad (6.35)$$

dengan d adalah jarak antara titik fokus objektif dan okuler (panjang tabung).

Teropong

Teropong (teleskop) digunakan untuk mengamati benda yang sangat jauh. Prinsipnya sama dengan mikroskop – dua lensa cembung – namun objektif memiliki jarak fokus *besar* untuk menangkap benda jauh, sementara okuler berfungsi sebagai lup.

Perbesaran angular teropong bintang (tanpa akomodasi):

$$M_{\text{teropong}} = \frac{f_{ob}}{f_{ok}} \quad (6.36)$$

Panjang teropong saat digunakan tanpa akomodasi:

$$d = f_{ob} + f_{ok} \quad (6.37)$$

Tabel 6.8: Perbandingan Alat-Alat Optik

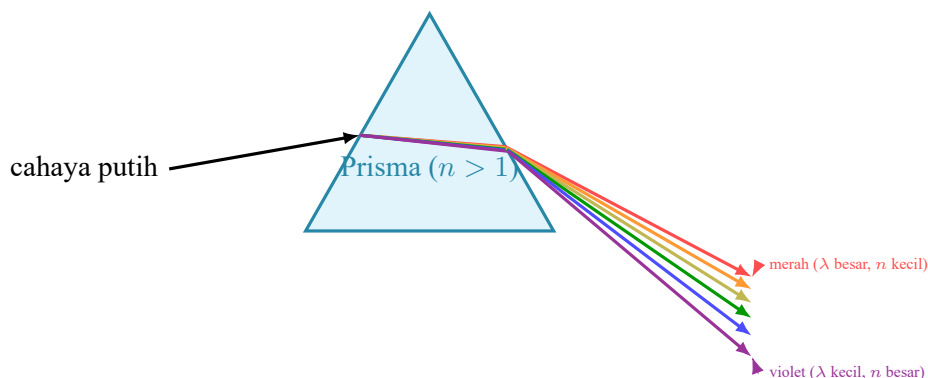
Alat	Lensa	Jumlah	Perbesaran
Lup	Cembung	1	$M = sn/f$ atau $sn/f + 1$
Mikroskop	Obj+Okl (cembung)	2	$M = (d/f_{ob}) \times (sn/f_{ok})$
Teropong	Obj+Okl (cembung)	2	$M = f_{ob}/f_{ok}$

6.3.9 Dispersi Cahaya

Pelangi setelah hujan, prisma yang memecah cahaya menjadi warna-warni – keduanya merupakan manifestasi dari **dispersi cahaya**: pemisahan cahaya putih menjadi komponen-komponen warnanya.

Dispersi adalah peristiwa terurainya cahaya putih menjadi spektrum warna-warna penyusunnya ketika melewati medium dispersif (seperti prisma kaca), akibat indeks bias yang berbeda untuk setiap panjang gelombang.

Kunci dispersi: **indeks bias bergantung pada panjang gelombang**. Cahaya violet (λ pendek) dibiaskan lebih kuat daripada cahaya merah (λ panjang).



Gambar 6.37: Dispersi cahaya oleh prisma (geometri dihitung dari Hukum Snell dengan indeks bias berbeda untuk setiap warna): cahaya putih masuk sebagai satu berkas dan diuraikan menjadi spektrum warna saat keluar. Violet dibiaskan paling kuat karena indeks biasnya paling besar; merah dibiaskan paling lemah. Urutan warna MEJIKUHIBINIU (merah–jingga–kuning–hijau–biru–nila–ungu) merupakan urutan dari yang paling sedikit dibiaskan ke yang paling banyak.

Pelangi

Pelangi adalah dispersi alami cahaya matahari oleh butiran air hujan. Setiap butiran air bertindak sebagai prisma mini: cahaya matahari masuk, mengalami pembiasan, pemantulan sempurna di bagian belakang butiran, lalu dibiaskan kembali saat keluar – menghasilkan pemisahan warna. Pelangi terlihat sebagai busur karena pengamat hanya dapat melihat warna tertentu dari butiran air pada sudut 40° – 42° terhadap arah sinar matahari.

6.3.10 Penerapan Optik Geometri

Prinsip-prinsip optik geometri yang telah dipelajari menjadi landasan dari berbagai teknologi penting:

- **Kamera digital dan film:** menggunakan sistem lensa cembung untuk memfokuskan bayangan benda ke sensor atau film. Prinsip pembentukannya identik dengan mata manusia.
- **Serat optik (*fiber optic*):** memanfaatkan pemantulan sempurna untuk menghantarkan sinyal cahaya (data) melalui kabel kaca fleksibel dengan kecepatan tinggi dan hampir tanpa rugi energi – tulang punggung internet modern.
- **Endoskopi:** kamera mungil yang disambungkan ke serat optik memungkinkan dokter memeriksa organ dalam tubuh pasien tanpa pembedahan mayor.
- **Teleskop Hubble dan JWST:** menggunakan cermin cekung berdiameter besar sebagai pengganti lensa objektif untuk menangkap cahaya dari galaksi yang berjarak miliaran tahun cahaya.
- **Periskop kapal selam:** menggunakan dua prisma atau cermin datar 45° untuk membelokkan cahaya 90° dua kali, memungkinkan pengamatan dari kedalaman.
- **Panel surya:** sel surya konsentrator menggunakan lensa Fresnel atau cermin cekung untuk memfokuskan cahaya matahari ke area kecil, meningkatkan efisiensi konversi energi.
- **Pemindai barcode dan CD/DVD:** menggunakan laser yang difokuskan oleh lensa untuk membaca pola pada permukaan datar.
- **Proyektor dan LED:** menggunakan kombinasi lensa cembung dan cermin untuk mengarahkan dan memfokuskan cahaya ke layar atau area target.

6.3.11 Ringkasan

Tabel 6.9: Persamaan Penting Gelombang Cahaya dan Optik Geometri

Konsep	Persamaan
Hukum pemantulan	$\theta_i = \theta_r$
Indeks bias	$n = c/v$
Hukum Snellius	$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$
Sudut kritis	$\sin \theta_c = n_2/n_1$
Persamaan cermin/lensa	$1/f = 1/s + 1/s'$
Jarak fokus cermin	$f = R/2$
Perbesaran	$M = -s'/s$
Kekuatan lensa	$P = 1/f$ (dioptri)
Lup (tanpa akomodasi)	$M = sn/f$
Lup (akomodasi maks)	$M = sn/f + 1$
Mikroskop	$M = (d/f_{ob}) \times (sn/f_{ok})$
Teropong	$M = f_{ob}/f_{ok}; d = f_{ob} + f_{ok}$
Koreksi miopi	$P = -1/sf$
Koreksi hipermetropi	$P = 1/sn - 1/sn'$

Catatan Penting: Persamaan cermin dan lensa ($1/f = 1/s + 1/s'$) memiliki bentuk yang **identik**, namun konvensi tanda berbeda: untuk cermin, $f > 0$ pada cermin cekung; untuk lensa, $f > 0$ pada lensa cembung. Bayangan nyata selalu dapat ditangkap layar dan terbentuk di depan cermin (atau di belakang lensa), sedangkan bayangan maya hanya dapat dilihat langsung oleh mata dan tidak dapat ditangkap layar. Pada semua alat optik berlensa majemuk (mikroskop, teropong), perbesaran total merupakan **hasil kali** perbesaran masing-masing lensa.



Daftar Bacaan

Al-Qur'an Karim

[Kem26] Kementerian Agama Republik Indonesia. *Quran Kemenag: Al-Qur'an Digital Lajnah Pentashihan Mushaf Al-Qur'an*. 2026. URL: <https://quran.kemenag.go.id/> (urlseen 23/06/2026).

Buku

[WHR14] Jearl Walker, David Halliday **and** Robert Resnick. *Fundamentals of Physics*. 10 **edition**. Wiley, 2014. ISBN: 978-1-118-23072-5.



Indeks

A	R
Arah Vektor.....20	Representasi Geometri.....18
B	Representasi Komponen atau Basis ... 19
Bentuk Basis.....19	Representasi Matriks 19
Bentuk Komponen 19	Representasi Vektor 18
Besar Vektor.....20	S
K	Sifat Asosiatif.....27
Kesamaan Dua Vektor 22	Sifat Komutatif 27
Konsep Dasar Vektor 18	Sifat Penjumlahan Vektor 27
N	
Notasi dan Penulisan Vektor.....18	
O	
Operasi dasar pada vektor23	
P	
Pengurangan Vektor 26	
Penjumlahan Vektor 23	
Perkalian Vektor dengan Skalar28	