Endarko, dkk

FISIKA JILID 2
UNTUK SMK TEKNOLOGI

SMK

Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan
Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta pada Departemen Pendidikan Nasional
Dilindungi Undang-undang

FISIKA JILID 2
UNTUK SMK TEKNOLOGI

Untuk SMK

Penulis : Endarko
Melania Suweni Muntini
Lea Prasetio
Heny Faisal
Editor : Darminto
Perancang Kulit : Tim

Ukuran Buku : 17,6 x 25 cm

END ENDARKO
f Buku Ajar Fisika Jilid 2 untuk SMK Teknologi /oleh Endarko, Melania Suweni Muntini, Lea Prasetio, Heny Faisal ---- Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008.
xi. 195 hlm
Daftar Pustaka : A1-A2
Glosarium : B1-B7
ISBN : 978-602-8320-28-3

Diterbitkan oleh
Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan
Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah
Departemen Pendidikan Nasional
Tahun 2008

KATA SAMBUTAN

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah Departemen Pendidikan Nasional, telah melaksanakan kegiatan penulisan buku kejuruan sebagai bentuk dari kegiatan pembelian hak cipta buku teks pelajaran kejuruan bagi siswa SMK. Karena buku-buku pelajaran kejuruan sangat sulit di dapatkan di pasaran.

Buku teks pelajaran ini telah melalui proses penilaian oleh Badan Standar Nasional Pendidikan sebagai buku teks pelajaran untuk SMK dan telah dinyatakan memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 45 Tahun 2008 tanggal 15 Agustus 2008.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada seluruh penulis yang telah berkenan mengalihkan hak cipta karyanya kepada Departemen Pendidikan Nasional untuk digunakan secara luas oleh para pendidik dan peserta didik SMK. Buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional ini, dapat diunduh (*download*), digandakan, dicetak, dialihmediakan, atau difotokopi oleh masyarakat. Namun untuk penggandaan yang bersifat komersial harga penjualannya harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh Pemerintah. Dengan ditayangkan *soft copy* ini diharapkan akan lebih memudahkan bagi masyarakat khsusnya para pendidik dan peserta didik SMK di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri untuk mengakses dan memanfaatkannya sebagai sumber belajar.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Kepada para peserta didik kami ucapkan selamat belajar dan semoga dapat memanfaatkan buku ini sebaik-baiknya. Kami menyadari bahwa buku ini masih perlu ditingkatkan mutunya. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat kami harapkan.

Jakarta, 17 Agustus 2008
Direktur Pembinaan SMK

KATA PENGANTAR

Seiring dengan dibukanya peluang bagi semua siswa lulusan dari berbagai jenis sekolah menengah, baik yang bersifat sekolah menengah umum, kejuruan ataupun keagamaan, serta tidak ada lagi pembedaan terhadap kelompok IPA, IPS ataupun kelompok Bahasa, agar siswa lulusannya dapat berkompetisi masuk di perguruan tinggi, maka sebagai konsekuensinya adalah pemerintah harus menyediakan, mengelola dan membina terhadap fasilitas software maupun hardware untuk sekolah menengah kejuruan dan sekolah menengah keagamaan yang mengalami ketertinggalan dibandingkan dengan sekolah menengah umum, akibat adanya perubahan kebijakan tersebut.

Dalam upaya peningkatan kualitas pendidikan dan pengajaran mata pelajaran Fisika untuk Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) se Indonesia, maka pihak Direktorat Pendidikan Sekolah Menengah dan Kejuruan melakukan kerjasama dengan salah satu perguruan tinggi teknik dalam hal ini Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Karena ITS telah memiliki pengalaman dalam membina mahasiswa baru yang berasal dari kelompok sekolah menengah kejuruan untuk ikut program pembenahan tersebut.

Pencanangan tahun 2015 oleh pemerintah agar perbandingan jumlah siswa SMU terhadap SMK adalah 30 prosen dibanding 70 prosen, yaitu terbalik dari kondisi sekarang, merupakan langkah yang harus diikuti dengan berbagai pembenahan. Pembenahan dapat dimulai dari penyediaan buku ajar yang berbahan baku standar, lengkap dan disajikan secara lebih populer, yaitu mudah dipahami. Permasalahan di lapangan adalah keberagaman sistem pengelolaan sekolah menengah kejuruan di berbagai daerah sudah lama dilepas dengan porsi kurikulum terbesarnya pada muatan lokal, dengan spesialisasi yang terlalu sempit, karena kebijakan bahwa SMK harus padu dan terkait dengan kebutuhan lingkungan (industri) terdekatnya.

Dalam pelaksanaan pengajaran mata pelajaran Fisika, pada umumnya para guru SMK, belum mempunyai pedoman yang seragam dan tegas. Tiap SMK memiliki arahan tersendiri. Guru lebih memilih untuk meracik sendiri materi yang akan diberikan kepada siswanya dari berbagai buku fisika yang teersedia. Untuk SMK berkualitas, seringkali terjebak dalam “standar kurikulum” yang disesuikan dengan selera industri pemakai tenaga lulusannya.

Program penyediaan buku, selalu dibarengi dengan pernyesuaian lamanya waktu yang dibutuhkan untuk pelaksanan di lapangan, penyiapan guru pengajarnya, upaya mendapatkan umpan balik, revisi buku dan pembakuan kurikulum. Diharapkan semua

program hendaknya dapat dijalankan dengan tanpa mendikte ataupun dengan pemaksaan, karena harus mengejar target waktu agar cepat terselesaikan, sedangkan di lapangan masih dibutuhkan suatu panduan yang lebih implementatif dan aplikatif. Hal ini mengingat SMK telah berjalan dengan budaya dan mapan dengan lingkungannya. Perubahan hendaknya secara bertahap dan dengan kesadaran institusinya serta sesuai tuntutan lingkungan dan lapangan kerja lulusannya.

Demikian kami sampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar–besarnya kepada Direktorat Pendidikan Sekolah Menengah dan Kejuruan Depdiknas atas terselenggaranya kerjasama ini, sehingga menggugah kesadaran para guru dan dosen akan tanggung jawabnya terhadap kualitas pendidikan di Sekolah Menengah Kejuruan, semoga Allah SWT membalas dedikasi dan amal baik tersebut.

Tim Penyusun

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR ii
DAFTAR ISI iv

BUKU JILID 1
BAB 1 1
BESARAN DAN SATUAN 1
1.1 BESARAN DAN SATUAN 3
1.2 STANDAR SATUAN BESARAN 5
1.3 MACAM ALAT UKUR 8
1.4 KONVERSI SATUAN 15
1.5 DIMENSI 17
1.6 ANGKA PENTING 19
1.7 NOTASI ILMIAH (BENTUK BAKU) 21
1.8 PENGUKURAN 21
1.9 VEKTOR 26
1.10 RANGKUMAN 35
1.11 TUGAS MANDIRI 35
1.12. SOAL UJI KOMPETENSI 37
BAB 2 43
MENERAPKAN HUKUM GERAK DAN GAYA 43
2.1 GERAK DAN GAYA 47
2.2 GERAK LURUS BERATURAN (GLB) 48
2.3 GERAK LURUS BERUBAH BERATURAN (GLBB) 50
2.4 HUKUM - HUKUM NEWTON TENTANG GERAK 56
2.5 GERAK BENDA YANG DIHUBUNGKAN DENGAN KATROL 61
2.6 BENDA BERGERAK PADA BIDANG MIRING 62
2.7 GAYA GESEK 62
2.8 GERAK MELENGKUNG 66
2.9 KEGIATAN 75
2.10 RANGKUMAN 76
2. 11 SOAL UJI KOMPETENSI 77
BAB 3 85

DINAMIKA ROTASI DAN KESETIMBANGAN BENDA TEGAR 85
3.1 DINAMIKA ROTASI 87
3.2. KECEPATAN DAN PERCEPATAN ANGULAR 88
3.3. TORSI DAN MOMEN INERSIA 91
3.4. PEMECAHAN MASALAH DINAMIKA ROTASI DENGAN HUKUM KEKEKALAN ENERGI MEKANIK 97
3.5. HUKUM KEKEKALAN MOMENTUM SUDUT 101
3.6 KESETIMBANGAN BENDA 103
3.7 RANGKUMAN 109
3.8 SOAL KOMPETENSI 110
BAB 4 113
USAHA DAN ENERGI 113
4.1 USAHA 115
4.2 DAYA 119
4.3 KONSEP ENERGI 120
4.4 ENERGI MEKANIK 122
4.5 KERJA OLEH GAYA KONSERVATIF DAN OLEH GAYA NON-KONSERVATIF 124
4.6 KEGIATAN 126
4.7 RANGKUMAN 127
4.8 SOAL UJI KOMPETENSI 128
BAB 5 131
MOMENTUM DAN IMPULS 131
5.1 PENGERTIAN MOMENTUM DAN IMPULS 133
5.2 IMPULS SEBAGAI PERUBAHAN MOMENTUM 134
5.3 HUKUM KEKEKALAN MOMENTUM 135
5.4 TUMBUKAN 137
5.5 KEGIATAN 139
5.6 RANGKUMAN 140
BAB 6 143
SIFAT MEKANIK BAHAN 143
6.1. SIFAT MEKANIK BAHAN 145
6.2 RANGKUMAN 160
6.3 SOAL UJI KOMPETENSI 162

BUKU JILID 2

BAB 7 165
SUHU DAN KALOR 165
7.1 PENGUKURAN TEMPERATUR 167

7.2 TEMPERATUR GAS IDEAL, TERMOMETER CELCIUS, DAN TERMOMETER FAHRENHEIT 168
7.3 ASAS BLACK DAN KALORIMETRI 169
7.4 HANTARAN KALOR. 170
BAB 8 181
DINAMIKA FLUIDA..... 181
A. FLUIDA STATIS 183
B. TEGANGAN PERMUKAAN DAN VISKOSITAS ZAT CAIR 192
C. FLUIDA DINAMIS..... 196
BAB 9 213
TERMODINAMIKA 213
9.1 SISTEM, KEADAAN SISTEM, DAN KOORDINAT TERMODINAMIKA 215
9.2 KEADAAN SETIMBANG 216
9.3 HUKUM TERMODINAMIKA KE NOL DAN TEMPERATUR 217
9.4 PERSAMAAN KEADAAN..... 224
9.5 PERSAMAAN KEADAAN GAS IDEAL..... 225
9.6 DIAGRAM PT, DIAGRAM PV, DAN PERMUKAAN *PVT* UNTUK ZAT MURNI..... 226
9.7 DIAGRAM PV, DIAGRAM PT, DAN PERMUKAAN PVT UNTUK GAS IDEAL 227
9.8 KERJA..... 228
9.10 KERJA PADA PROSES IRREVERSIBLE (TAK REVERSIBLE)..... 229
9.11 KALOR DAN HUKUM TERMODINAMIKA I 231
BAB 10..... 261
GETARAN, GELOMBANG DAN BUNYI..... 261
10.1 HAKEKAT GETARAN 263
10.2. FORMULASI GETARAN 271
10.3 ENERGI GETARAN 273
10.4 HAKEKAT GELOMBANG 282
10.5 KECEPATAN RAMBAT GELOMBANG 287
10.6 PERSAMAAN GELOMBANG..... 291
10.7 GELOMBANG BUNYI 293
10.8 EFEK DOPPLER..... 301
10.9 RANGKUMAN 304
10.10 SOAL / UJI KOMPETENSI..... 305
BAB 11..... 309

MEDAN MAGNET 309
11.1INDUKSI MAGNET..... 312
11.2 MEDAN MAGNET OLEH ARUS LISTRIK 315
11.3 INDUKSI MAGNET OLEH KAWAT LINGKARAN..... 317
11.4 INDUKSI MAGNET OLEH SOLENOIDA. 319
11.5 INDUKSI MAGNET OLEH TOROIDA. 320
11.6 GERAK MUATAN LISTRIK DAN MEDAN MAGNET 321
11.7 KUMPARAN DALAM MEDAN MAGNET 323
11.8 PEMAKAIAN MEDAN MAGNET..... 326
11.9 ALAT-ALAT UKUR LISTRIK 329
11.10 GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK 331
11.11 UJI KOMPETENSI 336

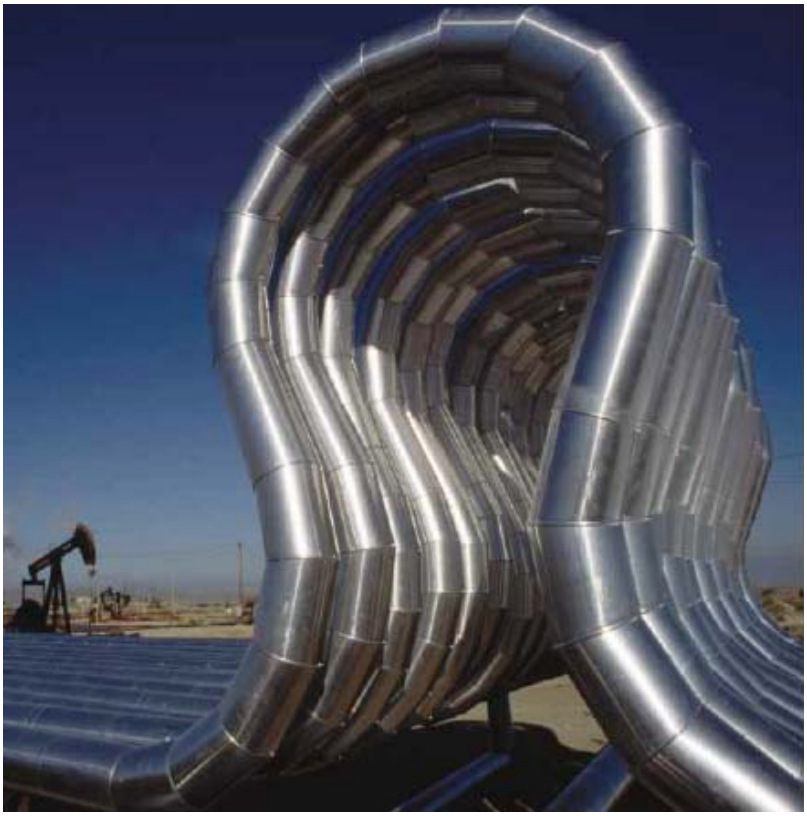
BUKU JILID 3

BAB 12 341
OPTIKA GEOMETRI 341
12.1. OPTIKA GEOMETRI..... 344
12.2. SIFAT GELOMBANG DARI CAHAYA 370
12.3. ALAT-ALAT OPTIK 376
12.4. PERCOBAAN..... 388
12.5. SOAL UJI KOMPETENSI..... 389
12.6. RANGKUMAN..... 390
12.7. SOAL-SOAL..... 393
BAB 13 397
LISTRIK STATIS DAN DINAMIS..... 397
13.1 URAIAN DAN CONTOH SOAL..... 399
13.2 MUATAN LISTRIK 399
13.3. HUKUM COULOMB..... 400
13.4 MEDAN LISTRIK..... 406
13.5 KUAT MEDAN LISTRIK..... 408
13.6 HUKUM GAUSS 412
13.7 POTENSIAL DAN ENERGI POTENSIAL 417
13.8 KAPASITOR..... 420
13.9 UJI KOMPETENSI 434
BAB 14 437
RANGKAIAN ARUS SEARAH..... 437
14.1 ARUS SEARAH DALAM TINJAU MIKROSKOPIS ... 440
14.2 HUKUM OHM..... 446
14.3 GGL DAN RESISTANSI DALAM 447
14.4 HUKUM KIRCHHOFF..... 450
14.5 SAMBUNGAN RESISTOR..... 453

14.6 RANGKUMAN 478
14.7 SOAL UJI KOMPETENSI 479
BAB 15 487
ARUS BOLAK BALIK 487
15.1 RESISTOR DALAM RANGKAIAN SUMBER TEGANGAN SEARAH 490
15.2 GEJALA PERALIHAN PADA INDUKTOR 491
15.3 GEJALA TRANSIEN PADA KAPASITOR 494
15.4. SUMBER TEGANGAN BOLAK BALIK 501
15.5. RESISTOR DALAM RANGKAIAN SUMBER TEGANGAN BOLAK BALIK 502
15.6. NILAI ROOT–MEANS–SQUARED (RMS) UNTUK TEGANGAN DAN ARUS BOLAK BALIK 504
15.7. DAYA DALAM RANGKAIAN ARUS BOLAK BALIK .. 505
15.8. INDUKTOR DALAM RANGKAIAN ARUS BOLAK BALIK 506
15.9. RANGKAIAN *RLC*–SERI 510
15.10 IMPEDANSI 511
15.11 PERUMUSAN IMPEDANSI RANGKAIAN *RL*–SERI 515
15.12 PERUMUSAN IMPEDANSI RANGKAIAN *RC*–SERI 515
15.13 PERUMUSAN IMPEDANSI RANGKAIAN *RLC*–SERI 518
15.14 RESONANSI PADA RANGKAIAN *RLC*–SERI 519
15.15 RINGKASAN RANGKAIAN *RLC*–SERI DALAM ARUS BOLAK BALIK 521
15.16. SOAL UJI KOMPETENSI 529
15.17 RANGKUMAN 534

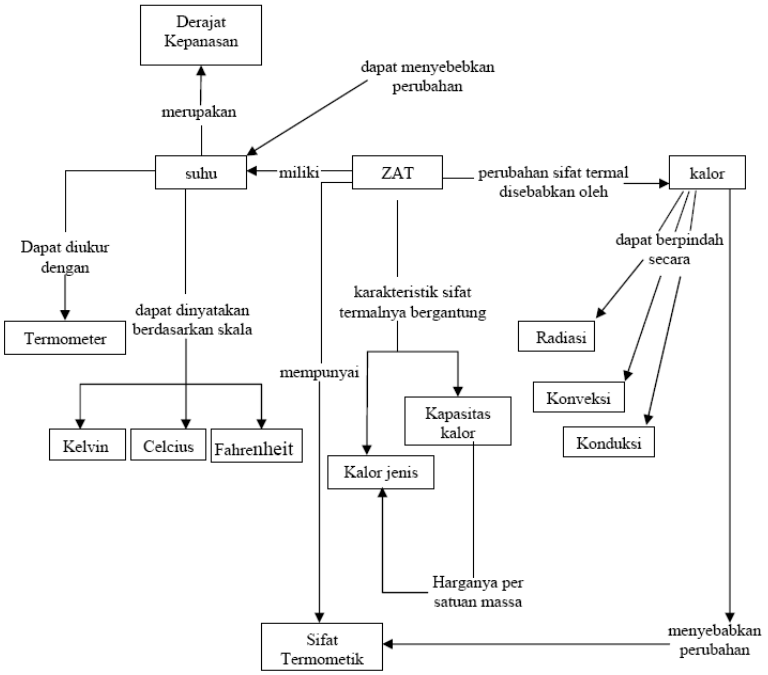
LAMPIRAN A DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN B GLOSARIUM

BAB 7
SUHU DAN KALOR



▲ *Why would someone designing a pipeline include these strange loops? Pipelines carrying liquids often contain loops such as these to allow for expansion and contraction as the temperature changes. We will study thermal expansion in this chapter. (Lowell Georgia/CORBIS)*

Peta Konsep


Derajat Kepanasan
merupakan
dapat menyebebkan perubahan
suhu
miliki
ZAT
perubahan sifat termal disebabkan oleh
kalor
Dapat diukur dengan
Termometer
dapat dinyatakan berdasarkan skala
Kelvin
Celcius
Fahrenheit
karakteristik sifat termalnya bergantung
mempunyai
Kapasitas kalor
Kalor jenis
Harganya per satuan massa
dapat berpindah secara
Radiasi
Konveksi
Konduksi
Sifat Termometik
menyebabkan perubahan

7.1 PENGUKURAN TEMPERATUR

Temperatur biasanya dinyatakan sebagai fungsi salah satu koordinat termodinamika lainnya. Koordinat ini disebut sebagai sifat termodinamikannya. Pengukuran temperatur mengacu pada satu harga terperatur tertentu yang biasanya disebut titik tetap. Sebagai titik tetap dapat dipakai titik tripel air, yaitu temperatur tertentu pada saat air, es, dan uap air berada dalam kesetimbangan fase. Besarnya titik tripel air, T_p = 273,16 Kelvin.

Persamaan yang menyatakan hubungan antara temperatur dan sifat termometriknya berbentuk:

$$T(x) = 273{,}16 \cdot \frac{x}{x_{tp}} \text{ Kelvin} \qquad \text{.....(7.1)}$$

Dimana,

x = besaran yang menjadi sifat termometriknya
x_{tp} = harga x pada titik tripel air
$T(x)$ = fungsi termometrik

Alat ntuk mengukur temperatur disebut termometer. Berapa bentuk fungsi termometrik untuk berbagai termometer seperti berikut ini:

1. Termometer gas volume tetap.

$$T(\mathrm{P}) = 273{,}16 \cdot \frac{P}{P_{tp}} \qquad \text{.....(7.2)}$$

Dengan, P= tekanan yang ditunjukkan termometer pada saat pengukuran.

P_{tp} = tekanan yang ditunjukkan termometer pada temperatur titik tripel air.

2.Termometer hambatan listrik.

$$T(R) = 273{,}16 \frac{R}{R_{tp}} \text{ Kelvin} \qquad \text{.....(7.3)}$$

Dengan, R = harga hambatan yang ditunjukkan termometer pada saat pengukuran R_{tp} = harga hambatan yang ditunjukkan termometer pada temperatur titik tripel air.

3.Termometer termokopel.

$$T(\varepsilon) = 273{,}16 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{tp}} \text{ Kelvin} \qquad \text{.....(7.4)}$$

Dengan,

ε = tegangan yang ditunjukkan termometer pada saat pengukuran.

ε_{tp} = tegangan yang ditunjukkan termometer pada temperatur titik tripel air.

7.2 TEMPERATUR GAS IDEAL, TERMOMETER CELCIUS, DAN TERMOMETER FAHRENHEIT

Perbendaan macam (jenis) gas yang dugunakan pada termometer gas volume tetap memberikan perbendaan harga temperatur dari zat yang diukur. Akan tetapi, dari hasil eksperimen didapatkan bahwa jika P_{tp} dari setiap macam gas pada termometer gas volume tetap tersebut harganya dibuat mendekati Nol ($P_{tp} \rightarrow 0$), maka hasil pengukuran temperatur suatu zat menunjukkan harga yang sama untuk setiap macam gas yang digunakan. Harga temperatur yang tidak bergantung pada jenis gas (yang digunakan pada termometer gas volume tetap) disebut temperatur gas ideal. Fungsi termometrik untuk temperatur gas ideal adalah:

$$T = 273{,}16 \lim_{P_{tp} \to 0} \left(\frac{P}{P_{tp}} \right) \text{ Kelvin} \qquad .....(7.5)$$

Termometer Celcius mengambil patokan titik lebur es/titik beku air sebagai titik ke nol derajat (0^oC) dan titik didih air sebagai titik ke seratus derajat (100^oC). Semua patokan tersebut diukur pada tekanan 1 atmosfer standar.

Termometer Celcius mempunyai skala yang sama dengan temperatur gas ideal. Harga titik tripel air menurut termometer Celcius adalah:

$\tau_{tp} = 0{,}01^oC$

Hubungan antara temperatur Celcius dan temperatur Kelvin dinyatakan dengan:

$$\tau(^oC) = T(K) - 273{,}15 \qquad .....(7.6)$$

Termometer Fahrenheit mengambila patokan titik lebur es/titik beku air sebagai skala yang ke -32^oF dan titik didih air sebagai skala yang ke -212^oF. Hubungan antara Celcius dan Fahrenheit dinyataka dengan:

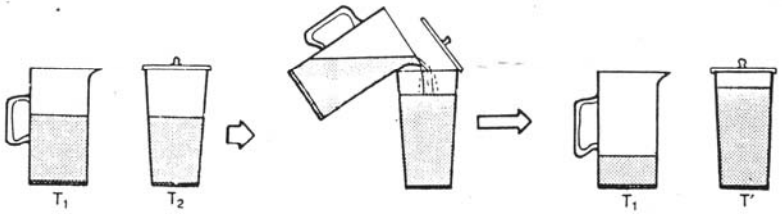
$$\tau_C(^oC) = \left(32 + \frac{9}{5}\tau_C \right)^0 F \qquad . \quad .....(7.7a)$$

atau

$$\tau_F(^oF) = \frac{5}{9}\left(\tau_F - 32\right)^0 C \qquad .....(7.7b)$$

7.3 ASAS BLACK DAN KALORIMETRI

Apabila pada kondisi adiabatis dicampurkan 2 macam zat yang temperaturnya mula-mula berbeda, maka pada saat tercapai kesetimbangan, banyaknya kalor yang dilepas oleh zat yang temperaturnya mula-mula tinggi sama dengan banyaknya kalor yang diserap oleh zat yang temperaturnya mula-mula rendah.



Gambar 7.1 Aplikasi Asas Black

Pernyataan di atas dikenal sebagai asas Black. Gambar 7.1 menunjukkan pencampuran 2 macam zat yang menurut asas Black berlaku:

$$Q_{lepas} = Q_{isap}$$

Atau,

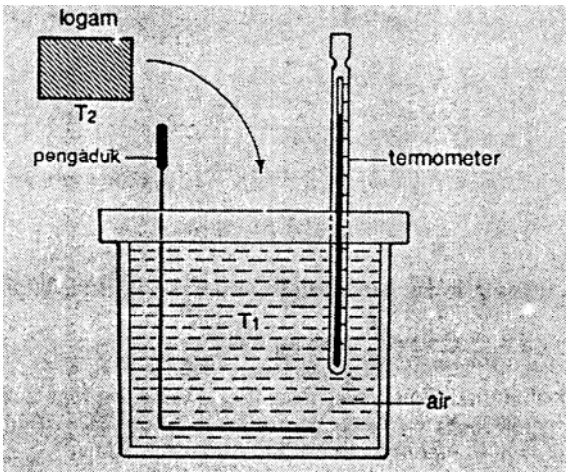
$$m_1 \,.\, c_1 \,(T_1 - T') = m_2 \,.\, c_2 \,.\, (T' - T_2)$$

dimana c_1 dan c_2 menyatakan kalor jenis zat 1 dan zat 2.

Apabila diketahui harga kalor jenis suatu zat, maka dapat ditentukanharga kalor jenis zat yang lain berdasarkan azas Black. Prinsip pengukuran seperti ini disebut kalorimetri. Alat pengukur kalor jenis zat berdasarkan prinsip kalorimatri disebut kalorimeter. Bagan dari kalorimeter ditunjukkan oleh Gambar 7.2. Tabung bagian dalam kalorimeter terbuat dari logam (biasanya aluminium atau tembaga) dan sudah diketahuikalor jenisnya. Tabung tersebut diisi air hingga penuh logam yang akan

diukur panas jenisnya dipanaskan dulu dan kemudian dimasukkan ke dalam kalorimeter.

Pada setiap kalorimeter biasanya diketahui kapasitan panasnya yang disebut harga air kalorimeter (H_a) yaitu hasil kali antara massa kalorimeter dengan kalor jenisnya. Jadi kalor yang diserap oleh kalorimeter dapat dituliskan sebagai:



Gambar 7.2 Bagan Kalorimeter

$$Q_k = M_k \,.\, c_k \,.\, T$$

Atau

$$Q_k = H_a \,.\, \Delta T$$

Dengan

$$H_a = M_k \,.\, c_k.$$

7.4 HANTARAN KALOR.

Kalor dapat mengalir dari suatu tempat ke tempat lainnyamelalui 3 macam cara, yaitu *konduksi, konveksi, dan radiasi*

Konduksi kalor pada suatu zat adalah perambatan kalor yang terjadi melalui vibrasi molekul-molekul zat tersebut. Jadi pada saat terjadi konduksi kalor, molekul-molekul zat tidak berpindah

tempat (relatif diam). Laju aliran kalor konduksi dinyatakan dengan persamaan :

$$\frac{\delta Q}{dt} = -KA\,\frac{dT}{dx} \qquad \text{.....(7.8)}$$

K menyatakan konduktivitas termal, *A* adalah luas penampang zat yang dilalui kalor, *t* adalah waktu aliran, dan *x* adalah jarak yang ditempuh oleh aliran kalor tersebut. Harga $\frac{dT}{dx}$ disebut *gradien temperatur*. Untuk zat padat homogen harga $\frac{dT}{dx}$ mendekati harga $\frac{\Delta T}{dx}$, atau $\frac{dT}{dx} = \frac{\Delta T}{\Delta x}$.

Konduktivitas termal *K* untuk zat padat pada umumnya konstan dan untuk setiap jenis zat mempunyai harga *K* tertentu.

Pada konveksi kalor, molekul-molekul yang menghantarkan kalor ikut bergerak sesuai dengan gerak aliran kalor. Aliran kalor terjadi padafluida (zat cair dan gas) yang molekul-molekulnya mudah bergerak. Laju aliran kalor konveksi dinyatakan oleh persamaan :

$$\frac{\delta Q}{dt} = h\,A\,\Delta T \qquad \text{.....(7.9)}$$

h disebut koefisien konveksi kalor yang harganya bergantung dari bermacam-macam faktor, seperti viskositas, bentuk permukaan zat, dan macam fluida. Persamaan (7.9) diperoleh secara empiris.

Radiasi kalor adalah kalor yang dihantarkan dalam bentuk radiasi gelombang elektromagnetik. *Enrgi radiasi* per satuan waktu persatuan luas, yang dipancarkan oleh suatu benda disebut daya radiasi. Daya radiasi yang dipancarkan oleh bneda hitam pada temperatur *T* dinyatakan dengan hukum Stefan – Boltzmann:

$$R_\beta = \sigma T^4 \qquad \text{.....(7.10)}$$

dengan R_β menyatakan daya radiasi yang dipancarkan oleh benda-benda hitam dan σ adalah suatu konstanta yang harganya,

$\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ watt m^{-2} K^{-4}.

Untuk benda yang bukan benda hitam :

$$R = e\,\sigma T^4 \qquad \text{.....(7.11)}$$

e adalah faktor emisivitas yang harganya $0 < e < 1$ dan untuk benda hitam $e = 1$.
Besaran δQ menyatakan sejumlah kecil kalor yang mengalir dalam interval waktu dt. Jadi $\frac{\delta Q}{dt}$ menyatakan laju aliran kalor.

Jika suatu benda yang luas permukaannya A dan temperaturnya T_2 menyerap energi radiasi yang dipancarkan oleh benda lain yang temperaturnya T_1 ($T_1 > T_2$), maka benda pertama akan terjadi perpindahan kalor sebesar :

$$\frac{\delta Q}{dt} = \varepsilon\sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right) \quad \text{.....(7.12)}$$

ε adalah suatu konstanta berdimensi luas yang bergantung pada luas permukaan dan emisivitas kedua benda.

SOAL-SOAL DENGAN PENYELESAIANNYA

1.1) Suatu gas berada di dalam tabung yang tertutup oleh piston.
   a. Tentukan apa yang menjadi permukaan batas dan apa yang menjadi lingkungan!
   b. Tentukan koordinat termodinamika dari sistem ini!

   Jawab:
   a. Permukaan batasnya adalah permukaan tabung dan permukaan piston sebelah dalam. Permukaan batas ini berubah-ubah (membesar atau mengecil) sesuai dengan perubahan posisi piston.
   b. Dalam keadaan setimbang, keadaan sistem biasanya direpresentasikan dengan besaran P, V, dan T.

1.2) Untuk sistem gelembung sambun, tentukan:
   a. permukaan batas
   b. koodinat termodinamika

   Jawab:
   a. Permukaan batasnya adalah permukaan selaput gelembung di sebelah dalam dan luar.
   b. Koordinat termodinamikanya adalah γ (tegangan permukaan), A (luas permukaan), dan T.

1.3) Pada permukaan titik tripel air, tekanan gas pada termometer gas menunjukkan 6,8 atmosfer (atm).

a. Berapakah besarnya temperatur suatu zat yang pada waktu pengukuran menunjukkan tekanan sebesar 10,2 atm?
b. Berapakah besarnya tekanan yang ditunjukkan termometer jika temperatur zat yang diukur besarnya 300 Kelvin?

Jawab:

a. $T = 273{,}16 \text{ x } \frac{P}{P_{tp}} = 273{,}16 \text{ x } \frac{10{,}2}{6{,}8} = 409{,}74$ Kelvin

b. $T = 273{,}16 \text{ x } \frac{P}{P_{tp}}$

$$P = \frac{T \, x \, P_{tp}}{273{,}16} = \frac{300 \, x \, 6{,}8}{273{,}16} = 7{,}49$$

1.4) Dengan menggunakan termometer hambatan listrik platina, didapatkan harga hambatan termometer pada titik tripel air sebesar $R_{tp} = 9{,}83$ ohm.

a. Berapakah besarnya temperatur suatu benda yang pada saat pengukuran menunjukkan hambatan termometer sebesar 16,31 ohm?
b. Berapakah besarnya hambatan yang ditunjukkan termometer jika benda yang diukur mempunyai temperatur 373,16 Kelvin?

Jawab:

a. $T = 273{,}16 \text{ x } \frac{R}{R_{tp}} = 273{,}16 \text{ x } \frac{16{,}31}{9{,}83} = 453{,}23$ Kelvin.

b. $T = 273{,}16 \, x \, \frac{R}{R_{tp}}$

$$R = \frac{T \, x \, R_{tp}}{273{,}16} = \frac{373{,}16 \, x \, 9{,}83}{273{,}16} = 13{,}43 \text{ ohm}$$

1.5) Suatu gas mempunyai temperatur -5^{o}C.

a. Tentukan besarnya temperatur gas tersebut dalam skala Kelvin!

b. Tentukan besarnya temperatur gas tersebut dalam skala Fahrenheit!

Jawab:

a. $t = (T - 273{,}15)^{o}\text{C}$.
$T = (t + 273{,}15)$ K
karena $t = -5^{o}\text{C}$., maka $T = 268{,}15$ K

b. $t' = \left(\frac{9}{5}\text{t} + 32\right)^{o}\text{F}$

$= \left(\frac{9}{5}x(-5)+32\right)^{o}\text{F} = 23^{o}\text{F}$

1.6) Tentukan harga temperatur suatu benda jika skala Fahrenheit menunjukkan harga yang sama!

Jawab:

$\tau_C = \tau_F$

$\tau_C = \frac{9}{5}\ \tau_C + 32$

$\frac{4}{5}\ \tau_C = -32$

$\tau_C = -40$

Jadi, harga temperatur tersebut -40^{o}C atau -40^{o}F.

1.7) Pesawat ulang-alik Colombia menggunakan helium cair sebagai bahan bakar utama roketnya. Helium mempunyai titik didih 5,25 Kelvin. Tentukan besarnya titik didih helium dalam ^{o}C dan dalam ^{o}F!

Jawab:

Titik didih helium.

$T = 273{,}15 = 5{,}25 + \tau$

$\tau = \text{T} - 273{,}15 = 5{,}25 - 273{,}15$

$\tau = -268{,}9^{o}\text{C}$

Dalam skala Fahrenheit:

$\tau = \frac{9}{5}\ t + 32$

$= \frac{9}{5}$ x (-268,9) + 32

= -484,02 + 32

$= -452{,}02^{o}F$

1.8) Suatu temperatur θ diandaikan sebagai fungsi dari temperatur Celcius t dalam bentuk:

$\theta = a\tau^2 + b$

Apabila $\theta = 10$ menunjukkan titik lebur es dan $\theta = 100$ menunjukkan titik didih air pada tekanan 1 atm standar, tentukan:

a. Konstanta a dan b.
b. Temperatur θ untuk titik didih nitrogen yang menurut skala Celcius besarnya $\tau = 32{,}78^{o}C$.

Jawab:

a. Untuk titik lebir es $\tau = 0^{o}C$ sehinggan didapatkan harga konstanta b = 10.

Untuk titik didih air $\tau = 100^{o}C$, sehingga didapatkan:

$100 = a10^4 + 10$

$a = 9 \times 10^{-3}$

b. Titik didih nitrogen, $\tau = -195{,}8^{o}C$

$\theta = 9 \times 10^{-3} \times (-195{,}8) + 10$

$\theta = 11{,}76^{o}C$

1.9) Lihat gambar di bawah ini! Berapakah besarnya tekanan gas di dalam tabung jika massa piston 2 kg dan g = 9,81 m/det^2. Diketahui tekanan udara luar = 1 atm standar dan jari-jari penampang tabung r = 10 cm.

Jawab:

Luas penampang tabung :

$A = \pi r^2 = 3{,}14 \times 100\ cm^2$

$= 314\ cm^2 = 3{,}14 \times 10^{-2}\ m^2$

Tekanan yang dilakukan piston pada gas.

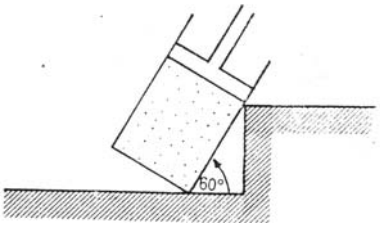
$$P_{piston} = \frac{mg \cos 60^{o}}{A}$$

$$P_{piston} = \frac{2.9{,}81.05}{3{,}14.10^{-2}} = 312{,}42\ Pa$$

$P_{gas} = P_{ud} + P_{piston}$

$P_{gas} = 1{,}013 \times 10^5\ Pa + 312{,}42\ Pa$

$= 1{,}044 \times Pa$



1.10) Untuk gambar berikut ini, berapakah ketinggian air pada bejana A jika tekanan piston terhadap permukaan air pada bejana B, $P_b = 5 \times 10^3$ Pascal, $\rho_{air} = 10^3$ kg/m^3, dan g = 9,81 m/det^2?

(Ketinggian air dihitung terhadap permukaan air di bejana B)

Jawab:

$P_a = P_{ud} + pgh$

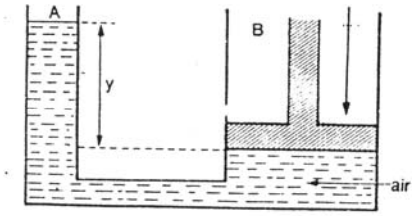
$P_b = P_{piston} + P_{ud}$

Untuk sistem setimbang,

$pgh = P_{piston}$

$$y = \frac{P_{piston}}{Pg} = \frac{5 \times 10^3}{103 \times 9,81}$$

$= 0,059$ m



1.13) Sebuah lempeng kaca tebalnya 20 cm, luas permukaannya 1 m^2 dan konduktivitas termalnya 1,3 watt m^{-1} K^{-1},

mempunyai beda temperatur antara dua permukaannya sebesar ΔT = 30^0C.

Hitunglah laju aliran konduksi kalor di dalam lempeng kaca tersebut.

Jawab:

Anggap bahwa kaca tersebut homogen.

$$\frac{\delta Q}{dt} = K A \frac{\Delta T}{d}$$

$$= 1{,}3 \text{ x } 1 \text{ x } \frac{30}{20 x 10^{-2}} \text{ J/det}$$

$$= 195 \text{ J/det}$$

1.14) Sebuah lempeng terdiri dari 2 lapisan bahan yang tebalnya masing-masing L_1 dan L_2 dan konduktivitas termalnya K_1 dan K_2. Jika luas penampang lempeng tersebut adalah A, buktikan bahwa laju aliran kalor pada lempeng tersebut dapat dinyatakan dengan

$$\frac{\delta Q}{dt} = \frac{A \Delta T}{\left[\frac{L_1}{K_1}\right] + \left[\frac{L_2}{K_2}\right]} \qquad \text{.....(7.17)}$$

ΔT adalah beda temperatur antara dua permukaan lempeng.

Jawab :

Untuk lapisan 1 : $\left(\frac{\delta Q}{dt}\right)_1 = K_1 A \frac{(T_1 - T)}{L_1}$ .....(7.13)

Untuk lapisan 2 : $\left(\frac{\delta Q}{dt}\right)_2 = K_2 A \frac{(T - T_2)}{L_2}$ .....(7.14)

Untuk aliran *Steady* (tunak),

$$\left[\frac{\delta Q}{dt}\right]_1 = \left[\frac{\delta Q}{dt}\right]_2 = \left[\frac{\delta Q}{dt}\right]$$

$$\frac{K_1 A(T_1 - T)}{L_1} = \frac{K_2 A(T - T_2)}{L_2} \quad \text{..... (7.15)}$$

Dengan mengubah $(T - T_2)$ menjadi,
$(T - T_2) = (T - T_1)(T_1 - T_2)$
dan kemudian menyelesaikan persamaan (7.15) dihasilkan,

$$(T_1 - T) = \frac{\left[\frac{K_2}{L_2}\right](T_1 - T_2)}{\left[\frac{K_1}{L_1} + \frac{K_2}{L_2}\right]} = \frac{\left[\frac{K_2}{L_2}\right]\Delta T}{\left[\frac{K_1}{L_1} + \frac{K_2}{L_2}\right]} \quad \text{..... (7.16)}$$

Substitusikan persamaan (7.16) ke dalam persamaan (7.13) sehingga didapatkan,

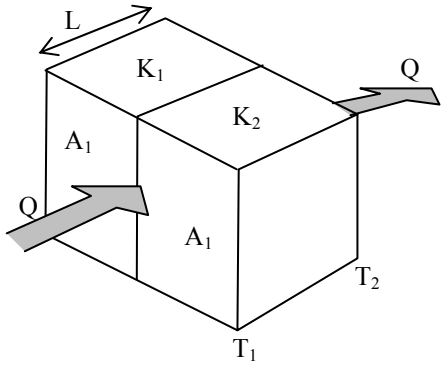
$$\left(\frac{\delta Q}{dt}\right)_1 = \left(\frac{\delta Q}{dt}\right) = \frac{A\,\Delta T}{\left[\frac{L_1}{K_1}\right]\left[\frac{L_2}{K_2}\right]} \quad \Leftarrow \text{persamaan (7.17)}$$

1.15) Buktikan bahwa untuk susunan lempeng seperti gambar di bawah ini besarnya laju aliran kalor $\frac{\delta Q}{dt} = \Delta T\left[\left(\frac{K_1 A_1}{L} + \frac{K_2 A_2}{L}\right)\right]$

Jawab : $\frac{\delta Q}{dt} = \left(\frac{\delta Q}{dt}\right)_1 + \left(\frac{\delta Q}{dt}\right)_2$

$$\frac{\delta Q}{dt} = \frac{K_1 A_1 \Delta T}{L} + \frac{K_2 A_2 \Delta T}{L}$$

$$\frac{\delta Q}{dt} = \Delta T\left[\frac{K_1 A_1}{L} + \frac{K_2 A_2}{L}\right]$$



Catatan :
Dari soal 2 dan 3 didapatkan bahwa susunan lempeng dapat dianalogikan dengan hambatan pada rangkaian listrik,

$$\Delta V \rightarrow \Delta T$$

$$i \rightarrow \frac{\delta Q}{dt}$$

$$R \rightarrow \frac{L}{KA}$$

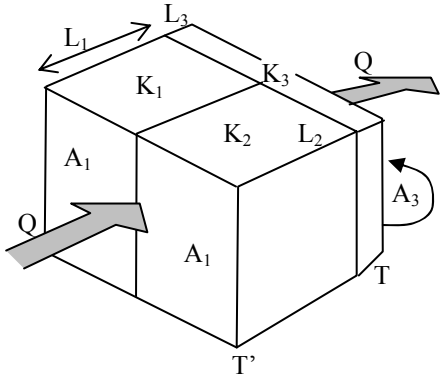
dengan ΔV, i, dan R masing-masing menyatakan tegangan, arus dan hambatan listrik pada suatu rangkaian listrik.

Susunan lempeng seperti pada soal 2 analog dengan susunan hambatan *seri* dan susunan lempeng seperti pada soal 3 analog dengan susunan hambatan *pararel*.

1.16) Tiga buah pelat logam disusun seperti pada gambar di bawah ini

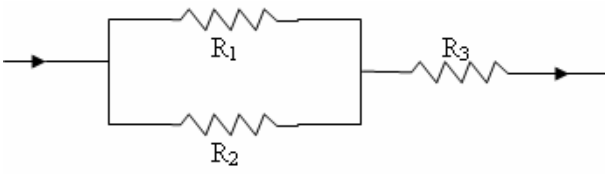
$L_1 = L_2 = 2\,L_3 = 0{,}2$ m
$A_1 = A_2 = 0{,}5\,A_3 = 2{,}5 \times 10^2$ m^2
$K_1 = 3{,}8 \times 10^3$ watt m^{-1} K^{-1}
$K_2 = 1{,}7 \times 10^3$ watt m^{-1} K^{-1}
$K_3 = 1{,}5 \times 10^2$ watt m^{-1} K^{-1}
$T = 300$ K
$T' = 400$ K

Hitunglah laju aliran kalor yang melalui susunan pelat tersebut !



Jawab :

Susunan pelat tersebut analog dengan susunan rangkaian hambatan di bawah ini



Yang menghasilkan hambatan total:

$$R = \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) + R_3$$

Laju aliran kalor yang melalui susunan pelat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\frac{\delta Q}{dt} = \frac{\Delta T}{R}$$

Dengan $R_1 = \frac{L_1}{K_1 A_1}$ kita dapatkan,

$$R_1 = \frac{L_1}{K_1 A_1} = \frac{0,2}{3,8 \times 10^3 \times 2,5 \times 10^{-2}} = 2,1 \times 10^{-3} \text{ K watt}^{-1}$$

$$R_2 = \frac{L_2}{K_2 A_2} = \frac{0,2}{1,7 \times 10^3 \times 2,5 \times 10^{-2}} = 4,7 \times 10^{-2} \text{ K watt}^{-1}$$

$$R_3 = \frac{L_3}{K_3 A_3} = \frac{0,1}{1,5 \times 10^2 \times 2,5 \times 10^{-2}} = 1,33 \times 10^{-2} \text{ K watt}^{-1}$$

$= 1,45 \times 10^{-3} + 1,33 \times 10^{-2}$ K watt^{-1}

Jadi,

$$\frac{\delta Q}{dt} = \frac{(400 - 300)}{14,7 \times 10^{-3}} \text{ watt}$$

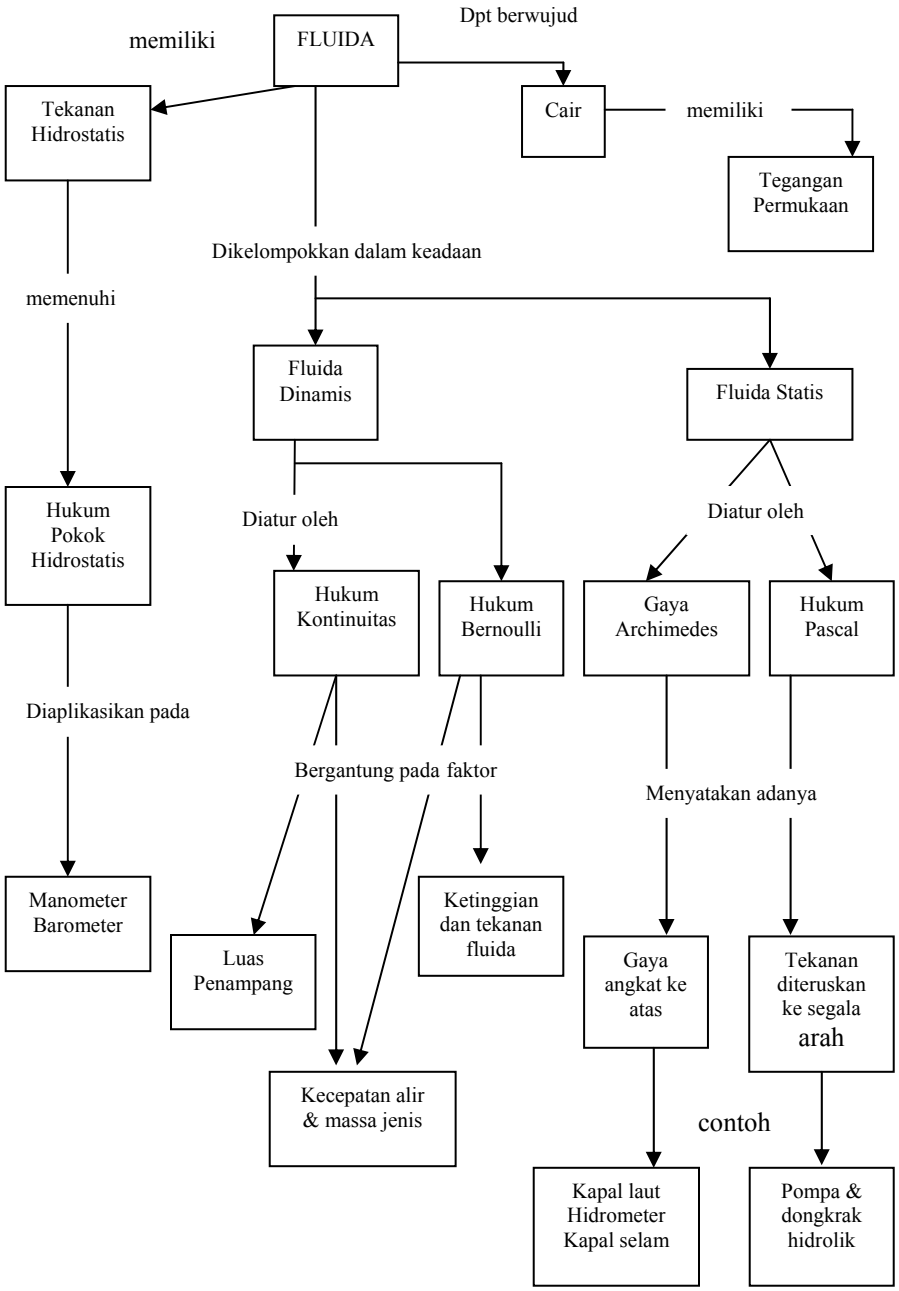
= 6,8 Kilowatt.

BAB 8
DINAMIKA FLUIDA



Fluida merupakan zat yang tidak mempunyai bentuk dan volume yang permanen, melainkan mengambil bentuk tempat sesuai yang ditempatinya serta memiliki kemampuan untuk mengalir. Dua zat yang umumnya disebut fluida adalah zat cair dan gas. Materi di bab ini pembahasan difokuskan pada fluida zat cair. Ketika Anda menyelam ke dalam kolam air dengan posisi semakin ke dalam dari permukaan air kolam, di telinga akan terasa sakit yang semakin bertambah, apa yang menyebabkan ini? Di sisi lain kita bisa berada dalam keadaan melayang atau mengapung dalam air kolam, sedangkan kita mempunyai berat badan bagaimana fenomena itu bisa terjadi? Fenomena di atas diakibatkan oleh gejala fisis yaitu tekanan hidrostatis yang diakibatkan oleh air kolam pada telinga dan gaya berat badan diseimbangkan oleh gaya apung air kolam. Besarnya gaya apung air kolam besarnya sama dengan berat air yang dipindahkan oleh badan kita yang tercelup dalam air kolam.

PETA KONSEP


memiliki
FLUIDA
Dpt berwujud
Tekanan Hidrostatis
Cair
memiliki
Tegangan Permukaan
Dikelompokkan dalam keadaan
memenuhi
Fluida Dinamis
Fluida Statis
Hukum Pokok Hidrostatis
Diatur oleh
Diatur oleh
Hukum Kontinuitas
Hukum Bernoulli
Gaya Archimedes
Hukum Pascal
Diaplikasikan pada
Bergantung pada faktor
Menyatakan adanya
Manometer Barometer
Luas Penampang
Ketinggian dan tekanan fluida
Gaya angkat ke atas
Tekanan diteruskan ke segala arah
Kecepatan alir & massa jenis
contoh
Kapal laut Hidrometer Kapal selam
Pompa & dongkrak hidrolik

A. FLUIDA STATIS

A.1. Cek Kemampuan Pra Syarat

Sebelum mempelajari materi subbab ini, silahkan anda mengerjakan soal-soal berikut ini di buku latihan. Jika anda dapat mengerjakan dengan baik dan benar, akan mempermudah dalam mempelajari materi berikutnya.

1. (a). Definisi dan satuan dalam SI dari massa jenis?
   (b). Nyatakan satuan dari massa jenis 1 gram/cm^3 ke dalam satuan kg/m^3.
2. Sebuah bola beton berdiameter 20 cm memiliki massa 5 kg. Berapakah nilai massa jenis bola beton tersebut?
3. Apa yang dimaksud dan satuan dalam SI dari tekanan?

A.2. Tekanan

Tekanan adalah besaran fisika yang merupakan perbandingan antara gaya normal (tegak lurus) yang bekerja pada suatu bidang permukaan dengan luas bidang permukaan tersebut.

Rumus tekanan:

$$P = \frac{F}{A} \qquad (8.1)$$

dengan F : gaya, newton dan A: luas bidang permukaan, m^2.

Satuan tekanan dalam SI adalah *pascal (Pa) atau N/m^2*. 1 Pa = 1 N/m^2.

Beberapa satuan tekanan yang lain yang sering digunakan dalam beberapa keperluan adalah *atmosfer (atm), centimeter Hg (cmHg), milibar (mb),*dan *torr*.

1 mb = 10^5 Pa ; 1 atm = 76 cm Hg=1,01.10^5 Pa = 1,01 mb.

1 torr = 1 mmHg

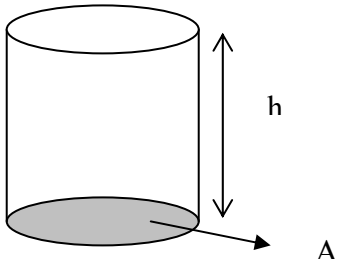
Kegiatan 1.

1. Ambil benda berbentuk kubus sebarang ukuran.
2. Ukur luas sisi balok.
3. Timbang massa balok.
4. Hitung berat balok.
5. Letakkan balok di permukaan lantai.
6. Tentukan besar tekanan yang diberikan balok terhadap lantai yang diberikan oleh gaya berat balok terhadap permukaan lantai. Nyatakan satuan tekanan dalam SI.

Tugas 1.
Tentukan besar tekanan yang diberikan oleh berat badan orang yang mempunyai massa 60 kg yang berdiri pada dua kakinya pada lantai, anggap luas kedua telapak kaki orang tersebut 2 x 250 cm^2.

A.3. Hukum Pokok Hidrostatika

Tekanan zat cair dalam keadaan tidak mengalir dan hanya disebabkan oleh beratnya sendiri disebut ***tekanan hidrostatika***. Besarnya tekanan hidrostatika suatu titik dalam zat cair yang tidak bergerak dapat diturunkan sebagai berikut:



Gambar 8.1. Zat cair dalam wadah silinder

Tinjau zat cair dengan massa jenis ρ berada dalam wadah silinder dengan luas alas A dan ketinggian h seperti pada Gambar 8.1. Volume zat cair dalam wadah $V = Ah$ sehingga berat zat cair dalam wadah adalah:

$$F = mg = \rho Vg = \rho Ahg$$

dengan demikian tekanan hidrostatika di sebarang titik pada luas bidang yang diarsir

oleh zat cair dengan kedalaman h dari permukaan adalah:

$$p_h = \frac{F}{A} = \frac{\rho ghA}{A} = \rho gh \qquad (8.2)$$

dengan g : percepatan gravitasi, m/s^2 dan h : kedalaman titik dalam zat cair diukur dari permukaan zat cair, m.

Biasanya tekanan yang kita ukur adalah perbedaan tekanan dengan tekanan atmosfir, yang disebut *TEKANAN GAUGE* atau tekanan pengukur. Adapun tekanan sesungguhnya disebut tekanan mutlak, di mana :

Tekanan mutlak = tekanan gauge + tekanan atmosfer

$$p_h = p_{gauge} + p_{atm} \quad (8.3)$$

dengan tekanan atmosfer P_{atm} (p_o) = 1,01.10^5 Pa.

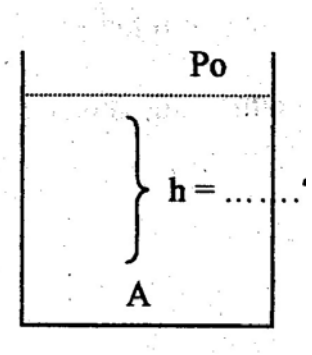
Perhatikan:

- Jika disebut tekanan pada suatu kedalaman tertentu, ini yang dimaksud adalah tekanan mutlak.
- Jika tidak diketahui dalam soal, gunakan tekanan udara luar p_o = 1 atm = 76 cmHg=1,01.10^5 Pa.

Contoh soal 8.1

Berapa kedalaman suatu posisi penyelam dalam fluida tak bergerak (air) diukur dari permukaan yang mempunyai tekanan sebesar tiga kali tekanan udara luar. (p_o = 1 atm = 10 10^5 N/m^2).

Penyelesaian:



Tekanan hidrostatis titik A :

$P_A = 3\ p_0$

Besarnya $p_A = p_0 + \rho\ .\ g\ .\ h$

$3\ p_0 = p_0 + \rho gh$

$3\ p_0 - p_0 = \rho gh$

$2\ p_0 = \rho gh$

2.10^5 N/m^2 = 10^3 kg/m^3 . 10 m/s^2 . h

jadi kedalaman posisi tersebut adalah h = 20 m dari permukaan air.

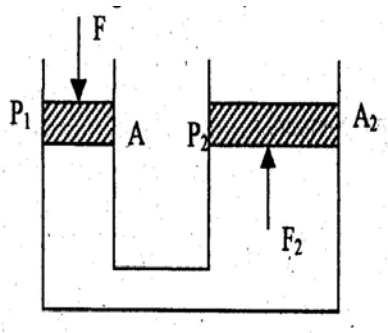
A.4. Hukum Pascal

Tekanan yang bekerja pada fluida statis dalam ruang tertutup akan diteruskan ke segala arah dengan sama rata, hal ini dikenal sebagai ***prinsip PASCAL.***

Tinjau sistem kerja penekan hidrolik seperti pada Gambar 8.2. apabila dikerjakan tekanan p_1 pada penampang A_1 maka tekanan yang sama besar akan diteruskan ke penampang A_2 sehingga memenuhi $p_1 = p_2$ dan diperoleh perumusan sebagai berikut :

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} atau\ F_1 = \frac{A_1}{A_2} F_2 atau F_1 = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 F_2 \qquad (8.4)$$

dengan D_1, D_2 adalah diameter penampang 1 dan 2.



Gambar 8.2 Sistem hidrolik

Alat-alat teknik yang menggunakan sistem prinsip Pascal adalah rem hidrolik dan pengangkat mobil dalam bengkel.

Contoh soal 8.2

Seorang pekerja bengkel memberikan gaya tekan pada pompa hidrolik dengan gaya 200 N. apabila perbandingan penampang silinder kecil dan besar 1 : 10, berapa berat beban yang dapat diangkat oleh pekerja tersebut.

Penyelesaian:

Dengan menggunakan persamaan (8.4) diperoleh :

$$F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1 = \frac{10}{1} 200\,N = 2000\,N$$

Kegiatan 2.

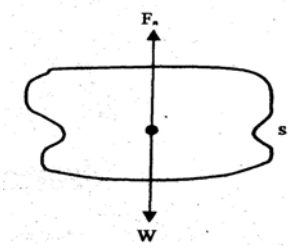
1. Amati pompa hidrolik sebarang di bengkel pencucian mobil.
2. Tentukan perbandingan penampang kecil dongkrak dan penampang pengangkat beban.
3. Tempatkan sebuah mobil pada penampang pengangkat beban.
4. Catat berat mobil yang tertera di bodi mobil.
5. Hitung berapa besar beban yang harus diberikan agar mobil dapat terangkat.

Tugas 2.
Jika diperoleh perbandingan radius penampang kecil dan besar dari sebuah pompa hidrolik 1:20, berapa besar gaya yang harus diberikan pada penampang kecil pompa agar dapat mengakat beban sebesar 3000 N?

A.5. Hukum Archimedes

Prinsip Archimedes

Di dalam fluida yang diam, suatu benda yang dicelupkan sebagian atau seluruh volumenya akan mengalami gaya tekan ke atas (gaya apung) sebesar berat fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut, yang lazim disebut ***gaya Archimedes***. Perhatikan elemen fluida yang dibatasi oleh permukaan *s* (Gambar 8.3)



Gambar 8.3 Elemen fluida yang dibatasi permukaan s.

Pada elemen ini bekerja gaya-gaya :

- gaya berat benda *W*
- gaya-gaya oleh bagian fluida yang bersifat menekan permukaan *s*, yaitu gaya angkat ke atas F_a.

Kedua gaya saling meniadakan, karena elemen berada dalam keadaan setimbang dengan kata lain gaya-gaya keatas = gaya-gaya kebawah.
Artinya resultante seluruh gaya pada permukaan *s* arahnya akan keatas, dan besarnya sama dengan berat elemen fluida tersebut dan titik tangkapnya adalah pada titik berat elemen. Dari sini diperoleh prinsip Archimedes yaitu bahwa suatu benda yang seluruhnya atau sebagian tercelup didalam satu fluida akan mendapat gaya apung sebesar dengan berat fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut.

Secara matematis hukum Archimedes diformulasikan:

$$F_a = \rho_f V_{bf} g \qquad (8.5)$$

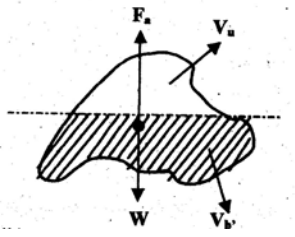
dengan V_{bf} : volume benda yang tercelup dalam fluida, m^3.
ρ_f : massa jenis fluida, kg/m^3
g : percepatan gravitasi, m/s^2

Perhatikan:
- Hukum Archimedes berlaku untuk semua fluida termasuk gas dan zat cair.
- Jika benda tercelup semua maka V_{bf} = volume benda.

Benda yang dimasukkan ke dalam zat cair, akan terjadi tiga kemungkinan keadaan yaitu *terapung, melayang dan tenggelam.* Ketiga kemungkinan keadaan tersebut terjadi ditentukan oleh perbandingan massa jenis benda dengan massa jenis fluida, syaratnya adalah:

- $\rho_{benda\,rata-rata} \langle \rho_{fluida}$: keadaan mengapung
- $\rho_{benda\,rata-rata} \rangle \rho_{fluida}$: keadaan tenggelam
- $\rho_{benda\,rata-rata} = \rho_{fluida}$: keadaan melayang

Contoh soal 8.4
Sebuah gunung es (*iceberg*) berada di tengah lautan. Berapa prosentase bagian gunung yang terlihat di udara apabila diketahui massa jenis es 0,92 gr/cm3 dan massa jenis air laut 1,03 gr/cm3.
Penyelesaian:
Berat gunung es adalah



$W = \rho_{es} V g$
Gaya apung (F_a) = berat air laut yang dipindahkan
$= \rho_{air\,laut} \cdot V_b' \cdot g$
karena kesetimbangan maka volume es yang terlihat di udara adalah:

$V_u = V_b - V_{bf}$ dengan $V_{bf} = \frac{\rho_b}{\rho_f} V_b = 0{,}89\ V_b$

Jadi bagian gunung yang muncul di udara sebesar 11%

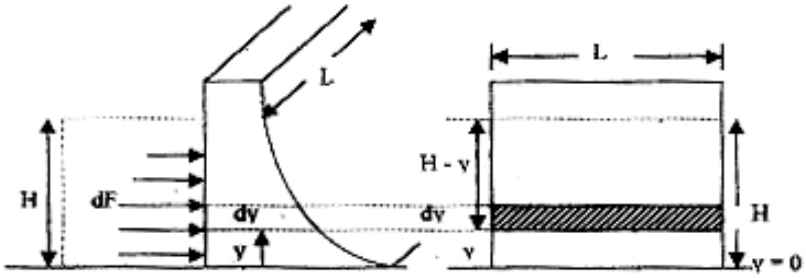
Kegiatan 3.

1. Ambil balok kayu kering dengan ukuran 10 cm x 10 cm x 10 cm yang dapat Anda peroleh di sekitar Anda.
2. Tentukan massa jenis kayu tersebut, dengan terlebih dulu menimbang massa balok.
3. Masukkan balok kayu ke dalam ember yang berisi air.
4. Amati apakah balok kayu tengelam, melayang atau mengapung?
5. Bila mengapung berapa persen bagian balok kayu yang tercelup air?
6. Catat perubahan volume air dalam ember setelah kayu dimasukkan.
7. Hitung berat beda volume air dengan terlebih dulu menghitung massa beda volume air.
8. Berapa besar gaya apung oleh air terhadap kayu tersebut?

Tugas 3.

Hitung prosentase volume gabus yang berukuran 40 cm^3 dan massa 10 gr ketika dimasukkan ke dalam air. Berapa gaya apung yang diberikan air kepada gabus?

Gaya pada Bendungan



Gambar 8.4 Gaya pada bendungan

Pengayaan:

Pada Gambar 8.4 bendungan dengan ketinggian air *H*, air bendungan menekan dinding bendungan sepanjang *L*. Gaya *dF* menekan dinding bendungan setebal *dy* pada jarak *y* dari dasar dan tekanan air pada bagian ini adalah *p*.

$$p = \rho g (H - y)$$

$$dF = p\, dA = p \,.\, dy\, L = \rho g L (H-y)\, dy$$

$$F = \int dF = \rho g L \int_0^H (H - y) dy$$

$$= \rho g L \,(Hy - \tfrac{1}{2} y^2)\Big|_0^H = \tfrac{1}{2} \rho g L H^2$$

Jadi resultan gaya horizontal yang berpengaruh pada bendungan oleh tekanan air adalah

$$F = \tfrac{1}{2} \rho g L H^2 \qquad (8.6)$$

Pengayaan:

Momen gaya *F* terhadap 0 (dasar dinding bedungan):

$$d\tau_0 = y\, dF$$

$$\int d\tau_0 = \int \rho gL \,(H - y)\, y\, dy$$

$$\tau_0 = \int_0^H \rho gL \,(H - y)\, y\, dy$$

$$= \rho gL \,(H \,.\, \tfrac{1}{2} y^2 - \tfrac{1}{3} y^3)\Big|_0^H$$

$$\tau_0 = \frac{1}{6} \rho gL\, H^3 \qquad (8.7)$$

Jika h adalah tinggi gaya resultan terhadap 0 maka :

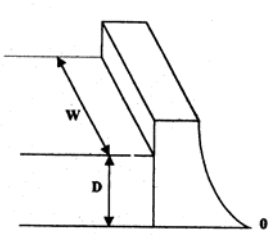
$$\tau_0 = F\, h \; atau \frac{1}{6} \rho gL\, H^3 = \tfrac{1}{2} \rho gL\, H^2 .h$$

Jadi $h = \frac{1}{3} H$

(8.8)

Dengan demikian gaya horizontal dari air yang menekan bendungan, akan bekerja pada ketinggian *1/3 H* (tinggi air) dihitung dari dasar air.

Contoh soal 8.5

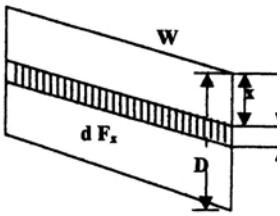


Air dalam keadaan diam setinggi 20 m berada pada sebuah bendungan (lihat gambar); lebar bendungan 100 m. Hitung resultane gaya horizontal yang berpengaruh terhadap garis melalui 0 yang sejajar dengan lebarnya bendungan.

Penyelesaian :

(a).

$$F = \tfrac{1}{2} p\, g\, W\, D^2$$
$$= \tfrac{1}{2}.10^3 kg/m^3.10 m/s^2.100 m.(20 m)^2$$
$$= 2 \,.\, 10^8 \text{ N}$$



(a) Momen oleh gaya d Fx adalah :

$$\tau = \frac{1}{6} p\, g\, W\, D^3 = \frac{1}{6}.10^3 kg/m^3 10 m/s^2.100\, m.(20\, m)^3 = \frac{4}{3}.10^9 N.m$$

Kegiatan 4.

1. Tentukan dinding bak mandi sebarang yang berisi air sebagai pengamatan.

2. Ukur lebar salah satu dinding dan ketinggian air diukur dari dasar bak.
3. Tentukan besar gaya yang harus ditahan oleh dinding bak mandi tersebut. Gunakan massa jenis air 1 gr/cm^3 dan persamaan (8.6).
4. Tentukan besar torsi terhadap dasar dinding oleh gaya yang diberikan oleh air tersebut mengggunakan persamaan (8.7).

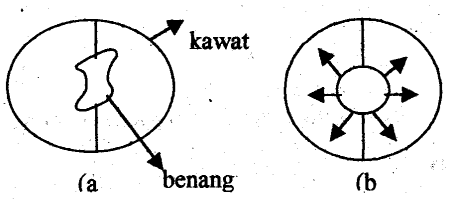
Tugas 4.
Berapakah besar gaya dan torsi pada dinding bendungan dengan lebar 100 m dengan letinggian air 20 m?

B. TEGANGAN PERMUKAAN DAN VISKOSITAS ZAT CAIR

B.1. Tegangan Permukaan Zat Cair dan Kapilaritas.

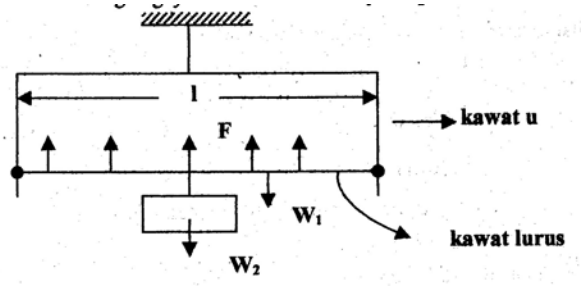
Sering terlihat peristiwa-peristiwa alam yang tidak diperhatikan dengan teliti misalnya tetes-tetes zat cair pada pipa kran yang bukan sebagai suatu aliran, mainan gelembung-gelembung sabun, pisau silet yang diletakkan perlahan-lahan di atas permukaan air yang terapung, naiknya air pada pipa kapiler. Hal tersebut dapat terjadi karena adanya gaya-gaya yang bekerja pada permukaan zat cair atau pada batas antara zat cair dengan benda lain. Fenomena itu dikenal dengan tegangan permukaan.

Peristiwa adanya tegangan permukaan bisa pula ditunjukkan pada percobaan sebagai berikut jika cincin kawat yang diberi benang seperti pada Gambar 8.5a dicelupkan kedalam larutan air sabun, kemudian dikeluarkan akan terjadi selaput sabun dan benang dapat bergerak bebas. Jika selaput sabun yang ada diantara benang dipecahkan, maka benang akan terentang membentuk suatu lingkaran. Jelas bahwa pada benang sekarang bekerja gaya-gaya keluar pada arah radial (Gambar 8.5b), gaya per dimensi panjang inilah yang dikenal dengan *tegangan permukaan.*



Gambar 8.5 Tegangan permukaan

Pengamatan lain bisa dilakukan seperti pada Gambar 8.6. Kawat yang berbentuk U dan sepotong kawat lurus lain dipasang dapat bergerak bebas pada kaki kawat. Bila kawat tersebut dicelupkan pada larutan sabun, maka kawat lurus akan tertarik keatas. Untuk mebuat ia setimbang maka harus diberi gaya W_2 sehingga dalam keadaan keseimbangan gaya tarik ke atas $F = W_1 + W_2$.



Gambar 8.6 Kawat berat W_1 diberi beban W_2 pada sistem tegangan permukaan oleh lapisan larutan sabun

Bila panjang kawat lurus adalah L, dan karena selaput air sabun mempunyai dua permukaan, maka panjang total kontak dari permukaan selaput air sabun dengan kawat adalah $2L$. Dari sini didefinisikan ***tegangan permukaan*** γ adalah hasil bagi gaya permukaan terhadap panjang permukaan dan secara matematis diformulasikan :

$$\gamma = \frac{F}{2L} \tag{8.9}$$

Satuan tegangan permukaan dinyatakan dalam dyne/cm (CGS) atau Newton/meter (MKS).

Uraian di atas hanyalah membahas gaya permukaan zat cair, yaitu yang terjadi pada lapisan molekul zat cair, yang berbatasan dengan udara.



Gambar 8.7 Selaput permukaan padat, cair uap dan cair

Disamping itu masih ada batas-batas lain yaitu antara zat padat dengan uap. Ketiga perbatasan dan selaput yang ada dilukiskan pada Gambar 8.7, yang mempunyai ketebalan beberapa molekul saja.

γ_{pc} : tegangan permukaan dari selaput padat – cair
γ_{pu} : tegangan permukaan dari selaput padat – uap
γ_{cu} : tegangan permukaan dari selaput cair – uap

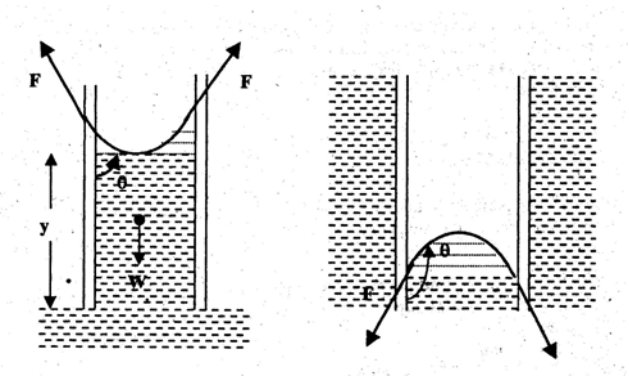
Tabel 8.1. Tegangan permukaan beberapa zat cair

Zat cair yang kontak dengan udara	Temperatur (^oC)	Tegangan permukaan ($.10^{-3}$N/m)
Air	0	75,6
Air	25	72,0
Air	80	62,6
Aseton	20	23,7
Etil alkohol	20	22,8
Gliserin	20	63,4
Air raksa	20	435

Fenomena fisis yang sering ditemui dimana salah satu faktor yang mempengaruhi terjadinya berupa tegangan permukaan adalah *gejala kapilaritas*. Kapilaritas adalah gejala fisis berupa naik / turunnya zat cair dalam media kapiler (saluran dengan diameter kecil). Besaran lain yang menentukan naik turunnya zat cair pada dinding suatu pipa kapiler selain tegangan permukaan, disebut *sudut kontak (θ)* yaitu sudut yang dibentuk oleh permukaan zat cair yang dekat dinding dengan dinding, lihat Gambar 8.8. Sudut kontak timbul akibat gaya tarik menarik antara zat yang sama (gaya kohesi) dan gaya tarik menarik antara molekul zat yang berbeda (adhesi).

Harga dari sudut kontak berubah-ubah dari 0^0 sampai 180^0 dan dibagi menjadi 2 bagian yaitu:

- Bagian pertama bila $0 < \theta < 90^0$ maka zat cair dikatakan membasahi dinding.
- Bila $90 < \theta < 180^0$ zat cair dikatakan tak membasahi dinding.



Gambar 8.8 Sudut kontak pada pipa kapiler

Jika tabung berjari-jari R maka zat cair akan bersentuhan dengan tabung sepanjang $2 \pi R$. Jika dipandang zat cair dalam silinder kapiler dengan tinggi y dan jari-jari R dan tegangan permukaan cair uap dari zat cair γ_{cu}, maka gaya k eatas total adalah :

$$F = 2 \pi R \gamma_{cu} \cos \theta \qquad (8.10)$$

Gaya ke bawah adalah gaya berat zat cair yang harganya :

$$W = \pi R^2 y \rho g \qquad (8.11)$$

dengan ρ : rapat massa zat cair, kg/m^3

g : percepatan gravitasi, m/s^2

Dari syarat kesetimbangan diperoleh :

$$\boldsymbol{W = F}$$

$$\pi R^2 y \rho g = 2\pi R \gamma_{cu} \cos \theta \qquad (8.12)$$

atau $$y = \frac{2 \gamma_{cu} \cos \theta}{R \rho g}$$

dari persamaan (8.12) terlihat bahwa harga-harga γ_{cu}, R, ρ dan g selalu berharga positip. Sedangkan cos θ bisa mengahasilkan harga positip maupun negatip. Untuk $0 < \theta < 90$, maka harga cos θ positip, sehingga diperoleh *y yang positip.* Zat cair yang demikian dikatakan *membasahi dinding*. Contohnya air dalam pipa kapiler gelas. Untuk $90 < \theta < 180$, maka harga cos θ negatip, sehingga diperoleh *y yang negatip* zat cair

yang demikian dikatakan *tak membasahi dinding*. Contohnya air raksa dalam pipa kapiler gelas.

Contoh soal 8.6.

Seorang siswa memasukkan pipa kapiler yang jari-jarinya 1 mm kedalam cair yang massa jenisnya 0,8 gr/cm^3. Ternyata sudut kontaknya 60^0 dan cairan naik setinggi 40 mm dari permukaan cairan di luar kepiler. Apabila percepatan gravitasi bumi 10 m/s^2 berapa besar tegangan permukaan zat cair tersebut.

Penyelesaian :

Dengan menggunakan persamaan (8.12) tegangan permukaan dapat dihitung:

$$\gamma = \frac{R.g.p.y}{2\cos\theta}$$

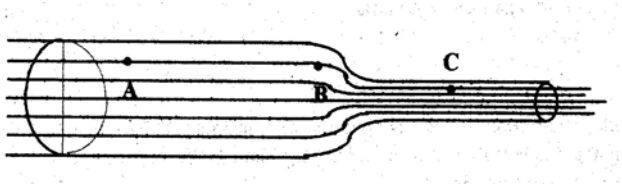
$$= \frac{10^{-3}m.10m/s^2.800kg/m^3.4.10^{-2}m}{2.\cos 60^0}$$

$$= 32.10^{-2}N/m$$

C. FLUIDA DINAMIS

C.1. Aliran Fluida

Dinamika fluida adalah cabang ilmu yang mempelajari fluida dalam keadaan bergerak. Ini merupakan salah satu cabang yang penting dalam mekanika fluida. Dalam dinamika fluida dibedakan *dua macam aliran* yaitu aliran fluida yang relatif sederhana yang disebut *aliran laminer* dan aliran yang komplek yang disebut sebagai *aliran turbulen*. Gambar 8.9 melukiskan suatu bagian pipa yang mana fluida mengalir dari kiri ke kanan. Jika aliran dari type laminer maka setiap partikel yang lewat titik A selalu melewati titik B dan titik C. Garis yang menghubungkan ketiga titik tersebut disebut garis arus atau *streamline.* Bila luas penampang pipa berlainan maka besarnya kecepatan partikel pada setiap titik juga berlainan. Tetapi kecepatan partikel-partikel pada saat melewati titik A akan sama besarnya. Demikian juga saat melewati titik B dan C.



Gambar 8.9 Aliran sederhana

Bila fluida mempunyai viskositas (kekentalan) maka akan mempunyai aliran fluida yang kecepatannya besar pada bagian tengah pipa dari pada di dekat dinding pipa. Untuk pembahasan disini, pertama dianggap bahwa fluida tidak kental sehingga kecepatan pada smeua titik pipa penampang melintang yang juga sama besar.

C.2. Persamaan Kontinuitas

Pada Gambar 8.8 dilukiskan suatu aliran fluida dalam pipa yang mempunyai penampang berbeda. Jika A_1 adalah luas penampang pada titik 1, dan v_1 kecepatannya, maka dalam t detik, partikel yang berada pada titik 1 akan berpindah sejauh ($v_1.t$) dan volume fluida yang lewat penampang A_1 adalah ($A_1 v_1 t$). Volume fluida yang lewat penampang A_1 persatuan waktu adalah $A_1 v_1$ demikian pula volume fluida yang lewat penampang A_2 per satuan waktu adalah $A_2 v_2$.

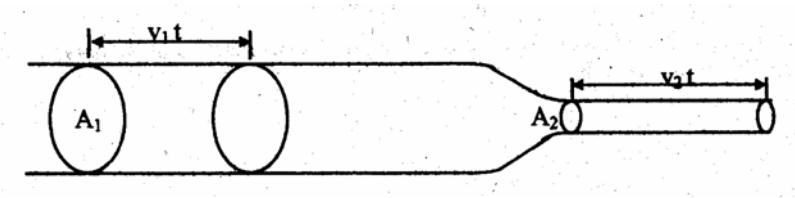
Jika fluida bersifat tak kompresibel, maka besarnya volume fluida yang lewat penampang A_1 dan A_2 persatuan waktu adalah sama besar sehingga diperoleh:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \qquad (8.13)$$

atau $v_1 = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 v_2$ dengan D_1 dan D_2 adalah diameter pipa 1 dan 2.

atau $Q = A\, v$ = konstan

Besaran Av dinamakan debit (Q) yang mempunyai satuan m^3/s (MKS) atau cm^3/s (CGS). Persamaan (8.13) dikenal sebagai *persamaan kontinuitas* untuk aliran yang mantap dan tak kompresibel. Konsekuensi dari hubungan di atas adalah bahwa kecepatan akan membesar jika luas penampang mengecil demikian juga sebaliknya.



Gambar 8.10 Aliran fluida pada pipa dengan penampang yang berbeda

Contoh soal 8.7.

Pipa berdiameter 0,2 m terhubung dengan pipa yang berdiameter 0,1 m. Jika kecepatan aliran fluida yang melewati pipa berdiameter 0,2 m sebesar 10 m/s, hitung kecepatan aliran fluida ketika melewati pipa yang berdiameter 0,1 m dan berapa besar debit fluida yang lewat pipa tersebut?

Penyelesaian:

Dengan menggunakan persamaan (8.13) diperoleh :

$$v_2 = \left(\frac{D_1}{D_1}\right)^2 v_1 = \left(\frac{0{,}2}{0{,}1}\right)^2 10 = 20 m/s$$

debit $Q = A_1 v_1 = \pi D_1^2 v_1 = \pi.0{,}2^2.10 = 0{,}4\pi$ m^3/s.

Kegiatan 5.

1. Ambil sebuah selang plastik.
2. Salah satu ujung selang disambungkan dengan sebuah kran dengan penampang lubang berdiameter 1 cm^2.
3. Buka kran / alirkan air.
4. Air yang keluar dari ujung selang gunakan untuk mengisi sebuah tempat air yang bervolume (30 x 30 x 30) cm^3.
5. Catat waktu yang dibutuhkan untuk mengisi tempat air tersebut hingga penuh.
6. Tentukan debit air yang melewati selang tersebut.
7. Hitung kecepatan aliran air yang melewati selang tersebut.

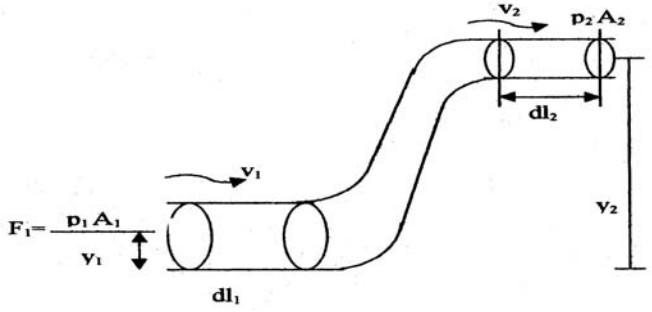
Tugas 5.

Hitung debit dan kecepatan aliran air pada kran yang dipakai untuk mengisi bak mandi di rumah Anda.

C.3. Persamaan Bernoulli

Persamaan Bernoulli merupakan persamaan dasar dari dinamika fluida di mana berhubungan dengan tekanan (p), kecepatan aliran (v) dan ketinggian (h), dari suatu pipa yang fluidanya bersifat tak kompresibel dan tak kental, yang mengalir dengan aliran yang tak turbulen. Tinjau aliran fluida pada pipa dengan ketinggian yang berbeda seperti Gambar 8.9.

Bagian sebelah kiri pipa mempunyai luas penampang A_1 dan sebelah kanan pipa mempunyai luas penampang A_2. Fluida mengalir disebabkan oleh perbedaan tekanan yang terjadi padanya. Pada bagian kiri fluida terdorong sepanjang dl_1 akibat adanya gaya $F_1 = A_1 p_1$ sedangkan pada bagian kanan dalam selang waktu yang sama akan berpindah sepanjang dl_2.



Gambar 8.11 Aliran fluida pada pipa dengan ketinggian yang berbeda

Pengayaan:

Usaha yang dilakukan oleh gaya F_1 adalah $dW_1 = A_1\, p_1\, dl_1$ sedang pada bagian kanan usahanya $dW_2 = -\, A_2\, p_2\, dl_2$

$$dW_1 + dW_2 = A_1\, p_1\, dl_1 - A_2\, p_2\, dl_2$$

Sehingga usaha totalnya

$$W_1 + W_2 = A_1\, p_1\, l_1 - A_2\, p_2\ \ l_2$$

Bila massa fluida yang berpindah adalah m dan rapat massa fluida adalah ρ, maka diperoleh persamaan :

$$W = (p_1 - p_2)\ \frac{m}{\rho} \qquad (8.14)$$

Persamaan diatas merupakan usaha total yang dilakukan oleh fluida. Bila fluida bersifat tak kental, maka tak ada gaya gesek sehingga kerja total tersebut merupakan perubahan energi mekanik total pada fluida yang bermasa *m*.

Besarnya tambahan energi mekanik total adalah :

$$E = \left(\tfrac{1}{2} m\, v_2^2 - \tfrac{1}{2} m\, v_1^2\right) + \left(mg\ h_2 - mg\ h_1\right) \qquad (8.15)$$

Maka

$$(\mathrm{p_1} - \mathrm{p_2})\ \frac{m}{\rho} = \left(\tfrac{1}{2} m\, v_2^2 - \tfrac{1}{2} m\, v_1^2\right) + \left(mg\ h_2 - mg\ h_1\right)$$

$$p_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g\, h_2 \qquad (8.16)$$

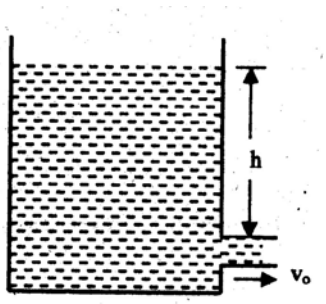
Sehingga dapat disimpulkan :

$$p + \tfrac{1}{2}\rho v^2 + \rho g\, h = kons\tan \qquad (8.17)$$

Persamaan (8.17) dikenal sebagai *persamaan Bernoulli.*

Contoh soal 8.10.

Sebuah tangki besar diberi lubang kecil pada kedalaman *h* dan diisi air.



a. Jika kecepatan air turun pada permukaan adalah *v*, tunjukkan dari persamaan Bernoulli bahwa :

$v_o^2 = v^2 + 2gh$, dimana v_o = kecepatan aliran air pada lubang kecil.

b. Jika A luas permukaan tangki dan A_0 luas permukaan lubang, tunjukkan bahwa:

$$V_o = \sqrt{\frac{2gh}{1 - \left(\frac{A_0}{A}\right)^2}}$$

Penyelesaian:

a. $p_o + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = p_o + \frac{1}{2}\rho v_o^2$

$v_o^2 = v^2 + 2gh$

b. Dari persamaan kontinuitas

$$v_0 = \frac{A}{A_o}\sqrt{v_0^2 - 2gh}$$

$$v_0^2 = \frac{A^2}{A_0^2}(v_0^2 - 2gh)$$

$Av = A_o v_o \rightarrow v_o = \frac{A}{A_o} v$ $\quad A_0^2 v_0^2 = A^2 v_0^2 - A^2 2gh$

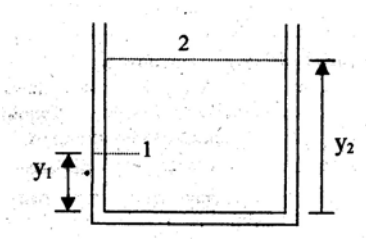
$$A^2 2gh = v_0^2(A^2 - A_0^2)$$

$$V_o = \sqrt{\frac{2gh}{1 - \left(\frac{A_0}{A}\right)^2}}$$

C.4. Pemakaian Persamaan Bernoulli

1. Hidrostatika

Persamaan dalam statika fluida adalah hal yang khusus dari persamaan Bernoulli, di mana kecepatannya sama dengannol.



Karena fluida diam, $v_1 = v_2 = 0$
Sehingga dari persamaan Bernoulli diperoleh hasil
$p_1 + \rho g y_1 = p_2 + \rho g y_2$

Gambar 8.12 Fluida statis dalam wadah

Titik (2) diambil pada permukaan fluida oleh sebab itu besarnya tekanan sama dengan besarnya tekanan udara luar yaitu P_o, sehingga :

$p_1 + \rho g y_1 = p_o + \rho g y_2$

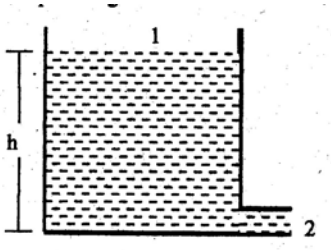
$p_1 = p_o + \rho g (y_2 - y_1)$

$p_2 = p_o + \rho g h$

Dengan p_1 adalah tekanan hidrostatis titik 1.

2.Teorema Torricelli

Teorema ini membahas tentang besarnya kecepatan aliran pada lubang kecil yang berada pada bagian bawah suatu silinder yang berisi fluida.



Titik (1) dan (2) terletak pada permukaan atas dan bawah zat cair sehingga besarnya tekanan adalah sama dan ketinggian titik (2) adalah nol.

Gambar 8.11 Air dalam wadah yang dasarnya ada lubang.

Sehingga persamaan Bernoulli menjadi :

$$p_o + \rho g h + \tfrac{1}{2} \rho v_1^2 = p_o + \tfrac{1}{2} \rho v_2^2$$

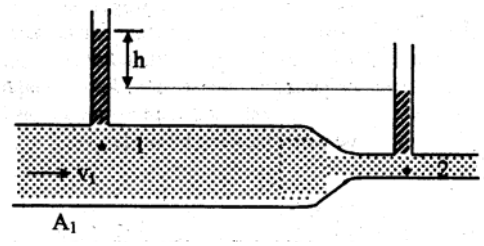
Jika perbandingan luas penampang pada titik (1) jauh lebih besar dengan titik (2), maka kecepatan v_1 mempunyai harga yang relatif jauh lebih kecil dari v_2 sehingga dari persamaan di atas v_1 bisa diabaikan dan diperoleh :

$$P_o + \rho g h = p_o + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2$$

$$V_2 = \sqrt{2 g h} \qquad (8.18)$$

Dengan v_2 : kecepatan air saat keluar dari lubang.

4. Alat Ukur Venturi
   Alat ini dipergunakan untuk mengukur besarnya kecepatan aliran fluida dalam suatu pipa.



Ambil titik (1) dan (2) yang mempunyai ketingian yang sama, sehingga dari persamaan Bernoulli diperoleh hasil :

$$p_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2$$

$$(p_1 - p_2) + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = \tfrac{1}{2}\rho v_2^2$$

$$\rho g h + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = \tfrac{1}{2}\rho v_2^2$$

Gambar 8.12 Alat ukur Venturi.

Hubungan antara v_1 dan v_2 dapat diperoleh dari persamaan Kontinuitas. Bila luas penampang pada titik (1) adalah A_1 dan pada titik (2) adalah A_2 maka :

$A_1 v_1 = A_2 v_2$ *dan* $v_2 = \dfrac{A_1 v_1}{A_2}$

Bila dimasukkan dalam persamaan Bernoulli diperoleh :

$$g h + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = \tfrac{1}{2}\rho\left(\frac{A_1 v_1}{A_2}\right)^2$$

$$2 g h + v_1^2 = \left(\frac{A_1 v_1}{A_2}\right)^2$$

$$2 g h = \left[\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1\right] v_1^2$$

$$v_1^2 = \frac{2 g h}{A_1^2 - A_2^2}$$

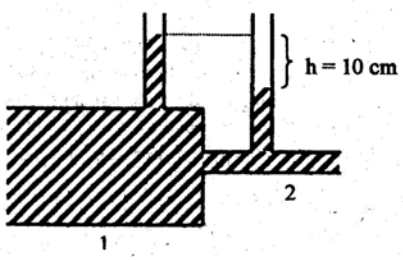
$$v_1 = \sqrt{\frac{2gh}{\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1}} \qquad (8.19)$$

Dengan persamaan kontinuitas diperoleh :

$$v_1 = \sqrt{\frac{2gh}{1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2}} \qquad (8.20)$$

Contoh soal 8.11

Sebuah alat venturi meter digunakan seorang siswa untuk mengukur kecepatan aliran air dalam pipa.



Ternyata perbedaan tinggi air pada pipa penampang besar dan kecil 10 cm. Jika perbandingan luas penampang besar dan kecil adalah 3:1. Berapa kecepatan aliran air pada penampang yang besar dan kecil.

Penyelesaian:

Dengan menggunakan persamaan (8.20) :

$$v_1 = \sqrt{\frac{2gh}{\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1}}$$

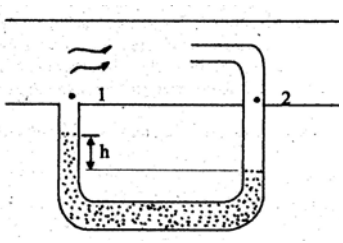
$$= \sqrt{\frac{2.10\,m/s^2.0{,}1m}{\left(\frac{3}{1}\right)^2 - 1}} = \frac{1}{2}m/s$$

Dan persamaan kontinuitas :

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2}.v_1 = \frac{3}{1}x\frac{1}{2}m/s = \frac{3}{2}m/s$$

5. Tabung Pitot

Alat ini dipergunakan untuk mengukur kecepatan angin atau aliran gas.



Misalkan gas mengalir dengan kecepatan v dan rapat massa gas adalah ρ, maka pada titik (1) dan (2) persamaan Bernoulli dapat dituliskan:

$$p_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2$$

Gambar 8.13 Tabung Pitot

Pada titik (1) kecepatan alirannya sama dengan kecepatan aliran gas sedangkan titik (2) kecepatannya nol. Padahal bila dilihat dari hubungan statika fluida $p_2 = p_1 + \rho_o g h$, dimana ρ_o adalah rapat massa zat cair, dan h adalah beda ketinggian permukaan, maka diperoleh :

$$p_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = p_1 + \rho_o g h$$

$$v_1^2 = \frac{2\rho_o g h}{p} \qquad (8.21)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2\rho_o g h}{p}}$$

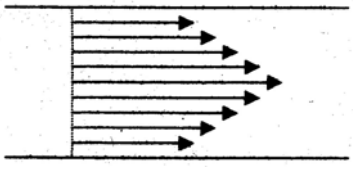
C.5. Aliran Viscous (aliran kental)

Dalam pembahasan persamaan Bernoulli di depan, permasalahan masih bersifat sederhana yaitu dengan mengaggap bahwa zat cair bersifat tak kental (non viscous).

Sekarang kita membahas bagaimana bila zat cairnya kental atau kekentalan zat cair tidak diabaikan.

Pandang aliran dalam suatu pipa Gambar 8.14. Garis alir dianggap sejajar dengan dinding pipa. Akibat adanya kekentalan zat cair dapam pipa, maka besarnya kecepatan gerak partikel pada penampang melintang tidaklah sama. Hal ini disebabkan adanya gesekan antar molekul pada cairan kental. Pada titik pusat pipa kecepatannya maksimum.

Gambar 8.14 Aliran



Akibat lain adalah kecepatan rata-rata partikel lebih kecil daripada kecepatan rata-rata partikel bila zat cairnya bersifat tak kental. Hal ini disebabkan oleh adanya gesekan yang lebih besar pada zat cair yang kental. Jika zat cairnya kental dan alirannya tidak terlalu cepat, maka aliran zat cair akan bersifat laminer dan jika kecepatan zat cair melebihi suatu harga tertentu, aliran yang terjadi menjadi lebih komplek. Pada aliran terjadi pusaran-pusaran yang disebut vortex. Aliran seperti ini disebut aliran turbulen.

Dari eksperimen didapatkan bahwa ada 4 buah faktor yang menentukan apakah aliran bersifat laminer atau turbulen.
Hubungan dari keempat faktor tersebut disebuut bilangan Reynold dan dinyatakan sebagai :

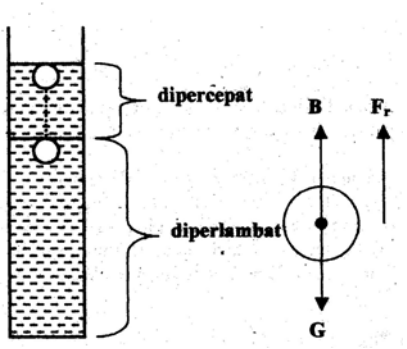
$$N_R = \frac{p\,v\,D}{\eta} \qquad (8.22)$$

dengan :

ρ : rapat massa zat cair, kg/m^3
v : kecepatan rata-rata aliran, m/s
η : koefisien kekentalan
D : diameter pipa, m
N_R : bilangan Reynold

Dari hasil pengamatan bila bilangan Reynold antara 0 sampai 2000, maka alirannya bersifat laminer, sedangkan di atas 3000 alirannya bersifat turbulen dan di antara 2000 sampai 3000 terjadi suatu transisi, aliran dapat berubah dari laminer turbulen atau sebaliknya.

Untuk menghitung koefisien kekentalan digunakan cara, antara lain cara Stokes.
Sebuah tabung diisi cairan yang diukur η nya. Sebuah bola kecil dilepaskan tepat pada permukaan cairan ($v_0 = 0$).



Gambar 8.15 Stokes

Bola kecil yang dipakai sudah diketahui massa jenisnya (ρ bola), juga ρ cairan sudah diketahui.
Gerakan bola mula-mula dipercepat sampai pada suatu tempat geraknya menjadi beraturan. Gerakan bola ini mengalami gaya gesekan F_r dan gaya apung keatas (B).

Mula-mula $\Sigma F_y = ma$, kemudian $\Sigma F_y = 0$ (setelah v nya tetap) dan berlaku resultan gaya: $G-B-F_r = 0$.

Pada saat *v* sudah tetap besarnya, gaya gesekan yang tergantung pada *v*, menurut dalil stokes adalah:

$F_t = 6\pi\eta rv$, diman *r* adalah jari-jari bola kecil.

$$G = m\,g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{bola}.g$$

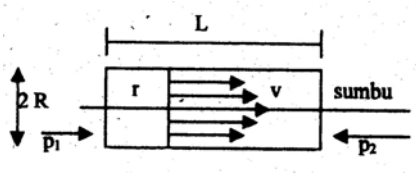
$$B = m_{cairan}.g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{cairan}.g$$

Jadi

$$\frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho_{bola} - \rho_{cairan}) = 6\pi\eta r v$$

$$\eta = \frac{2r^2 g(\rho_{bola} - \rho_{cairan})}{9v} \qquad (8.23)$$

Untuk menghitung kecepatan dan debit zat cair viscous digunakan ***hukum Poiseuille.***



Gambar 8.16 Aliran Viscous

Bila P_1 dan P_2 tekanan pada ujung-ujung tabung dengan diameter *2R*, maka cairan pada jari-jari *r*, mengalami gaya yang bekerja dalam arah *v* sebesar :

$$F = A\,\eta\,\frac{dv}{dr} = 2\pi r L \eta \frac{dv}{dr}$$

Pengayaan:

Gambar 8.16 Aliran Viscous berlaku:

$\Sigma F_x = 0 \rightarrow (p_1 - p_2)\pi r^2 + 2\pi r L \eta \dfrac{dv}{dr} = 0$

(disebabkan tak ada ΔE_k)

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{\Delta p.r}{2L\eta}, (\Delta p = p_1 - p_2)$$

$$\int_v^o dv = -\frac{p}{2\eta L}\int_r^R r\,dr \rightarrow -v = -\frac{\Delta p}{2\eta L}\frac{r^2}{2}\Big|_r^R \qquad (8.24)$$

$$\rightarrow v = \frac{p}{4\eta L}(R^2 - r^2)$$

Untuk menentukan debit cairan :

$$Q = \frac{dv}{dr} = v.2\pi r\,dr = \frac{p}{4\eta L}(R^2 - r^2)2\pi r\,dr$$

$$= \frac{\pi(p_1 - p_2)}{2\eta L}(R^2 - r^2)r\,dr \qquad (8.25)$$

$$Q = \frac{\pi}{8}\frac{R^4}{\eta}.\frac{(p_1 - p_2)}{L}$$

dimana $(p_1 - p_2) / L$ adalah menyatakan gradien tekanan.

1. *Tekanan* adalah besaran fisika yang merupakan perbandingan antara gaya normal (tegak lurus) yang bekerja pada suatu bidang permukaan dengan luas bidang permukaan tersebut.
   Rumus tekanan:

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

   dengan F : gaya, Newton dan A: luas bidang permukaan, m^2.
   Satuan tekanan dalam SI adalah *Pascal (Pa) atau* N/m^2.
   1 Pa = 1 N/m^2

Beberapa satuan tekanan yang lain yang sering digunakan dalam beberapa keperluan adalah *atmosfer (atm), centimeter Hg (cmHg) dan milibar (mb), torr.*

1 mb = 10^5 Pa ; 1 atm = 76 cm Hg=1,01.10^5 Pa = 1,01 mb.

1 torr = 1 mmHg

2. Tekanan hidrostatika dirumuskan : $p_h = \frac{F}{A} = \frac{\rho ghA}{A} = \rho gh$
3. Tekanan yang bekerja pada fluida statis dalam ruang tertutup akan diteruskan ke segala arah dengan sama rata, hal ini dikenal sebagai ***prinsip PASCAL.***
4. Di dalam fluida yang diam, suatu benda yang dicelupkan sebagian atau seluruh volumenya akan mengalami gaya tekan keatas (gaya apung) sebesar berat fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut, yang lazim disebut ***gaya Archimedes***.
5. Tegangan permukaan adalah gaya per dimensi panjang.
6. Jika fluida bersifat tak kompresibel, maka besarnya volume fluida yang lewat penampang A_1 dan A_2 persatuan waktu adalah sama besar sehingga diperoleh:
   $A_1 v_1 = A_2 v_2$, disebut *persamaan kontinuitas*.
7. Pada aliran tunak pada system pipa yang mempunyai beda ketinggian berlaku hukum Bernoulli : $p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$

SOAL KOMPETENSI

1. Sebuah wadah air berbentuk silinder dengan diameter alas 30 cm dan tinggi 80 cm. Jika wadah diisi dengan air sampai penuh, tentukan :
   (a). massa air dalam wadah tersebut jika massa jenis air 1000 kg/m^3,
   (b). berat air dalam wadah tersebut,
   ©. Tekanan yang dikerjakan wadah tersebut yang berisi air pada lantai, jika diketahui massa wadah 75 gram.

2. (a). Hitung tekanan hidrostatis pada kedalaman 100 m di bawah permukaan air laut.
   (b). Hitung tekanan mutlak pada kedalaman tersebut (massa jenis relatif air laut 1,03 ; 1 atm = $1{,}01.10^5$ Pa; g = 10 m/s^2).

3. Tiga jenis cairan yang tidak dapat tercampur dituangkan ke dalam sebuah wadah yang penampangnya berbentuk silinder dengan luas 100 cm^2. Jika diketahui volume dan massa jenis masing-masing cairan adalah 0,5 liter, 2,6 gr/cm^3; 0,3 liter, 1 gr/cm^3 dan 0,4 liter, 0,80 gr/cm^3. Berapakah tekanan mutlak yang disebabkan oleh ketiga cairan tersebut pada alas wadah?

4. Sebutkan hukum utama hidrostatika dan prinsip Pascal dalam fluida statis.

5. Sebuah dongkrak hidrolik yang mengandung minyak (massa jenis 800 kg/m^3) memiliki luas silinder besar dan kecil 0,5 m^2 dan 10^{-4} m^2. Massa penghisap kecil m (kg) tidak diketahui. Jika massa tambahan 510 kg diletakkan di atas penghisap besar , dongkrak berada dalam keadaan kesetimbangan dengan penghisap kecil berada setinggi h = 100 cm di atas penghisap besar. Berapakah besar massa m?

6. Sebuah batang tembaga memiliki rongga di dalamnya, massanya di udara sebesar 264 gr dan di dalam air 220 gr. Jika massa jenis tembaga 8,8 gr/cm^3, tentukan volume rongga tembaga tersebut.

7. Air naik sampai ketinggian 10 cm dalam suatu pipa kapiler tertentu, dalam pipa kapiler yang sama permukaan air raksa turun 3,5 cm. Tentukan perbandingan tegangan permukaan air dan air raksa. Massa jenis relatif air raksa 13,6; sudut kontak air 0^o dan untuk air raksa 153^o .

8. Seorang anak menyiram tanaman dengan menggunakan selang semprot, air mengalir dengan kelajuan 3,5 m/s melalui pipa penyemprot yang beradius 8 mm.
   (a). Berapa diameter mulut pipa agar air menyemprot keluar dengan kecepatan 10 m/s?
   (b). Berapakah banyaknya air yang keluar bila dilakukan penyemprotan selama 30 menit?

9. Air mengalir dari lantai 1 sebuah apartemen bertingkat melalui pipa berdiameter 280 mm. Air dialirkan ke kamar mandi dilantai 2 melalui kran berdiameter 0,800 cm dan terletak 300 cm di atas pipa lantai 1. Jika kelajuan air dalam pipa di lantai 1 adalah 0,150 m/s dan tekanan $1{,}8.10^5$ Pa, tentukan:
   (a). kelajuan air yang keluar dari kran,
   (b). tekanan dalam pipa di lantai 2.

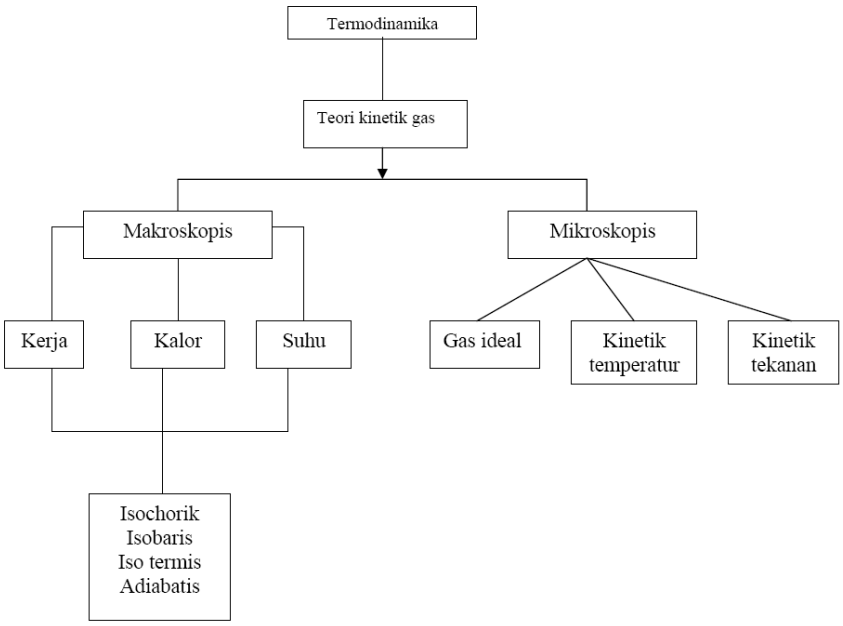
10. Tekanan di bagian pipa horizontal dengan diameter 2 cm adalah 142 kPa. Air mengalir lewat pipa dengan debit 2,8 liter/s, berapakah diameter di bagian pipa yang dipersempit agar tekanannya 101 kPa?

BAB 9
TERMODINAMIKA



▲ *In this photograph of Bow Lake in Banff National Park, Alberta, we see evidence of water in all three phases. In the lake is liquid water, and solid water in the form of snow appears on the ground. The clouds in the sky consist of liquid water droplets that have condensed from the gaseous water vapor in the air. Changes of a substance from one phase to another are a result of energy transfer. (Jacob Taposchaner/Getty Images)*

Peta konsep


Termodinamika
Teori kinetik gas
Makroskopis
Mikroskopis
Kerja
Kalor
Suhu
Gas ideal
Kinetik temperatur
Kinetik tekanan
Isochorik
Isobaris
Iso termis
Adiabatis

Termodinamika adalah cabang fisika yang mempelajari hubungan antara kalor dan usaha mekanik. Dalam pengertian yang lebih luas, termodinamika merupakan kajian tentang suhu dan kalor serta pengaruh suhu dan kalor terhadap sifat-sifat zat. Dengan konsep dasar termodinamika ini sejal, sejak permulaan abad XIX, orang sudah berhasil menemukan mesin-mesin yang dapat membantu mempermudah pekerjaan manusia dan mempernyaman kehidupannya.

9.1 **Sistem, Keadaan Sistem, dan Koordinat Termodinamika**

Sistem. Adalah sesuatu yang menjadi pusat perhatian kita, Sistem termodinamika adalah suatu sistem yang keadaannya didiskripsikan oleh besaran-besaran termodinamika. Segala sesuatu di luar sistem (yang dapat mempengaruhi keadaan sistem) disebut lingkungan. Suatu permukaan yang membatasi sistem dengan lingkungannya di sebut permukaan batas, yang dapat berupa permukaan nyata (real surface) atau berupa khayal (imaginary surface). Permukaan batas dapat tetap atau berubah bentuknya.

Berdasarkan interaksinya dengan lingkungan, sistem dibedakan menjadi tiga macam, yaitu sistem terisolasi, sistem tertutup, dan sistem terbuka. Sistem terisolasi adalah suatu sistem yang keadaannya tidak dapat dipengaruhi oleh lingkungannya. Sistem tertutup adalah suatu sistem yang tidak terjadi perpindahan materi dari sistem ke lingkungannya atau sebaliknya, tetapi dapat terjadi pertukaran (interaksi) energi antara sistem dengan lingkungannya. Sistem terbuka adalah suatu sistem yang dapat terjadi perpindahan materi dan/atau energi antara sistem dan lingkungannya.

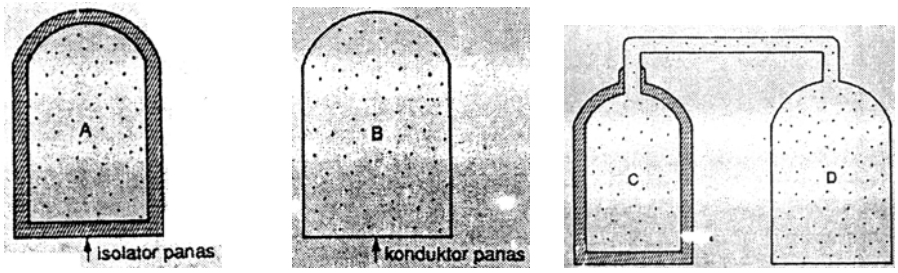
Sistem A (Gambar 9.1a) adalah suatu sistem yang dilingkupi dengan dinding yang berupa isolator panas (dinding adiabat) sehingga tidak terjadi interaksi materi dan energi antara sistem A dan lingkungannya, sehingga keadaan sistem A tidak dapat dipengaruhi oleh lingkungan. Sistem A merupakan sistem terisolasi.

Sistem B (Gambar 9.1b) merupakan suatu sistem yang dilingkupi dinding yang berupa konduktor panas (dinding diaterm) sehingga dapat terjadi interaksi antara sistem B dengan lingkungannya meskipun disini tak terjadi perpindahan materi. Sistem B disebut sistem tertutup.

Sistem C dan sistem D pada Gambar 9.1c adalah sistem-sistem yang terbuka, di mana dapat terjadi perpindahan materi dari sistem C ke sistem D atau sebaliknya. Sistem C dilingkupi oleh dinding adiabatis

sehingga hanya dapat berinteraksi dengan sistem D saja, sedangkan sistem D dilingkupi dengan dinding diaterm sehingga dapat berinteraksi dengan sistem C dan dengan lingkungannya.

Contoh sistem sederhana



(a) (b) (c)

Gambar 9.1. Sistem dengan lingkungan dalam termodinamika

Besaran-besaran makroskopis yang dapat diukur pada sistem mencirikan keadaan sistem. Besaran makroskopis sistem menunjukkan sifat (properties) sistem. Besaran makroskopis sistem disebut juga koordinat termodinamika sistem. Koordinat termodinamika sistem cukup dinyatakan oleh tiga variabel dan baisanya salah salah satunya adalah temperatur. Pada buku ini temperatur secara umum diberi simbol τ dan khusus untuk temperatur Kelvin diberi simbol T.

9.2 Keadaan Setimbang

Dalam termodinamika dikenal beberapa macam keadaan setimbang, yaitu keadaan setimbang mekanik, keadaan setimbang termal, dan keadaan setimbang kimiawi.

Kesetimbangan mekanik, yaitu kesetimbangan yang terjadi apabila tekanan di setiap titik di dalam sistem mempunyai harga yang konstan.

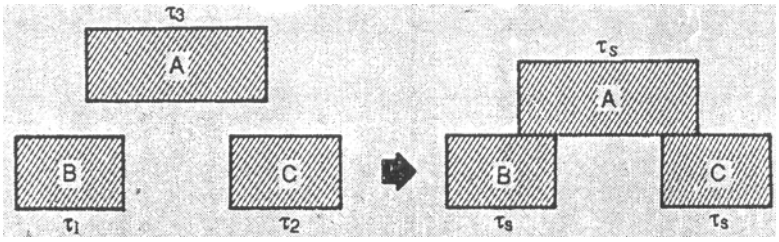
Kesetimbangan termal, yaitu kesetimbangan yang terjadi apabila temperatur di setiap titik di dalam sistem mempunyai harga sama.

Kesetimbangan kimiawi, yaitu kesetimbangan yang terjadi apabila struktur materi (komposisi) di dalam sistem tidak berubah.

Apabila ketiga macam kesetimbangan tersebut dipenuhi pada saat bersamaan maka sistemnya dikatakan berada dalam kesetimbangan termodinamik. Dalam keadaan setimbang termodinamik, keadaan sistem direpresentasikan dengan besaran-besaran termodinamika.

9.3 HUKUM TERMODINAMIKA KE NOL DAN TEMPERATUR

*Hukum termodinamika ke nol berbunyi:Jika dua buah sistem yang terpisah berada dalam kesetimbangan termal dengan sistem yang lain (sistem yang ketiga), maka kedua sistem tersebut juga berada dalam kesetimbangan termal. Gambar 9.2 menggambarkan pernyataan hukum termodinamika ke no*l yang berlaku pada sistem A, B, dan C.



Gambar 9.2: a. Keadaan sistem A, B, dan C sebelum kontak termal. b. Sistem A dan B setimbang termal dengan sistem C dengan temperatur setimbang τ_s.

Sistem a setimbang termal dengan sistem B pada temperatur setimbang τ_s.

Dinding pemisah antara dua sistem yang bersentuhan dapat berupa dinding adiabatis atau dinding diaterm.

Dinding adiabatis adalah dinding pemisah yang menyebabkan masing-masing sistem yang bersentuhan tetap dalam keadaannya semula (tidak ada perubahan keadaan sistem). Contoh dinding adiabatis, untuk temperatur sekitar temperatur ruang, adalah dinding yang terbuat dari bahan isolator panas misalnya kayu, semen, dan keramik yang ukurannya cukup tebal.

Dinding diterm, adalah dinding pemisah yang menyebabkan adanya interaksi dari sistem-sistem yang bersentuhan sehingga tercapai keadaan setimbang. Contoh dinding diaterm adalah logam. Keadaan kontak antara dua sistem melalui dinding diaterm disebut kontak termal.

Besaran yang mencirikan keadaan sistem yang berada dalam kesetimbangan termal adalah temperatur. Dalam keadaan sehari-hari

istilah temperatur digunakan untuk membedakan apakah suatu benda bersifat panas atau dingin relatif terhadap tubuh kita.

Karena kajian termodinamika yang akan kita pelajari di dalam bab ini banyak berhubungan dengan proses gas, maka diawal bab ini kita akan mempelajari lebih dahulu *teori kinetika gas*.

A. TEORI KINETIKA GAS

Teori yang menggunakan tinjauan tentang gerak dan energi partikel-partikel zat untuk menyelediki sifat-sifatnya disebut *teori kinetik zat*. Sifat yang dimaksud ialah sifat zat secara keseluruhan sebagai hasil rata-rata kelakuan partikel-partikel zat tersebut. Teori kinetik zat yang secara khusus diterapkan pada teori kinetik gas.

1. Pengertian gas Ideal

Gas yang ditinjau dalam pembahasan ini ialah gas ideal, yaitu suatu gas yang memiliki sifat-sifat sebagai berikut :

- gas ideal terdiri atas partikel-partikel (atom-atom atau molekul-molekul) yang jumlahnya banyak sekali dan antarpartikelnya tidak terjadi gaya tarik-manarik (interaksi);
- setiap pertikel gas bergerak dengan arah sembarang;
- ukuran partikel gas dapat diabaikan terhadap ukuran ruangan;
- setiap tumbukan yang terjadi berlangsung secara lenting sempurna;
- partikel gas terdistribusi merata dalam seluruh ruangan;
- berlaku hukun newton tentang gerak.

Pada kenyataannya tidak ada gas sejati yang memenuhi sifat-sifat gas ideal, tetapi gas pada suhu kamar dan pada tekanan rendah dapat mendekati sifat-sifat gas ideal.

2. Persamaan keadaan gas Ideal

a. Hukum Boyle-Gay Lussac

Gas dalam suatu ruang tertutup, keadaanya ditentukan oleh volum, tekanan, dan suhu gas tersebut. Menurut hukum Boyle-Gay Lussac, tekanan *(p),* volum *(v*), dan suhu mutlak *(T*) dari gas ideal memenuhi hubungan :

$$pV=nRT \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9.1)$$

dengan :

p = tekanan gas
V = volume gas
n = jumlah mol gas
R = tetapan umum gas

= 8314 J/kmol.K atau 8,31 J/mol.K

T = suhu mutlak (K)

Persamaan (9.1) disebut persamaan keadaan gas ideal atau disebut juga hukum Boyle-Gay Lussac.

b. Hubungan jumlah mol dengan massa total dan jumlah partikel

Misalkan massa total gas = m dan jumlah partikel gas = N, maka jumlah mol gas (n) dapat dinyatakan:

$n = m/M$ ..... (9.2)

atau

$n = N/M_o$ ..... (9.3)

dengan :

m = massa total gas

M = massa relatif partikel (atom atau molekul) gas

N = bilangan Avogadro

= 6,02 x 10^{23} partikel/mol

Bila persamaan (9.2) dimasukka ke persamaan (9.1), maka akan diperoleh persamaan keadaan gas berikut:

$pV = (m/M)\ RT$ ..... (9.4)

dengan memasukkan persamaan (9.3) ke persamaan (9.1) dapat juga diperoleh persamaan gas bentuk lain, yaitu:

$pV = NkT$ .....(9.5)

dengan:

N = jumlah partikel gas

N_o = bilangan Avogadro

= 6,02 x 10^{23} partikel/mol

k = tetapan Boltzman = 1,38 x 10^{-23} J/K

$k = R/N_o$ atau $R = k\ .\ N_o$

Contoh 9.1

Satu mol gas berada dalam tabung yang volumenya 50 liter. Bila suhu gas itu 227^0C, berapa tekanan gas ?

Penyelesaian:

n = 1 mol

V = 50 liter

= 50 dm^3 = 50 x 10^{-3} m^3 = 5 x 10^{-2} m^3

R = 8,31 x 10^3 J/kmol . K

T = 227^0C = (227 + 273) K = 500 K

p = ?
pV = n RT

$$p = \frac{\text{nRT}}{\text{V}} = \frac{1(8{,}31x10^{3})(500)}{5x10^{-2}}$$

p = 8,31 x 10^7 N/m^2 = 8,31 x 10^7 Pa

Contoh 9.2
Berapa volume 5 gram gas oksigen O_2 yang berat molekulnya M = 32 kg/kmol pada keadaan normal (t = 0^0C dan p = 1 atm) ?
Penyelesaian :
m = 5 gram = 5 x 10^{-3} kg
M = 32 kg/kmol
T = (0 + 273) = 273 K
p = 1 atm = 10^5 N/m^2
R = 8314 J/kmol.K (kita pilih nilai R sesuai dengan satuan M dan m)
V = ?
pV = n RT

$$V = \frac{m/M.R.T}{p} = \frac{mRT}{pM}$$

$$= \frac{(5x10^{-3})(8314)(273)}{(10^{5})(32)}$$

= 3,6 x 10^{-3}m^3

Latihan 9.1
1. Sebua tangki 300 liter berisi gas oksigen (M = 32 kg/k mol) pada suhu 27^0C dan tekanan 4 atm. Tentukan massa gas oksigen tersebut!
2. 6,9 liter gas suhunya 27^0C dan bertekanan 60 N/m^2. Berapa jumlah partikel gas tersebut (k = 1,38 x 10^{-23} J/k) ?

3. Tekanan dan energi kinetik

Sejumlah gas dengan N buah partikel berada dalam tabung yang volumenya V. Bila diketahui massa sebuah partikelnya m_o dan kecepatan rata-ratanya $\bar{v}$, makatekanan gas itu memenuhi hubungan:

$$p = \frac{1}{3} m_o \bar{v}^2 \left(\frac{N}{V}\right) = \frac{2}{3}\left(\frac{1}{2} m_o \bar{n}^2\right)\left(\frac{N}{V}\right) \quad \text{.....(9.6a)}$$

atau $p = \frac{2}{3}\overline{E}_k \left(\frac{N}{V}\right)$ ..... (9.6b)

dengan $\overline{E}_k$ = energi kinetik rata-rata

Contoh 9.3
Tentukan energi kinetik rata-rata 5 mol gas neon yang volumenya 23 liter dengan tekanan 100 kPa !
Penyelesaian:
n = 5 mol
N_o = bilangan Avogadro
= 6,02 x 10^{23} partikel/mol

$n = \frac{N}{N_o} \rightarrow N = n \,.\, N_o$

N = 5 . (6,02 x 10^{23}) = 3,01 x 10^{24} partikel
V = 25 liter x $10^{-3}m^3$
p = 100 k Pa = 100 x 10^3Pa
$\overline{E}_k$ = ... ?

$p = \frac{2}{3}\overline{E}_k \left(\frac{N}{V}\right)$

$\overline{E}_k = \frac{3p}{2\left(\frac{N}{V}\right)} = \frac{3pV}{2N}$

$\overline{E}_k = \frac{3\left(100 \text{x} 10^3\right)\left(25 \text{x} 10^{-3}\right)}{2\left(3{,}01 \text{x} 10^{24}\right)}$

$\overline{E}_k$ = 1,24 x 10^{-21} joule

Latihan 9.2
Energi kinetik 2 mol gas monoatomik dalam tabung 10 liter adalah 2,3 x 10^{-22} joule. Berapa tekanan gas dalam tabung itu ?

4. Suhu dan energi kinetik rata-rata

Hubungan antara suhu dan energi kinetik rata-rata, dapat kita tentukan dengan cara sebagai berikut.

Dari persamaan (9.5) kita peroleh harga p:

$pV = NkT$

$$\Leftrightarrow p = \frac{N}{V} kT$$

Masukkan harga p tersebut ke dalam persamaan (9.6b):

$$P = \frac{2}{3} \overline{E}_k \left(\frac{N}{V} \right)$$

$$\Leftrightarrow \frac{N}{V} kT = \frac{2}{3} \overline{E}_k \left(\frac{N}{V} \right)$$

$$\Leftrightarrow kT = \frac{2}{3} \overline{E}_k$$

$$\overline{E}_k = \frac{3}{2} kT \qquad \text{.....(9.7)}$$

Dengan k = tetapan Boltzman, $k = 1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K

Persamaan (9.7) hanya berlaku untuk gas monoatonik. Untuk gas diatomik atau poliatomik tidak berlaku.

Contoh 9.4

Tentukan energi kinetik rata-rata partikel gas yang memiliki suhu 57^0C!

Penyelesaian

T = (57 + 273) K = 330 K

k = $1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K

$\overline{\mathrm{E}}_\mathrm{k}$ = ... *?*

$$\overline{E}_k = \frac{3}{2} kT$$

$$= \frac{3}{2} (1{,}38 \times 10^{-23}) (330)$$

$$= 6{,}83 \times 10^{-21} \text{ joule}$$

Latihan 9.3

1. Berapa suhu suatu gas monoatomik yang memiliki energi kinetik rata-rata (E_k) = $5{,}6511 \times 10^{-21}$J. (k = $1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K)?
2. Suatu gas ideal dalam ruang tertutup suhunya 27^oC. Energi kinetik partikelnya E_{ko}. Tentukan besarnya suhu gas apabila energi kinetiknya 2 E_{ko} !

Energi dalam suatu gas didefinisikan sebagai jumlah energi kinetik seluruh partikel gas. Bila terdapat *N* buah partikel gas dalam wadah tertutup, maka energi dalam gas U merupakan hasil kali *N* dengan kinetik tiap partikel $\overline{E}_k$.

$$U = \frac{3}{2} N k T \quad \text{.....(9.8)}$$

- Untuk gas monoatomik

Atau

$$U = \frac{3}{2} n R T \quad \text{.....} \quad (9.9)$$

- Untuk gas diatomik pada suhu rendah (± 300 K):

$$U = \frac{3}{2} N k T$$

Atau

$$U = \frac{3}{2} n R T \quad \text{.....} \quad (9.10)$$

- Untuk gas diatomik pada suhu sedang (± 500 K)

$$U = \frac{5}{2} N k T$$

Atau

$$U = \frac{5}{2} n R T \quad \text{.....} \quad (9.11)$$

- Untuk gas diatomik pada suhu tinggi (± 1000):

$$U = \frac{7}{2} N k T$$

Atau

$$U = \frac{7}{2} n R T \quad \text{.....} \quad (9.12)$$

Contoh 9.5

Berapa energi dalam 2 gram neon (Ne) pada suhu 77^0C? (diketahui neon memiliki *M* = 10 g/mol).

Penyelesaian:

m = 2 gram
T = 77 + 273 = 350 K
M = 10 g/mol
R = 8,31 J/mol . K

U = ... ?

Neon adalah gas monoatomik. Jadi, kita gunakan persamaan:

$$U = \frac{3}{2} nRT$$

$$= \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$$

$$= \frac{3}{2} . \frac{2}{32} (8{,}31) (350)$$

$$= 272{,}67 \text{ J}$$

Latihan 9.4

1. Tentukan energi dalam dari satu mol gas diatomik pada suhu 127^0C!
   ($k = 1{,}38 \times 10^{-23}$J/K; $N_o = 6{,}02 \times 10^{23}$ molekul/mol)
2. Tentukan energi kinetik dan energi dalam 0,5 mol gas idel pada suhu 1227^0C jika gas tersebut berupa:
   a) gas monoatomik!
   b) Gas diatomik!
   (k dan N_o lihat soal nomor diatas)

9.4 PERSAMAAN KEADAAN

Bentuk umum persamaan keadaan suatu sistem dalam keadaan setimbang dinyatakan dengan:

$$f(P, V, T)_{x,y,z} = 0 \quad \text{.....(9.13)}$$

Di mana x, y, z merupakan koordinat termodinamika sistem. Untuk sistem hidrostatik atau sering disebut sistem *PVT*, persamaan keadaannya dinyatakan sebagai:

$$f(P, V, T) = 0 \quad \text{.....(9.14)}$$

Sistem hidrostatik adalah sistem dengan massa tetap yang mengadakan tekanan yang homogen, tanpa efek grafitasi, listrik, dan magnetik. Contoh sistem hidrostatik:

a. Zat murni, yaitu sistem yang hanya terdiri satu macam zat, misalnya gas oksigen (O_2), gas helium (He), dan air murni (H_2O).
b. Campuran homogen, yaitu sistem yang terdiri dari beberapa macam senyawa/unsur yang tidak bereaksi, misalnya campuran antara gas nitrogen dan oksigen pada temperatur ruang.
c. Campuran heterogen, misalnya campuran dari beberapa macam cairan dengan uapnya.

Persamaan keadaan gas banyak dihasilkan secara empirik, yaitu didapatkan dari hasil eksperimen. Beberapa bentuk persamaan keadaan gas yang dihasilkan secara teoritis diberikan seperti berikut ini.

9.5 Persamaan Keadaan Gas Ideal

Gas ideal gas hipotesis (gas khayalan) yang model molekularnya mengikuti asumsi tertentu. Berdasarkan model molekular tersebut, dapat diturunkan suatu bentuk persamaan keadaan ga ideal:

$PV = n\,R\,T$ .....(9.15a)

Di mana,

P = tekanan gas ideal
V = volume gas ideal
= volume ruang yang ditempati gas
n = jumlah mol gas tersebut

$$= \frac{\text{massa gas}}{\text{berat molekul gas}}$$

R = konstanta gas universal
= 8.314,3 J $Kmol^{-1}$ K^{-1}
T = Temperatur gas tersebut

Catatan: Gas-gas nyata pada tekanan yang sangat rendah (tekanannya di bawah tekanan kritis) dan pada temperatur tinggi (temperaturnya di atas temperatur kritis) mempunyai sifat seperti gas ideal.

Bentu persamaan keadaan gas ideal yang lain adalah:

$Pv = RT$ .....(9.15b)

Di mana, $v = \frac{V}{n}$, disebut volume spesifik molar dengan satuan m^3 $Kmol^{-1}$ (SI).

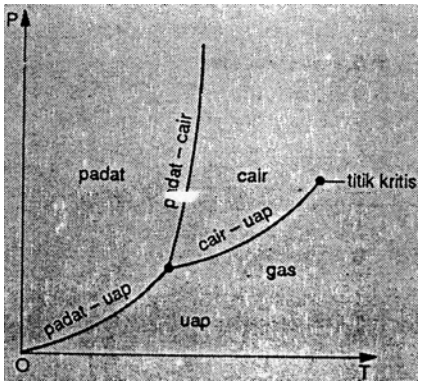
Bentuk persamaan yang lain lagi:

$PV = n\,K\,T$ .....(9.16)

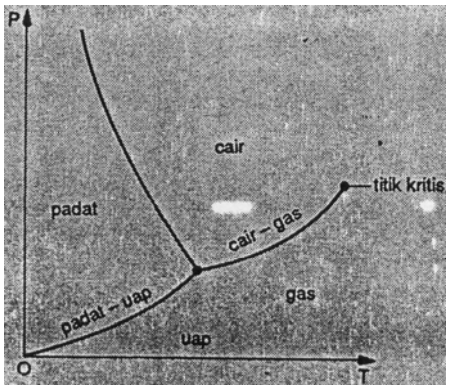
Di mana, $K = \frac{R}{berat\ molekul\ gas}$, adalah konstanta dengan satuan $Kg^{-1}Kmol^{-1}K^{-1}$.

9.6 DIAGRAM PT, DIAGRAM PV, DAN PERMUKAAN *PVT* UNTUK ZAT MURNI

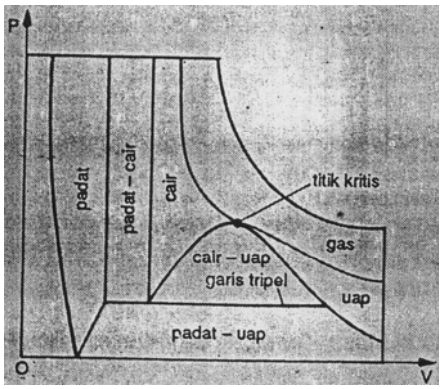
Zat murni adalah yang terdiri dari satu macam senyawa kimia. Gambar-gambar di bawah ini menunjukkan diagram PT, diagram PV, dan permukaan PVT untuk zat murni



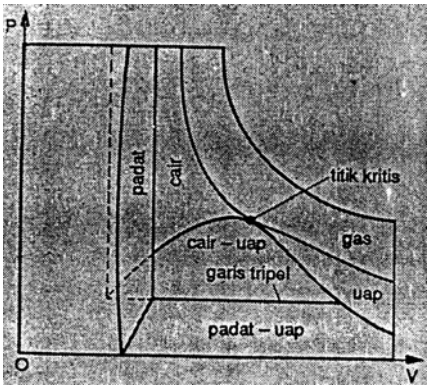
Gambar 9.3
Diagram *PT* untuk zat murnii yang yang menyusut pada waktu membeku



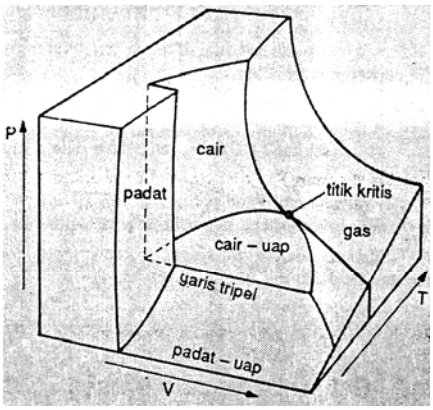
Gambar 9.4
Diagram *PT* untuk zat murni memuai pada waktu membeku



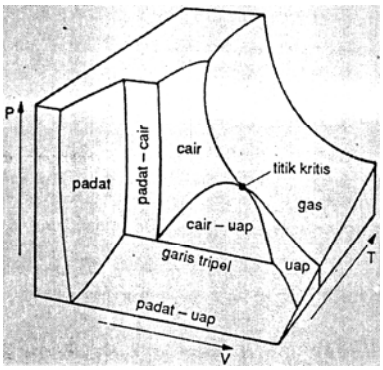
Gambar 9.5
Diagram *PV* untuk zat murni yang yangmenyusut pada waktu membeku



Gambar 9.6
Diagram *PV* untuk zat murni memuai pada waktu membeku



(a)



(b)

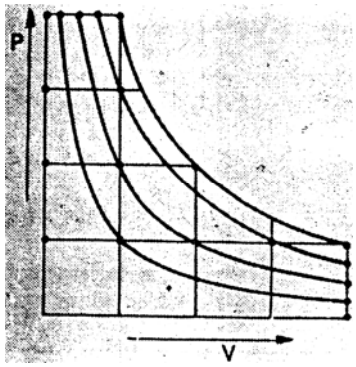
Gambar 9.7 a.Permukaan *PVT* zat murni yang memuai pada waktu membeku, b. Permukaan *PVT* zat mumi yang menyusut pada waktu membeku.

9.7 DIAGRAM PV, DIAGRAM PT, DAN PERMUKAAN PVT UNTUK GAS IDEAL

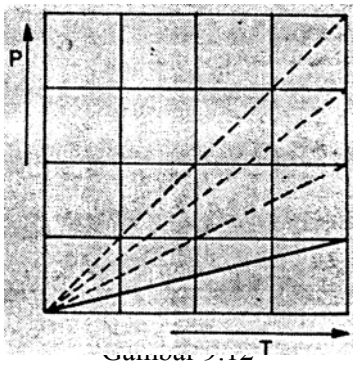
Gas ideal adalah gas yang memenuhi persamaan keadaan:

$$PV = nRT$$

Gambar-gambar berikut ini menunjukkan diagram *PV,* diagram *PT*, dan permukaan *PVT* untuk gas ideal.

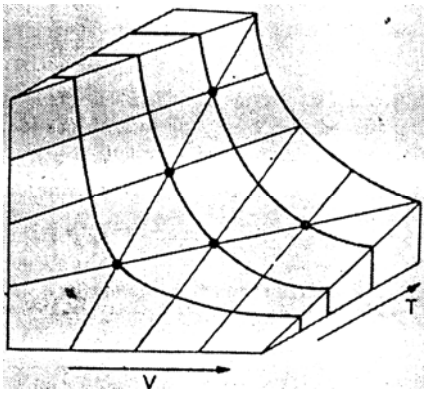


(a)



Gambar 9.12

(b)



(c)

Gambar 9.8. a. Diagram *PV* gas ideal, b. Diagram *PT* gas ideal, c. Permukaan *PVT* gas ideal

9.8 KERJA

Kerja atau usaha, dengan simbol *W*, adalah besaran skalar yang didefinisikan sebagai hasil kali antara lintasan dengan komponen gaya pada arah lintasa.

Secara vektor, kerja didefinisikan sebagai perkalian skalar antara gaya $\overline{F}$ dengan vektor lintasan $\overline{S}$ atau:

$$W = \overline{F} \cdot \overline{S} = FS \cos \alpha \qquad \text{.....(9.17)}$$

di mana α menyatakan sudut yang dibentuk oleh vektor $\overline{F}$ dengan vektor $\overline{S}$, sedangkan *F* dan *S* menyatakan besarnya vektor gaya dan lintasan tersebut.

Secara umum, untuk setiap perpindahan (pergeseran) dihasilkan kerja sebesar *dW*:

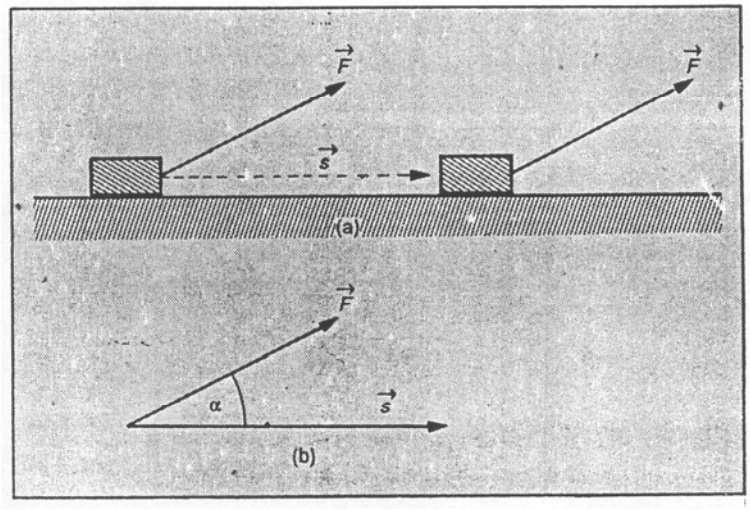
$$dW = F \cos \alpha \, dS \qquad \text{.....(9.18)}$$

Persamaan (9.17) menyatakan kerja dalam bentuk diferensial (kerja infinitesimal). Kerja total oleh gaya F dituliskan dalam bentuk:

$$W = \int F \cos \alpha \, dS \qquad \text{.....(9.19)}$$

Di dalam termodinamika, besaran kerja dibedakan menajdi kerja eksternal dan kerja internal. Kerja eksternal adalah kerja yang dilakukan oleh gaya eksternal. Kerja eksternal dapat dilakukan oleh lingkungan terhadap sistem atau sebaliknya (dilakukan oleh sistem

terhadap lingkungan. Kerja internal adalah kerja yang dilakukan oleh gaya internal. Kerja internal dilakukan oleh satu bagian sistem terhadap bagian sistem yang lainnya. Untuk pembahasan selanjutnya istilah kerja dimaksudkan untuk kerjaeksternal.



Gambar 9.9 a. Gaya sebesar *F* bekerja pada abenda m dan menyebabkan perpindahan sejauh *S*, b. Vektor gaya $\overline{F}$ membentuk sudut α dengan vektor $\vec{S}$.

9.10 KERJA PADA PROSES IRREVERSIBLE (TAK REVERSIBLE)

Proses irreversible terjadi jika perubahan besaran ekstensif sistem berlangsung secara spontan. Selama berlangsungnya proses ini sistem berada dalam keadaan tak setimbang. Untuk proses irreversible kerja sistem hanya dapat dinyatakan sebagai harga negatif dari kerja lingkungan terhadap sistem:

$$W = -W_{eks} = -Y_{eks} \int_1^2 \mathrm{dx}$$

Dengan Y_{eks} menyatakan besaran intensif lingkungan (eksternal) yang pada umumnya konstan.

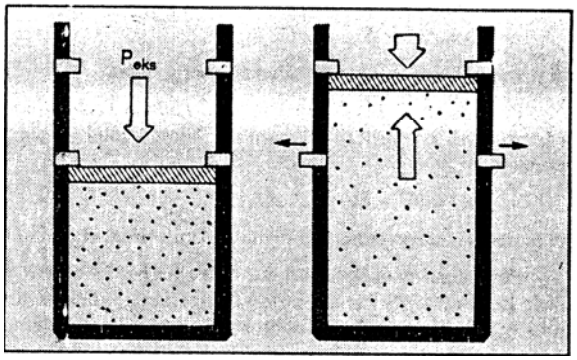
Contoh:

1. Kerja pada proses perubahan volume yang irreversible.

Gambar di samping ini menunjukkan perubahan volume gas secara spontan apabila stoper dilepas. Kerja pada proses spontan ini dinyatakan dengan:

$$W = P_{eks} \int_{V_1}^{V_2} dV$$

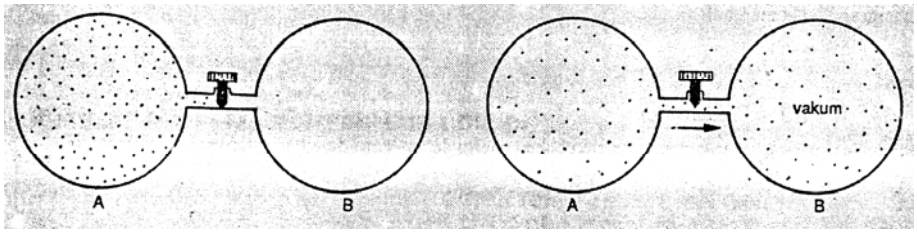
$$W = P_{eks} (V_2 - V_1) \quad \text{.....(9.20)}$$



Gambar 9.10 Proses adiabatis

2. **KERJA PADA PROSES PEMULAAN BEBAS (EKSPANSI BEBAS)**

Gambar di bawah ini menunjukkan perubahan volume gas karena mengisi ruang vakum.



Gambar 9.11 Proses pemuaian bebas

Setelah kran dibuka, maka gas dari ruang A akan mengalir ke ruang B yang mula-mula vakum, sehingga volume gas bertambah dari $V = V_A$ menjadi $V = V_A + V_B$. Karena $P_{eks} = 0$, maka perubahan volume gas tersebut dikatan sebagai pemuaian bebas dan prosesnya berlangsung

secara spontan. Pada pemuaian bebea besarnya kerja. $W = 0$, karena $P_{eks} = 0$.

Catatan:

Prinsip pemuaian bebas ini digunakan oleh Gay Lussac dan Joule di dalam percobaannya untuk mengamati perubahan temperatur akibat perubahan volume. Percobaan dikenal sebagai eksperimen Joule-Gay Lussac.

9.11 KALOR DAN HUKUM TERMODINAMIKA I

Kalor

Istilah kalor dipergunakan untuk menyatakan energi yang berpindah. Aliran kalor terjadi karena adanya perbedaan temperatur dan kalor mengalir dari suatu tempat yang temperaturnya tinggi ke tempat lain yang temperaturnya rendah. Kalor diberi simbol Q dan perubahan infinitesimalnya dinyatakan dengan δQ yang merupakan diferensial tidak eksak seperti halnya δW.

Suatu sistem yang tidak terisolasi akan menyerap kalor dari lingkungannya jika temperatur sistem lebih rendah dari temperatur lingkungan, dan sebaliknya sistem akan melepaskan kalor ke lingkungannya jika temperatur sistem.

9.11.1 PANAS (KALOR) TRANSFORMASI DAN ENTALPI

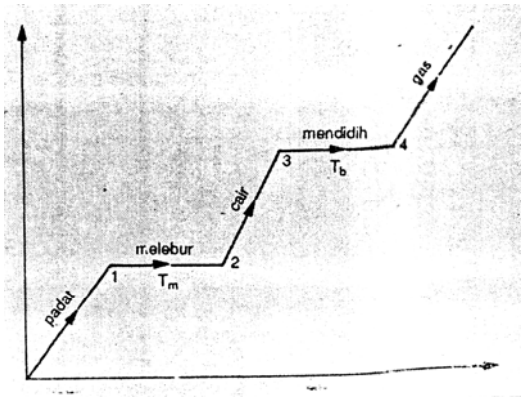
Perubahan Fasa

Apabila suatu zat padat dipanaskan terus-menerus pada tekanan tetap maka temperaturnya akan naik terus sampai pada suatu harga temperatur tertentu di mana temperaturnya menjadi konstan. Pada temperatur konstan tersebut kalor yang diserap zat dipergunakan seluruhnya untuk melakukan perubahan wujud (transformasi fasa). Temperatur zat akan naik lagi apabila seluruh massa zat sudah berubah wujudnya. Perubahan wujud zat secara skematis dapat digambarkan sebagai berikut:

Proses 1 → 2 disebut melebur (meleleh) yaitu perubahan zat padat ke cair, dan kebalikannya (proses 2 → 1) disebut membeku. Proses 3 → 4 disebut mendidih yaitu perubahan zat dari cair ke uap dan kebalikkannya (proses 4 → 3) di sebut mengembun. Proses 2 → 3 adalah proses kenaikan temperatur zat (dalam bentuk cairnya) secara isobarik dari titik leburnya (T_m) sampai dengan titik didihnya (T_b).

Ada beberapa zat yang di dalam pengamatan kita zat tersebut dapat berubah wujud dari padat langsung menjadi uap, misalnya es kering (CO_2 pada) dana pada kamper (kapur barus). Hal ini disebabkan karena

titik beku dan titik didihnya mempunyai harga yang berdekatan, sehingga bentuk cair dari zat tersebut tidak sempat teramati. Perubahan zat dari padat ke uap disebut suplimasi.



Gambar 9.12. Diagram *H* (entalpi) versus *T* (temperatur)

Titik lebur suatu zat *(T_m)* adalah harga temperatur pada zat sejumlah zat padat berubah seluruhnya menjadi zat cair jika dipanaskan pada tekanan konstan.

Titik didih suatu zat *(T_b)* adalah harga temperatur pada saat sejumlah zat cair berubah seluruhnya menjadi uap jika dipanaskan pada tekanan konstan.

Banyak panas persatuan massa yang dibutuhkan oleh suatu zat di dalam proses perubahan wujudnya di sebut kalor transformasi dan diberi simbol *l*. Satuan *l* menurut SI adalah Jkg^{-1}.

Kalor transformasi untuk proses melebur disebut kalor lebur (l_m) dan untuk proses mendidih disebut kalor didih atau kalor uap (l_b atau l_v). Banyaknya kalor yang diperlukan m kg zat untuk melebur seluruhnya, Q_m, atau untuk mendidih, Q_b, dapat dinyatakan dengan:

$$Q_m = m \,.\, l_m \quad \text{..... ...(9.21)}$$

$$Q_b = m \,.\, l_b \quad \text{.....(9.22)}$$

Contoh harga T_m, T_b, l_m dan l_b dari beberapa zat:

Tabel 9.1
Harga T_m, T_b, l_m dan l_b pada temperatur ruang dan tekanan 1 atm

Zat	T_m (K)	l_m (KJ/mol)	T_b (K)	l_b (KJ/mol)
O_2	54,8	0,45	90,2	6,83
N_2	63,3	0,72	77,3	5,58
CH_4	90,7	0,94	111,0	8,80
C_2H_4	104,0	3,35	185,0	14,68
HCl	-	-	188,0	16,18

9.11.2 Entalpi

Entalpi, H, suatu sistem didefinisikan sebagai:

$$H = U + PV \quad \text{.....(9.23)}$$

Dan entapi spesifik, yaitu entalpi persatuan massa atau persatuan jumlah mol:

$$h = \frac{H}{m} = \frac{H}{n}\ u + Pv \quad \text{.....(9.24)}$$

Pada peristiwa transformasi fasa, banyaknya kalor yang diserap atau dilepaskan oleh sistem atau zat persatuan massa sama dengan kalor transformasi *l*. Jadi dapat kita tuliskan:

$$l = \frac{Q}{m} = \frac{\Delta U}{m} + \frac{\Delta p}{m}$$
$$= \Delta u + P \,.\, \Delta v$$

Untuk perubahan fasa dari fasa 1 ke fasa 2:

$$l_{1,2} = u_2 - u_1 + P\,(v_2 - v_1)$$
$$= (u_2 + Pv_2) - (u_1 + Pv_1)$$
$$= h_2 - h_1$$

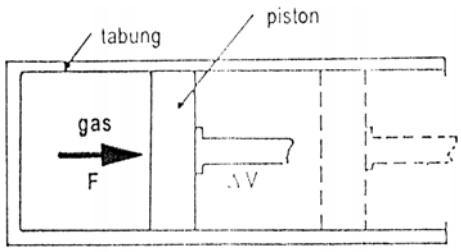
Jadi,

$$l = \Delta h \quad \text{.....(9.25)}$$

Persamaan (9.25) menyatakan bahwa pada perubahan fasa, besarnya kalor transformasi sama dengan besarnya perubahan entalpi sistem.

Dalam termodinamika, sekumpulan gas yang kita amati disebut sistem, sedangkan semua yang berada di sekitar sistem (misalkan tabung tempat gas dan udara luar) disebut lingkungan.

1. Usaha Luar
   Sebua tabung ditutup dengan penghisap (piston) yang dapat bergerak bebas tanpa gesekan, dan berisi gas ideal (lihat Gambar 9.13). Bila gas dalam tabung dipanaskan, penghisap akan bergerak. Dikatakan bahwa gas melakukan usaha luar atau melakukan usaha terhadap lingkungannya.



Gambar 9.13 Usaha luar

Besarnya usaha luar yang dilakukan oleh gas adalah:

$W = F \,.\, \Delta s$

$\Leftrightarrow W = p \,.\, A \,.\, \Delta s$

Karena $A \,.\, \Delta s = \Delta V$ = perubahan volume, maka

$$W = p.\, \Delta V \qquad \text{.....(9.26a)}$$

Atau

$$W = p\,(V_2 - V_1) \qquad \text{.....(9.26b)}$$

Dengan:

F = gaya tekanan gas
Δs = pergeseran penghisap
A = luas penampang penghisap
p = tekanan gas
ΔV = perubahan volume

Selain dapat melakukan usaha luar, gas juga dapat menerima usaha luar. Usaha yang dilakukan lingkungan terhadap gas adalah kebalikan dari usaha luar gas. Persamaan (9.26a) dapat kita tulis:

$$W = -p.\, \Delta V \qquad \text{.....(9.26c)}$$

2. Proses yang dialami gas
   Suatu gas ideal dalam ruang tertutup dapat diubah keadaanya melalui berbagai proses, antara lain proses isotermal, proses isokhorik, proses isobarok, dan proses adiabatik.

A.PROSES ISOTERMAL

Proses isotermal dalah suatu proses perubahan keadaan gas pada suhu tetap (T = tetap). Dalam proses isotermal ini, berlaku persamaan keadaan gas ideal $pV = nRT$. Tetapi karena T tetap dan nR juga selalu tetap, maka dinyatakan:

pV = konstan

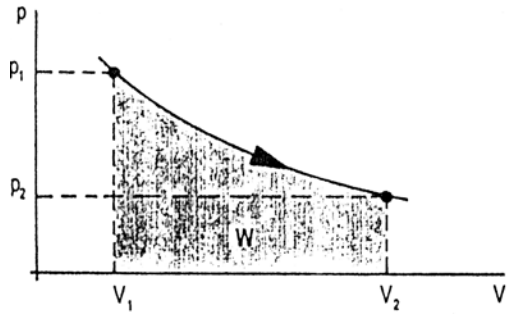
atau

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \qquad \text{.....(9.27)}$$

Persamaan (9.27) sesuai dengan hukum Boyle, dengan:

- p_1 dan V_1 = tekanan dan volume mula-mula
- p_2 dan V_2 = tekanan dan volume akhir

Grafik hubungan tekanan *(p)* dengan volume *(V)* pada proses isotermal, ditunjukkan seperti Gambar 9.14 Luas daerah di bawah grafik (daerah yang diraster), menggambarkan besarnya usaha yang dilakukan gas atau usaha luar *(W)*. Secara umum usaha yang dilakukan gas dinyatakan dengan persamaan integral sebagai berikut:



Gambar 9.14 Usaha luar gas dalam grafik pV

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p.dV \qquad \text{.....(9.28)}$$

Dari persamaan umum gas ideal, diperoleh:

$p = \frac{nRT}{V}$, sehingga $W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV$.

Faktor-faktor *nRT* dapat dikeluarkan dari tanda integral, karena nilainya tetap (konstan). Kemudian digunakan sifat integral $\int \frac{dx}{x} = ln x$, sehingga diperoleh:

$$W = nRT \int \frac{dV}{V}$$

$$= nRT \left[ln\ V \right]_{V_1}^{V_2}$$

$$= nRT\ [ln\ V_2 - ln\ V_1]$$

$$W = n\ RT\ ln \frac{V_2}{V_1} \qquad \text{.....(9.29)}$$

Contoh 9.6

Dua mol gas mula-mulamenempati ruang *V* dan tekanannya *p*. Gas tersebut dimampatkan secara isotermal pada suhu 227^{o}C, sehingga volume akhir gas tersebut menjadi setengah dari volume awalnya.

Tebtukan:

a. tekanan gas pada keadaan akhir!
b. Usaha yang dilakukan gas bila *R* = 8,31 J/molK!

Penyelesaian

n = 2 mol

$V_1 = V \Rightarrow V_2 = ½\ V$

$p_2 = p$

T = (227 + 273) K = 500 K

R = 8,31 J/molK

a) p_2 = ?

b) W = ?

a) Tekanan gas pada keadaan akhir

$p_1V_1 = p_2V_2$

$\Leftrightarrow p\ .\ V = p_2\ (\left(\frac{1}{2} \mathrm{V}\right)$

$\Leftrightarrow p_2 = 2\ p$

b) Usaha yang dilakukan gas

$$W = nRT1n\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$= 2\ (8{,}31)\ (500)\ 1n\left(\frac{\frac{1}{2}V}{V}\right)$$

$$= 8310\ .\ 1n\ \tfrac{1}{2}$$

$$= 8310\ (-0{,}693)$$

$$= -5760{,}05\ \text{J}$$

Usaha yang dilakukan gas dalam kasus di atas ternyata bernilai negatif. Ini berarti bahwa gas menerima usaha dari luar. Dalam soal disebutkan bawah gas dimampatkan.

Latihan 9.5

Dua gas argon memuai secara isotermal pada suhu 500 K, dari volume awal 0,05 m^3 ke volume akhir 0,1 m^3. Bila tekanan awal gas 8,31 . 10^7 Pa, tentukanlah:

a. Tekanan akhir gas!
b. Usaha yang dilakukan gas!

B. PROSES ISOKHORIK

Proses iskhorik gas pada volume tetap (V = tetap). Dalam proses ini, juga berlaku persamaan gas ideal $pV = nRT$

$$\Leftrightarrow \frac{P}{T} = \frac{nR}{V}$$

Karena $\frac{nR}{V}$ = tetap, maka dinyatakan:

$$\frac{P}{T} = \text{tetap}$$

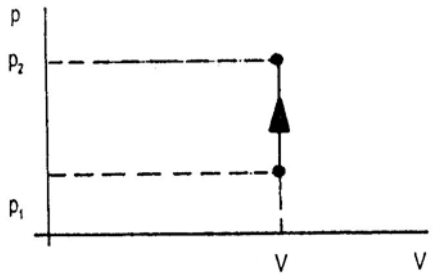
atau

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \qquad \text{.....(9.30)}$$

Persamaan (9.27) sesuai dengan hukum Gay-Lussac, dengan:

- p_1 dan T_1 = tekanan san suhu mula-mula
- p_2 dan T_2 = tekanan dan suhu akhir

grafik hubungan tekanan (p) dengan volume (V) pada proses iskhorik, ditunjukkan seperti Gambar 9.15 Karena volume tetap, maka dalam proses ini usaha sama dengan nol ($W = 0$).



Gambar 9.15 Grafik *PV* proses iskhorik

C. PROSES ISOBARIK

Proses isobarik adalah suatu proses perubahan keadaan gas pada tekanan tetap. Dari persamaan keadaan gas iseal $pV = nRT$, dengan menganggap p dan nR tetap, diproleh hubungan:

$\frac{V}{T}$ = konstan

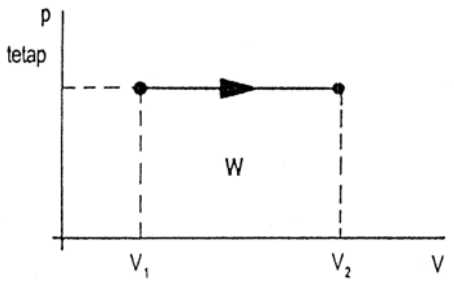
atau

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \qquad \text{.....(9.31)}$$

Peramaan (9.28) sesuai dengan hukum Gay-Lussac.

Grafik hubungan p-V-nya, ditunjukkan seperti Gambar 9.16 Usaha yang dilakukan gas sama dengan luas daerah yang diraster, yaitu sebesar:

$W = p\,\Delta V$ *atau* $W = p(V_2 - V_1)$



Gambar 9.16 Garfik *PV* proses isobarik

d. Proses adiabatik

Proses adiabatik adalah suatu proses perubahan keadaan gas di mana tidak ada kalor yang masuk ke atau ke luar dari sistem (gas) (Q = 0). Proses ini mengikuti rumus Poisson sebagai berikut:

pV^{γ} = konstan atau

$p_1V_1^{\gamma} = p_2V_2^{\gamma}$ .....(9.32)

dengan:

γ = konstanta Laplace = $\frac{C_p}{C_v}$

C_p = kapasitas kalor pada volume tetap

C_v = kapasitas kalor pada volume tetap

- Untuk gas monoatomik besarnya C_v dan C_p yaitu:

  $C_v = \frac{3}{2} n R$ dan $C_p = \frac{5}{2} n R$ ..... (9.33)

- Untuk gas diatomik, besarnya C_v dan C_p yaitu:

  Pada suhu rendah ($\pm$ 300 K)

  $C_v = \frac{3}{2} n R$ dan $C_p = \frac{5}{2} n R$

  Pada suhu sedang ($\pm$ 500 K)

  $C_v = \frac{5}{2} n R$ dan $C_p = \frac{7}{2} n R$

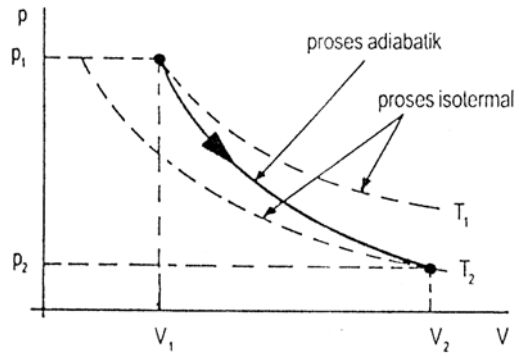
  Pada suhu tinggi ($\pm$ 1000 K)

  $C_v = \frac{7}{2} n R$ dan $C_p = \frac{9}{2} n R$

Tabel 10.2 Konstanta Laplace γ beberapa gas tertentu hasil pengukuran pada tekanan 1 atm dan suhu 20^0C

Gas	$\gamma = C_p/C_v$
Monoatomik	
Helium (He)	1,66
Argon (Ar)	1,67
Diatomik	-
Nitrogen (N_2)	1,40
Oksigen (O_2)	1,40
Karbonmonoksida (Co)	1,40

Perhatikan grafik $p - V$ pada Gambar 9.17. Tampak bahwa grafik adiabatik lebih curam dari pada grafik isotermal. Suhu, tekanan, maupun volume pada proses adiabatik adalah tidak tetap.



Gambar 9.17 $P - V$ Proses adiabatik dan isotermal

Karena pada proses adiabatik sistem tidak melepas atau menerima kalor (Q = 0), maka usaha yang dilakukan oleh sistem (gas) hanya mengubah energi dalam *(ΔU = -W)*. Besarnya usaha tersebut dinyatakan sebagai berikut:

$$W = \frac{3}{2} n R(T_1 - T_2) \quad \text{.....(9.34)}$$

Contoh 10.7

Dalam silinder sebuah mesin, dilakukan pemampatan gas (campuran behan bakar dan udara) secara adiabatik dengan rasio 15 : 1, artinya volume gas dimampatkan, tekanannya 1 atm, hitunglah: (g = 1,4).

a. tekanan gas pada keadaan akhir!
b. Suhu gas pada keadaan akhir!

Penyelesaian:

$V_2 = \frac{1}{15} V_1$

T_1 = (27 + 273) K = 300 K

p_1 = 1 atm

a) p_2 = ...?

b) T_2 = ...?

a. Tekanan gas pada keadaan akhir (p_2)

$p_1 V_1^{\gamma} = p_2 V_2^{\gamma}$

$\Leftrightarrow p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma}$

$= (1) \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma}$

$= (1) (15)^{1,4}$

= 44,31 atm

b. Suhu gas pada keadaan akhir *(T_2)*

$p_1 V_1^{\gamma} = p_2 V_2^{\gamma}$

$\Leftrightarrow \left(\frac{nRT_1}{V_1} \right) V_{1^{\gamma}} = \left(\frac{nRT_1}{V_1} \right) V_{2^{\gamma}}$

$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$ .....(9.35)

$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}$

$= 300 \left(\frac{V_1}{1/15 V_1} \right)^{1,4-1}$

$= 300 (15)^{0,4}$

= 886,25 K

$= (886,25 - 273)^{o}C = 613,25^{0}C$

Contoh 10.8
Untuk memampatkan 1 mol gas monoatomik dilakukan usaha sebesar 1,5 x 10^4J, sehingga suhu mutlak gas itu menjadi 2 kali susu awal. Bebarapa suhu awal gas tersebut?
(R = 8,31 J/mol K)

Penyelesaian:
n = 1 mol
W = 1,5 x 10^4 J
T_2 = $2\ T_1 \Leftrightarrow T_2 - T_1 = (2T_1) - T_1 = T_1$
T_2 = ...?

$$W = \frac{3}{2} nR(T_2 - T_1)$$

$$\Leftrightarrow W = \frac{3}{2} nRT_1$$

$$\Leftrightarrow T_1 = \frac{2W}{3nR}$$

$$= \frac{2\left(1{,}5\,x10^4\right)}{3(1)(8{,}31)} = 1203{,}37 \text{ K}$$

Latihan 9.6

1. Suatu gas monotomik dimampatkan secara adiabatik, sehingga volumenya menjadi $1/10$ kali semula. Barapa tekanan dan suhu gas pada keadaan akhir?
2. Dua mol gas manoatomik dimampatkan secara adiabatik, sehingga suhu mutlaknya menajadi lima kali semula. Berapa usaha yang dilakukan pada gas? (R = 8,3 J/mol K)

3. Hukum pertama termodinamika

Hukum pertama termodinamika merupakan perluasan dari hukum kekekalan energi yang menyatakan ”meskitpin energi kalor telah berubah menjadi perubahan energi dalam dan usaha luar gas, jumlah seluruh energi itu selalu tetap”. Hukum tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan:

$\Delta Q = \Delta U + \Delta W$ .....(9.36)

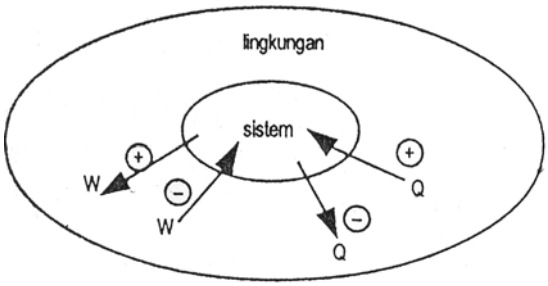
dengan:

ΔQ= energi kalor yang diserap atau dilepas sistem

ΔU= perubahan energi dalam

ΔW = usaha luar (kerja)

Ketentuan menggunakan persamaan (9.36), lihat Gambar 9.18.



Gambar 9.18 Ketentuan nilai W dan Q

- Jika sistem melakukan kerja, nilai ΔW bertanda positif
- Jika sistem menerima kerja, nilai ΔW bertanda negatif
- Jika sistem melapas kalor, nilai ΔQ bertnda negatif
- Jika sistem menerima kalor, nilai ΔQ bertanda positif

Contoh 9.9

Suatu sistem menyerap kalor 2000 kalori dari lingkungannya (1 kalori = 4,2 J) dan melakukan kerja sebesar 2400 J terhadap lingkungannya. Tentukan perubahan energi sistem!

Penyelesaian

ΔQ = + 2000 (4,2 J) = 8400 J

ΔW = + 2400 J

ΔU = ...?

$\Delta Q = \Delta U + \Delta W$

$\Leftrightarrow \Delta U = \Delta Q - \Delta W$

= 8400 – 2400

= 6000 J

Latihan 9.7

Hitunglah perubahan energi dalam gas apabila:

a. gas menyerap kalor 800 kalori dan melakukan usaha 1680 J!
b. Gas menyerap kalor 400 kalori dan lingkungan melakukan usaha terhadap gas sebesar 1000 J!

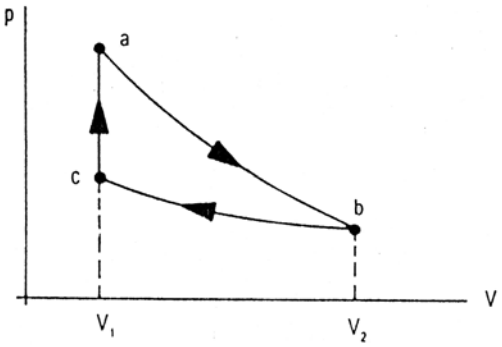
c. Gas mengeluarkan kalor 1600 kalori pada volume tetap!

Petunjuk:
Gas diproses pada volume tetap, berarti $\Delta V = 0$, sihingga $W = 0$.

D. PROSES KELILING (SIKLUS) TERMODINAMIKA

1. Pengertian proses keliling (siklus)

Mengubah usaha menjadi kalor dapat dilakukan secara terus-menerus. Tetapi mengubah kalor menjadi usaha tidak semudah itu karena menyangkut terbatasnya ruang tempat gas. Untuk dapat mengubah kalor menjadi usaha secara terus-menerus, haruslah diupayakan agar gas yang telah melakukan usaha itu dikembalikan ke keadaan semula. Proses seperti ini disebut proses keliling atau siklus atau daur.
Perhatikan contoh siklus sembarang dalam diagram *p-V* seperti diperlihatkan pada Gambar 4.7. Rangkaian prosesnya dapat dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 9.19 Contoh proses keliling (siklus) dalam diagram *p-V*

Proses pertama (a – b)

Pada proses a – b, gas memuai secara adiabatik. Usaha yang dilakukan oleh gas adalah luas bidang abV_2V_1, harganya positif ($+ W_{ab}$).

Proses kedua (b – c)

Pada proses b – c, gas dimampatkan secara isotermal. Usaha yang dilakukan oleh gas sama dengan luas bcV_2V_1, harganya negatif $(-W_{bc})$.

Proses ketiga (c – a)

Proses c – a adalah proses isokhorik. Pada proses ini gas tidak melakukan usaha luar karena volume tetap ($W_{ca} = 0$). Proses c – a dilakukan hanya untuk mengembalikan keadaan gas ke keadaan semula, agar bisa lagi melakukan proses pertama dan seterusnya.

Usaha luar total (ΔW) dalam satu siklus a – b – c – a dapat dinyatakan:

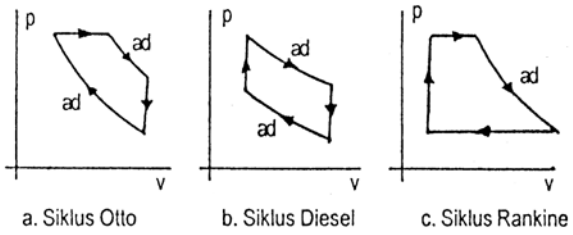
$$\Delta W = W_{ab} - W_{bc}$$

atau ΔW = luas daerah abca

Dalam penerapannya, suatu proses keliling (siklus) dilakukan di dalam sebuah mesin kalor. Misanya :

- Mesin otto, siklusnya disebut siklus Otto
- Mesin Diesel, siklusnya disebut siklus Diesel
- Mesin Uap, siklusnya disebut siklus Rankine

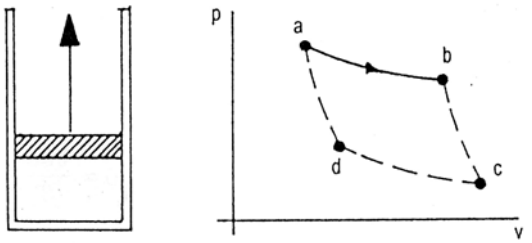
Gambar 9.28 memperlihatkan siklus mesin-mesin tersebut.



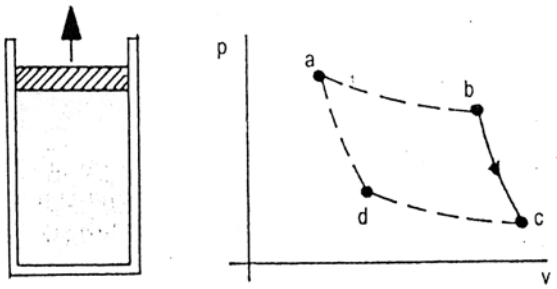
Gambar 9.20 Proses keliling (siklus) mesin

2. Sekitar tahun 1824 seorang insinyur dan ahli fisika bernama Sardi Carnot, telah berhasil menciptakan suatu landasan teori tentang siklus dalam suatu mesin, yang kemudian disebut mesin carnot dan siklusnya disebut siklus carnot. Mesin carnot merupakan mesin kalor ideal yang bekerja secara siklus dan dapat dibalik (*reversible*) di antara dua suhu.

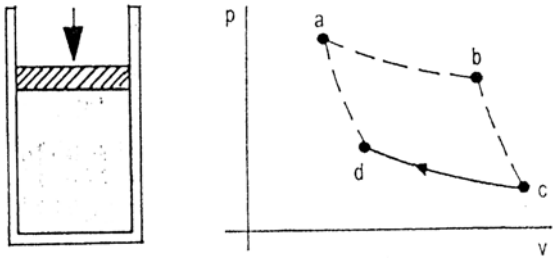
   Mesin carnot dibayangkan sebagai mesin yang terdiri atas sebuah silinder gas ideal dan ditutup dengan penghisap (piston) yang dapat bergerak bolak-balik dalam silinder. Perhatikan gerakan piston pada setiap proses dari satu bidang siklus (Gambar 9.21).



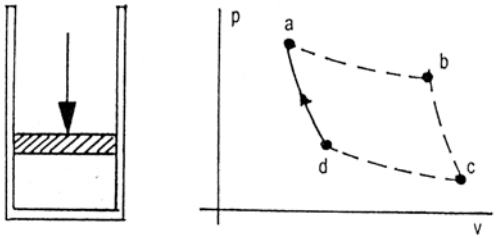
a. Pemuaian isotermal pada



b. Pemuaian adiobatik



c. Pemampatan isotermal pada T_2

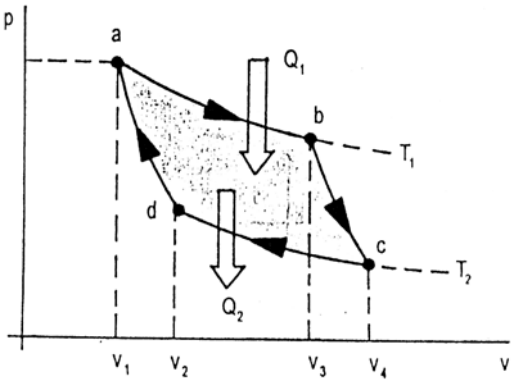


d. Pemampatan adiabatik

Gambar 9.21 Siklus Carnot dan gerak piston di dalam silinder.

Siklus carnot secara lengkap ditunjukkan oleh gambar 9.29. Proses-prosesnya yaitu sebagai berikut:

- Proses a ke b, gas mengalami pemuaian isotermal, menyerap kalor dari reservoar suhu tinggi T_1 dan melakukan usaha.
- Proses b ke c, gas mengalami pemuaian adiabatik dan melakukan usaha.
- Proses c ke d, gas mengalami pemampatan isotermal, membuang kalor Q_2 ke reservoar suhu rendah T_2, usaha dilakukan pada gas.
- Proes d ke a (kembali ke kedudukan awal), gas mengalami pemampatan adiabatik dan usaha dilakukan pada gas.



Gambar 9.22 Diagram PV untuk proses isothermal dan adiabatis.

Karena dalam satu siklus, gas kembali ke keadaan semula, maka tidak ada perubahan energi dalam ($\Delta U = 0$). Oleh karena itu, usaha yang dilakukan gas (ΔW) dalam satu siklus adalah:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W$$
$$\Leftrightarrow + Q_1 - Q_2 = 0 + \Delta W$$
$$W = Q_1 - Q_2 \qquad \text{.....(9.37)}$$

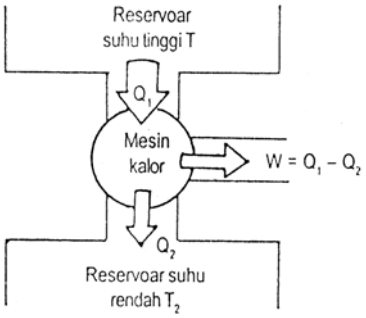
Dengan :

Q_1 = kalor yang diserap dari reservoir suhu tinggi T_1
Q_2 = kalor yang dibuang ke reservoar suhu rendah T_2
ΔW = usaha dalam satu siklus

Menurut Gambar 9.22, usaha total satu siklus sama dengan luas abcd (bidang yang diranster).

3. Efisiensi mesin Carnot

Mesin Carnot adalah mesin paling efisien, yang siklusnya hanya merupakan siklus teoritik saja. Skema yang menggambarkan perubahan kalor menjadi usaha pada mesin kalor, termasuk mesin Carnot, ditunjukkan pada Gambar 9.23.



Gambar 9.23 Skema mesin kalor

- Pada mesin uap, reservoar bersuhu tinggi adalah ketel uap dan reservoar bersuhu rendah aalah lingkungan mesin itu.
- Pada mesin pembakaran, reservoar bersuhu tinggi adalah campuran bahan bakar dan udara yang dibakar dalam silinder dan reservoar bersuhu rendah adalah lingkungan mesin itu.

Untuk menghasilkan usaha *W*, memerlukan energi. Perbandingan antara usaha yang dihasilkan dengan kalor yang diserap oleh mesin disebut efisiensi mesin *(η)*.

Efisiensi mesin:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \; x\; 100\% \qquad \text{.....(9.38)}$$

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \text{ x } 100\%$$

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) \text{ x } 100\% \qquad \text{..... (9.39)}$$

Menurut Kelvin, $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$. Dari hubungan kalor dengan suhu tersebut, diperoleh rumusan efisiensi mesin Carnot sebagai berikut:

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) x\ 100\% \quad . \qquad \text{.....(9.40)}$$

Rumusan efisiensi mesin secara umum dan efisiensi mesin carnot di atas, menggambarkan bahwa efisiensi mesin tidaklah mungkin mencapai 100%, karena tidak mungkin semua kalor yang diserap mesin seluruhnya diubah menjadi usaha. Tetapi menurut carnot, dari semua mesin yang bekerja dengan menyerap kalor ke resevoar T_1 (bersuhu tinggi) dan melepas kalor ke reservoar T_2 (bersuhu rendah) tidak ada yang seefisien mesin carnot.

Contoh 9.10
Sebuah mesin menyerap kalor dari reservoar suhu tinggi sebesar 11000 joule. Bila mesin melakukan usaha sebesar 4000 joule, hitunglah:
a. kalor yang dikeluarkan mesin ke reserfoar suhu rendah!
b. Efisiensi mesin!

Penyelesaian:

Q_1 = 11000 joule
W = 4000 joule
a) Q_2 = ...?
b) η = ...?

a) Kalor yang dibuang (Q_2)
$W = Q_1 - Q_2$ atau
$Q_2 = Q_1 - W$
= (11000 – 4000)
= 7000 J

b) efisiensi mesin
$\eta = \frac{W}{Q_1}$ x 100%

$$= \frac{4000}{12000} \text{ x } 100\%$$
$$= 33\%$$

Contoh 10.11
Tentukan efisiensi mesin carnot yang bekerja antara suhu 27^0C dan 127^0C!

Penyelesaian:

T_1 = (127 + 273) K = 400 K
T_2 = (27 + 273) K = 300 K
η = ...?

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \text{x } 100\%$$
$$= \left(1 - \frac{300}{400}\right) \text{x } 100\%$$
$$= 25\ \%$$

Contoh 10.12
Sebuah mesin Carnot mempunyai efisiensi 30% ketika reserfoar suhu tinggi 800 K. Agar efisiensi mesin naik menjadi 50%, harus dibuat suhu berapa reserfoar suhu tinggi?

Penyelesaian:

$$\eta_1 = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \text{x } 100\%$$
$$0{,}3 = \left(1 - \frac{T_2}{800}\right) . 1$$
$$\Leftrightarrow \frac{T_2}{800} = 0{,}7$$
$$\Leftrightarrow T_2 = 800 \text{ x } 0{,}7$$
$$= 560 \text{ K}$$

Agar efisiensinya menjadi $\eta_2 = 50\%$, untuk $T_2 = 560$ K, maka:

$$\eta_2 = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \text{x } 100\%$$

$$0{,}5 = \left(1 - \frac{560}{T_1}\right) . 1$$

$$\Leftrightarrow \frac{560}{T_1} = 0{,}5$$

$$\Leftrightarrow T_1 = \frac{560}{0{,}5}$$

$$= 1120 \text{ K}$$

Latihan 9.8

1. Reserfoar suhu tinggi sebuah mesin Carnot besarnya 127^0C dan resefoar bersuhu rendah 27^0C. Kalor yang diambil mesin dalam satu siklus adalah 80 J. Hitunglah:
   a) kalor yang dibuang
   b) usaha yang dilakukan
   c) efisiensi mesin
2. Tentukan efisiensi mesin Carnot yang bekerja antara suhu 0^0C dan 100^0C:
3. Jika reserfoar suhu rendah bersuhu 27^0C, maka efisiensi mesin besarnya 40%. Berapa suhu reserfoar suhu tinggi harus dinaikkan agar efisiensi mesin menjadi 50%?

4. Entropi dan hukum kedua termodinamika

a. Pengertian entropi

Konsep entropi berhungan dengan salah satu cara tinjauan hukum kedua termodinamika. Entropi adalah suatu ukuran banyaknya energi atau kalor yang tidak dapat diubah menjadi usaha. Seperti halnya energi dalam, entropi termasuk fungsu keadaan, sehingga harga entropi hanya bergantung pada kedudukan awal dan kedudukan akhir sistem dan tidak bergantung pada lintasan yang ditempuh untuk mencapai keadaan akhir itu. Jadi, untuk suatu siklus termodinamika, gas mulai dari suatu keadaan menempuh lintasan tertentudan kembali lagi ke kedudukan semula, perubahan entropinya *(ΔS)* sama dengan nol *(ΔS* = 0).

Jika suatu sistem pada suhu mutlak T mengalami suatu proses reversibel dengan menyerap sejumlah kalor Q, maka kenaikan entropi *(ΔS*) dinyatakan sebagai berikut:

$$\Delta S = \left[\frac{Q}{T} \right] \qquad \text{.....(9.41)}$$

dengan ΔS = kenaikan (perubahan) entropi, satuannya J/K atau JK^{-1}

Proses reversibel dan ireversibel

Proses reversibel adalah proses yang dapatdibalik arahnya ke keadaan semula dengan memberikan pengaruh atau kondisi tertentu, tetapi tanpa menimbulkan perubahanpada sitem lain. Proses reversibel, dalam kenyataannya sukar dilakukan. Jadi, adanya hanya dalam konsep. Kebalikan dari proses ini adalah proses ireversibel, di mana usaha yang diperoleh kurang dari usahayang diperlukan untuk mengembalikan sistem ke keadaan semula. Umunya semua proses di alam semesta (jagad raya) merupakan proses ireversibel.

b. Hukum kedua termodinamika

Hukum pertama temodinamika berbicara tentang kekekalan energi, bahwa jumlah seluruh energi itu selalu tetap meskipun energi itu telah berubah dari bentuk yang satu ke bentuk yang lain. Tetapi apakah perubahan bentuk energi itu dapat berlangsung sembarang? Hukum pertama termodinamika tidak membatasi hal ini. Kenyataan menunjukkan bahwa kalor selalu mengalir dari benda yang suhunya tinggi ke benda yang suhunya rendah. Dapatkah kalor berpindah dengan arah sebaliknya? Keadaan ini tidak pernah terjadi walaupun tetap memenuhi hukum termodinamika. Pembatasan tentang perubahan mana yang dapat terjadi dan mana yang tidak, dinyatakan dalam hukum kedua termodinamika.

Beberapa rumusan hukum kedua termodinamika yaitu sebagai berikut.

1) Hukum kedua termodinamika tentang entropi

Hukum kedua termodinamika tentang entropi menyatakan:

Total entropi jagat raya (alam semesta) tidak berubah ketika proses reversibel terjadi ($\Delta S_{jagat\ raya} = 0$) dan bertambah ketika proses ireversibel terjadi ($\Delta S_{jagat\ raya} > 0$).

Kata ”jagad raya” berarti keseluruhan sistem dan lingkungannya.

2) Hukum kedua termodinamika tentang mesin kalor

Rumusan Kelvin dan Planck menyatakan:

Tidak mungkin membuat mesin yang bekerja dalam satu siklus, menerima kalor dari satu sumber kalor dan mengubah kalor itu seluruhnya menajdi usaha.

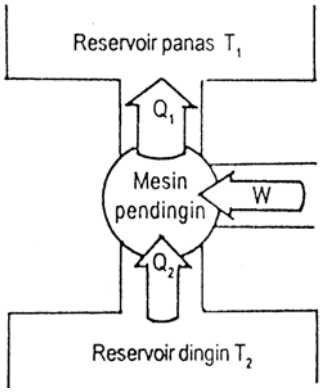
Dapat juga dikatan bahwa tidak mungkin membuat mesin yang efisiensinya 100%. Jadi, seperti telah dikemukakan di atas, bahwa dari semua mesin yang ada, mesin Carnotlah yang memiliki efisiensi terbesar.

Rumusan Clausius menyatakan:

Kalor mengalir secara spontan dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah dan tidak mengalir secara spontan dalam arah kebalikkannya. Tidak mungkin membuat mesin yang bekerja dalam suatu siklus, mengambil kalor dari reservoar yang suhunya rendah dan memberikan kalor itu pada reservoar yang suhunya tinggi tanpa memerlukan usaha luar.

3) Prinsip dasar mesin pendingin

Berdasarkan rumusan Clausius, kalor dapat dipaksa mengalir dari reservoar dingin T_1 ke reservoar panas T_2 dengan melakukan usaha pada sistem. Peralatan yang bekerja dengan cara seperti ini disebut mesin pendingin (refrigerator). Skemanya ditunjukkan pada Gambar 9.32. Contoh mesin pendingin, yaitu lemari es (kulkas) dan pendingin ruangan (air conditioner).



Gambar 9.24 skema mesin pendingin

Dalam lemari es (kulkas), sebagai reservoar dingin adlah bagiandalam kulkas (tempat menyimpan makanan), sedangkan sebagai reservoar panas adalah udara luar sekitar kulkas. Usaha luar dilakukan arus listrik pada sistem, menyebabkan kalor yang diambil dari makanan dipindahkan ke udara luar. Dalam pendingin ruangan (air conditioner), sebagai reservoar dingin adalah ruangan dalam, sedangkan sebagai reservoar panas adalah udara diluar ruangan.

Besarnya usaha luar yanh diperlukan adalah mesin pendingin adalah:

$$W = Q_1 - Q_2 \qquad \text{.....(9.42)}$$

Dengan:

Q_1 = kalor yang diserap dari suhu rendah

Q_2 = kalor uamg diberikan pada suhu tinggi

Koefisien performansi

Penampilan (performansi) mesin pembakaran ditunjukkan oleh efisiensi mesin itu. Untuk mesin pendingin, penampilannya ditunjukkan oleh nilai koefisien performansi (*Cp*). Koefisien performansi didefinisikan sebagai nilai perbandingan antara kalor reservoar dingin dengan usaha yang diberikan pada sitem.

$$Cp = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \qquad \text{.....(9.43)}$$

Nilai koefisien performansi selalu lebih besar daripada satu ($Cp>1$). Makin tinggi nilai *Cp*, maka makin baik mesin pendingin. Kulkas atau AC umumnya memiliki nilai *Cp* antara 2 sampai dengan 6.

Contoh 1.11

Satu kg air pada suhu 100^0C berubah seluruhnya menjadi uap air 100^0C. Jika kalor laten uap air adalah 2,2 x 10^{-6}J/kg, tentukan kenaikan entropi sistem!

Penyelesaian:

Untuk mengubah wujud air menjadi uap, sistem menyerap kalor sebesar *Q* (bertanda positif). Persamaan *Q* yang berhubungan dengan kalor laten adalah:

$Q = mL$

m = massa air atau uap = 1 kgm

L = kalor laten = 2,2 x 10^6J/kg

Q = (1) (2,2 x 10^6) = 2,2 x 10^6 J

T = (100 + 273) K = 373 K

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

$$= \frac{2{,}2\,x10^6}{373} = 5898 \text{ J/K}$$

Contoh 9.12

Sebuah kulkas ideal mempunyai koefisien performansi 5,0. Jika suhu ruang di luar kulkas adalah 27^0C, berapa suhu paling rendah di dalam kulkas yang dapat diperoleh?

Penyelesaian

$Cp = 5{,}0$

$T_2 = 27^0\text{C} = (27 + 273)\text{ k} = 300\text{ K}$

$$Cp = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

$$5{,}0 = \frac{300}{T_1 - 300}$$

$\Leftrightarrow 5{,}0\,(T_1 - 300) = 300$

$\Leftrightarrow 5\,T_1 - 1500 = 300$

$\Leftrightarrow 5T_1 = 1200$

$$\Leftrightarrow T_1 = \frac{1200}{5} = 240^0\,k = 33^0C$$

Latihan 9.9

1. Sebanyak 5 kg es pada suhu 0^0C diubah seluruhnya menjadi air 0^0C. Jika kenaikan entropi adalah 3×10^3 J/K, tentukanlah besar kalor laten es!
2. Koefisien performansi sebuah kulkas adalah 4,0. Berapa banyak energi listrik yang digunakan untuk memindahkan 4000 joule dari makanan yang terdapat didalam kulkas?
3. Berapa koefsien performansi sebuah mesin pendingin ideal yang bekerja di antara suhu 2^0C dan + 35^0C?

Soal-soal Latihan

1. Partikel-partikel gas ideal mempunyai sifat antara lain .....
   1. selalu bergerak
   2. tidak tarik menarik
   3. Bertumbukan lenting sempurna
   4. Tidak mengikuti hukum Newton

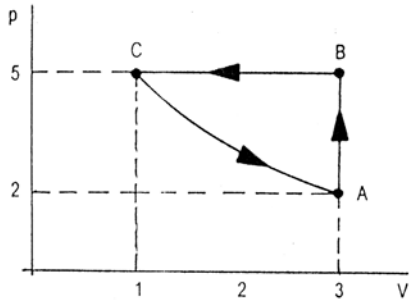
   Pernyataan diatas yang benar yaitu .....
   A. 1, 2, dan 3
   B. 1 dan 3
   C. 2 dan 4
   D. 4 saja
   E. Semua benar
2. Suatu gas ideal tekanannya 30 Pa, volumenya 1,38 liter, dan suhunya 27^0. Jika tetapan Boltzman = $1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K, maka jumlah partikel gas tersebut yaitu ...

A. 10^{14}
B. 10^{19}
C. 10^{20}
D. 10^{22}
E. 10^{25}

3. Jika konstanta Boltzman k = 1,38 x 10^{-23} J/K, maka energi kinetik sebuah atom gas helium pada suhu 27^0 yaitu ....
   A. 4,14 x 10^{-21} J
   B. 2,07 x 10^{-21} J
   C. 5,59 x 10^{-21} J
   D. 6,21 x 10^{-21} J
   E. 12,42 x 10^{-21} J
4. Energi dalam suatu gas ideal ditentukan oleh ....
   A. volumenya saja
   B. tekanannya saja
   C. suhunya saja
   D. Lintasannya saja
   E. Tekanan, volume, dan suhunya
5. Suatu gas volumenya 0,5 m^3 perlahan-lahan dipanaskan pada tekanan tetap hingga volumenya menjadi menjadi 2 m^2. Jika usaha luar gas tersebut 3 x 10^5 J, maka tekanan gas yaitu ....
   A. 6,0 x 10^5 J
   B. 4,5 x 10^5 J
   C. 3,0 x 10^5 J
   D. 2,0 x 10^5 J
   E. 1,5 x 10^5 J
6. Didalam sebuah ruangan tertutup, terdapat gas dengan suhu 27^0C. Gas itu dipanaskan sampai 127^0C sambil siperbesar volumenya menjadi tigas kali volume semula, tekanannya menjadi ....
   A. 4 kalinya
   B. $2\frac{1}{4}$ kalinya
   C. $1\frac{3}{4}$ kalinya
   D. $1\frac{1}{3}$ kalinya
   E. $\frac{4}{9}$ kalinya
7. Perbandingan kapasitas panas pada tekanan tetap terhadap kapasitas panas pada volum tetap adalah 5 : 3 untuk suatu gas ideal 8 m^3. gas ini tekanan awalnya 2,43 x 10^5 Nm^{-2} dieskpansi secara adiabatik hingga volumenya menjadi 27 m^3. Tekanan gas pada akhir ekspansi ialah .....
   A. 0,23 x 10^5 Nm^{-2}
   B. 0,72 x 10^5 Nm^{-2}
   C. 1,08 x 10^5 Nm^{-2}
   D. 1,17 x 10^5 Nm^{-2}
   E. 1,85 x 10^5 Nm^{-2}
8. Hukum pertama termidinamika menyatakan:
   A. kalor tidak dapat masuk ke dan keluar dari suatu sistem
   B. energi adalah kekal

C. energi dalam adalah kekal
D. suhu adalah tetap
E. sistem tidak menadapat usaha dari luar

9. Proses sebuah mesin dengan gas ideal digambarkan dalam gambar diagram di bawah. Dari gambar diagram tersebut dinyatakan:



1. Proses dari A ke B adalah proses isokhorik
2. Usaha yang dilakukan dalam proses dari A ke B sebasar 6 joule
3. Proses dari B ke C, kalor keluar dari sistem
4. Proses dari C ke A adalah proses isotermis

Pernyataan di atas yang benar yaitu .....

A. 1, 2, dan 3
B. 1 dan 3
C. 2 dan 4
D. 4 saja
E. Semua benar

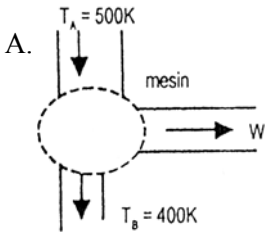
10. Sebuah mesin turbin memakai uap dengan suhu awal 550^0C dan membuangnya pada suhu 35^0C. Efisiensi maksimum mesin turbin tersebut yaitu ...

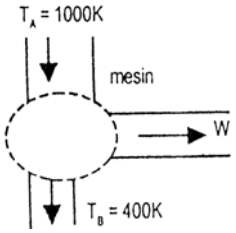
A. 33 %
B. 43 %
C. 53 %
D. 63 %
E. 73 %

11. Dari lima gambar diagram arus mesin Carnot di bawah ini, yang memiliki efisiensi 60 % ialah ....

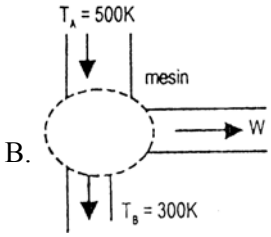
12.

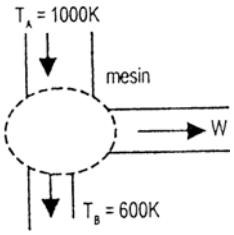
A.



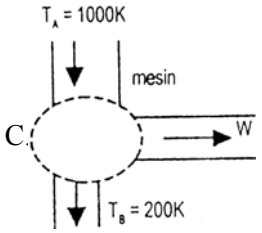


B.





C.



13. Sebuah mesin Carnot bekerja antara suhu 27^0C dan 227^0C, digunakan untuk menggerakkan sebuah generator yang tegangan keluarannya 220 V. Jika setiap detik mesin Carnot itu menyerap kalor 5500 J, maka kuat arus keluaran meksimum generator ialah ....
    A. 2,75 A
    B. 10 A
    C. 15 A
    D. 22 A
    E. 25 A
14. Sebuah mesin Carnot menggunakan reservoar suhu tinggi 800 K dan mempunyai efisiensi 20 %. Untuk menaikkan efisiensi menjadi 36 %, maka suhu reservoar kalor suhu tinggi dinaikkan menjadi .....
    A. 928 K
    B. 1000 K
    C. 1160 K
    D. 1200 K
    E. 1380 K
15. Suhu didalam ruangan berpendingin = -23^0C, sedangkan suhu di luar = 27^0C. Setiap 30 menit dapat dikeluarkan kalor 3 x 10^6

joule. Daya tarik yang dipakai dalam menjalankan pesawat pendingin Carnot itu besarnya ...

A. $\frac{1}{36}$ x 10^4 watt
B. $\frac{1}{18}$ x 10^4 watt
C. $\frac{1}{6}$ x 10^4 watt
D. $\frac{5}{18}$ x 10^4 watt
E. 10^4 watt

II. SOAL URAIAN

1. Sebutkan sifat-sifat gas ideal ?
2. Tuliskan tiga persamaan yang menyatakan hubungan pV dengan faktor-faktor lainya dalam persamaan gas ideal ?
3. Pada suhu berapakah, energi kinetik molekul gas akan menjadi dua kali energi kinetiknya pada suhu 127^0C ?
4. Berapa energi dalam 0,04 mol gas oksigen (diatomik) di dalam sebuah ruang tertutup yang suhunya 350 K ?
5. Suatu jenis gas menempati volum 100 cm^3 pada 0^0C dan tekanan 1 atm. Bila suhu dijadikan 50^0C dan tekanan dijadikan 2 atm, berapa volume gas pada keadaan akhir ?
6. Gas ideal monoatomik mula-mula volumenya 2,5 m^3, tekananannya 10^5 N/m^2, dan suhunya250 K. Gas ini mengalami proses tekanan tetap sampai volumenya menjadi 10 m^3. Kemudian mengalami proses dengan volume tetap sampai tekanannya menjadi 2 x 10^5 N/m^2.
    a. Gambarkan keadaan proses gas tersebut pada diagram $p - V$!
    b. Tentukan suhu gas pada setiap akhir proses!
    c. Berapa usaha total yang dilakukan gas!
7. Sebuah silinder yang ditutup dengan penghisap yang bergerak tanpa gesekan, berisi udara dengan tekanan 20 x 10^5 Pa. Pada saat itu, suhu udara 300 K dan volumenya 0,03 m^3.
   Udara didalam silinder melakukan proses sebagai berikut:
   1) Dipanaskan pada tekanan tetap sampai 500 K
   2) Lalu didinginkan pada volume tetap sampai 250 K
   3) Kemudian didinginkan pada tekanan tetap sampai 150 K
   4) Dipanaskan pada volume tetap sampai 300 K
   a. Lukislah proses-proses itu ke dalam diagram p – V!

b. Hitunglah usaha luar total yang dilakukan gas !

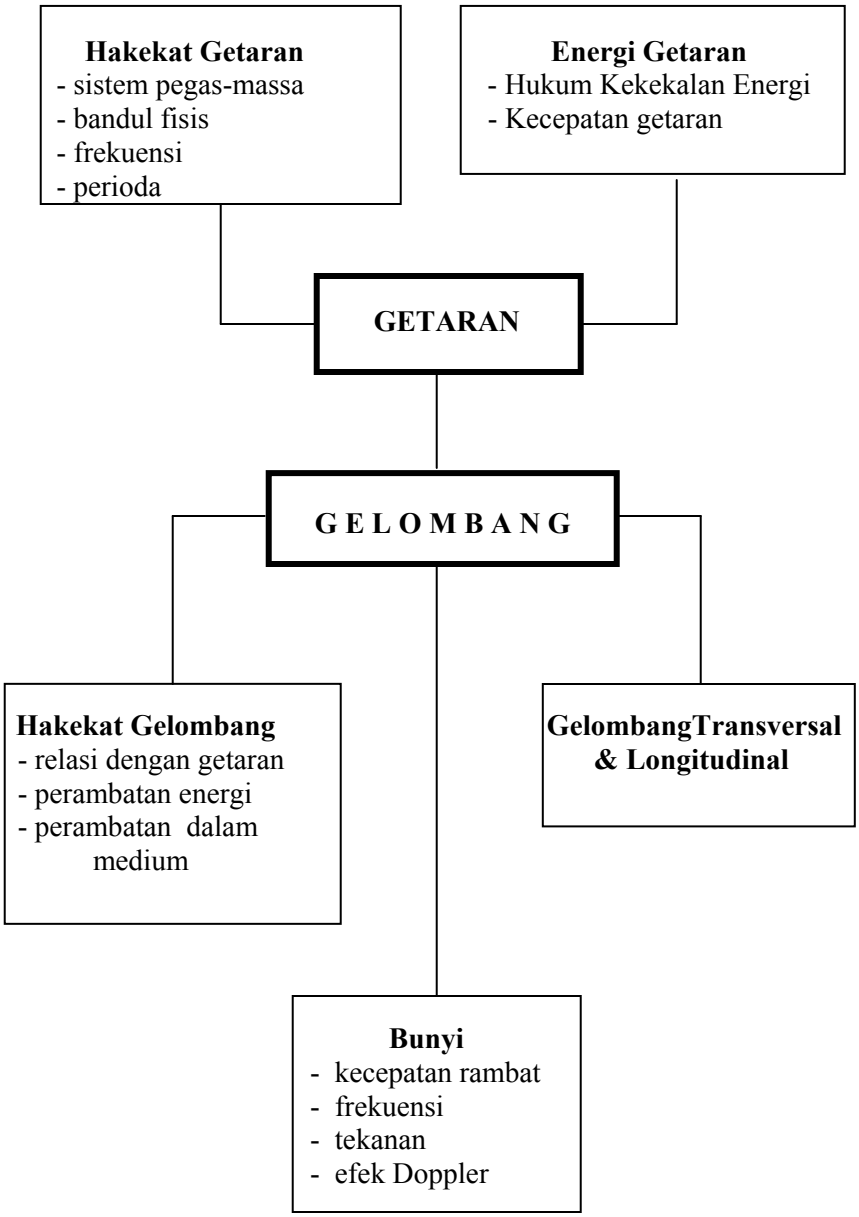
8. Mesin Carnot dengan suhu reservoar dingin 7^0C mempunyai efisiensi 40 %. Bila mesin itu efisiensinya ingin ditingkatkan menjadi 50%, berapa derajat suhu reservoar tinggi harus dinaikkan?
9. Koefisien performansi sebuah mesin pendingin adalah 3,5. Berapa banyak energi listrik yang digunakan untuk memindahkan 6000 joule kalor yang terdapat dalam sebuah ruangan?
10. Sebutkan hukum kedua termodinamika:
    a. tentang entropi!
    b. rumusan menurut Kelvin-Plank dan menurut Clausius!
    c. Berhubungan dengan mesin apa perumusan Kelvin-Plank dan perumusan Clausius?

BAB 10
GETARAN, GELOMBANG DAN BUNYI



Kita tentunya masih ingat musibah akibat gelombang Tsunami di daerah Aceh. Suatu berita yang mengejutkan dan terjadi secara tiba-tiba. Sampai saat ini pun masyarakat di beberapa tempat masih selalu dibayangi dengan ketakutan kalau-kalau gelombang Tsunami muncul kembali. Pemerintah kemudian mengupayakan alat pendeteksi dini (early warning system) agar masyarakat sempat menyelamatkan diri sebelum gelombang itu muncul kembali. Musibah ini berkaitan dengan gelombang yang ternyata membawa energi dalam jumlah yang sangat besar dan menghancurkan. Untuk kelak dapat mengatasi atau mengurangi kehancuran yang diakibatkan gelombang ini maka anda diajak untuk mempelajari dasar-dasar gelombang. Sumber dari setiap gelombang, apakah gelombang bunyi, gelombang air dan lainnya adalah getaran, sehingga gelombang sering juga dikatakan sebagai getaran yang dirambatkan. Karena itu sebelum mendalami tentang gelombang pembahasan akan diawali dengan pengenalan tentang getaran terlebih dahulu. Tsunami hanyalah salah satu gejala alam yang berkaitan dengan gelombang dan getaran. Teknologi komunikasi yang sudah sedemikian canggihnya saat ini juga berkembang karena orang semakin mengenali sifat-sifat gelombang dan memanfaatkannya hingga berdaya guna. Bila anda kelak bergerak di bidang ini, bab ini dan tentunya beberapa bab lain akan dapat merupakan dasar untuk menapak ke sasaran yang lebih tinggi.

PETA KONSEP


Hakekat Getaran
- sistem pegas-massa
- bandul fisis
- frekuensi
- perioda
Energi Getaran
- Hukum Kekekalan Energi
- Kecepatan getaran
GETARAN
G E L O M B A N G
Hakekat Gelombang
- relasi dengan getaran
- perambatan energi
- perambatan dalam medium
GelombangTransversal & Longitudinal
Bunyi
- kecepatan rambat
- frekuensi
- tekanan
- efek Doppler

Pra Syarat

Untuk dapat mengerti pembahasan bab ini dengan baik, siswa sebaiknya telah mempelajari dan mengerti tentang masalahan gerakan benda (kecepatan, percepatan) dan terutama gerak benda dengan kecepatan yang tidak konstan. Selain itu siswa diharapkan telah mengerti tentang makna gaya dan kaitannya dengan gerak benda. Dalam segi matematika, selain aljabar, dan fungsi trigonometri siswa diharapkan telah mengerti tentang makna dari fungsi dua variabel.

Cek Kemampuan

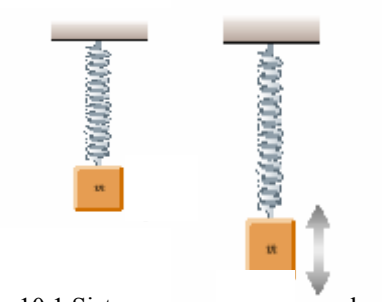
1. Sebuah bandul terdiri dari tali yang panjangnya 50 cm digantungi beban yang massanya 100 gram. Hitunglah frekuensi dan perioda ayunan bandul tersebut. Apakah hasilnya tergantung pada massa beban yang digantungkan?
2. Sebuah benda bergerak harmonik dengan perioda 0,5 sekon dan amplitudo 6 cm. Pada saat awal, benda ada pada posisi x = 0. Di manakah benda berada setelah 0,8 sekon? Berapa kecepatannya saat itu?
3. Gelombang transversal merambat dalam dawai dengan kecepatan sebesar 100 m/s. Berapakah kecepatan rambat gelombang transversal bunyi itu bila tegangan dawai digandakan?
4. Sebuah gelombang longitudinal dirambatkan dengan kecepatan rambat 600 m/s. Berapakah panjang gelombangnya bila frekuensi gelombang itu adalah 300 Hz?
5. Sebuah kereta bergerak dengan kecepatan 108 km/jam menuju sebuah stasiun sambil membunyikan sirenenya. Kepala stasiun mendengar bunyi sirene itu dengan frekuensi 1000 Hz. Berapakah sebenarnya frekuensi sirene kereta api itu?

10.1 Hakekat Getaran

Berikut ini adalah contoh-contoh sistem yang melakukan getaran.

A. Sistem pegas-massa

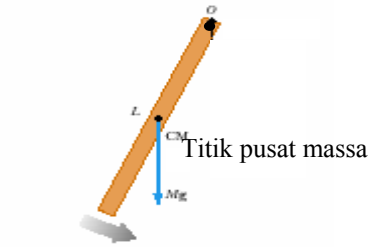
Perhatikan balok bermassa *m* yang dikaitkan pada ujung pegas yang digantungkan secara vertikal (Gambar 10.1). Bila balok m ditarik ke bawah, kemudian dilepaskan, maka balok tersebut akan melakukan gerakan naik-turun-naik-turun berulang-ulang. Balok dikatakan bergetar.



Gambar 10.1 Sistem pegas-massa yang bergetar

A. Sistem bandul fisis

Perhatikan sekarang penggaris yang digantungkan pada sebuah paku (Gambar 10.2). Bila penggaris tersebut disimpangkan dari posisi vertikalnya, maka penggaris akan berayun, menyimpang ke kanan dan ke kiri secara berulang-ulang dan penggaris dikatakan bergetar.



Gambar 10.2 Sistem getaran bandul fisis

Dari dua contoh tadi dapat disimpulkan bahwa getaran adalah suatu gerakan yang khas, yaitu gerakan yang berulang-ulang dan disebut sebagai gerakan periodik. Pada gerakan berulang itu yang dimaksud dengan satu getaran lengkap adalah gerakan dari suatu titik awal kembali ke titik awal tadi. Benda yang bergetar seringkali disebut juga melakukan gerakan harmonis sederhana.

Jadi dapat disimpulkan bahwa

> Getaran harmonis sederhana adalah gerak bolak balik yang melewati suatu titik kesetimbangan

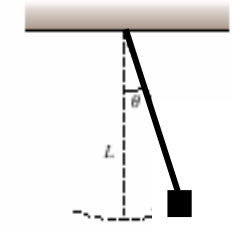
Tugas 1
Carilah lagi 2 contoh sistem yang melakukan getaran, dan peragakan getarannya.

10.1.1 Frekuensi Getaran

Salah satu besaran yang sering dipakai untuk menggambarkan karakter sebuah getaran adalah frekuensi. Jumlah pengulangan atau getaran lengkap yang terjadi tiap satuan waktu dinamakan frekuensi getaran *f*. Jadi satuan getaran dapat berupa getaran/menit, bahkan getaran/jam. Bila satuan waktunya dinyatakan dalam sekon maka didapatkan satuan getaran/sekon atau sering juga dinamakan siklus/sekon dan 1 getaran/sekon = 1 siklus/sekon ≡ 1Hz (Hertz, mengikuti nama fisikawan Jerman, Heinrich Hertz). Jadi getaran dengan frekuensi 200 Hz menyatakan bahwa dalam satu sekon terjadi 200 getaran lengkap.
Benda yang bergetar dengan frekuensi yang tinggi menandakan bahwa dalam suatu waktu tertentu benda itu melakukan banyak getaran lengkap, sementara getaran dengan frekuensi rendah menandakan bahwa jumlah getaran lengkap yang terjadi hanya sedikit.

Kegiatan1 (MENGHITUNG FREKUENSI BANDUL SEDERHANA)

- Ikatkanlah penghapus karet pada seutas tali/benang
- Gantungkan ujung tali yang lain pada sebuah gantungan atau paku
- Simpangkan penghapus tersebut sekitar 30 derajat (lihat Gambar 10.3)
- Hitunglah getaran lengkap yang terjadi dalam 1 menit [gunakan jam henti (*stopwatch*)]
- Berapa Hz frekuensi getaran tadi?
- Ulangi rangkaian kegiatan di atas dengan menggantungkan beban lain. Apakah terjadi perubahan frekuensi?
- Panjangkan tali/benang penggantung menjadi 2 kalinya kemudian ulangi rangkaian kegiatan di atas! Apakah sekarang terjadi perubahan frekuensi?
- Diskusikan hasil yang Anda dapat dalam kelompok



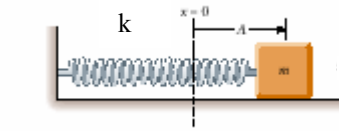
Gambar 10.3 Beban dan tali yang membentuk bandul sederhana

Besar kecilnya frekuensi getaran tergantung dari sistemnya. Pada sistem pegas massa, frekuensi tergantung pada massa balok yang dikaitkan pada pegas (m) dan karakter pegas yang dinyatakan oleh konstanta pegasnya (k). Pegas yang ”keras” mempunyai konstanta pegas yang besar, sedangkan pegas yang sudah lemas (sudah lama) mempunyai konstanta pegas yang kecil. Nah, pada sistem pegas-massa (lihat Gambar 10.4), frekuensi getaran f adalah:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (10.1)$$

dengan k = konstanta pegas

m = massa benda yang terikat pada pegas



Gambar 10.4 Sistem pegas – massa

Tugas 2

1. Carilah dari buku-buku atau internet satuan dari konstanta pegas!
2. Sebuah pegas mempunyai konstanta pegas 15 N/cm, jelaskan apa artinya!
3. Pegas manakah yang lebih ”keras”, pegas A yang mempunyai k = 50 N/cm atau pegas B yang mempunyai k = 5 N/cm? Diskusikan masalah ini dalam kelompok!

Kegiatan 2 (MENENTUKAN KONSTANTA PEGAS)

Bila kita dapat menentukan frekuensi getaran pada sistem pegas massa, maka konstanta pegas dapat dihitung/dicari dengan menggunakan Pers. (10.1).

Jalannya percobaan:

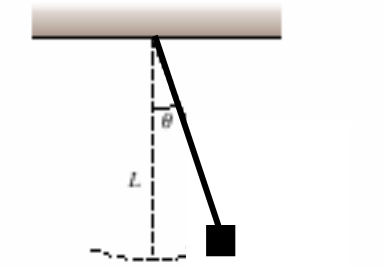
- Berikanlah suatu pengait pada sebuah balok
- Timbang massa balok beserta pengait itu
- Kaitkan balok tadi pada sebuah pegas
- Gantungkan sistem pegas secara vertikal
- Beri simpangan pada balok dengan menarik/menekan balok
- Lepaskan tarikan atau tekanan dan catat dengan *stopwatch* waktu untuk melakukan 5 getaran lengkap

- Berapa Hz frekuensi yang didapat?
- Gunakan Pers. (10.1) untuk mendapatkan nilai k pegas
- Ulangi langkah-langkah tadi dengan pegas yang sama, namun massa balok yang berbeda; dan simpulkan yang saudara peroleh!

Pada sistem bandul sederhana seperti yang terlihat pada Gambar 10.5 di bawah ini, frekuensi ayunan adalah:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{L}} \qquad (10.2)$$

dengan g = percepatan gravitasi
L = panjang tali bandul



Gambar 10.5 Bandul sederhana

Tugas 3

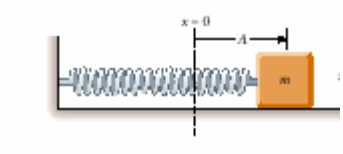
Dari data yang Sdr. dapatkan pada Kegiatan (1), dapatkah Sdr. menghitung percepatan gravitasi? Berapa nilai percepatan gravitasi yang Sdr. dapatkan? Bila Sdr mendapatkan nilai yang jauh dari 9, 8 m/s^2, perkirakan apa yang menyebabkan hal tersebut?

Contoh Soal 1:

Sebuah balok dikaitkan pada sebuah pegas yang konstanta pegasnya 5 N/cm. Berapakah massa balok yang harus dikaitkan agar sistem bergetar dengan frekuensi 10 Hz?

Penyelesaian:

k = 5 N/cm = 500 N/m



Dari Pers (10.1), $f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$

didapat $10 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{500}{m}}$

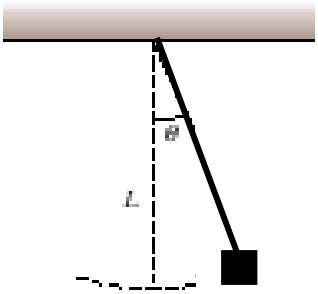
Dengan demikian massa balok yang harus dikaitkan adalah :

$$m = \frac{(500\ N/m)}{(100\ Hz^2)(2\pi)^2} = \underline{0{,}13\ kg}$$

Contoh Soal 2:

Sebuah bola yang massanya 0,1 kg digantungkan pada sebuah tali dan diayunkan. Ternyata dalam waktu 5 menit jumlah ayunan (getaran lengkap) yang terjadi adalah 600 kali. Hitunglah panjang tali tersebut!

Penyelesaian:



Bila dalam 5 menit terjadi 600 getaran lengkap, maka dalam 1 detik terjadi (600/300) = 2 getaran lengkap. Ini berarti bahwa frekuensi getaran adalah f = 2 Hz. Dengan menggunakan Pers.(10.2), $f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{L}}$, dan dengan mengambil percepatan gravitasi g = 10 m/s^2, didapat:

$2\ Hz = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{10\ m/s^2}{L\ m}}$, sehingga diperoleh panjang tali adalah:

$$L = \underline{6{,}3\ cm}$$

10.1.2 Perioda Getaran

Waktu yang dibutuhkan sistem untuk membuat satu getaran lengkap dinamakan waktu perioda atau perioda saja. Dari pengertian ini dan pengertian frekuensi getaran, dengan mudah relasi antara T dan f dapat dimengerti, yaitu bahwa perioda getaran (T) adalah balikan dari frekuensi getaran, atau dirumuskan

$$T = \frac{1}{f} \qquad (10.3)$$

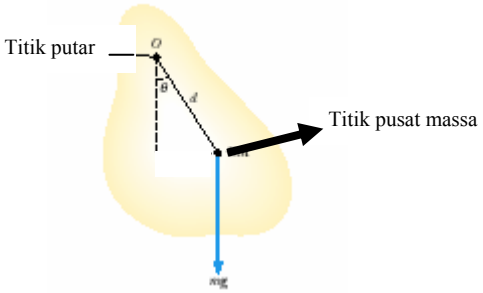
Jadi, jika waktu yang dibutuhkan untuk membuat satu getaran lengkap adalah 0,1 sekon, maka frekuensi getaran itu adalah 1/(0,1) = 10 Hz dan seterusnya.

Telah dijelaskan bahwa frekuensi getaran sangat tergantung pada besaran-besaran sistem. Karena perioda adalah balikan frekuensi, maka jelaslah bahwa perioda getaran juga sangat tergantung pada sistemnya. Pada bandul fisis (misalnya penggaris yang berayun), perioda getarannya ditentukan oleh massa sistem itu, letak titik pusat massanya dan momen inersia benda tersebut (lihat Gambar 10.6).

Perioda getaran bandul fisis adalah:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I_O}{mgd}} \text{ sekon} \qquad (10.4)$$

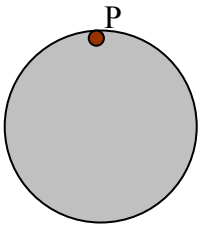
dengan I_o: momen inersia benda terhadap titik putar O (kg m^2)
m: massa benda (kg)
g: percepatan gravitasi (m/s^2)
d: jarak titik putar ke titik pusat massa benda (m)



Gambar 10.6 Bandul fisis

Contoh Soal 3:

Di sebuah peralatan terdapat cakram yang berayun dengan poros P dekat dengan tepi roda cakram tersebut (lihat gambar). Bila massa cakram m adalah 0,2 kg, jari–jarinya R = 10 cm dan momen inersia cakram terhadap poros P adalah $\frac{3}{2}mR^2$, hitunglah perioda ayunan cakram tersebut !



Penyelesaian:
Perioda getaran untuk cakram ini dapat dicari dengan menggunakan Pers. (10.4):

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I_P}{mgd}}$$

Momen inersia terhadap titik putar P adalah $I_P = \left(\frac{3}{2}\right)(0{,}2\ kg)(0{,}1\ m)^2$

= 0,003 kg m^2
Massa cakram m = 0,2 kg; percepatan gravitasi g = 10 m/s^2; sedangkan d = jarak antara titik putar ke titik pusat massa, yang dalam hal ini adalah R = 0,1 m.
Bila nilai-nilai ini dimasukkan ke dalam Pers. (10.4), maka didapat perioda T = 0,77 sekon

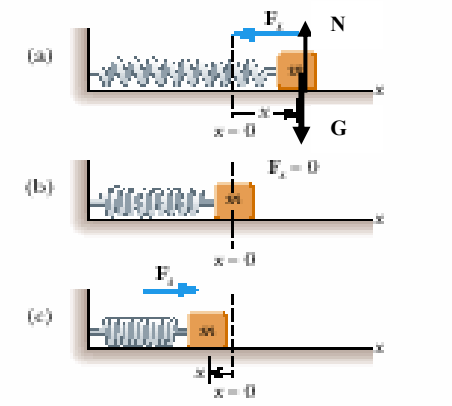
Kegiatan 3 (MENYIMPULKAN BAHWA PERIODA BANDUL TERGANTUNG PADA PANJANG BANDUL DAN TIDAK TERGANTUNG PADA MASSA BEBAN)

- Ikatkanlah penghapus karet pada seutas tali/benang
- Gantungkanlah ujung tali yang lain pada sebuah gantungan atau paku
- Simpangkan penghapus tersebut sekitar 30 derajat
- Catatlah waktu yang dibutuhkan untuk membuat 10 getaran lengkap
- Berapa perioda getaran tadi?
- Ulangi rangkaian kegiatan di atas dengan menggantungkan beban lain. Apakah terjadi perubahan perioda?
- Panjangkan tali/benang penggantung menjadi 2 kalinya kemudian ulangi rangkaian kegiatan di atas! Apakah sekarang terjadi perubahan perioda?
- Diskusikan hasil yang Anda dapat dalam kelompok!

10.2. Formulasi Getaran

Telah dikemukakan bahwa getaran adalah suatu gerakan bolak-balik. Karena itu, dapat ditanyakan posisi benda yang bergetar itu tiap saat. Jawaban pertanyaan ini diberikan lewat suatu formulasi getaran. Ini berarti bahwa dari formula matematika itu dapat diketahui posisi benda yang bergetar saat demi saat.

Formulasi getaran dapat diturunkan lewat berbagai sistem, dan antara lain adalah lewat sistem pegas-massa. Untuk itu perhatikan pegas dan balok bermassa m dalam kedudukan setimbang di atas permukaan licin seperti pada Gambar 10.7. Bila balok massa m ditarik sejauh A dari posisi kesetimbangan O kemudian dilepaskan, maka balok akan bergerak bolak balik. Dalam sistem pegas-massa di seluruh buku ini selalu diasumsikan bahwa pegas tidak ditarik melampaui batas elastisnya. Ini berarti bahwa bila gaya tarik itu dihilangkan maka pegas akan kembali ke ukurannya semula. (Anda diharapkan masih mengingat Hukum Hooke yang dibahas di bagian elastisitas).



Gambar 10.7 Sistem pegas-massa

Ketika m berada sejauh x dari O, maka gaya-gaya yang bekerja pada m adalah :

- Gaya berat $\vec{G}$
- Gaya normal $\vec{N}$
- Gaya pemulih $\vec{F}_i = -k\vec{x}$

dengan k = konstanta pegas (newton/meter) yang menyatakan besarnya gaya yang dibutuhkan untuk tiap pertambahan satu

satuan panjang pegas. Jadi k = 5 N/cm, berarti bahwa untuk menambah panjang pegas dengan 1 cm dibutuhkan gaya 5 newton.

x = simpangan (m), yang dihitung dari titik kesetimbangan O

Tanda (–) timbul karena arah $\vec{F}_i$ selalu berlawanan dengan arah simpangan $\vec{x}$.

Dari hukum Newton II, $\sum \vec{F} = m\vec{a}$, didapatkan:

$$\vec{G} + \vec{N} + \vec{F}_i = m\vec{a}$$

Karena $\vec{G} = -\vec{N}$, maka didapatkan hubungan $\sum \vec{F}_i = m\vec{a}$

Selanjutnya karena $\vec{F}_i$ dan $\vec{a}$ segaris, maka untuk mudahnya tanda vektor dihilangkan dan selanjutnya ditulis:

$$\begin{aligned} F_i &= ma \\ &= -kx \end{aligned}$$

sehingga,

$$ma + kx = 0 \qquad (10.5)$$

Pada persamaan terakhir ini terdapat besaran percepatan, yang muncul ketika benda bergerak dengan kecepatan v yang tidak konstan (seperti yang terjadi pada getaran), dan kita tentunya masih ingat bahwa percepatan a adalah perubahan kecepatan per satuan waktu. Selanjutnya telah dijelaskan pula di bab tentang gerakan, bahwa kecepatan itu ada bila benda berpindah tempat, atau bila terjadi perubahan posisi *x*, dan kecepatan dinyatakan sebagai perubahan posisi per satuan waktu. Nah, penelusuran percepatan *a*, ke kecepatan *v* dan akhirnya ke posisi *x* yang dikaitkan dengan waktu *t*, pada akhirnya akan menghasilkan suatu persamaan matematika, yang dikenal sebagai persamaan diferensial getaran Dengan eksplorasi matematika yang panjang lebar maka didapatkan solusi dari persamaan diferensial getaran tersebut. Solusi itulah yang merupakan formulasi matematika yang dapat menggambarkan posisi dari benda yang bergetar saat demi saat, dan bentuknya adalah:

$$x = A\sin(\omega t + \theta_o) \qquad (10.6)$$

atau

$$x = A\cos(\omega t + \theta_o) \qquad (10.7)$$

dengan

x: simpangan getaran yang diukur dari posisi kesetimbangan
A: amplitudo simpangan atau simpangan maksimum
$\omega t + \theta_o$: fasa getaran, yaitu besaran yang menyiratkan keadaan getaran (posisi, kecepatan dan percepatan getaran)
t: waktu berlangsungnya getaran sejak saat awal
θ_o fasa awal getaran
$\omega = 2\pi f$: frekuensi sudut yang dinyatakan dalam rad/s

Contoh Soal 4:
Suatu benda bergetar harmonis yang dinyatakan oleh persamaan :

$$x = 4\sin[(\pi/3)t + \pi/4] \quad \text{cm}$$

Tentukan:
a. amplitudo, perioda, frekuensi dan fasa awal getaran
b. posisi benda pada saat t = 3 sekon

Penyelesaian:

a. Dari persamaan tadi, maka dengan segera dapat ditentukan bahwa :
Amplitudo A = 4 cm
$\omega = \pi/3 \rightarrow$ perioda $T = 2\pi/\omega$ = 6 sekon
Frekuensi $f = \omega/2\pi$ = 0,16 Hz
Fasa awal θ_o = $\pi/4$ rad

b. Untuk t = 3 sekon $\Rightarrow \theta = (\pi/3)(3) + \pi/4\ rad = (5\pi/4)$ rad
Jadi, pada t = 3 sekon, posisi $x = 4\sin(5\pi/4) = -2\sqrt{2}\ cm$
Bila arah positif diambil ke kanan, maka ini berarti bahwa pada saat t = 3 s, benda berada $2\sqrt{2}$ cm di kiri posisi kesetimbangannya.

10.3 Energi Getaran

10.3.1 Hukum Kekekalan Energi

Telah dijelaskan bahwa getaran adalah sebuah gerakan, karena itu pada setiap getaran pasti terkait sejumlah energi yang kita kenal sebagai Energi Kinetik, yaitu energi yang dimiliki benda atau sistem karena keadaannya yang bergerak itu. Kita tentunya masih ingat bahwa energi kinetik adalah:

$$EK = \frac{1}{2} m V^2 \quad \text{J} \tag{10.8}$$

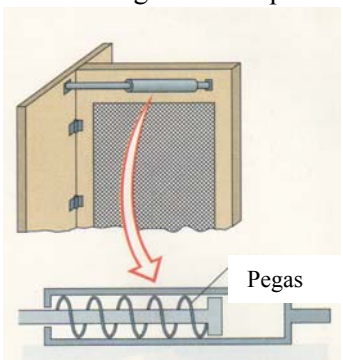
dengan m : massa benda (kg)
V : kecepatan benda (m/s)

Sebuah benda yang berada di atas sebuah permukaan juga mempunyai energi yang terkait kedudukannya itu, yaitu energi potensial gravitasi. Karena benda mempunyai energi potensial gravitasi ini, maka ia mendapatkan kerja yang dilakukan oleh gaya gravitasi ketika jatuh. Besarnya energi potensial gravitasi ini adalah:

$$EP = m\, g\, h \quad \text{J} \tag{10.9}$$

dengan : m = massa benda (kg)
g = percepatan gravitasi (m/s^2)
h = jarak titik pusat massa benda ke acuan nol (m)

Pada benda-benda yang terkait dengan pegas terdapat energi potensial lain yang disebut sebagai energi potensial elastis $EP`$. Energi potensial elastis ini muncul ketika pegas diregangkan atau dimampatkan. Karena energi potensial elastis inilah, pegas yang diregangkan atau dimampatkan dapat kembali ke kedudukan semula karena kerja yang dilakukan oleh gaya pemulih. Contoh yang jelas adalah alat penutup pintu yang seringkali ditempelkan pada pintu berkawat anti nyamuk. Detail peralatan itu dapat dilihat pada Gambar 10.8, yaitu peralatan yang bekerja berdasarkan kerja pegas. Ketika pintu dibuka, pegas yang ada dalam peralatan itu termampatkan sehingga memiliki energi potensial elastis. Ketika pintu dilepas, pegas yang termampatkan tadi meregang kembali untuk berusaha kembali ke ukurannya semula dan mengakibatkan pintu tertutup.



Gambar 10.8 Alat penutup pintu otomatis
(diambil dari Cutnell & Johnson, 1992)

Untuk pegas dengan konstanta pegas k N/m, maka ketika ukuran pegas bertambah atau berkurang dengan x , didapat energi potensial elastis

$$EP' = \frac{1}{2}kx^2 \quad \text{J} \tag{10.10}$$

Sistem yang bergetar, dengan demikian berpeluang mempunyai ketiga jenis energi tersebut, atau energi total sistem yang bergetar adalah:

$$E_{total} = EK + EP + EP' \tag{10.11}$$

Dengan demikian energi total juga dapat ditulis menjadi

$$E_{total} = \frac{1}{2}mV^2 + mgh + \frac{1}{2}kx^2 \tag{10.12}$$

Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa, tanpa adanya gesekan dan kerja dari luar, maka energi awal dan energi akhir total adalah sama. Ini berarti bahwa:

$$\left(\frac{1}{2}mV^2\right)_{awal} + (mgh)_{awal} + \left(\frac{1}{2}kx^2\right)_{awal} = \left(\frac{1}{2}mV^2\right)_{akhir} + (mgh)_{akhir} + \left(\frac{1}{2}kx^2\right)_{akhir} \tag{10.13}$$

Perhatikan sistem getaran pegas-massa dengan pegasnya dalam posisi horisontal. Pada kasus semacam ini EP_{awal} dan EP_{akhir} adalah sama karena $h_{awal} = h_{akhir}$ dan biasanya diambil sama dengan nol, sehingga Pers.(10.13) menjadi:

$$\left(\frac{1}{2}mV^2\right)_{awal} + \left(\frac{1}{2}kx^2\right)_{awal} = \left(\frac{1}{2}mV^2\right)_{akhir} + \left(\frac{1}{2}kx^2\right)_{akhir} \tag{10.14}$$

Dengan Pers.(10.14) ini maka distribusi energi dari benda yang bergetar harmonis pada sistem pegas - massa dapat digambarkan seperti pada Tabel 10.1 berikut ini.

Tabel 10.1 Distribusi energi pada sistem pegas massa yang bergetar

Saat t	**Posisi benda**	**EK**	**EP'**	**E_{total}**
0	x = A	0	½ kA^2	½ kA^2
T/4	x = 0	½ $m(V_{max})^2$ =	0	½ kA^2

		½ kA^2		
T/2	X = - A	0	½ kA^2	½ kA^2
3T/4	x = 0	½ $m(V_{max})^2$ = ½ kA^2	0	½ kA^2
T	x=A	0	½ kA^2	½ kA^2
3T/8	X = ½ A	(3/8) kA^2	(1/8) kA^2	½ kA^2

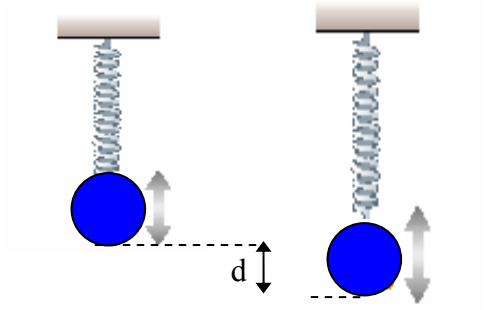
Tugas 4

Carilah di internet simulasi gambar bandul sederhana yang menunjukkan perubahan energi potensial dan energi kinetisnya dan ceritakan tentang sifat perubahan tersebut dari hasil simulasi tersebut!

Contoh Soal 5:

Sebuah bola yang massanya 0,1 kg digantungkan pada sebuah pegas vertikal yang mempunyai konstanta pegas 20 N/m. Bola mula-mula ditopang oleh tangan, sehingga pegas tidak teregang maupun termampatkan. Tangan dilepas, sehingga bola turun dan pegas teregang. Bila hambatan udara dapat diabaikan, sejauh apa bola jatuh sebelum dihentikan sesaat oleh pegas?

Penyelesaian:



Karena hambatan udara diabaikan, maka penerapan hukum kekekalan energi pada kasus ini adalah

$$\left(\frac{1}{2}mV^2\right)_{awal} + (mgh)_{awal} + \left(\frac{1}{2}kx^2\right)_{awal} = \left(\frac{1}{2}mV^2\right)_{akhir} + (mgh)_{akhir} + \left(\frac{1}{2}kx^2\right)_{akhir}$$

Pada keadaan awal, pegas belum teregang, sehingga

$$\left(\frac{1}{2}kx^2\right)_{awal} = 0$$

Bila pada keadaan akhir bola menyimpang sejauh *d* dari keadaan awalnya, maka pegas teregang sejauh d, sehingga energi potensial elastisnya adalah

$$\left(\frac{1}{2}kx^2\right)_{akhir} = \frac{1}{2}kd^2$$

Pada keadaan awal, bola berada sejauh d di atas posisi akhirnya, sehingga bila

$$(mgh)_{akhir} = 0,$$

maka

$$(mgh)_{akhir} = mgd$$

Bola dilepas dari keadaan diam dan pada akhirnya juga berhenti bergerak. Berarti energi kinetik awal dan akhirnya adalah

$$\left(\frac{1}{2}mV^2\right)_{awal} = \left(\frac{1}{2}mV^2\right)_{akhir} = 0$$

Dengan demikian, hukum kekekalan energi menghasilkan

$$mgd = \frac{1}{2}kd^2$$

sehingga didapat

$$d = \frac{2mg}{k} = \frac{2(0,1)(10)}{20} = 0,1 \text{ m} = \underline{10 \text{ cm}}$$

Perhatikan bahwa jarak d ini bukan jarak yang didapat ketika bola sudah tergantung diam setimbang pada pegas.

Kegiatan 4 (UNTUK MEMAHAMI CONTOH SOAL 6)

- ambillah 4 atau 5 buah karet gelang
- ikatlah satu gelang ke gelang yang lainnya, sehingga terbentuk rangkaian yang terdiri dari 4 gelang karet
- gantungkan ujung atas rangkaian gelang ini pada sebuah paku, dan ikatlah sebuah beban yang sudah ditimbang di ujung lainnya
- catat posisi beban ketika gelang karet belum mengalami regangan (di topang dengan tangan)

- lepaskan tangan yang menopang dan catat posisi beban ketika berada pada jarak paling jauh dari posisi setimbangnya (ini adalah jarak d)
- beban akan naik turun beberapa kali
- usahakan untuk mencatat posisi terjauhnya
- dengan menimbang massa beban, dan menggunakan rumus $d = \frac{2mg}{k}$, maka dalam hal ini konstanta pegas gelang karet dapat dihitung
- bandingkanlah nilai d ini dengan d_o, yaitu posisi beban ketika gelang karet sudah berhenti bergetar naik-turun. Bahas perbedaan antara d dan d_o

10.3.2 Kecepatan Getaran

Getaran adalah suatu gerakan, karena itu dapat ditanyakan bagaimana sifat gerakan tersebut. Apakah gerakannya berlangsung dengan kecepatan konstan; bila tidak, maka tentunya ada percepatan. Selanjutnya dapat ditanyakan apakah percepatannya konstan. Pertanyaan-pertanyaan tersebut dapat dijawab dengan meninjau dari berbagai sudut pandang.

Di subbab ini kecepatan getaran akan dibahas dengan melakukan pendekatan energi. Dengan melakukan pendekatan kekekalan energi, maka kecepatan getaran dengan mudah dapat ditentukan, seperti yang akan dibahas berikut ini.

Perhatikan kembali sistem pegas-massa yang berada dalam posisi horisontal. Bila getaran ini dimulai dari posisi simpangan maksimum ($x = A$), atau disebut juga amplitudo simpangan, dan benda semula berada dalam keadaan diam, maka

$$\left(\frac{1}{2}kA^2\right)_{awal} = \left(\frac{1}{2}mV^2\right)_{akhir} + \left(\frac{1}{2}kx^2\right)_{akhir} \qquad (10.15)$$

Dari Pers.(10.15) ini dengan mudah kecepatan V dapat ditemukan, yaitu dengan menulis terlebih dahulu:

$$\left(\frac{1}{2}mV^2\right) = \left(\frac{1}{2}kA^2\right) + \left(\frac{1}{2}kx^2\right) = \frac{1}{2}k\left(A^2 - x^2\right)$$

Dengan demikian diperoleh kecepatan getaran,

$$V = \sqrt{\frac{k}{m}\left(A^2 - x^2\right)} \tag{10.16}$$

Dengan Pers.(10.16) ini maka kecepatan di setiap titik x dapat ditentukan dengan mudah.
Dari Pers.(10.16) dan Tabel 1.1 di Subbab 10.3.1, dengan segera dapat dimengerti bahwa benda yang bergetar tidak bergerak dengan kecepatan konstan, namun berubah-ubah dari nol di titik-titik simpangan maksimumnya dan mencapai harga maksimum di posisi kesetimbangannya.

Karena benda yang bergetar tidak bergerak dengan kecepatan konstan, maka tentu ada percepatan yang terkait dengan getaran. Untuk mendapatkan percepatan ini, maka lihatlah kembali Pers.(10.5) berikut ini:

$$ma + kx = 0$$

Dari hubungan ini diperoleh

$$a = -\frac{k}{m}x = -\omega^2 x \tag{10.17}$$

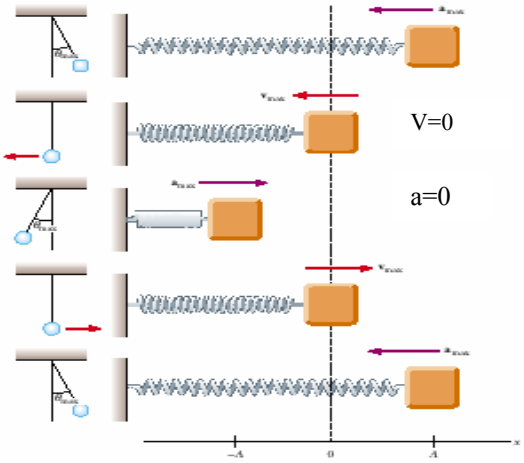
Jadi bila kita mulai dari persamaan

$$x = A\cos\left(\omega t + \theta_o\right)$$

maka persamaan percepatan menjadi:

$$a = -A\omega^2 \cos\left(\omega t + \theta_o\right) \tag{10.18}$$

Pers.(10.18) menggambarkan dengan jelas bahwa percepatan a juga tidak konstan. Tidak konstannya kecepatan maupun percepatan, secara fisik sudah dapat diduga, karena adanya gerakan bolak-balik itu, seperti terlihat pada sistem bandul sederhana dan sistem pegas-massa di Gambar 10.9.



Gambar 10.9 Kecepatan dan percepatan tidak konstan pada sistem getaran

Benda berbalik arah, ketika simpangannya maksimum, karena kecepatannya nol. Jadi di sini terlihat bahwa benda yang bergerak (mempunyai kecepatan), tidak bergerak terus ke arah yang sama, namun berbalik karena kecepatannya nol pada saat itu. Berarti kecepatannya makin-lama makin kecil, atau tidak konstan. Pada bagian gerakan yang lain kecepatannya membesar, namun mengecil kembali sampai nol, kemudian membesar kembali dan peristiwa semacam ini berulang-ulang terus.Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa v_{maks} terjadi pada posisi kesetimbangan $x = 0$. Dari Pers.(10.17) terlihat bahwa percepatan bernilai nol, ketika $x = 0$ (di posisi kesetimbangannya), sedangkan percepatannya maksimum ketika simpangan getaran mencapai maksimumnya. Amplitudo percepatannya sendiri bernilai $A\omega^2$. Jadi dapat dikatakan bahwa pada sistem yang bergetar, percepatannya selalu sebanding dengan simpangan getaran.

Contoh Soal 6:
Hitunglah kecepatan maksimum getaran sistem pegas-massa, bila massa beban adalah 2 kg sedangkan konstanta pegas dan amplitudo getaran adalah masing-masing 0,5 N/m dan 0,25 m.

Penyelesaian:
Energi total sistem pegas massa adalah

$$E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}(0{,}5)(0{,}25)^2 = (1/64) \text{ joule}$$

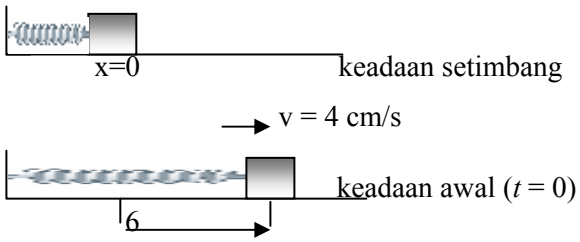
Kecepatan maksimum terjadi ketika pegas berada pada posisi kesetimbangan, yaitu x = 0, sehingga pada posisi itu EP = 0.
Dari hukum kekekalan energi, dapat ditulis :

$$\frac{1}{2}m(V_{maks})^2 = \frac{1}{2}(2)(V_{maks})^2 = 1/64$$

Dengan demikian $(V_{maks})^2 = 1/64$,
sehingga didapat $V_{maks} = 1/8 =$ 0,125 m/s

Contoh Soal 7:
Sebuah benda yang massanya m = 10 gram diikatkan pada pegas yang mempunyai konstanta pegas k = 40 dyne/cm. Benda ini bergerak di atas permukaan licin dan memulai getarannya dari posisi simpangan maksimumnya. Ketika benda berada pada posisi x = 6 cm, kecepatannya adalah sebesar 4 cm/s. Di manakah posisi benda ini 5 sekon sejak keadaan awal?

Penyelesaian:



Misalkan sebagai persamaan getaran diambil bentuk

$$x = A\cos(\omega t + \theta_o)$$

Karena pada saat awal (t = 0), benda berada di posisi simpangan maksimum (x = A), maka dapat ditulis

$$A = A\cos(0 + \theta_o),$$

sehingga $\cos\theta_o = 1$ atau $\theta_o = 0^o$

Dengan demikian $x = A\cos(\omega t)$

Di sini

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{40\ dyne/cm}{10\ gram}} = 2 \text{ rad/s}$$

Dari kondisi V = 4 m/s ketika benda berada di x = 6 cm, dan dengan menggunakan Pers.(10.16) didapatkan

$$4 = 2\sqrt{A^2 - 6^2}$$

sehingga diperoleh, $A = 2\sqrt{10}$ cm.

Dengan demikian, $x = A\cos(\omega t)$ pada t = 5 sekon menghasilkan

$$x = 2\sqrt{10}\ cm\cos[(2rad/s)(5s)] = 2\sqrt{10}\ cm\cos(2\ rad)$$

Jadi pada t = 5 sekon, posisi benda ada di $x = \underline{-2{,}63 \text{ cm}}$ (berarti benda berada 2,63 cm di kiri posisi kesetimbangannya)

10.4 Hakekat Gelombang

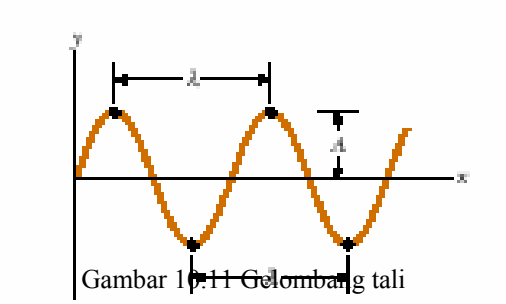
10.4.1 Relasi dengan getaran

Kita telah belajar tentang getaran dan beberapa sifatnya. Getaran yang dihasilkan suatu sumber getar, seperti garpu tala, pita suara dan lain-lain seringkali dirambatkan lewat medium yang ada di sekitarnya. Getaran yang diteruskan ini yang disebut sebagai gelombang. Jadi, seperti telah disebutkan di awal bab ini, gelombang pada dasarnya adalah gangguan atau getaran yang dirambatkan. Pada Gambar 10.10 di bawah ini tampak bahwa gelombang yang dihasilkan oleh kapal motor dirambatkan lewat air telaga sehingga mengganggu seorang pemancing. Dalam hal ini air hanya menjadi medium perantara. Yang merambat bukanlah air, seperti air sungai yang mengalir, tetapi yang dirambatkan adalah gangguannya. Bila gangguannya berupa getaran, maka yang dirambatkan di permukaan air adalah getaran.

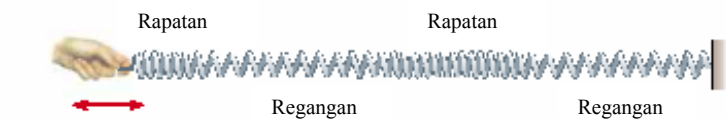
Gelombang lain yang juga kita kenal adalah gelombang tali dan gelombang bunyi yang merambat di udara. Pada gelombang tali terlihat deretan lembah-puncak yang merambat di sepanjang tali (lihat Gambar 10.11) karena ujung tali yang digerakkan naik-turun, sedangkan pada gelombang bunyi di udara terjadi pola pemampatan dan peregangan molekul-molekul udara. Pola pemampatan dan peregangan itu juga dapat dilihat pada pegas sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 10.12. Pada dasarnya perambatan gelombang bunyi di udara terbentuk melalui mekanisme yang sama dengan pegas tadi.



Gambar 10.10 Gelombang yang terjadi karena perahu motor yang lewat (diambil dari Cutnell & Johnson, 1992)



Gambar 10.11 Gelombang tali



Gambar 10.12. Pola rapatan dan regangan pada pegas yang terusik (diambil dari Cutnell & Johnson, 1992)

Tugas 5

Dari bacaan – bacaan di internet, cobalah anda jelaskan kaitan antara getaran dan gelombang Tsunami!

10.4.2 Energi Gelombang

Ciri kedua dari setiap gelombang adalah bahwa gelombang merambatkan energi. Pada gelombang mekanik, hal ini diperlihatkan ketika energi yang dirambatkan melalui gelombang air mampu memindahkan gabus yang semula terapung tenang di atas permukaan air. Olengnya kapal di laut yang seringkali disebabkan oleh ombak laut membuktikan adanya sejumlah energi yang dibawa oleh gelombang. Panas matahari yang terasa di bumi kita, juga disebabkan karena gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh matahari merambatkan/meradiasikan energi panas ke bumi.

Sementara itu, pemindahan energi melalui gelombang elektromagnetik tanpa disadari, manfaatnya sudah biasa dinikmati dalam kehidupan sehari-hari. Contohnya, seseorang dapat menikmati alunan musik dari stasiun radio yang jauh letaknya karena adanya gelombang radio yang mengangkut energi bunyi musik itu. Berkat gelombang mikro, seseorang dapat memberi perintah pada para karyawannya dan mengendalikan perusahaannya hanya dari sebuah telepon

gengggamnya. Semua cara berkomunikasi ini dapat terlaksana berkat gelombang elektromagnetik, yang dapat mengangkut energi informasi ke berbagai tempat.

Contoh lain bahwa gelombang membawa sejumlah energi adalah terjadinya kerusakan di mana-mana ketika terjadi gempa. Kekuatan gempa biasanya dinyatakan oleh skala Richter yang diusulkan oleh Charles Richter. Richter mengaitkan kekuatan gempa dengan logaritma (basis 10) amplitudo maksimum suatu getaran yang diukur dalam mikrometer. Amplitudo maksimum itu harus diukur pada jarak 100 km dari pusat gempa. Jadi misalkan rekaman gempa yang diperoleh dari seismometer yang dipasang 100 km dari pusat gempa menunjukkan amplitudo maksimum 1 mm = 10^3 □m; maka ini berarti bahwa kekuatan gempa itu (berhubungan dengan energinya) adalah

$$\text{Log } (10)^3 = 3 \text{ skala Richter}$$

Perhatikanlah energi yang terkait dengan kekuatan gempa yang dinyatakan dalam skala Richter dalam Tabel 10.2 berikut ini.

Tabel 10. 2. Skala Richter beserta contohnya

Skala Richter	**Energi dalam Joule**	**Contoh**
0,5	23,5 MJ	Granat tangan besar
1,0	134,4 MJ	Ledakan di lahan konstruksi
3,5	747,6 GJ	Malapetaka nuklir Chernobyl, 1986
5,0	134,4 TJ	Bom atom Nagasaki

Tugas 6

Carilah sekali lagi dari bacaan di internet, berapa skala Richter kekuatan gempa yang mengawali gelombang Tsunami, dan berapa pula energi yang terkait peristiwa ini !

10.4.3 Perambatan dalam medium

Gelombang yang dirambatkan, seringkali membutuhkan medium perantara. Gelombang bunyi misalnya tidak dapat kita dengar bila tidak ada medium perantara. Demikian pula tanpa adanya tali tidak mungkin merambat gelombang tali. Gelombang tali, gelombang bunyi (mencakup pula gelombang infrasonik dan ultrasonik), gelombang air, dan gelombang seismik, merupakan contoh dari gelombang mekanik, suatu jenis gelombang yang memerlukan media (dalam hal ini tali,

molekul udara, dan air) untuk merambat sampai ke tujuannya. Namun tidak semua gelombang membutuhkan medium perantara. Contohnya adalah gelombang elektromagnetik, seperti gelombang radio, gelombang mikro, radar, cahaya tampak, Laser, sinar-X, dan sinar gamma. Gelombang-gelombang ini adalah kelompok gelombang yang dapat merambat walaupun dalam hampa udara. Gelombang elektromagnetik ini dipancarkan ke segala arah oleh medan listrik dan medan magnet berubah, sehingga perambatannya tidak lagi memerlukan media khusus, karena ia dapat melewati ruang hampa sekalipun.

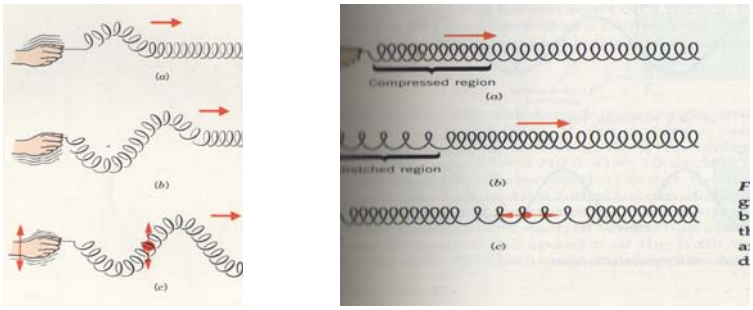
Sebelum teknologi komunikasi berkembang seperti sekarang, para nenek moyang kita telah tahu bahwa getaran merambat lewat tanah, sehingga mereka mengamati derap musuh yang akan menyerang dengan mendekatkan telinga ke tanah. Dengan melakukan upaya itu mereka dapat mengetahui adanya musuh yang masih berada pada jarak yang sangat jauh sekali. Ini tentunya merupakan perambatan gelombang yang alami, melewati tanah yang sudah ada. Tentunya di dalam perjalanannya menuju tempat-tempat tertentu terjadi banyak kehilangan energi, sehingga ketika tiba di tempat tujuannya energi gelombang itu sudah sangat sedikit jumlahnya. Orang sekarang berlomba-lomba mencari bahan/medium perantara yang dapat merambatkan gelombang dengan rugi perambatan yang seminim mungkin. Serat optik merupakan salah satu jawabannya dan penemuan ini telah mengubah wajah pertelekomunikasian kita, menjadi sedemikian canggihnya.

10.4.4 Gelombang Transversal dan Longitudinal

Berdasarkan arah rambat terhadap arah getar, maka dikenal dua macam gelombang, yaitu gelombang transversal dan gelombang longitudinal.

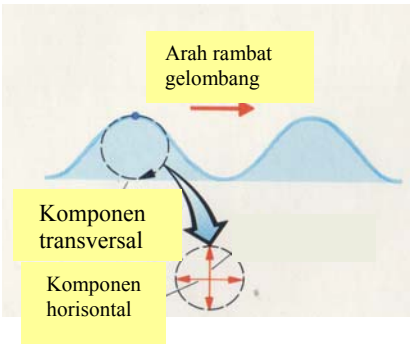
Gelombang transversal adalah gelombang yang arah rambatnya tegaklurus arah getarnya, sedang pada gelombang longitudinal, arah rambat sama dengan arah getarnya.

Dengan *slinky*, kedua jenis gelombang itu dapat diperagakan (lihat Gambar 10.13). Ketika tangan digerakkan naik turun, maka pada *slinky* terbentuk gelombang transversal, sementara gelombang longitudinal dihasilkan bila tangan digerakkan maju mundur. Gelombang radio, gelombang cahaya, gelombang tali dan gelombang mikro adalah contoh gelombang transversal. Gelombang transversal juga merambat dalam dawai instrumen musik seperti gitar atau piano. Contoh gelombang longitudinal adalah gelombang bunyi yang merambat di udara.



Gambar 10.13 Gelombang transversal dan gelombang longitudinal
(diambil dari Cutnell & Johnson, 1992)

Beberapa gelombang tidak merupakan gelombang transversal maupun gelombang longitudinal, contohnya adalah gelombang air. Pada gelombang air, gerak partikel-partikel air tidak tegaklurus maupun paralel dengan arah rambatnya, artinya pada gelombang air, terdapat komponen transversal maupun longitudinal, karena partikel air di permukaan air bergerak dalam lintasan melingkar seperti terlihat pada Gambar 10.14.

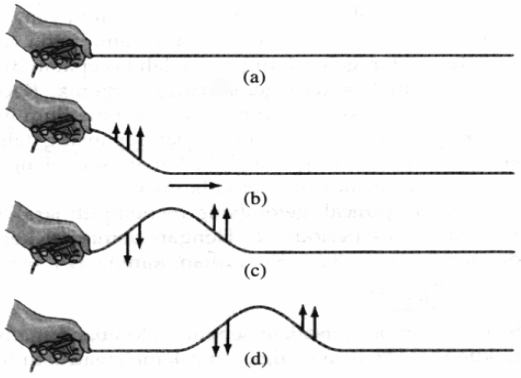


Gambar 10.14 Gelombang air (diambil dari Cutnell & Johnson, 1992)

10.5 Kecepatan Rambat Gelombang

Anda tentunya pernah mengamati bahwa ketika kembang api ditembakkan ke atas, maka anda akan melihat kembang api itu terlebih dulu baru mendengar ledakannya. Peristiwa ini menunjukkan bahwa gelombang cahaya dirambatkan lebih cepat dibandingkan gelombang bunyi. Kecepatan rambat gelombang tergantung pada jenis gelombang apa yang dirambatkan dan juga tergantung pada karakter medium yang merambatkannya. Gelombang bunyi misalnya, dirambatkan lebih cepat di air dibandingkan di udara. Hubungan antara kecepatan rambat gelombang dan karakter medium perantaranya akan dijelaskan berikut ini lewat contoh yang paling sederhana, yaitu gelombang tali. Beberapa perhitunan matematis akan dimunculkan di sini sampai terbentuknya persamaan diferensial (mungkin sebagai wacana baru bagi Anda), namun Anda dipersilahkan langsung ke hasil akhirnya bila belum terlampau terampil dengan perhitungan diferensial, yang penting Anda tidak kehilangan makna fisisnya.

Seperti telah dijelaskan, gelombang tali muncul sebagai akibat gangguan pada tali (lihat Gambar 10.15). Sesaat setelah tali diganggu, gaya gangguan ini dirambatkan sepanjang tali. Ini berarti bahwa setiap bagian tali bertindak sebagai penyalur gaya gangguan tadi. Perambatan gaya gangguan ini dapat berlangsung karena pada setiap bagian tali bekerja tegangan tali T yang besarnya sama dengan gaya gangguan tadi tetapi dengan arah yang berlawanan. Tanda panah menunjukkan arah kecepatan partikel tali



Gambar 10.15 Gerak segmen tali dalam menghantarkan gelombang
Tanda panah menunjukkan arah kecepatan partikel tali

Materi Pengayaan

==========

Penurunan persamaan gelombang tali dilakukan dengan meninjau bagian tali ketika berada pada keadaan tak setimbang, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 10.16.

Gaya tegangan tali yang bekerja pada ujung-ujung segmen tali diurai ke arah sumbu y vertikal dan ke arah sumbu x horisontal. Oleh karena bagian tali yang ditinjau ini sangat kecil maka pengaruh gaya gravitasi dapat diabaikan, sedangkan komponen x saling meniadakan.Dengan demikian resultante gaya dalam arah y adalah:

$$\sum F_y = T_{2y} - T_{1y} = T_{2x} \tan\theta_2 - T_{1x} \tan\theta_1$$

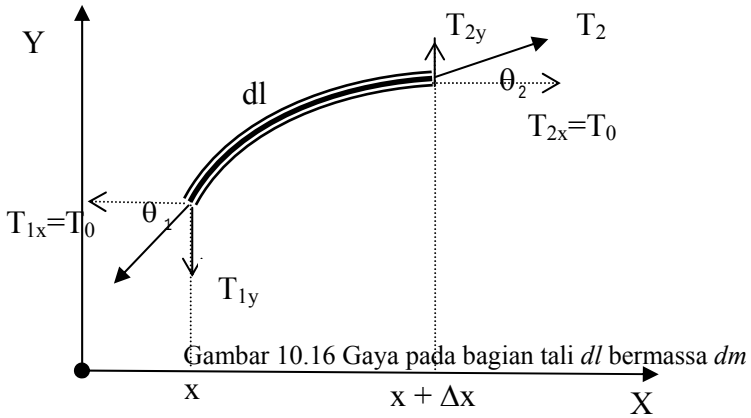
Bila T_{2x} dan T_{1x} yang sama besar dinyatakan sebagai T_o, maka

$$\sum F_y = T_o \tan\theta_2 - T_o \tan\theta_1 \qquad (10.19)$$

Dengan pendekatan $\tan\theta = \frac{dy}{dx}$, maka Pers.(10.19) menjadi

$$\sum F_y = T_o \left[\left(\frac{dy}{dx} \right)_2 - \left(\frac{dy}{dx} \right)_1 \right]$$

yang dapat pula ditulis dalam bentuk:



Gambar 10.16 Gaya pada bagian tali *dl* bermassa *dm*

$$\sum F_y = T_0 \left[\frac{d}{dx} y(x+\Delta x) - \frac{dy}{dx} \right] = T_0 \frac{d}{dx} \left[y(x+\Delta x) - y(x) \right] \qquad (10.20)$$

Menurut hukum ke II Newton, persamaan gerak elemen tali dm ini adalah

$$\sum F_y = dm \frac{d^2 y}{dt^2} \tag{10.21}$$

dengan $\frac{d^2 y}{dt^2}$ adalah percepatan.

Jika tali dianggap serbasama dengan massa persatuan panjang tali adalah μ, maka massa elemen tali dl adalah

$$dm = \mu\, dl = \mu\, dx ,$$

sehingga Pers.(10.21) dapat ditulis menjadi

$$\sum F_y = (\mu\, dx) \frac{d^2 y}{dt^2} \tag{10.22}$$

Samakan Pers.(10.20) dengan Pers.(10.22), maka didapatkan

$$\frac{\mu}{T_0} \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{d}{dx}\left[\frac{y(x+\Delta x) - y(x)}{\Delta x} \right] \tag{10.23}$$

Pers.(10.23) ini dapat ditulis dalam bentuk

$$\frac{1}{T_0 / \mu} \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{d^2 y}{dx^2} \tag{10.24}$$

karena untuk $\Delta x \to 0$ berlaku definisi

$$\lim_{\Delta x \to 0} \left(\frac{y(x+\Delta x) - y(x)}{\Delta x} \right) \equiv \frac{dy}{dx}$$

Hubungan variabel bebas x dan t dalam persamaan gelombang itu, adalah $x = vt$. Ini berarti persamaan gelombang tali pada Pers.(10.24) dapat pula ditulis sebagai

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2 y}{dt^2} \tag{10.25}$$

==========

Dari Pers.(10.24) dan Pers.(10.25) didapat kecepatan rambat gelombang v dalam tali adalah:

$$v = \sqrt{\frac{T_0}{\mu}} \tag{10.26}$$

dengan T_o = tegangan tali (newton)

□ = rapat massa = massa per satuan panjang (kg/m)

Pers.(10.26) menunjukkan bahwa pada tali dengan tegangan yang semakin besar, gelombang akan merambat dengan kecepatan

rambat yang semakin besar pula. Sebaliknya semakin besar massa persatuan panjang tali maka gerak gelombang akan menjadi lambat.

Contoh Soal 8:
Gelombang dirambatkan pada sebuah tali yang tegang. Tegangan tali diberikan dengan cara menggantung sebuah beban bermassa 3 kg pada salah satu ujungnya. Bila panjang tali adalah 2,5 m dan massanya 50 g, carilah kecepatan rambat gelombang transversal lewat tali ini.

Penyelesaian:
Dalam keadaan setimbang, pada beban berlaku

Tegangan tali $T_0 = mg = 3\ kg \times 10\ m/s^2 = 30\ N$

Massa persatuan panjang tali adalah

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{0{,}05\ kg}{2{,}5\ m} = 0{,}02 \text{ kg/m}$$

Dengan demikian cepat rambat gelombang adalah

$$v = \sqrt{\frac{T_0}{\mu}} = \sqrt{\frac{30\ N}{0{,}02\ kg/m}} = \underline{38{,}7 \text{ m/s}}$$

Seperti telah disebutkan sebelum ini, kecepatan rambat gelombang akan berbeda di medium yang berbeda dan sangat ditentukan oleh karakter medium perantaranya. Kecepatan rambat gelombang longitudinal dalam fluida dipengaruhi oleh modulus Bulk B, serta rapat massa ρ dan hubungannya adalah:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \qquad (10.27)$$

dengan B: modulus Bulk (N/m^2)
ρ: rapat massa fluida (kg/m^3)

Bila gelombang longitudinal itu merambat di zat padat, maka cepat rambat gelombang adalah:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad (10.28)$$

dengan E : modulus Young (N/m^2)
ρ : rapat massa zat padat (kg/m^3)

Contoh Soal 9:
Bandingkan nilai kecepatan gelombang longitudinal di sepanjang batang baja dan aluminium. Modulus Young baja dan aluminium masing-masing adalah $2{,}2\times10^{10}\,\mathrm{N/m^2}$ dan $6{,}9\times10^{10}\,\mathrm{N/m^2}$, sedangkan rapat massa kedua logam masing-masing adalah $7{,}83\times10^{3}\,\mathrm{kg/m^3}$ dan $2{,}7\times10^{3}\,\mathrm{kg/m^3}$.

Penyelesaian:

Kecepatan dihitung dengan menggunakan rumusan $v=\sqrt{\dfrac{E}{\rho}}$, sehingga untuk baja

$$v=\sqrt{\frac{2{,}2\times10^{10}\,N/m^2}{7{,}83\times10^{3}\,kg/m^3}}=5{,}3\times10^{3}\ \text{m/s}$$

sedangkan untuk aluminium

$$v=\sqrt{\frac{6{,}9\times10^{10}\,N/m^2}{2{,}7\times10^{3}\,kg/m^3}}=5{,}06\times10^{3}\ \text{m/s}$$

Tampak bahwa kecepatan gelombang longitudinal di dalam baja lebih besar daripada di dalam aluminium.

10.6 Persamaan Gelombang

Ketika membahas kecepatan rapat gelombang tali, telah didapatkan persamaan gelombang yang berbentuk persamaan diferensial

$$\frac{d^2y}{dx^2}=\frac{1}{v^2}\frac{d^2y}{dt^2} \qquad (10.29)$$

Persamaan diferensial ini adalah bentuk umum dari semua gelombang, baik gelombang transversal maupun gelombang longitudinal. Solusi dari persamaan diferensial ini dinamakan persamaan atau fungsi gelombang, yang bentuknya

$$y=A\sin(\omega t\pm kx) \qquad (10.30)$$

dengan A: amplitudo
$\omega t\pm kx$: fasa gelombang
ω: frekuensi sudut
t: waktu

k: bilangan gelombang = 2□/□ dengan □ = panjang gelombang
x: posisi di dalam medium

Tanda (+) digunakan untuk gelombang yang merambat ke arah sumbu X negatif, sedangkan tanda (-) digunakan untuk gelombang yang merambat ke arah sumbu X positif.
Karena panjang gelombang (jarak antara dua titik berturutan dengan fasa sama) $\lambda = \frac{v}{f}$, maka bilangan gelombang k dapat ditulis dalam bentuk lain, $k = \frac{2\pi}{v/f} = \frac{\omega}{v}$. Dengan demikian persamaan gelombang (10.30) dapat ditulis menjadi,

$$y = A\sin\left(2\pi f t \pm \frac{\omega}{v}x\right) \qquad (10.31)$$

dengan *f*: frekuensi gelombang
v: kecepatan rambat gelombang

Perbedaan persamaan gelombang dengan persamaan getaran adalah bahwa bila persamaan getaran hanya merupakan fungsi dari waktu *t* saja, maka persamaan gelombang adalah fungsi dari waktu *t* dan posisi *x*.

Contoh Soal 10:
Sebuah gelombang merambat dengan amplitudo 5 cm dan frekuensi 100 Hz. Bila cepat rambat gelombang adalah 10 m/s, maka hitunglah simpangan sebuah titik yang berada pada jarak 2 m dan sumber gelombang tersebut pada setelah sumber bergetar 50 sekon!

Penyelesaian:
Simpangan pada sebuah titik yang dirambati gelombang dapat dicari dari Pers.(10.31), yaitu,

$$y = A\sin\left(2\pi f t \pm \frac{\omega}{v}x\right)$$

Dengan memasukkan data-data yang diberikan, maka didapat

$$y = 5\sin\left(2\pi(100)(50) \pm \frac{2\pi(100)}{10}2\right)$$

Bila dianggap bahwa gelombang itu merambat dari sumber ke arah kanan, maka

$$y = 5\sin\left(2\pi(100)(50) - \frac{2\pi(100)}{10}2\right) = 5\sin(10000\pi - 40\pi)$$

$= \underline{0 \text{ cm}}$

Contoh Soal 11:
Sebuah gelombang merambat ke arah sumbu X negatif dengan amplitudo 3 cm, cepat rambat 50 m/s dan frekuensi 30 Hz. Berapakah beda fasa antara dua titik di sumbu X yang berjarak pisah 5 m?

Penyelesaian:
Persamaan gelombang yang merambat ke arah X negatif adalah

$$y = A\sin\left(2\pi f t + \frac{\omega}{v}x\right)$$

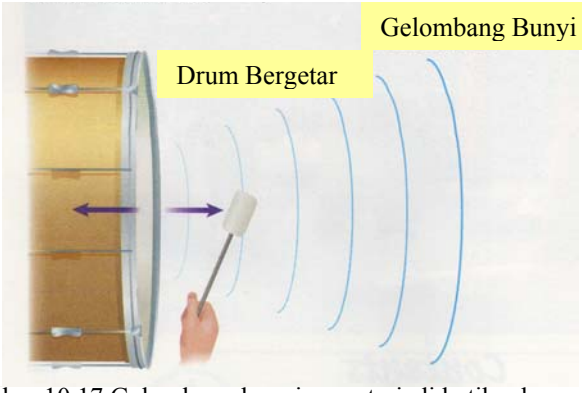
sehingga fasa gelombang adalah

$$\left(2\pi f t + \frac{\omega}{v}x\right)$$

Dengan demikian, untuk dua titik yang terpisah sejauh 5 m beda fasanya pada saat t yang sama adalah

$$\frac{2\pi f}{v}(\Delta x) = \frac{2\pi(30)}{50}(5) = \underline{6\square \text{ rad}}$$

10.7 Gelombang Bunyi
10.7.1 Hakekat Bunyi



Gambar 10.17 Gelombang bunyi yang terjadi ketika drum dipukul
(diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

Bunyi adalah energi yang dirambatkan dalam bentuk gelombang, yang dapat menyebabkan sensasi aural, artinya gelombang bunyi dapat kita dengar. Ada banyak sekali bunyi di sekitar kita, dan ini patut disyukuri. Dapatkah Anda bayangkan andai tidak ada bunyi samasekali di sekitar kita? Perhatikan ketika Anda berjalan – jalan di taman. Anda dapat mendengar burung berkicau, anjing menggonggong dan masih banyak bunyi-bunyian lain. Di tempat yang gelap pun Anda masih dapat mendengarkan dentang lonceng, atau suara kendaraan di jalan. Alat-alat musik, juga menghasilkan bunyi, bunyi yang indah, dan salah satu di antaranya adalah drum yang dipukul (lihat Gambar 10.17). Tampak dari gambar bahwa bunyi dimulai dari getaran drum ketika ia dipukul. Selanjutnya getaran itu dirambatkan dan menghasilkan gelombang, dan karena dapat didengar manusia maka ia disebut gelombang bunyi. Jadi setiap kali Anda mendengar bunyi pasti entah di mana ada sesuatu yang bergetar sebagai sumber bunyi tersebut. Perhatikan Tabel 10.3 yang menggambarkan berbagai sumber bunyi.

Tugas 7

Carilah paling sedikit 5 buah bunyi di sekitar Anda dan sebutkan sumber getarannya

Tabel 10.3 Sumber bunyi dan bunyi yang dihasilkan

SUMBER-SUMBER BUNYI	
BUNYI	**SUMBER GETARAN**
Biola	Dawai
Suara Drum	Membran drum
Suara orang	Pita suara
Ketukan pintu	Daun pintu
Deruman mobil	Mesin mobil

Tugas 8

Tadi kita telah berbicara tentang bunyi yang dirambatkan lewat udara. Tugas Anda adalah menyelidiki apakah bunyi dapat dirambatkan lewat zat padat. Carilah contoh-contoh yang menopang jawaban Anda.

Kegiatan 5

- Letakkanlah gelas yang berisi air di atas meja datar dan tunggu hingga air tidak bergerak (lihat Gambar 10.18)

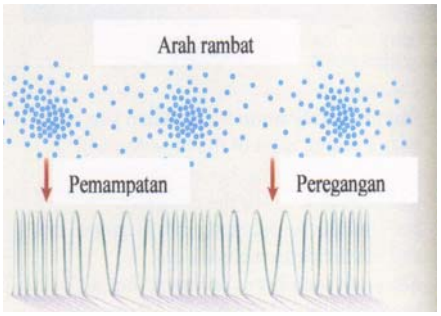
- Sediakan sebuah garpu tala
- Ketukkanlah garpu tala tersebut di meja, kemudian celupkan garputala yang bergetar itu ke dalam air
- Apa yang Anda lihat di air?
- Apakah anda mendengar bunyi ketika garpu tala diketukkan di meja?
- Apakah Anda mendengar bunyi ketika garputala yang bergetar itu dimasukkan dalam air?



Gambar 10.18 Garputala bergetar yang dicelupkan dalam air
(diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

10.7.2 Perambatan Gelombang Bunyi

Gelombang bunyi yang dirambatkan di udara menghasilkan pemampatan dan peregangan (lihat Gambar 10.19), dan pemampatan serta peregangan ini dirambatkan. Jadi gelombang bunyi yang merambat di udara termasuk gelombang longitudinal, karena arah rambatnya sama dengan arah perapatan dan peregangan.



Gambar 10.19 Pemampatan dan peregangan pada gelombang bunyi
(diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

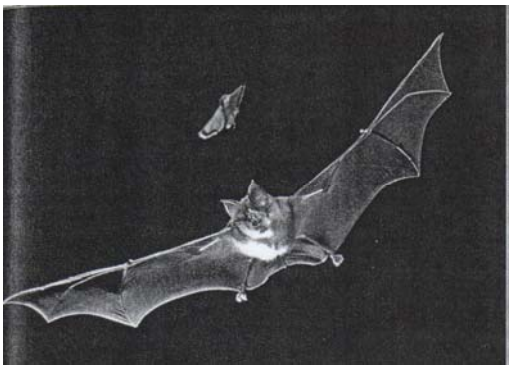
Gelombang bunyi membutuhkan medium untuk merambatkan gelombang bunyi. Ia tidak seperti gelombang elektromagnet yang dapat

merambat di ruang hampa. Karena itu para astronaut tidak dapat menggunakan bunyi untuk berkomunikasi di bulan. Di bulan tidak ada udara, sehingga tidak ada bunyi di sana. (lihat Gambar 10.20)



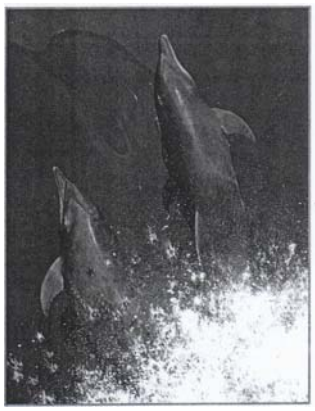
Gambar 10.20 Di bulan tidak ada bunyi
(diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

Perambatan gelombang menjadi sarana dari binatang-binatang untuk berkomunikasi. Kelelawar misalnya menggunakan bunyi ultra untuk mengetahui letak mangsa yang mau ditangkapnya (lihat Gambar10.21).



Gambar 10.21 Kelelawar menemukan mangsanya dengan bunyi ultra
(diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

Gelombang bunyi tidak hanya merambat di udara tetapi dapat juga merambat di zat cair maupun zat padat. Lumba-lumba dan ikan paus misalnya, dapat berkomunikasi dengan sesamanya melalui bunyi yang dirambatkan di air (lihat Gambar 10.22). Bunyi yang dihasilkan lumba-lumba berkisar dari 250 Hz sampai 150.000 Hz. Diduga bahwa lumba-lumba mempunyai bahasa di antara mereka seperti halnya manusia.



Gambar 10.22 Lumba – lumba yang mengeluarkan bunyi untuk menentukan letak suatu objek (*echolocation*) dan berkomunikasi (diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

Bunyi merambat lebih cepat di air dibandingkan di udara. Gelombang bunyi juga merambat lebih cepat di zat padat. Bukti bahwa gelombang bunyi merambat lewat zat padat dapat dibuktikan kalau telinga ditempelkan di dinding pemisah antara dua kamar. Bukankah bunyi-bunyi yang ada di ruang sebelah dapat didengar? Jadi gelombang bunyi merambat di zat cair, gas dan zat padat, namun dengan kecepatan rambat yang berbeda. Kecepatan rambat bunyi di udara adalah 346 m/s (jauh lebih kecil dari kecepatan rambat cahaya; itulah sebabnya ketika terjadi badai, kilat akan terlihat terlebih dahulu sebelum suara guruh/petir terdengar), sedangkan di air kecepatan rambatnya 1498 m/s. Di zat padat kecepatan rambatnya tergantung pada jenis zat padatnya. Dalam baja kecepatannya 5200 m/s, di karet hanya 60 m/s, sedangkan di kayu 1850 m/s.

Beberapa pesawat jet dapat bergerak dengan kecepatan yang lebih tinggi, yaitu dua atau tiga kali lebih cepat dibandingkan kecepatan rambat bunyi. Kecepatan yang lebih tinggi dari kecepatan bunyi ini dinamakan supersonik. Bila pesawat bergerak dengan kecepatan supersonik, maka ia bergerak lebih cepat dari bunyi yang

dihasilkan mesinnya. Bila sebuah pesawat supersonik ini lewat di atas Anda, maka pesawat itu sudah akan berada cukup jauh sebelum bunyi pesawatnya terdengar. Glamorous Glennis yang dipiloti oleh Chuck Yeager, adalah pesawat pertama yang bergerak dengan kecepatan yang melebihi kecepatan rambat bunyi. Gerakan pesawat yang melampaui kecepatan rambat bunyi akan menimbulkan bunyi yang sangat keras yang disebut sebagai *sonic boom.*



Gambar 10.23 Pesawat Concorde yang terbang dengan kecepatan supersonik (diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

Kecepatan rambat bunyi di udara yang besarnya 346m/s dinamakan 1 Mach. Pada 14 Oktober, 1947 itulah Chuck Yeager menerbangkan pesawat dengan kecepatan yang lebih dari 1 Mach. Dengan berkembangnya teknologi, sekarang pesawat supersonik sudah dapat terbang dengan kecepatan 2 Mach bahkan sampai 3 Mach. Contohnya adalah pesawat Concorde (lihat Gambar 10.23) yang menyeberangi Lautan Atlantic dalam waktu yang sangat singkat. Satu-satunya kerugian dari pesawat supersonik adalah *sonic boom* yang dihasilkannya. *Sonic boom* itu sedemikian kerasnya hingga dapat memecahkan jendela bahkan dapat menjatuhkan pigura-pigura yang digantungkan di dinding. Karena itulah pesawat supersonik tidak diperkenankan terbang di atas daerah yang banyak penduduknya.

10.7.3 Intensitas Bunyi

Telah dijelaskan bahwa bunyi adalah energi yang dirambatkan dalam bentuk gelombang. Banyak sedikitnya energi bunyi yang diterima di suatu tempat dinyatakan melalui besaran intensitas bunyi, I. Intensitas bunyi I adalah energi yang dirambatkan tiap sekon melalui satu satuan luasan yang tegaklurus arah rambat gelombang bunyi itu. Karena energi per satuan waktu menyatakan daya, maka intensitas dapat juga

dikatakan sebagai daya yang menembus tiap satuan luasan yang tegaklurus arah rambat gelombvang bunyi itu. Dalam bentuk matematika hubungan itu dituliskan sebagai:

$$I = \frac{P}{A} \qquad \text{watt/m}^2 \qquad (10.32)$$

dengan: P = daya bunyi (watt)
A = luas bidang yang ditembus tegaklurus oleh gelombang bunyi (m^2)

Bila sumber bunyi berbentuk sumber titik (dimensi sumber kecil), maka bunyi akan disebarkan ke segala arah dengan cara yang sama. Dalam hal ini maka muka gelombangnya akan berbentuk bola, dan gelombang ini dinamakan gelombang sferis. Pada gelombang sferis intensitas bunyi di suatu titik pada jarak r dari sumber tersebut adalah:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \qquad \text{watt/m}^2 \qquad (10.33)$$

dengan: P = daya bunyi (watt)
r = jarak dari sumber bunyi ke pendengar/titik ukur (m)

Pers.(10.33) ini menunjukkan bahwa di sebuah lapangan terbuka, kita makin sulit mendengar suatu bunyi (I kecil), semakin jauh kita berada dari sumber bunyi itu (r besar).

Intensitas bunyi 1000 Hz terendah yang dapat didengar manusia (ambang pendengaran) pada umumnya adalah 10^{-12} watt/m^2, sedangkan intensitas bunyi yang mulai menimbulkan rasa sakit pada telinga manusia adalah 1 watt/m^2. Tampak di sini bahwa ada rentang intensitas yang sangat lebar yang dapat didengar manusia. Karena itu dimunculkan besaran baru yang disebut Taraf Intensitas (TI) untuk memampatkan rentang yang lebar itu, yaitu dengan mengambil skala logaritmis. Taraf Intensitas bersatuan dB (desibel) dan didefinisikan sebagai:

$$TI = 10 \log \frac{I}{I_{ac}} \quad \text{dB} \qquad (10.34)$$

dengan: I = intensitas bunyi (watt/m^2)
I_{ac} = intensitas acuan = 10^{-12} watt/m^2 (yaitu ambang pendengaran)

Taraf Intensitas beberapa bunyi yang ada di sekitar kehidupan kita dapat dilihat di Tabel 10.4 berikut ini.

Tabel 10.4 Taraf Intensitas beberapa sumber bunyi (diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

Sumber bunyi	**TI (dB)**	**Catatan**
Mesin roket besar	180	
Jet lepas landas	150	
Konser rock dengan amplifier pada jarak 2 m	120	Ambang rasa nyaman
Kereta api	100	
Air terjun Niagara	90	Membahayakan pendengaran
Lalulintas padat	70	
Percakapan normal (1 m)	60	
Kantor tenang	50	Tenang
Perpustakaan	30	Sangat tenang
Bisik – bisik (5 m)	20	Hampir tak terdengar
Pernafasan normal	0	Ambang pendengaran

Contoh Soal 12:
Intensitas gelombang bunyi terlemah berfrekuensi 1000 Hz yang dapat didengar manusia pada umumnya adalah 10^{-12} watt/m^2. Berapakah Taraf Intensitasnya?

Penyelesaian:
Dari Pers.(10.34), Taraf Intensitas adalah:

$$TI = 10 \log \frac{I}{I_{ac}}$$

Jadi untuk bunyi dengan intensitas 10^{-12} watt/m^2, didapat

$$TI = 10 \log \frac{10^{-12}}{10^{-12}} = 10 \log 1 = \underline{0 \text{ dB}}$$

Dari contoh soal ini dapat dibayangkan yang dinamakan Taraf Intensitas 0 dB.

Contoh Soal 13:
Sebuah speaker A menghasilkan TI = 70 dB di suatu titik P yang berada pada jarak 3 m dari speaker A itu. Speaker B berada pada jarak 5 m dari titik P, dan menghasilkan TI = 75 dB di P. Berapakah TI yang ditangkap di titik P, bila kedua speaker itu berbunyi secara serentak?

Penyelesaian:
Untuk speaker A:

$$70 = 10 \log \frac{I_A}{10^{-12}} \quad \text{atau} \quad \log \frac{I_A}{10^{-12}} = 7$$

Dengan demikian

$$\frac{I_A}{10^{-12}} = 10^7 ,$$

sehingga

$$I_A = (10^7)(10^{-12}) = 10^{-5} \text{ watt/m}^2$$

Dengan cara sama,

$$I_B = (10^{7,5})(10^{-12}) = 10^{-4,5} \text{ watt/m}^2$$

Bila dibunyikan secara serentak, maka intensitas total

$$I_{A,B} = I_A + I_B = 10^{-5} + 10^{-4,5} = 4,16 x 10^{-5} \text{ watt/m}^2$$

Jadi, Taraf Intensitas total adalah:

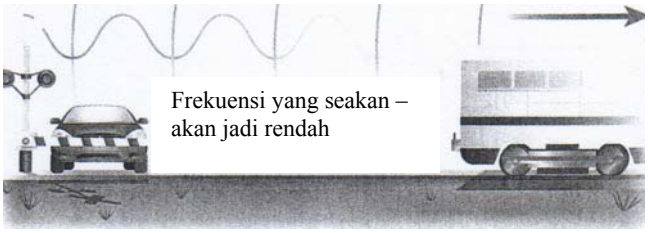
$$TI_{A,B} = 10 \log \frac{I_{A,B}}{I_{ac}} = 10 \log \frac{4,16 x 10^{-5}}{10^{-12}} = \underline{76,2 \text{ dB}}$$

10.8 Efek Doppler

Ketika sedang menunggu kereta api melintasi suatu persimpangan, Anda tentunya pernah mendengar bahwa pluit yang dibunyikan kereta api itu terdengar makin lama makin tinggi ketika kereta api itu mendekat namun frekuensinya terdengar semakin rendah ketika kereta api itu telah melewati Anda dan menjauh (lihat Gambar 10.24). Jadi Anda mendengar peluit itu seakan – akan melagukan suatu musik dengan nada yang semula makin lama makin tinggi, namun kemudian menjadi rendah kembali. Apakah ini terjadi karena operator kereta api memijat tombol nada-nada yang berbeda saat itu ? Ternyata tidak. Apa yang Anda dengar itu terjadi karena gejala yang dikenal sebagai Efek Doppler, untuk menghormati seorang Australia bernama, Christian Andreas Doppler (1803-1855), yang pertama kali mengamati gejala ini.

Efek Doppler adalah suatu gejala berubahnya frekuensi yang didengar seseorang karena sumber bunyi relatif bergerak terhadap pendengarnya. Sumber bunyi yang relatif bergerak terhadap

pendengarnya, dapat berarti bahwa sumber bunyi diam dan pendengar mendekat atau menjauhi sumber, namun dapat juga pendengarnya yang diam sementara sumber bunyi yang bergerak mendekati atau menjauhi pendengar, bahkan dapat juga kedua-duanya dalam keadaan bergerak.



Gambar 10.24 Efek Doppler yang menyebabkan perubahan frekuensi yang ditangkap pendengar (diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

Terjadinya efek Doppler tidak hanya dapat didengar tetapi juga dapat dilihat. Ingatlah kembali bahwa frekuensi gelombang menggambarkan jumlah gelombang yang melewati suatu titik tiap satuan waktunya. Coba ingat-ingatlah ketika Anda sedang memancing di sebuah danau (lihat Gambar 10.25). Ketika perahu motor mendekati Anda, jumlah gelombang yang yang menumbuk ”dermaga” tempat Anda berada, semakin banyak, namun begitu perahu motor itu melewati Anda, jumlah gelombang yang menumbuk dermaga itu menjadi semakin sedikit.



Gambar 10.25 Frekuensi gelombang yang berubah ketika perahu melewati Pemancing (diambil dari Stanley Wolfe, 2003)

Kembali ke efek Doppler yang berhubungan dengan bunyi. Frekuensi yang dipancarkan peluit kereta api sebenarnya tidak berubah. Yang berubah adalah frekuensi yang terdengar, dan kita katakan bahwa frekuensi sumber bunyi itu seakan-akan berubah, namun sekali lagi, frekuensi sumber bunyi tidak berubah. Hubungan antara frekuensi yang terdengar dan frekuensi bunyi sesungguhnya tergantung pada kecepatan gerak sumber bunyi maupun kecepatan gerak pendengar. Hubungan itu dinyatakan oleh Pers (10.35) berikut ini:

$$\frac{f_p}{V \pm V_p} = \frac{f_s}{V \pm V_s} \tag{10.35}$$

atau

$$f_p = \left(\frac{V \pm V_p}{V \pm V_s} \right) . f_s \tag{10.36}$$

dengan f_p = frekuensi yang ditangkap pendengar (Hz)
f_s = frekuensi sumber bunyi yang sebenarnya (Hz)
V_p = kecepatan pendengar (m/s)
V_s = kecepatan sumber bunyi (m/s)
V = kecepatan rambat bunyi (biasanya diambil 340 m/s)

Untuk mengisi tanda (+) atau (−) pada Pers.(10.35) dan Pers(10.36) berlaku ketentuan sebagai berikut:

a. V_p diisi (+), bila P (pendengar) mendekati S (sumber)
   V_p diisi (−), bila P menjauhi S
b. V_s diisi (+), bila S menjauhi P
   V_s diisi (−), bila S mendekati P

Contoh Soal 14:

Sebuah mobil bergerak menjauhi pendengar dengan kecepatan 20 m/s sambil membunyikan klaksonnya yang berfrekuensi 200 Hz. Bila kecepatan rambat bunyi adalah 340 m/s, hitunglah frekuensi yang ditangkap pendengar itu yang sedang tidak bergerak!

Penyelesaian:

Karena sumber menjauhi pendengar yang diam maka pada Pers.(10.36), V_p diisi 0 sedangkan V_s diisi (+). Jadi,

$$f_p = \left(\frac{V \pm V_p}{V \pm V_s} \right) . f_s = \left(\frac{340 + 0}{340 + 20} \right) (200) = 188{,}9$$

Jadi frekuensi yang ditangkap pendengar adalah 188,9 Hz.

Contoh Soal 15:
Sumber bunyi yang memancarkan bunyi dengan panjang gelombang 10 cm bergerak dengan kecepatan 60 m/s menjauhi pendengar yang juga sedang bergerak dalam arah yang berlawanan dengan kecepatan 40 m/s. Hitunglah frekuensi yang ditangkap pendengar, bila kecepatan rambat bunyi adalah 340 m/s!

Penyelesaian:

Karena panjang gelombang $\lambda = \frac{c}{f}$, maka frekuensi

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340\ m/s}{0{,}10\ m} = 3400 \text{ Hz}$$

Sumber bunyi menjauhi pendengar, maka V_S diisi (+); karena pendengar menjauhi sumber, maka V_P diisi (-).
Dengan demikian

$$f_p = \left(\frac{V \pm V_p}{V \pm V_s}\right) . f_s = \left(\frac{340\ m/s - 40\ m/s}{340\ m/s + 60\ m/s}\right)(3400\ Hz) = 2550\ Hz$$

Jadi frekuensi yang ditangkap pendengar adalah 2550 Hz.

10.9 Rangkuman

- Getaran adalah gerakan yang berulang-ulang atau gerakan bolak-balik melewati suatu titik kesetimbangan
- Beberapa sistem getaran yang dibahas adalah sistem pegas-massa, bandul sederhana dan bandul fisis
- Besaran yang penting pada getaran adalah frekuensi, perioda, simpangan, amplitudo, kecepatan, percepatan dan energi
- Bila energi getaran dirambatkan maka diperoleh gelombang
- Berdasarkan arah getar relatif terhadap arah rambatnya, dikenal gelombang transversal dan gelombang longitudinal
- Pada umumnya gelombang yang dirambatkan membutuhkan medium perantara, kecuali gelombang elektromagnetik yang dapat merambat di ruang hampa
- Kecepatan rambat gelombang tergantung pada jenis gelombang yang dirambatkan dan karakteristik medium perantaranya
- Gelombang bunyi adalah gelombang yang dapat didengar dan di udara dirambatkan sebagai gelombang longitudinal

- Di ruang hampa gelombang bunyi tidak dapat didengar
- Keras lemahnya bunyi ditentukan oleh intensitas bunyi atau Taraf Intensitasnya. Makin jauh pendengar dari sumber bunyi, makin lemah bunyi yang didengar
- Efek Doppler adalah gejala berubahnya frekuensi yang didengar seseorang karena sumber bunyi bergerak relatif terhadap pendengar

10.10 Soal / Uji Kompetensi

1. Perhatikan dua buah bandul sederhana dengan panjang tali yang berbeda. Jelaskan, mengapa bandul dengan tali yang pendek bergetar dengan frekuensi yang lebih besar! Bila panjang tali bandul kedua adalah setengah panjang tali bandul pertama, apakah frekuensi bandul kedua adalah dua kali frekuensi bandul pertama?

2. Sebuah benda yang massanya 0,25 kg digantungkan pada sebuah pegas vertikal, sehingga pegas bertambah panjang dengan 5 cm. Berapakah frekuensi dan perioda getaran yang terjadi bila beban yang digantungkan bermassa 0,75 kg?

3. Pilihlah jawaban yang benar!
   Pada benda yang bergetar harmonik, pada simpangan maksimum,
   a. kecepatan dan percepatannya maksimum
   b. kecepatan dan percepatannya minimum
   c. kecepatannya maksimum sedangkan percepatannya minimum
   d. kecepatannya nol, dan percepatannya maksimum
   e. energi totalnya maksimum
4. Sebuah bandul sederhana yang massa bebannya 25 gram dan panjang talinya 50 cm diberi simpangan $\square = 10^o$. Bila percepatan gravitasi g = 10 m/s^2, hitunglah:
   a. amplitudo simpangan getaran!
   b. gaya pada saat simpangan maksimum!
   c. perioda dan frekuensi getaran!

5. Sebuah benda bergetar harmonik dengan amplitudo 10 cm. Di manakah benda tersebut mempunyai kecepatan yang besarnya setengah kecepatan maksimum?

6. Sebuah bola bergetar harmonik dengan perioda 1,5 sekon dan amplitudo 4 cm. Pada saat awal bola itu melewati titik kesetimbangannya dengan arah vertikal ke atas. Carilah posisi bola tersebut 2 sekon sejak saat awal tadi!

7. Ketika pegas vertikal digantungi beban bermassa 1 kg, pegas menyimpang 1 cm dari posisi kesetimbangannya. Pegas-massa itu diganggu hingga bergetar. Berapakah simpangan pegas ketika energi potensial elastisnya 20 joule?

8. Benda bergetar menurut persamaan $y = 10 \sin 628\, t$ cm, dengan t adalah waktu dalam sekon. Frekuensi getaran tersebut adalah:
   a. 10 Hz
   b. 50 Hz
   c. 100 Hz
   d. 200 Hz
   e. 400 Hz

9. Sebuah tempat tidur pegas (*springbed*) dirancang dengan pegas – pegas yang dipasang paralel. Konstanta pegas total tempat tidur itu adalah 2000 N/m. Hitunglah:
   a. Perioda bila tempat tidur dibebani dengan massa 200 kg!
   b. Gaya pada pegas ketika pegas tertekan sejauh 10 mm!

10. Gelombang yang merambat dalam sebuah tali mempunyai persamaan gelombang:
    $y = 0{,}2 \sin \pi (8\,t - 2\,x)$ meter , dengan x dinyatakan dalam meter dan t dalam sekon. Berapakah kecepatan rambat gelombang ini?

11. Kecepatan rambat gelombang transversal yang lewat tali nylon adalah 20 m/s, ketika tegangan tali itu 10 N. Jika tegangan tali dinaikkan menjadi 50 N, berapakah kecepatan rambat gelombang dalam tali itu sekarang?

12. Bila tegangan suatu dawai gitar dinaikkan menjadi 4 kali lebih besar, maka nada yang dihasilkan
    a. menjadi 4 kali lebih tinggi
    b. menjadi 2 kali lebih tinggi
    c. menjadi 4 kali lebih rendah
    d. menjadi 2 kali lebih rendah
    e. tidak mengalami perubahan

13. Ujung sebuah tali digetarkan harmonik, sehingga dalam tali terbentuk gelombang transversal ke sumbu X positif. Bila kecepatan rambat gelombang adalah 50 m/s, sedangkan frekuensi gelombangnya 10 Hz, dengan amplitudo 10 cm, hitunglah
    a. fase dari sebuah titik di tali itu; 2,5 m dari ujung tadi pada t = 2 s
    b. simpangan dari titik pada (a)

14. Daya atau energi per satuan waktu yang dipancarkan sebuah sumber bunyi adalah $8\pi \text{ x } 10^{-4}$ watt. Berapakah taraf intensitas bunyi tersebut di sebuah titik yang berada 1 m dari sumber bunyi tadi?

15. Ketika Ali berdiri 5 meter dari sebuah speaker, ia mendapatkan taraf intensitas sebesar 80 dB. Berapakah taraf intensitas yang diterimanya bila ia berada 10 meter dari speaker tadi?

16. Sebuah sepedamotor menghasilkan *TI* = 70 dB. Bila terdapat 10 sepeda motor yang identik, berapakah *TI* yang dihasilkan bila kesepuluh sepedamotor itu dihidupkan pada saat yang sama?

17. Taraf intensitas yang diterima di sebuah jendela terbuka yang luasnya 1 m^2 adalah 50 dB. Hitunglah daya akustik yang diterima jendela itu!

18. Dua buah mobil saling mendekat dengan kecepatan masing-masing 25 m/s dan 20 m/s. Pengemudi mobil pertama membunyikan klakson yang frekuensinya 3000 Hz. Tentukan frekuensi yang ditangkap pengemudi di mobil kedua, bila kecepatan rambat bunyi di udara adalah 340 m/s!

19. Sebuah kereta api bergerak dengan kecepatan 100 m/s menuju ke pendengar yang diam. Frekuensi yang ditangkap pendengar adalah 50 Hz. Berapakah frekuensi yang ditangkap pendengar bila sumber bunyi diam, namun pendengar yang bergerak dengan kecepatan 100 m/s mendekati kereta api? Gunakan kecepatan rambat bunyi di udara sebesar 340 m/s.

20. Sebuah mobil pemadam kebakaran bergerak menuju ke arah lokasi kebakaran sambil membunyikan sirene dengan frekuensi 600 Hz. Seorang pendengar yang sedang makan di warung di tepi jalan

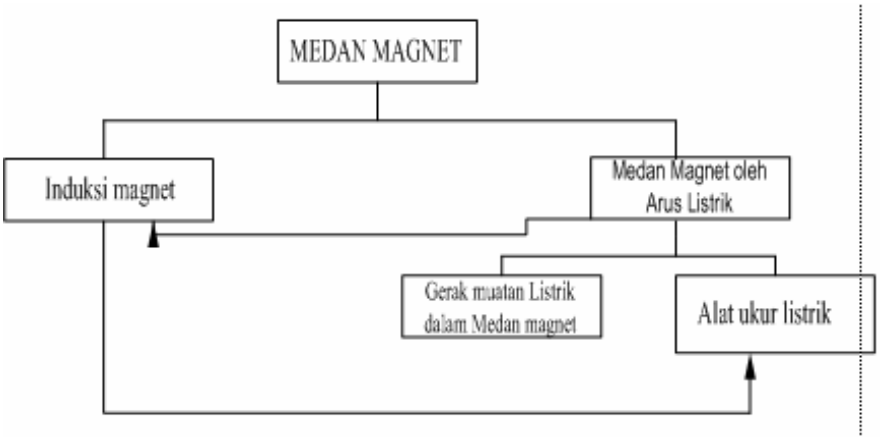
ternyata menangkap sirene itu dengan frekuensi 500 Hz. Apakah mobil pemadam kebakaran itu sedang mendekati atau menjauhi pendengar? Berapakah kecepatan mobil pemadam kebakaran itu?

BAB 11
MEDAN MAGNET



▲ *A proposed method for launching future payloads into space is the use of* rail guns, *in which projectiles are accelerated by means of magnetic forces. This photo shows the firing of a projectile at a speed of over 3 km/s from an experimental rail gun at Sandia National Research Laboratories, Albuquerque, New Mexico. (Defense Threat Reduction Agency [DTRA])*

PETA KONSEP


MEDAN MAGNET
Induksi magnet
Medan Magnet oleh
Arus Listrik
Gerak muatan Listrik
dalam Medan magnet
Alat ukur listrik

BAB 11 MEDAN MAGNET

Pra Syarat

Untuk dapat mengerti pembahasan bab ini dengan baik, siswa sebaiknya telah mempelajari dan mengerti tentang masalah Gaya aksi reaksi, muatan listrik dan aruslistrik. Dalam segi matematika, siswa diharapkan telah mengerti tentang vektor, perkalian vektor, serta makna tentang elemen panjang dan integral.

Beberapa penurunan rumus diturunan dengan integral, namun demikian apabila ini dirasa sulit maka siswa dapat mengambil hasil langsung penurunan rumus tanpa harus mengikuti penurunan matematika secara integral.

Cek kemampuan

1. Apabila anda mendekatkan batang magnet pada sebuah jarum. Apa yang terjadi?
2. Hitung rapat fluks magnet dari suatu bidang empat persegi panjang ukuran 100 cm^2. Jika fluks magnet serba sama sebesar 10^3 Weber menembus tegak lurus pada seluruh bidang.
3. Sebuah kawat melingkar dengan dialiri arus 1 mA. Jika jari-jari lingkaran kawat adalah 5 cm, berapakah induksi magnet di pusat lingkaran?
4. Sebuah elektron bergerak dengan kecepatan 1000 m/s dalam medan magnet seba sama 10^4Weber. Berapa besar gaya magnet yang dialami elektron tersebut?
5. Dua kutub magnet sejenis kekuatannya 10^{-3} A.mBeberapa gaya tolak menolaknya jika jaraknya 25 cm.

Uraian dan contoh soal

Medan magnet dapat dirasakan atau ada di sekitar kutup magnet. Apabila ada kutub magnet lain dalam medan medan magnet maka akan ada gaya interaksi magnetik atau gaya magnet. Medan magnet dapat timbul dari bahan-bahan dari alam yang mempunyai sifat kemagnetan atau bisa juga ditimbulkan oleh arus listrik.

Salah satu tokoh terkenal yang menlakukan peneletian tentang medan magnet adalah Hans Christian Oersted (1777-1851). Oersted merupakan orang pertama yang dalam percobaannya mengetahui terjadinya medan magnet oleh arus listrik.



Gaya magnet ini dalam aplikasinya banyak digunakan sebagai dasar dalam mengubah energi listrik menjadi enegi mekanik. Misalkan dalam pembuatan motor listrik, pembuatan generator.

Gambar 11.1 Hans Christian Oersted (diambil dari Serway,2004)

Selain karena adanya arus listrik medan magnet juga dapat ditimbulkan karena sifat kemagnetan bahan.

Kegiatan 11.1.

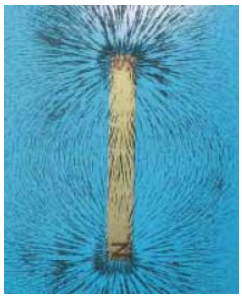
1. Untuk kegiatan ini siapkan sebuah batang magnet, sepotong baja dan sebuah jarum.
2. Ambil batang baja kemudian dekatkan pada jarum.
3. Apakah baja dapat menarik jarum?
4. Kemudian, baja di gosok dengan sebuah magnet, cara dalam arah yang tetap. Kemudian dekatkan pada jarum.
5. Apakah baja dapat menarik jarum?
6. Apa yang dapat Anda simpulkan?

Perhatikan bahwa stelah digosok dengan batang magnet, baja akan berubah menjadi magnet, namun bersifat sementara. Selain dengan digosok dengan batang magnet, baja juga dapat memiliki sifat kemagnetan apabila baja dialiri oleh arus listrik.

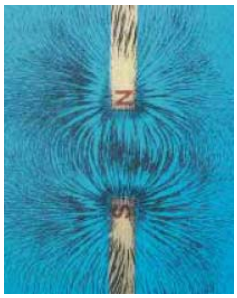
11.1 Induksi Magnet

Pada suatu titik ada medan magnet bila muatan yang bergerak pada titik tersebut mengalami gaya magnet. Medan magnet ini dikenal juga sebagai *induksi magnet*. Induksi magnet dapat dilukiskan sebagai garis-garis yang arah singgungnya pada setiap titik pada garis-garis induksi magnet menunjukkan arah vektor induksi magnet di titik-titik tersebut.

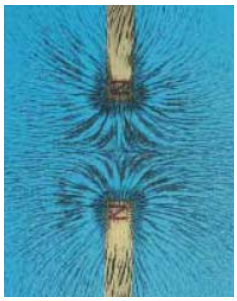
Induksi magnetik pada batang magnet akan muncul seprti diperlihatkan dalam Gambar 11.2



a. batang magnet

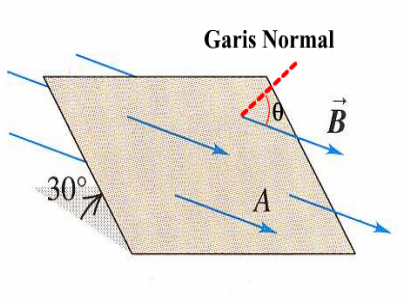


b. dua batang magnet dengan kutub berlawanan didekatkan



c. dua batang magnet dengan kutub searah didekatkan

Gambar 11.2 Medan magnet pada batang magnet (diambil dari Serway,2004)



Gambar 11.3 Ilustrasi rapat fluks magnet menembus bidang

Banyaknya garis-garis induksi magnet yang melalui satuan luas bidang dinyatakan sebagai besar induksi magnet di titik tersebut. Banyaknya garis-garis gaya dinamakan *fluks magnet* (ϕ), sedang banyaknya garis-garis induksi magnet persatuan luas dinamakan *rapat fluks magnet* (B).

Fluks magnet dan rapat fluks magnet dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai

$$\Phi = BA\cos\theta \qquad (11.1)$$

Dalam sistem MKS, satuan fluks magnet adalah Weber (W), sedang satuan rapat fluks magnet adalah Weber/m^2 (W/m^2) atau dikenal denga Tesla (*T*). Untuk sistem CGS satuan fluks magnet adalah Maxwell (*M*), sedang satuan rapat fluks magnet adalah Maxwell/cm^2 (M/cm^2). Satuan Maxwell/cm^2 disebut juga dengan nama Gauss (G). Hubungan satuan sistem MKS dan sistem CGS adalah 1 T = 10^4 G.

Contoh soal 11.1:

Medan magnet menembus bidang empat persegi panjang ukuran 20 cm x 25 cm secara tegak lurus terhadap bidang. Fluks magnet serba sama pada seluruh bidang adalah sebesar 10^4 Weber. Tentukan rapat fluks magnet dalam sistem MKS/SI.

Penyelesaian :

$A = 500\ cm^2 = 5 \times 10^{-2}\ m^2$

$$\Phi = BA\cos\theta$$
$$= BA\cos 90$$
$$\Phi = BA$$

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{10^4}{5x\,10^{-2}}\frac{W}{m^2} = 2x\,10^5\ \frac{W}{m^2}$$

$B = 2 \cdot 10^5$ T

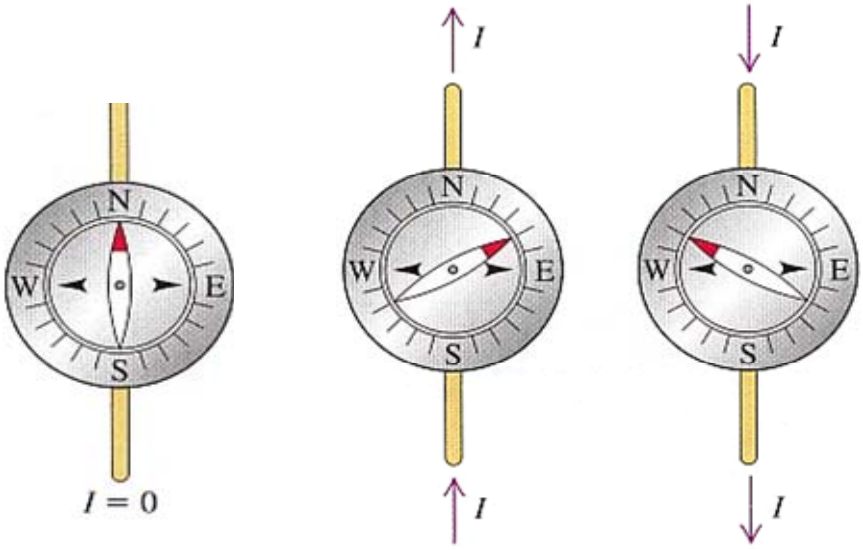
1 W = 10^8 Maxwell

$$\frac{1\text{W}}{\text{m}^2} = \frac{10^8\,\text{maxwell}}{10^4\,\text{cm}^2} = 10^4\,\frac{\text{maxwell}}{\text{cm}^2} = 10^4\,\text{Gauss}$$

Jadi $B = 5 \times 10^9$ Gauss

1I.2 Medan Magnet Oleh Arus Listrik

Percobaan yang dilakukan Oersted mengamati jarum kompas yang diletakkan di bawah kawat yang dilalui arus listrik. Hasil percobaan diperlihatkan pada Gambar 11.4. Gambar 11.4a. memperlihatkan posisi jarum kompas ketika tidak dialiri arus, jarum kompas menunjuk arah utara. Selanjutnya jarum kompas dialiri arus ke arah utara seperti diperlihatkan pada Gambar 11.3b, akibatnya penunjukan jarum menyimpang ke arah timur. Apabila jarus kompas dialiri arus ke arah selatan maka penunjukan jarum menyimpang ke arah barat (Gambar 11.3c).



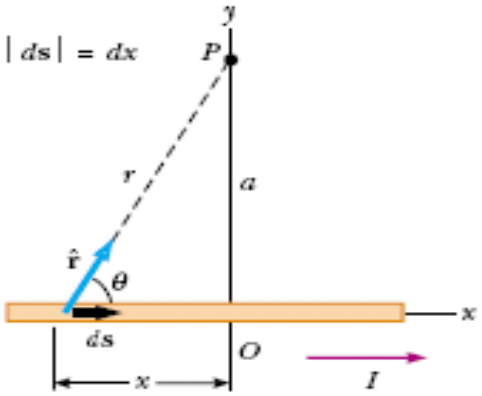
b. Jarum kompas tanpa dialiri arus

a. Jarum kompas dialiri arus arah ke utara

c. Jarum kompas dialiri arus arah ke selatan

Gambar 11.3 Pengaruh arus listrik terhadap penunjukan arah jarum kompas

Hubungan antara besarnya arus listrik dan medan magnet di nyatakan oleh Biot Savart, yang kemudian dikenal dengan Hukum Biot Savart.



Gambar 11.4 Medan magnet di P akibat arus I

Induksi magnet di P yang berjarak r dari kawat berarus adalah:

- berbanding lurus dengan kuat arus *i*
- berbanding lurus dengan elemen *dx*
- berbanding terbalik dengan kuadrat jarak
- arah induksi magnet tersebut tegak lurus dengan bidang yang melalui elemen arus dari titik P.

Induksi magnet oleh kawat arus lurus

Untuk menghitung induksi magnet di P oleh kawat lurus berarus dapat diguna pendekatan secara integral. Induksi magnet di titik P oleh kawat yang tak berhingga panjang adalah

$$B = \frac{\mu_o i}{2 \pi a} \qquad (11.5)$$

μo = 12,57 x 10-7 W/Amp.m

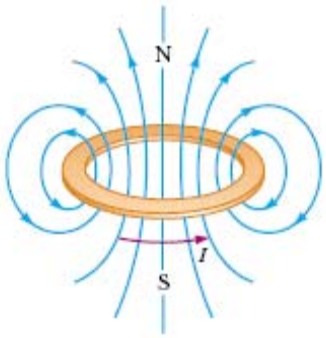
Intuksi magnet oleh kawat dengyang panjangnya tertentu seperti pada Gambar 1.4 adalah

$$B = \frac{\mu_o}{4\pi a}\left(\cos\theta_1 - \cos\theta_2\right) \qquad (11.6)$$

θ_1 dan θ_2 adalah sudut-sudut yang terbentuk antara ujung-ujung kawat dengan garis yang menghubungkan ujung kawat dan titik P.

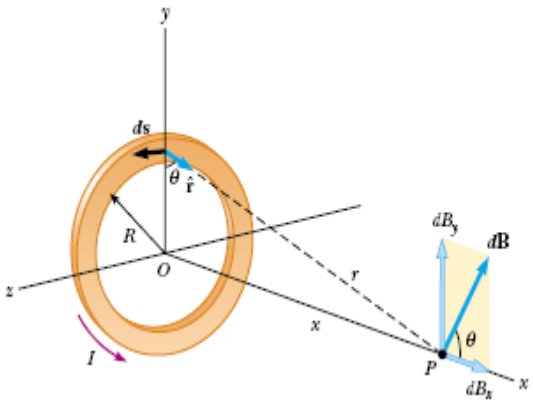
11.3 Induksi magnet oleh kawat lingkaran.

Pada sebuah kawat berarus melingkar akan ada induksi magnet yang arahnya seperti diperlihatkan pada Gambar 11.7. Pada Gambar 11.7 tampak bahwa pada tepi kawat arah induksinya melingkari kawat dan makin ke tengah radius lingkarannya semakin besar. Dari Gambar 11.7 juga dapat disimpulkan bahwa makin besar radius kawat berarus maka radius arah induksi magnet dipusat lingkaran juga semakin besar. Pembahasan berikut adalah akan dihitung induksi magnetik oleh kawat berarus yang melingkar.



Gambar 11.7 Arah induksi magnet oleh kawat melingkar berarus

Ditinjau suatu kawat arus berbentuk lingkaran jari-jari R, akan dihitung rapat fluks magnetik/induksi magnet suatu titik di sumbu lingkaran yang jaraknya dari pusat lingkaran x (Gambar 11.8).



Gambar 11.8 Induksi magnet oleh kawat melingkar berarus di titik P

Kawat melingkar berarus menyebabkan induksi magnet dan dilukiskan seperti pada Gambar 11.8. Vektor *dB* adalah sebagian kecil dari induksi magnet B yang disebabkan oleh elemen kawat *ds* yang arahnya tegak lurus dengan *r* dan *ds*. Bagian kecil induksi magnet *dB* diuraikan ke sumbu lingkaran yaitu dB_y dan ke arah tegak lurus sumbu dB_x. Dengan pertimbangan simetri, komponen total ke arah yang tegak lurus sumbu lingkaran (kearah sumbu y) adalah 0. Hal ini dikarenakan dalam arah sumbu y komponen-komponen saling meniadakan, sehingga yang ada hanya komponen ke arah sumbu lingkaran .

Medan magnet pada sumbu lingkaran kawat berarus pada jarak x dari pusat lingkaran dan berjari-jari R adalah

$$B = \frac{\mu_o \, i \, R^2}{2\,(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \qquad (11.7)$$

Pada pusat lingkaran kawat berarus, berari x = 0,induksi magnetetnya adalah

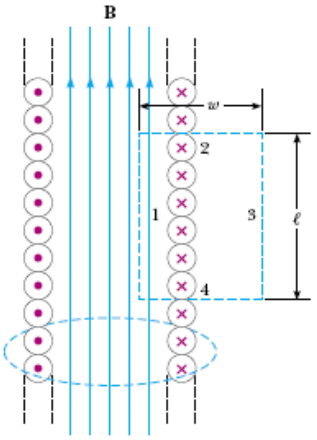
$$B = \frac{\mu_o \, i}{2\,R} \qquad (11.8)$$

Jika kawat lingkaran disusun sedemikian hingga berupa kumparan tipis (tebalnya jauh lebih kecil dari x), besarnya induksi magnet pada sumbu kumparan

$$B = \frac{\mu_o \, i \, R^2 \, N}{2\,(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \qquad (11.10)$$

N = jumlah lilitan kumparan.

11. 5 Induksi magnet oleh Solenoida.



Suatu solenoida dibayangkan sebagai suatu silinder yang dililiti kawat arus berbentuk lingkaran, masing-masing lingkaran tegak lurus sumbu silinder, arah arus pada solenoida seperti pada Gambar 11.9.

Solenoida dengan jumlah N, panjangnya l, jumlah lilitan pesatuan panjang $n = N/l$.

Gambar 11.9 Solenoida

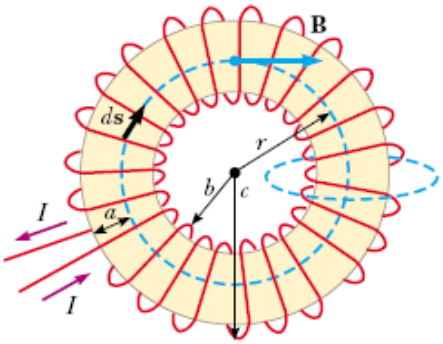
Untuk solenoid yang panjang tak berhingga, maka induksi manet ditengah-tengah solenoid sepanjang solenoid adalah

$$B = \frac{\mu_o \, N \, i}{L} \qquad B = \mu_o n \, i \qquad (11.10)$$

11.6 Induksi magnet oleh Toroida.

Suatu toroida adalah bangun berbentuk seperti ban yang dililiti dengan kawat sedemikian hingga tiap lilitan berbentuk lingkaran seperti diperlihatkan dalam Gambar 11.10

Toroida dianggap seperti solenoida sangat panjang yang dilengkungkan sehingga ujung-ujungnya berimpit, sehingga induksi magnet oleh toroida dapat diperoleh dari rumus (11.10).



Gambar 11.9 Toroida

$$L = 2\pi \left[b \left(+ \frac{c - b}{2} \right) \right] \\ = \pi (b + c) \qquad (11.11)$$

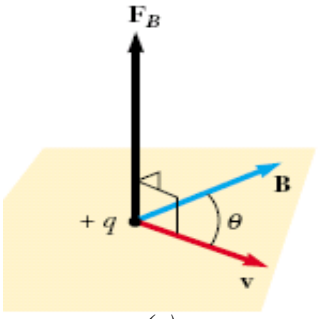
Medan magnet pada Toroida dapat dinyatakan sebagai

$$B = \frac{\mu_o N i}{\pi (c + b)} \qquad (11.12)$$

11.6 Gerak Muatan Listrik dan Medan Magnet

Gerak muatan listrik dalam medan magnet sangat penting dalam pemakaian sehari-hari, misalkan gerak elektron pada tabung sinar katoda, gerak pertikel bermuatan dalam siklotron, gerak elektron yang diproyeksikan dalam layar televisi, gerak ion dalam spektrograf massa dan sebagainya.

Ditinjau muatan positif q bergerak dengan kecepatan v dalam medan magnet yang induksi magnetnya B. Muatan +q akan mengalami gaya F_B yang arahnya diperlihatkan seperti pada Gambar 11.10 a-c



(a)

Besarnya gaya magnet adalah

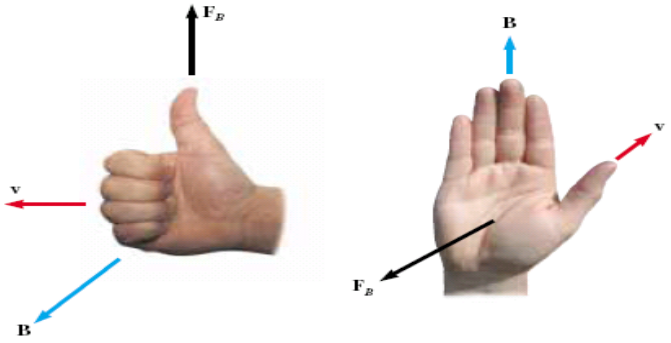
$F = q\ v\ B\ sin\ \theta,$

dimana θ sudut antara arah kecepatan dengan arah induksi magnet.

Arah gaya $\vec{F}$ adalah arah maju sekrup kanan bila diputar dari arah kecepatan $\vec{v}$ kearah induksi magnet $\vec{B}$ (perhatikan Gambar 11.10b).

Dalam notasi vektor gaya tersebut dapat ditulis sebagai

$$\vec{F} = q\ (\vec{v}\ x\ \vec{B}) \qquad (11.13)$$

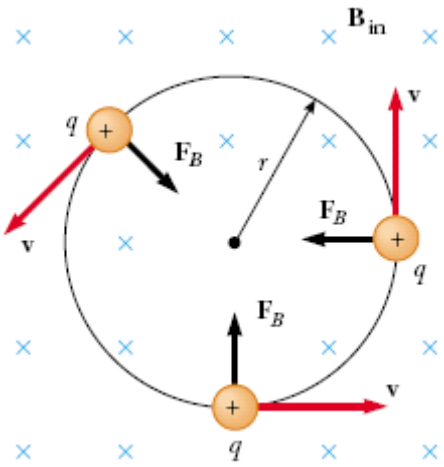


(b) *(c)*

Gambar 11.10 Arah Gaya magnet pada muatan yang bergerak dalam medan magnet B

Jika yang bergerak adalah muatan negatif, arah gaya sebaliknya dengan arah gaya pada muatan positif. Gaya magnet pada muatan yang bergerak ini dinamakan gaya **Lorentz**. Gaya Lorentz selalu bergerak tegak lurus arah kecepatan dan juga tegak lurus induksi magnet, dan hanya ada jika arah kecepatan tidak sejajar arah medan magnet.

Suatu muatan positif bergerak dalam medan magnet serba sama seperti diperlihatkan pada Gambar 11.11. Arah kecepatan tegak lurus arah medan magnet.



Gambar 11.11 Gerak melingkar suatu muatan yang bergerak dalam medan magnet *B*

Karena gaya magnet tegak lurus arah kecepatan, maka gaya magnet tersebut hanya mengubah arah gerak (arah kecepatan), sedang besar kecepatan tetap.

Percepatan yang ada adalah percepatan sentripetal,

$$\frac{mv^2}{r} = q\,v\,B \qquad (11.14)$$

atau

$$r = \frac{mv}{qB} \qquad (11.15)$$

Akibat bergerak dalam medan magnet, lintasan gerakan partikel bermuatan adalah berbentuk linkaran, maka kecepatan anguler muatan adalah

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m} \tag{11.16}$$

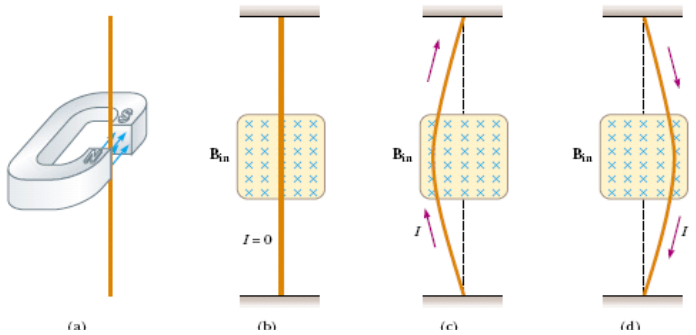
Periode dari gerakan muatan adalah

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \tag{11.17}$$

11.7 Kumparan Dalam Medan Magnet

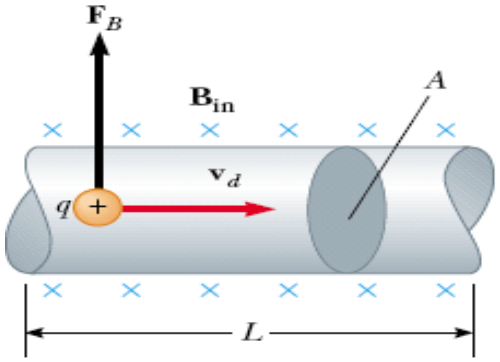
Sebelum membicarakan pengaruh medan magnet pada kumparan yang dilalui arus, dibicarakan dahulu pengaruh medan magnet pada kawat yang dilalui arus listrik.

Perhatikan Gambar 11.12a, adalah penghantar lurus didekatkan pada sebuah batang magnet. Kawat yang tidak dialiri arus tetap dalam lurus. Kemudian penghantar dalam medan magnet ditempatkan dalam medan magnet serba sama tanpa dialiri arus (Gambar 11.12b). Dari gambar tampak bahwa kawat tetap dalam keadaan lurus. Apabila penghantar dialiri arus listrik I ke arah atas, maka kawat akan melengkung ke kiri seperti terlihat pada Gambar 11.12 c. Jika arah arus pada penghantar dibalik maka arah lengkungan akan terlihat seperti pada Gambar 11.12d.



Gambar 11.12 Pengaruh medan magnet pada kawat yang dilalui arus listrik

Pada Gambar 11.13 diperlihatkan kawat berarus lurus berada dalam medan magnet serbasama. Arah medan magnet adalah tegak lurus dengan papan gambar dan menjauhi penggambar. Kawat berarus berada pada bidang gambar, sehingga kawat arus tegak lurus pada arah medan magnet.



Gambar 11.13 Kawat berarus dalam

Kita bayangkan ada partikel-partikel bermuatan q dan bergerak dengan kecepatan v_d. Menurut hukum Lorentz Masing-masing partikel akan dipengaruhi gaya magnet sebesar

$$F_B = qvB$$

Arah F_B tegak lurus dengan arah i dan medan magnet. Untuk kawat sepanjang L, jumlah partikel dalam kawat adalah $\Delta Q = A.v_d.\ \Delta t.n.q$

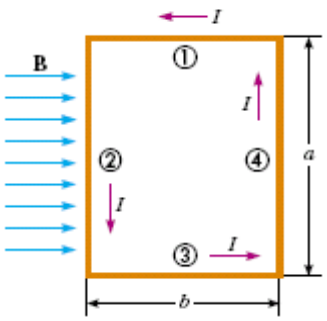
Gaya pada seluruh muatan pada kawat sepanjang L adalah

$$F = A.v_d.\ \Delta t.n.qBL \qquad (11.18)$$
$$= B\ (A.v_d.\ \Delta t.n.q\ )L$$

dengan $i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$, maka gaya yang bekerja pada muatan sepanjang kawat L dapat dinyatakan sebagai:

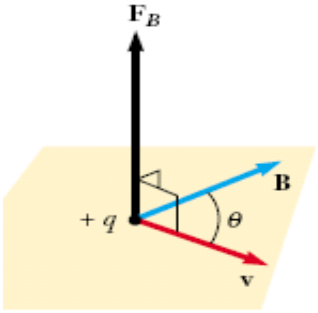
$$F = B\, i\, L \qquad (11.19)$$

Ditinjau kawat arus tertutup berbentuk empat persegi panjang seperti pada Gambar 11.14 yang dilalui arus i.



Gambar 11.14 Kawat berarus dalam medan magnet

Arah induksi magnet adalah ke kanan. Gaya pada kawat a yaitu F_a arahnya masuk bidang gambar (arah maju sekrup kanan bila diputar dari arah arus kearah B, besarnya $B\, i\, L_a \sin \alpha$).
Gaya pada kawat cd adalah kearah sumbu Z negatif (arah maju sekrup kanan bila diputar dari arah i kearah B, besarnya $B\, i\, L_{cd} \sin \alpha$).

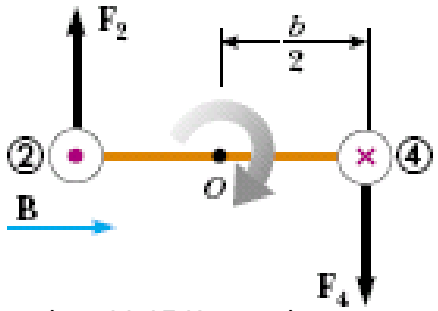


Gambar 11.15 Ilustrasi arah ***F***, ***B*** dan ***v***

Gaya F_{ab} dan F_{cd} besarnya sama dengan arah yang berlawanan dan juga garis kerjanya berimpit, sehingga kedua gaya tersebut saling menetralkan, ini berarti bahwa gaya-gaya tersebut saling meniadakan (gaya resultan kearah sejajar dengan sumbu Z nol).

Gaya pada kawat da yaitu F_{da} kearah sumbu X negatif (arah maju sekrup kanan bila diputar dari arah i/sumbu Z positif kearah

B/sumbu Y positif), sebaliknya gaya pada kawat bc yaitu F_{bc} kearah sumbu X positif, besar gaya F_{da} = besar gaya $F_{bc} = B\ i\ L_{da} = B\ i\ L_{bc}$.



Gambar 11.15 Kawat berarus dalam medan magnet

Jika arus dan arah medan magnet dilihat dari atas (kearah sumbu Z negatif) maka arus dan arah B terlihat seperti Gambar 11.15.

Terlihat pada gambar bahwa arah gaya F_{da} dan arah gaya F_{bc} berlawanan dan tidak segaris kerja, sehingga membentuk sebuah kopel dengan momen kopel ;

$$\tau = B\ i\ L_{da}\ L_{ab}\ \cos\ \theta$$
$$= B\ i\ L_{da}\ L_{ab}\ \cos\ (90^o - \alpha)$$

atau $$\tau = B\ i\ A\ \sin\ \alpha \qquad (11.20)$$

dengan

A = Luas bidang kawat arus.

Jika kawat arus terutup diganti dengan kumparan dengan N lilitan, maka besarnya momen kopel :

$$\tau = B\ i\ A\ N \sin\ \alpha \qquad (11.21)$$

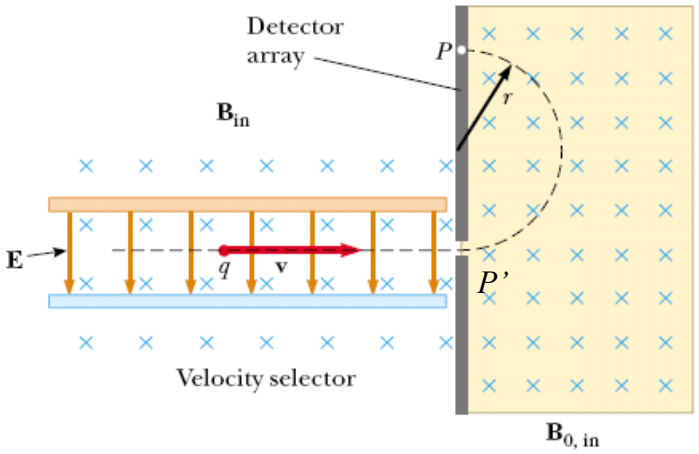
11. 8 Pemakaian Medan Magnet

Medan magnet banyak digunakan dalam peralatan yang digunakan sehari-hari misalnya pada motor listrik, generator listrik, komputer, televisi, tabung sinar katoda, siklotron, spektrograf massa, mikroskoop elektron, dsb.

Dalam paragraf ini hanya akan dibahas beberapa alat yang mudah dianalisa pemakaian medan magnetnya, misalnya tabung sinar katoda, siklotron, spektrogram Thomson, spektrograf massa Bainbridge, dan generator arus searah.

Spektrometer massa

Alat ini digunakan untuk mengukur massa partikel bermuatan. Prinsip kerjanya adalah bahwa suatu unsur mempunyai beberapa isotop.



Gambar 11.14 Spektrometer massa

Ion-ion positif dari sumber ion *S* bergerak dengan kecepatan *v* masuk celah yang sangat sempit S_1 masuk dalam daerah diantara dua plat sejajar dimana didalamnya terdapat medan magnet dan medan listrik. Pada Gambar 11.16 medan listrik arahnya ke kanan sebesar *q E*, dimana *E* adalah kuat medan listrik diantara *P* dan *P'*, *P* positif terhadap *P'*. Agar supaya ioan positif dapat melalui S_2, maka gaya listrik kearah kanan harus diimbangi oleh gaya magnet *q v B* kearah kiri (arah induksi magnet tegak lurus papan gambar dan menuju penggambar, sehingga arah maju sekrup kanan yang diputar dari arah *v* kearah *B* adalah ke kiri).

Setelah melewati celah S_2 karena pengaruh medan magnet dengan induksi magnet *B'* ion-ion bergerak dengan lintasan berupa lingkaran-lingkaran.

Kecepatan ion dapat dihitung sebagai berikut yaitu

Gaya listrik kekanan = gaya magnet kekiri

$Q\,E = q\,v\,B$

Atau $v = \frac{E}{B}$

Radius lintasan ion $R = \frac{m\,v}{q\,B'}$ (11.22)

Untuk isotop-isotop *v*, *q*, dan *B'* sama sehingga radius ion sebanding dengan massa ion. Dengan spektrometer ini dapat dipisahkan bermacam-macam isotop. Dari persamaan (11.22), tampak bahwa jari-jari lintasan sebanding dengan massa isotop tersebut.

Contoh soal 1:

Jika pada spektrograf massa Bainbridge kuat medan listrik antara P dan P' $= 10^4 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$ dan $B = B' = 0{,}2 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$, Sedang ion-ion yang diselidiki adalah 6^{016}, 8^{017}, 8^{018} bermuatan tunggal. Tentukan jarak antara garis-garis yang terbentuk pada film.

Penyelesaian :

$e\,E = e\,v_o\,B$

$v_o = \frac{E}{B} = \frac{10^4}{0{,}2} = 5 \times 10^4$

$R_1 = \frac{m_1\,v_o}{e\,B'}, m_1 = 16 \times 1{,}66 \times 10^{-27}$ kgm.

$R_2 = \frac{m_2\,v_o}{e\,B'}, m_2 = 17 \times 1{,}66 \times 10^{-27}$ kgm.

$R_3 = \frac{m_3\,v_o}{e\,B'}, m_3 = 18 \times 1{,}66 \times 10^{-27}$ kgm.

Jarak antara garis kedua dan pertama,

$= 2\,(R_2 - R_1) = 2\frac{\mathrm{v_o}}{\mathrm{e\,B'}}(\mathrm{m_2 - m_1})$

$= 2 . \frac{5 \times 10^4}{1{,}6 \times 10^{-19} . 0{,}2}(17 - 16)1{,}66 \times 10^{-27}$ meter

Jarak antara garis ketiga dan kedua,

$$= \frac{2.5 \times 10^{4}}{1{,}6 \times 10^{-19} . 0{,}2} (18 - 17)\, 1{,}66 \times 10^{-27} \text{ meter}$$

11.9 Alat-Alat Ukur Listrik

Interaksi medan magnet dengan kumparan yang dilalui arus listrik memungkinkan dikontruksi alat-alat ukur besaran-besaran listrik, misalnya arus listrik, beda potensial, muatan yang dipindahkan dari dan ke kapasitor, daya dan tenaga listrik. Disamping alat-alat ukur listrik interaksi antara medan magnet dan arus listrik juga digunakan dalam motor arus searah.

Dalam paragraf ini akan dibicarakan prinsip dari galvanometer, amper meter, voltmeter, galvanometer balistik dan dinamometer.

Galvanometer

Prinsip dari suatu galvanometer adalah simpangan kumparan yang dilalui arus listrik dalam medan magnet. Akan tetapi gerakannya dibatasi oleh kedua pegas. Makin besar arus listrik yang mengalir, kumparan terputar semakin besar. Akibatnya, jarum penunjuk akan menunjuk ke arah skala yang lebih besar.

Galvanometer yang memiliki letak skala nol di tengah dapat digunakan untuk mengukur besar arus listrik tanpa memandang arahnya.Namun apabila titik nolnya berada di ujung sebelah kiri, harus diperhatikan kutub positif dan negatif galvanometer.

Amperemeter.

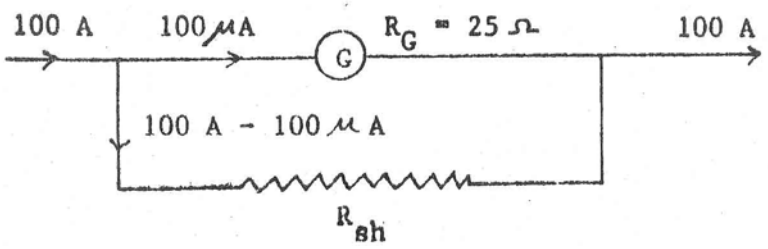
Galvanometer hanya untuk mengukur arus dalam orde mikroampere, sedang sehari-hari kita memerlukan arus dalam orde Ampere, karena itu perlu alat ukur arus ini disebut ampermeter.

Suatu ampermeter adalah suatu galvanometer yang diberi tahanan luar paralel dengan tahanan galvanometer (disebut tahanan shunt).

Fungsi dari tahanan shunt adalah untuk mengalirkan arus sedemikian hingga arus maksimum yang lewat galvanometer tetap dalam orde mikroamper.

Misalnya suatu galvanometer dengan tahanan 25 ohm hanya mampu dialiri arus 100 mikroamper pada simpangan maksimum, galvanometer ini akan dijadikan ampermeter yang mampu mengukur

arus sebesar 100 ampere pada simpangan maksimum. Arus sebesar 100 ampere – 100 mikroampere harus dilewatkan pada tahanan shunt Rsh (Gambar 11.20).



Gambar 11.19 Ampermeter

Besarnya tahanan shunt yang harus dipasang pada galvanometer agar mampu menjadi ampermeter dengan batas ukur 100 A (simpangan maksimum bila dilalui arus 100 A) dapat dihitung sebagai berikut :

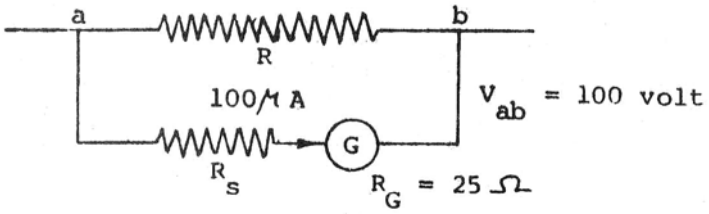
$$0{,}0001 \times 25 = (100 - 0{,}0001)R_{sh}$$

$$R_{sh} = \frac{25 \times 0{,}0001}{1000 - 0{,}0001}$$

$$= 2{,}5 \times 10^{-5} \text{ ohm.}$$

Voltmeter.

Prinsip suatu voltmeter adalah galvanometer yang diberi tahanan muka (tahanan luar yang seri dengan tahanan galvanometer). Misalkan tahanan galvanometer 25 ohm, simpangan maksimum galvanometer terjadi bila galvanometer dilalui arus 0,1 mikroampere. Galvanometer akan dijadikan voltmeter dengan batas ukur 100 volt, tahanan muka yang dipasang R_s (Gambar 11.18) harus sedemikian sehingga bila dipasang pada antara titik a dan b yang beda potensialnya 100 volt, arus yang lewat galvanometer 100 mikroampere.



Gambar 11.21 Voltmeter

Tahanan seri pada galvanometer agar dapat dipakai sebagai voltmeter dengan batas ukur 100 volt dapat dihitung sebagai berikut

$(R_s + 25)10^{-4} = 100$

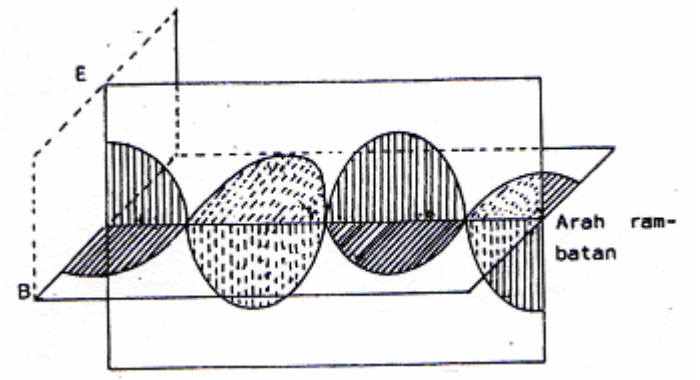
$$R_s = \frac{100}{10^{-4}} - 25 = 5.999,9925\ ohm.$$

11.10 Gelombang Elektromagnetik

Bila dalam kawat PQ terjadi perubahan-perubahan tegangan baik besar maupun arahnya, maka dalam kawat PQ elektron bergerak bolak-balik, dengan kata lain dalam kawat PQ terjadi getaran listrik. Perubahan tegangan menimbulkan perubahan medan listrik dalam ruangan disekitar kawat, sedangkan perubahan arus listrik menimbulkan perubahan medan magnet. Perubahan medanlistrik dan medan magnet itu merambat ke segala jurusan. Karena rambatan perubahan medan magnet dan medan listrik secara periodik maka rambatan perubahan medan listrik dan medan magnet lazim disebut Gelombang Elektromagnetik.

Percobaan-percobaan yang teliti membawa kita pada kesimpulan :

1. Pola gelombang elektromagnetik mempunyai pola yang sama dengan gelombang transversal dengan vektor perubahan medan listrik tegak lurus pada vektor perubahan medan magnet.



2. Gelombang elektromagnetik menunjukkan gejala-gejala :

Pemantulan, pembiasan, difraksi, polarisasi seperti halnya pada cahaya.

3. Diserap oleh konduktor dan diteruskan oleh isolator.

Hasil-hasil percobaan yang mendahuluinya telah mengungkapkan tiga aturan gejala kelistrikan :

Hukum Coulomb : Muatan listrik menghasilkan medan listrik yang kuat.

Hukum Biot-Savart : Aliran muatan (arus) listrik menghasilkan medan magnet disekitarnya.

Hukum Faraday : Perubahan medan magnet (B) dapat menimbulkan medan listrik (E).

Didorong oleh keyakinan atas keteraturan dan kerapian hukum-hukum alam, Maxwell berpendapat :

Masih ada kekurangan satu aturan kelistrikan yang masih belum terungkap secara empirik.

Jika perubahan medan magnet dapat menimbulkan perubahan medan listrik maka perubahan medan listrik pasti dapat menimbulkan perubahan medan magnet, demikianlah keyakinan Maxwell.

Dengan pengetahuan matematika yang dimilikinya, secara cermat Maxwell membangun teori yang dikenal sebagai teori gelombang elektromagnetik. Baru setelah bertahun-tahun Maxwell tiada, teorinya dapat diuji kebenarannya melalui percobaan-percobaan.Menurut perhitungan secara teoritik, kecepatan gelombang elektromagnetik hanya bergantung pada permitivitas (ε_0) dan permeabilitas (μ_0).

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 . \mu_0}} \qquad (11.26)$$

Dengan memasukkan $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi.9}.10^{-9}$ C/N.m^2

dan $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ W/A.m

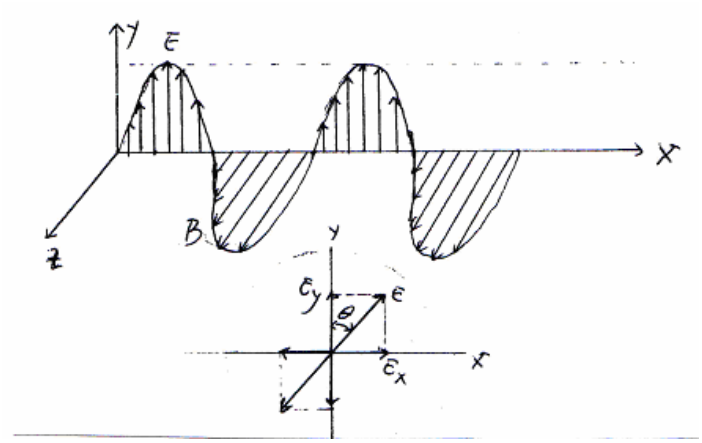
Diperoleh nilai $c = 3.10^8$ m/s, nilai yang sama dengan kecepatan cahaya.

Oleh sebab itu Maxwell mempunyai cukup alasan untuk menganggap cahaya adalah Gelombang Elektromagnetik.

Oleh karena itu konsep gelombang elektromagnetik ini merupakan penyokong teori HUYGENS tentang cahaya sebagai gerak gelombang.

11.10.1 Intensitas Gelombang Elektromagnetik.

Energi rata-rata per satuan luas yang dirambatkan oleh gelombang elektromagnetik disebut dengan **intensitas gelombang elektromagnetik.** Intensitas tersebut sebanding dengan harga maksimum medan magnet (*B*) dan sebanding pula dengan harga maksimun medan listriknya (*E*).



Gambar 11.22 Perambatan gelombang

Kedua medan listrik dan medan magnet tersebut saling tegak lurus, merambat kearah sumbu X.

Kedua gelombang tersebut dapat dituliskan menjadi :

$$E_y = E_0 \sin (kx - \omega t) \qquad (11.27)$$

$$E_z = B_0 \sin (kx - \omega t) \qquad (11.28)$$

Intensitas gelombang elektromagnetik dituliskan menjadi :

$$s = \frac{E_y . B_z}{\mu_0}$$

$$s = \frac{E_0 . B_0}{\mu_0} sin^2 (kx - \omega t) \qquad (11.29)$$

Jadi hanya intesitas (s) tergantung dari $\sin^2$ (kx-ωt), s akan berharga maksimum bila harga $\sin^2$ (kx-ωt) = 1, atau

$$s_{max} = \frac{E_0 . B_0}{\mu_0} \quad \text{,atau}$$

$$s_{max} = \frac{E_{max} . B_{max}}{\mu_0} \qquad (11.30)$$

Sedangkan s akan berharga minimum bila harga $\sin^2$ (kx-ωt) adalah nol. Jadi intensitas rata-rata (s) adalah :

$$\bar{s} = \frac{s_{max} + s_{min}}{2}$$

$$\bar{s} = \frac{E_{max} + B_{max}}{2\mu_0}$$

Selain itu $\bar{s}$ juga dapat dituliskan menjadi :

$$\bar{s} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \, E_0^2 \, c \qquad (11.31)$$

Karena 1) $E_0 = c\, B_0$; $E_0 = E_{max}$ dan $B_0 = B_{max}$:

2) $c = \dfrac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$

Nilai $\bar{s}$ juga dapat dituliskan dalam bentuk :

$$\bar{s} = \frac{E_0^2}{2c\mu_0} \qquad (11.32)$$

Gejala gelombang elektromagnetik baru dapat ditunjukkan beberapa tahun setelah Maxwell meninggal yaitu oleh H.R. Hertz.

Beberapa glombang-gelombang yang dapat dilihat oleh mata yaitu gelombang cahaya yang mempunyai panjang gelombang antara 8.10^{-7} meter yaitu warna merah - 4.10^{-7} meter yaitu warna ungu. Gelombang yang mempunyai daya tembus yang sangat besar adalah sinar X dan sinar γ.

Sinar X dihasilkan oleh radiasi 'pengereman' (brehmstrahlung) sewaktu elektron yang dipercepat menumbuk target/logam dan kehilangan energinya berupa sinar X. Selain itu sinar X juga dihasilkan karena eksitasi (menyerap energi) dan deeksitasi (memancarkan energi) elektron-elektron atom kulit dalam sedangkan sinar γ dihasilkan oleh inti-inti yang tidak stabil (bersifat radioaktif).

Manfaat gelombang elektromagnet dapat diterangkan sesuai urutan spektrumnya

1. Daerah frekuensi antara 10^4 sampai 10^7 Hz dikenal sebagai gelombang radio, yaitu sebagai salah satu sarana komunikasi. Karena sifat gelombangnya yang mudah dipantulkan ionosfer, yaitu lapisan atmosfir bumi yang mengandung partikel-partikel bermuatan, maka gelombang ini mampu mencapai tempat-tempat yang jaraknya cukup jauh dari stasiun pemancar.
Informasi dalam bentuk suara dibawa oleh gelombang radio sebagai perubahan amplitudo (modulasi amplitudo).

2. Daerah frekuensi sekitar 10^8 Hz, gelombang elektromagnetik mampu menembus lapisan ionosfer sehingga sering digunakan sebagai sarana komunikasi dengan satelit-satelit. Daerah ini digunakan untuk televisi dan radio FM (frekuensi modulasi) dimana informasi dibawa dalam bentuk perubahan frekuensi (modulasi frekuensi).

3. Daerah frekuensi sekitar 10^{10} Hz, digunakan oleh pesawat RADAR (Radio Detection and Ranging). Informasi yang dikirim ataupun yang diterima berbentuk sebagai pulsa. Bila pulsa ini dikirim oleh pesawat radar dan mengenai suatu sasaran dalam selang waktu t, maka jarak antara radar ke sasaran :

$$s = \frac{c\ x\ \Delta t}{2}$$

c = kecepatan cahaya (3×10^8 m/det)

4. Daerah frekuensi $10^{11} – 10^{14}$ Hz, ditempati oleh radiasi infra merah, dimana gelombang ini lebih panjang dari gelombang cahaya tampak dan tidak banyak dihamburkan oleh partikel-partikel debu dalam atmosfir sehingga mengurangi batas penglihatan manusia.

5. Daerah frekuensi $10^{14} – 10^{15}$ Hz, berisi daerah cahaya tampak (visible light), yaitu cahaya yang tampak oleh mata manusia dan terdiri dari deretan warna-warna merah sampai ungu.

6. Daerah frekuensi $10^{15} – 10^{16}$ Hz, dinamakan daerah ultra ungu (ultra violet). Dengan frekuensi ultra ungu memungkinkan kita mengenal lebih cepat dan tepat unsur-unsur yang terkandung dalam suatu bahan.

7. Daerah frekuensi $10^{16} – 10^{20}$ Hz, disebut daerah sinar X. Gelombang ini dapat juga dihasilkan dengan menembakkan elektron dalam tabung hampa pada kepingan logam. Karena panjang gelombangnya sangat pendek, maka gelombang ini mempunyai daya tembus yang cukup besar sehingga selain digunakan di rumah sakit, banyak pula digunakan di lembaga-lembaga penelitian ataupun industri.

8. Daerah frekuensi $10^{20} – 10^{25}$ Hz, disebut daerah sinar gamma. Gelombang ini mempunyai daya tembus yang lebih besar daripada sinar X, dan dihasilkan oleh inti-inti atom yang tidak stabil.

11.11. Uji Kompetensi

Sebuah kutub magnet mempunyai kekuatan 10^{-5} A.m

a. Berapa kuat medan di satu titik yang jaraknya 1 m.

b. Berapa induksi magnetik di tempat itu ?

c. Berapa kuat medan dan induksi magnetik pada jarak 0,25 m.

Kuat medan di titik dalam medan magnet 5 N/A.m

a. Berapa besar gaya yang bekerja pada magnet yang kekuatannya 10 A.m dititik itu ?

b. Berapa besar induksi magnetik di tempat itu ?

Berapa fluks magnetik kutub magnet yang kekuatannya 10^{-2} ?

Medan magnet yang serba sama mempunyai kuat medan sebesar 10^{7} N/A.m

a. Berapa induksi magnetiknya ?

b. Berapa fluks magnetik yang tegak lurus bidang seluas 2 m^2

c. Jika bidang itu mengapit sudut 30^0 dengan medan magnet. Berapa fluks magnetik yang menembus bidang itu ?

Sebuah penghantar bergerak dengan kecepatan 15 m/s pada suatu medan magnet homogen. Berapa *tesla* kuat medan magnet tersebut jika ggl induksi yang timbul 10^2 volt dan panjang kawatnya 10 cm?

sebuah kawat berbentuk persegi panjang dengan luas 20 cm^2 diletakkan didalam medan magnet $B = 10^{-2}$ *tesla*. Hitung fliks magnet pada kawat tersebut jika :
B tegak lurus bidang kawat!
B membentuk sudut 30^0 dengan bidang kawat!

Soal pilihan ganda

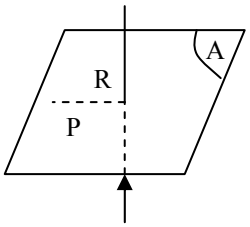
1. Medan magnet dapat ditimbulkan oleh .....
   1. muatan listrik yang bergerak
   2. konduktor yang dialiri arus listrik
   3. konduktor yang dialiri arus bolak – balik
   4. muatan listrik yang tidan bergerak

   pernyataan yang benar yaitu ...
   A. 1,2 dan 3 D. 4 saja
   B. 1 dan 3 E. Semua benar
   C. 2 dan 4

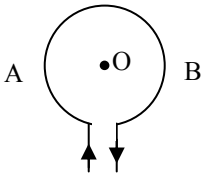
2. Bila kawat yang dialiri arus diletakkan diatas sebuah kompas, maka jarum kompas....
   A. tidak terpengaruh oleh arus listrik
   B. menyimpang ke arah tegak lurus kawat
   C. cenderung menyimpang ke arah sejajar kawat
   D. cenderung menyimpang searah dengan arus
   E. berputas terus-menerus

3. Besar kuat medan magnet di suatu titik yang letaknya sejauh r dari suatu penghantar lurus yang dialiri arus listrik I adalah sebanding dengan .....
   A. I D. I/r
   B. rI E. I/(rI)
   C. r/I

4. Sebuah kawat lurus yang panjang, ber arus listrik 10 Ampere. Sebuah titik berada 4 cm dari kawat. Jika $\mu_0 = 4\pi\ 10^{-7}$ Wb/A.m, maka kuat medan magnet dititik tersebut adalah...
   A. $0{,}5 \cdot 10^{-4}$ wb/m^2
   B. $1{,}0 \cdot 10^{-4}$ wb/m^2
   C. $3{,}14 \cdot 10^{-4}$ wb/m^2
   D. $4{,}0 \cdot 10^{-4}$ wb/m^2
   E. $5{,}0 \cdot 10^{-4}$ wb/m^2

5. 

   Kawat lurus yang panjang menembus tegak lurus bidang kertas (A). Titik P berada pada jarak R dari kawat itu, seperti tampak pada gambar. Bila kawat dialiri arus i dengan arah dari bawah keatas, maka arah induksi magnetik *B* di titik P adalah .....
   A. tegak lurus bidang A arah ke bawah
   B. tagak lurus bidang A arah ke atas
   C. menuju ke P
   D. menyinggung lingkaran dengan jari-jari R di P awah ke belakang menyinggung lingkaran dengan jari-jari R di P awah ke muka

5. 

Arah garis gaya magnet dipusat lingkaran O adalah
   A. tegak lurus bidang kertas menjauhi pembaca
   B. tegak lurus bidang kertas mendekati pembaca
   C. menuju O melalui A
   D. meninggalkan O melalui A
   E. meninggalkan O melalui B

Sebuah kawat yang berbentuk lingkaran dengan jari-jari 1 dialiri arus i. Besar kuat medan magnet pada pusat lingkaran itu adalah....

tidak bergantung pada i
sebanding dengan i^2
berbanding terbalik dengan i
berbanding lurus dengan i
berbanding terbalik dengan i^2

Induksi magnetik disebuah titik yang berada ditengah sumbu solenoida yang berarus listrik berbanding ....

1. lurus dengan jumlah lilitan
2. lurus dengan besarnya kuat arus
3. lurus dengan besarnya permeabilitas zat dalam solenoida
4. terbalik dengan panjang solenoida

pernyataan diatas yang benar yaitu..

1,2 dan 3
1 dan 3
2 dan 4
D. 4 saja
E. Semua benar

Suatu solenoida panjang 2 meter dengan 800 lilitan dan jari-jari 2 cm. Bila solenoida itu dialiri arus sebesar 0,5 A, maka induksi magnet pada ujung solenoida tersebut adalah... ($\mu_0 = 4\pi\ 10^{-7}$ Wb.A^{-1}.m^{-1})

4×10^{-5} Wb.m^{-2}
8×10^{-7} Wb.m^{-2}
4×10^{-8} Wb.m^{-2}
8×10^{-5} Wb.m^{-2}
2×10^{-4} Wb.m^{-2}

besar gaya yang dialami seutas kawat lurus berarus listrik di dalam suatu medan magnet yang serba sama tidak bergantung pada ...
posisi kawat di dalam medan magnet
panjang kawat

”Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

Tippler, Paul A, 1998, ***Fisika Untuk Sains dan Teknik***, Alih Bahasa Lea Prasetio, Rahmat W Adi, Penerbit Erlangga, Jakarta.

Douglas C Giancoli, ***FISIKA***, Jilid 1 Edisi 5, Alih Bahasa Yulhiza Hanum, Penerbit Erlangga, Jakarta.

Marthen Kanginan, 2006, ***Fisika Untuk SMA Kelas IX,X, dan XI-***, Penerbit Erlangga, Jakarta.

Raymond Serway, et. al, ***Physics for Scientists and Engineers***, Saunders College Publishing, New york.

Dosesn-Dosen Fisika FMIPA ITS, 1998, ***Diktat Fisika Dasar I***, Yanasika ITS.

Lawrence H Van Vlack, ***"Elements of Materials Science and Engineering"*** Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1985

William D Callister Jr, ***"Materials Science and Engineering" An Introduction,*** John Willey and Sons, Singapore, 1986

O'Dwyer, John J, 1984, ***College Physics***, Wadsworth, Inc, USA

Lawrence H Van Vlack, ***"Elements of Materials Science and Engineering"*** Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1985

William D Callister Jr, ***"Materials Science and Engineering" An Introduction,*** John Willey and Sons, Singapore, 1986

Dikmenjur, ***Bahan Ajar Modul Manual Untuk SMK Bidang Adaptif Mata Pelajaran Fisika***, 2004.

Dra. Etty Jaskarti S, Drs. Iyep Suryana, 1994, ***Fisika untuk SMK Kelompok Teknologi dan Industri Program Studi Belmo***, Tingkat 1 Catur wulan 1,2, dan 3, Penerbit ANGKASA Bandung.

A2

Glosarium

Akurasi: Berkaitan dengan ketepatan, hasil pengukuran yang mendekati nilai sebenarnya.
Angka penting: Angka-angka hasil pengukuran yang terdiri dari angka pasti dan angka taksiran.
Besaran: Sesuatu yang memiliki kuantitas/nilai dan satuan.
Besaran pokok: Besaran yang satuannya didefinisikan sendiri melalui konferensi internasional.
Besaran turunan: Besaran-besaran yang satuannya diturunkan dari besaran pokok.
Dimensi: Salah satu bentuk deskripsi suatu besaran.
Jangka sorong: Alat ukur panjang dengan nonius geser, umumnya memiliki ketelitian hingga 0,1 mm atau 0,05 mm.
Kilogram (kg) Satuan SI untuk massa.
Massa benda: Jumlah materi yang terkandung dalam suatu benda.
Meter (m): Satuan SI untuk panjang.
Mikrometer sekrup: Alat ukur panjang dengan nonius putar, umumnyavmemiliki ketelitian hingga 0,01 mm.
Neraca lengan: Alat ukur massa.
Neraca pegas: Alat ukur gaya, termasuk gaya berat.
Newton (N): Satuan SI untuk gaya.
Nonius: Skala tambahan yang membagi skala utama menjadi nilai/kuantitas lebih kecil.
Panjang: Jarak antara dua titik.
Paralaks: Kesalahan yang terjadi karena pemilihan posisi atau sudut pandang yang tidak tegak lurus.
Pengukuran: Kegiatan membandingkan suatu besaran dengan besaran lain sejenis yang digunakan sebagai satuan.
Presisi: Berkaitan dengan ketelitian, pengukuran yang mengandung ketidak pastian kecil.
Sekon: Satuan SI untuk waktu.
Skala terkecil: Skala pada alat ukur yang nilainya paling kecil, dibatasi oleh dua garis skala yang paling dekat.

SI Sistem Internasional: sistem satuan yang berbasis sistem metrik.
Stopwatch: Alat pengukur waktu.
Termometer: Alat pengukur temperatur.
Waktu: Selang antara dua kejadian atau peristiwa.

Besaran: Sesuatu yang dapat diukur dan dinyatakan dengan angka.
Besaran scalar:

- Besaran yang cukup dinyatakan dengan suatu angka.
- Besaran yang hanya memiliki besar (nilai) saja.

Besaran vector:

- Besaran yang harus dinyatakan dengan suatu angka dan arah
- Besaran yang memiliki arah dan besar (nilai)

Gerak jatuh bebas: Gerak suatu benda yang dijatuhkan dari suatu ketinggian tanpa kecepatan awal
Gerak lurus beraturan: Gerak benda pada garis lurus yang pada selang waktu sama akan menempuh jarak yang sama.
Gerak lurus berubah beraturan Gerak benda yang lintasannya pada garis lurus dengan perubahan kecepatan tiap selang waktu adalah tetap.
Gerak vertical: Gerak suatu benda pada arah vertikal terhadap tanah, yang selama geraknya benda itu dipengaruhi oleh gaya gravitasi bumi.
Gerak vertikal ke atas: Gerak benda yang dilempar vertikal ke atas dengan kecepatan awal tertentu. Pada kasus gerak vertical ke atas terdapat dua kejadian yaitu gerak vertical naik dan gerak vertikal turun.
Gerak vertikal ke bawah: Gerak benda yang dilempar vertikal ke bawah dengan kecepatan awal tertentu
Gradien: Kemiringan suatu garis/kurva
Jarak: Panjang lintasan sesungguhnya yang ditempuh oleh suatu benda dalam waktu tertentu, dan tidak bergantung pada arah sehingga jarak selalu memiliki tanda positif (+).
Kedudukan: Letak suatu materi yang dinyatakan terhadap suatu titik sembarang (titik acuan).
Kuadran: Daerah pada sumbu koordinat yaitu di atas sumbu x positif dan di sebelah kanan sumbu y positif.

Lintasan:

- Jalan yang dilalui suatu materi/benda yangbergerak.
- Titik berurutan yang dilalui suatu benda yang bergerak.

Percepatan: Penambahan kecepatan per satuan waktu.

Perpindahan: Perubahan kedudukan awal dan akhir suatu benda karena adanya perubahan waktu dan tidak bergantung pada jalan mana yang ditempuh oleh benda.

Pewaktu ketik (ticker timer): Alat yang dapat digunakan untuk menentukan kelajuan sesaat dan percepatan suatu benda yang bergerak.

Titik acuan: Titik pangkal pengukuran.

Perlambatan: Pengurangan kecepatan per satuan waktu.

Gerak melingkar beraturan Gerak yang lintasannya melingkar dengan kelajuan konstan.

Kecepatan linier: Kecepatan gerak melingkar yang arahnya selalu tegak lurus jari-jari lingkaran.

Kecepatan sudut: Perpindahan sudut persatuan waktu

Percepatan sentripetal: Perubahan kecepatan persatuan waktu pada gerak melingkar yang arahnya selalu ke pusat lingkaran.

Gaya sentripetal: Gaya yang mengakibatkan percepatan sentripetal.

Percepatan sentrifugal: Percepatan yang dihasilkan adanya gaya sentrifugal.

Gaya sentrifugal: Gaya inersial yang besarnya sama dan arahnya berlawanan dengan gaya sentripetal. Berdasarkan hukum III Newton gaya setrifugal dan gaya sentripetal merupakan pasangan gaya aksi dan reaksi.

Kelembaman: Mempertahankan dalam keadaan semula baik dalam keadaan bergerak maupun diam.

Gaya Merupakan besaran vektor yang mempunyai nilai besar dan arah, misalnya berat mempunyai nilai 10 m/s^2 arahnya menuju kepusat bumi.

Gaya aksi: Gaya yang diberikan oleh benda pertama kepada benda kedua.

Gaya reaksi: Gaya yang diberikan benda kedua sebagai akibat adanya gaya oleh benda pertama, yang mempunyai besar sama dengan gaya aksi tetapi arahnya berlawanan.

Percepatan: Merupakan vektor yang dapat menyebabkan kecepatan berubah seiring perubahan waktu.
Gaya Normal: Gaya yang ditimbulkan oleh suatu benda pada suatu bidang dan bidang memberikan gaya reaksi yang besarnya sama dengan berat benda yang arahnya tegak lurus bidang.
Gaya Gesek: Merupakan gaya akibat dari gesekan dua buah benda atau lebih yang arah berlawanan dengan arah gerak benda.
Koefisien gesek: Perbandingan antara gaya gesek dengan gaya normal.
Massa: Jumlah materi yang dikandung suatu benda.
Berat: Merupakan gaya yang disebabkan adanya tarikan bumi, sehingga arahnya menuju ke pusat dan besarnya merupakan perkalian antara massa dan percepatan grafitasi.
Usaha: Hasil kali besar perpindahan dengan komponen gaya yang sejajar dengan perpindahan benda.
Gaya: Suatu tarikan atau dorongan yang dapat mengakibatkan perubahan bentuk dan arah gerak pada suatu benda.
Perpindahan: Perubahan kedudukan suatu benda karena mendapat pengaruh gaya.
Joule: Satuan energi dalam MKS atau SI.
Erg: Satuan energi dalam CGS.
Daya: Usaha persatuan waktu.
Watt: Salah satu satuan daya.
Pk: Satuan daya kuda.
Energi Potensial: Energi yang dimiliki oleh suatu benda karena kedudukan.
Energi Kinetik: Energi yang dimiliki oleh suatu benda karena kecepatan.
Energi Mekanik: Penjumlahan antara energi potensial dengan energi
kinetik pada sistem tertentu.
Gaya Konservatif: Gaya yang tidak bergantung pada lintasannya namun hanya pada posisi awal dan akhir.
Gaya non Konservatif: Gaya yang bergantung pada lintasannya.
Momentum: Ukuran kesukaran untuk memberhentikan suatu benda yang sedang bergerak.
Impuls: Perubahan momentum yang dialami benda.
Koefisien Restitusi: Ukuran Kelentingan atau elastisitas suatu

Arus Listrik Searah : Jumlah muatan positif yang mengalir dalam suatu bahan atau media per satuan waktu dari suatu titik yang memiliki potensial listrik tinggi ke titik yang berpotensial listrik rendah.

Medan Listrik: Besar Medan Listrik disuatu titik P didefini-sikan sebagai besar gaya listrik per satuan muatan di titik P tersebut.

Resistor merupakan salah satu elemen listrik yang memiliki sifat mngubah energi listrik menjadi energi panas. Sehingga energi listrik tersebut tidak dapat dipulihkan menjadi energi listrik kembali secara langsung.

Resistansi merupakan sifat intrinsik suatu bahan yang memberikan hambatan terha-dap aliran muatan listrik di dalam suatu bahwa atau materi.

Resistivitas merupakan sifat suatu bahwa untuk mem-berikan hambatan terhadap laju aliran muatan listrik di dalam suatu bahwa. Resis-tivitas merupakan sifat intrin-sik yang tidak bergantung pada ukuran dan berat benda.

Beda Potensial Listrik: dapat dimengerti secara lebih mudah dengan cara sebagai berikut Bila diantara dua titik memiliki Beda Potensial sebesar satu volt, berarti bahwa untuk memindahkan muatan satu Coulomb diantara kedua titik tersebut diperlukan energi sebesar satu joule.

Kecepatan derip merupakan nilai laju total perjalanan muatan di dalam suatu bahan atau materi.

Dielektrik: zat yang dapat digunakan untuk memperbesar kapasitansi kapasitor

Kapasitor: piranti elektronik yang terbuat dari dua buah bahan konduktor dan berfungsi untuk menyimpan energi.

Permitivitas: kemampuan suatu bahan untuk menerima fluks listrik

Generator Listrik pada arus bolak balik merupakan sumber tegangan yang digunakan memberikan aliran arus listrik bolak balik. Pengertian bolak balik terkait dengan nilai arus atau tegangan yang dihasilkan selalu berubah terhadap waktu secara sinusoida. Tegangan yang dihasilkan bernilai $+V_{\text{maks}}$ sampai dengan $-V_{\text{maks}}$. Atau kalau yang dihasilkan generator adalah arus listrik maka akan bernilai antara $+I_{\text{maks}}$ sampai dengan $-I_{\text{maks}}$.

Arus listrik bolak balik dapat dihasilkan oleh adanya jumlah fluks magnet yang dilingkupi oleh suatu kumparan. Agar proses perubahan fluks magnet tersebut dapat dilakukan secara berulang maka digunakan sistem pemutaran terhadap kumparan tersebut. Hal ini pulalah yang mengakibatkan arus atau tegangan yang dihasilkan adalah sinusoida.

Hukum Kirchhoff dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu Hukum Kesatu Kirchhoff yang menyatakan bahwa muatan yang masuk suatu titik cabang adalah kekal. Artinya jumlah muatan yang masuk sama dengan jumlah muatan yang keluar. Rumusan ini banyak digunakan menyelesaikan soal dengan tipe rangkaian sederhana. Tetapi bila terkait dengan rangkaian yang rumit, dapat digunakan hukum kedua Kirchhoff. Hukum kedua Kirchhoff pada prinsipnya merupakan penerapan hukum kekekalan energi listrik dalam suatu rangkaian. Artinya energi yang diberikan oleh baterei atau suatu sumber energi listrik maka seluruhnya akan digunakan oleh rangkaian tersebut.

Gaya gerak listrik (GGL) merupakan kemampuan suatu bahan untuk memberikan beda potensial contohnya adalah baterei. Artinya bila kedua ujung baterei dihubungkan dengan suatu resistor maka akan terdapat beda potensial pada kedua ujung resistor tersebut. Hal ini berarti baterei memberikan energi pada resistor yaitu untuk menggerakkan muatan listrik di dalam resistor.