



BUKU AJAR

**TERMODINAMIKA
PAF 222/3 SKS**

**OLEH:
*Ir. Ainie Khuriati R.S., DEA.***

| |
|-------------------------------|
| UPI-40911-0-12007 |
| No. Daftar: 0552/13A/FMIPA/C1 |
| Tgl. : 16-7-'09 |

JURUSAN FISIKA FMIPA
UNIVERSITAS DIPONEGORO
2007

KATA PENGANTAR

Buku ini dimaksudkan guna melengkapi bahan bacaan bidang termodinamika klasik dalam edisi bahasa Indonesia. Buku ini sesuai untuk kuliah pengantar termodinamika baik yang bersifat utama maupun tidak utama. Saya harap buku ini juga bermanfaat bagi orang lain yang berminat untuk mempelajari ilmu termodinamika. Buku ini terdiri atas dua jilid. Jilid pertama membahas dasar-dasar termodinamika klasik. Penekanan ditempatkan pada konsep mendasar yaitu energi, entropi, dan kesetimbangan, hubungan diantara konsep-konsep ini.

Buku ini terdiri dari enam bab. Untuk lebih memahami pokok bahasan yang sedang dikembangkan, pada setiap bab diberikan tujuan bab dan kata kunci yang diletakkan pada margin. Setiap bahasan disertai contoh-contoh perhitungan untuk lebih menggambarkan bahan bahasan yang sedang dikembangkan. Beberapa latihan diberikan agar mahasiswa/pembaca memperoleh pengalaman dalam memecahkan persoalan dengan menggunakan metode yang sesuai. Buku ini selain menggunakan satuan SI juga menggunakan satuan yang sering digunakan dalam bidang rekayasa yaitu sistem satuan keteknikan.

Pembahasan pertama pada buku ini dimulai dengan pembahasan mengenai konsep-konsep dasar termodinamika untuk menanamkan pengertian tentang sistem, sifat-sifat sistem dan proses serta besaran-besaran dasar yang merupakan sifat sistem yang terukur yaitu volume jenis, tekanan dan temperatur dalam termodinamika dan persamaan gas ideal.

Bab kedua membahas tentang prinsip energi yang dinyatakan dengan menggunakan hukum pertama termodinamika. Zat murni terutama air dalam segala bentuknya adalah salah satu zat kerja yang paling banyak digunakan dalam aplikasi peralatan termodinamika. Sifat-sifat zat murni dibahas dalam bab keempat. Penerapan hukum pertama terhadap volume tetap terutama pada aliran tunak keadaan tunak diberikan dalam bab keempat.

Hukum pertama termodinamika menyatakan hukum kekekalan energi, bagaimana energi dapat diubah menjadi dari bentuk satu ke bentuk lainnya dan jumlahnya selalu kekal. Namun hukum ini tidak memberikan batasan arah komana perubahan dapat terjadi. Hukum kedua memberikan jawaban atas pertanyaan ini. Pada pembahasan hukum kedua dimulai dengan pengertian tentang siklus sampai pada entropi yang dibahas pada bab kelima.

Aplikasi dari gabungan hukum pertama dan kedua diberikan pada bab keenam. Perhitungan entropi dalam berbagai jenis proses juga diberikan. kedua pada volum atur, Besarnya kerja yang beradaya guna bergantung pada berapa besar entropi diproduksi dalam suatu proses. Gibbs dan Helmholtz memberikan formula untuk menghitung besarnya energi yang dapat dibebaskan untuk melakukan kerja. Kesemuanya ini akan dibahas di bab enam.

Pengguna buku diharapkan sudah memiliki pengetahuan mengenai Fisika Dasar I (seperti mekanika) dan Matematika Dasar yang berhubungan dengan penurunan model matematik sistem-sistem fisika.

Penulis menyadari buku ini masih jauh dari sempurna, saran dan kritik dari pembaca sangatlah diharapkan untuk penyempurnaan buku ini.

Tak lupa penulis ucapkan terimakasih terutama kepada DP3M Dijen DIKTI Depdiknas, bapak Tjia MO yang telah membantu mengoreksi buku ini dan juga kepada semua pihak yang telah memberikan kesempatan dan membantu dalam penulisan buku ini.

Harapan kami semoga buku ini bermanfaat.

Semarang, 10 Nopember 2005

Penulis

DAFTAR ISI

BAB I. SISTEM TERMODINAMIKA DAN SPESIFIKASI KEADAANNYA

| | |
|---|----|
| 1.1 Aplikasi termodinamika | 1 |
| 1.2. Pemerian makroskopik dan mikroskopik | 2 |
| 1.3. Dimensi dan Sistem satuan | 6 |
| 1.4. Sistem, keadaan, dan sifat termodinamik | 7 |
| 1.5. Dua Sifat terukur : volum jenis dan tekanan | 12 |
| 1.6. Keseimbangan | 19 |
| 1.7. Proses kuasistatik | 20 |
| 1.8. Suhu dan Hukum kenol termodinamika | 21 |
| 1.9. Termometer gas ideal | 26 |
| 1.10. Skala suhu Internasional | 27 |
| 1.11. Sistem termodinamik sederhana : persamaan gas ideal | 30 |

BAB II KALOR, USAHA DAN HUKUM PERTAMA TERMODINAMIKA

| | |
|--|-----|
| 2.1. Usaha dan energi mekanis | 47 |
| 2.2. Usaha untuk mengubah volum | 56 |
| 2.3. Energi Sistem | 63 |
| 2.4. Kalor dan perpindahan kalor | 66 |
| 2.5. Hukum pertama termodinamika | 83 |
| 2.6. Laju perubahan energi untuk system tertutup | 85 |
| 2.7. Kapasitas kalor | 86 |
| 2.8. Entalpi | 90 |
| 2.9. Aneka ragam gas ideal | 92 |
| Rangkuman | 104 |
| Pertanyaan-pertanyaan | |
| Soal-soal | |

BAB III. SIFAT-SIFAT TERMODINAMIS ZAT MURNI

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 3.1. Sifat-sifat bebas dari zat murni | 111 |
| 3.2. Fase | 112 |
| 3.3. Perubahan Fase | 112 |
| 3.4. Permukaan termodinamik | 115 |
| 3.5. Tabel termodinamik | 123 |
| 3.6. Faktor keternampatan | 133 |
| Rangkuman | 134 |
| Pertanyaan-pertanyaan | 135 |
| Soal-soal | 137 |

BAB IV. TERMODINAMIKA PROSES ALIRAN TUNAK

| | |
|--|-----|
| 4.1. Prinsip kekekalan massa untuk volum atur | 139 |
| 4.2. Kekekalan energi untuk volum atur | 142 |
| 4.3. Persamaan energi untuk aliran keadaan tunak | 145 |
| 4.4. Proses pencekikan | 147 |
| 4.5. Turbin | 150 |
| 4.6. Aliran melalui nosel | 152 |
| 4.7. Ketel uap | 154 |
| 4.8. Kondensor, | 156 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 4.9. Kompresor | 157 |
| 4.10. Sistem Pembangkit daya uap | 158 |

BAB V HUKUM KEDUA TERMODINAMIKA DAN ENTROPI

| | |
|---|-----|
| 5.1. Mesin kalor dan mesin pendingin | 167 |
| 5.2. Hukum kedua termodinamika | 173 |
| 5.3. Proses reversible dan ireversibel | 176 |
| 5.4. Siklus Carnot | 178 |
| 5.5. Efisiensi mesin reversibel | 183 |
| 5.6. Skala suhu termodinamik dan nol mutlak | 185 |
| 5.7. Ketidaksamaan Clausius | 186 |
| 5.8. Entropi & diagram T-s | 191 |
| 5.9. Prinsip penambahan entropi | 192 |
| Rangkuman | 194 |
| Pertanyaan-pertanyaan | 195 |
| Soal-soal | 195 |

BAB VI BEBERAPA AKIBAT HUKUM KEDUA TERMODINAMIKA

| | |
|---|-----|
| 6.1. Diagram T-s | 197 |
| 6.2. Diagram h-s & diagram Muller | 199 |
| 6.3. Perubahan Entropi dari zat murni dan keadaan jenuh | 201 |
| 6.4. Perubahan entropi selama proses reversibel | 202 |
| 6.5. Dua hubungan penting | 206 |
| 6.6. Perubahan entropi dan produksi entropi dalam system tertutup | 207 |
| 6.7. Perubahan entropi pada gas ideal | 210 |
| 6.8. Perubahan entropi untuk zat taktermampatkan | 215 |
| 6.9. Hukum Kedua termodinamika untuk volumatur | 215 |
| 6.10. Proses Isentropik gas ideal | 221 |
| 6.11. Dayaguna | 224 |
| 6.12. Energi bebas Helmholtz dan Gibbs | 235 |
| Rangkuman | 235 |
| Pertanyaan-pertanyaan | 237 |
| Soal-soal | 238 |

| | |
|--|-----|
| LAMPIRAN A. Konstanta Fisika dan berbagai ekuivalen berdimensi | 241 |
| LAMPIRAN B. Berbagai Sifat termodinamik | 243 |

BAB I

SISTEM TERMODINAMIKA DAN SPESIFIKASI KEADAANNYA.

Kajian termodinamika secara formal dimulai sejak awal abad ke 19 walaupun berbagai aspek termodinamika telah dipelajari sejak dahulu kala. Kata termodinamika berasal dari bahasa Yunani *therme* berarti kalor dan *dynamics* berarti kaku. Jadi termodinamika berarti kemampuan benda panas menghasilkan usaha/kerja. Namun sekarang ini pengertian termodinamika telah berkembang, termodinamika diartikan sebagai ilmu yang mempelajari energi beserta perubahannya dan hubungan antara sifat-sifat (*properties*) fisis materi. Energi muncul dalam berbagai bentuk seperti energi listrik, energi magnet, energi yang digunakan untuk memanaskan air, energi untuk memindahkan obyek, dan lain sebagainya. Dalam termodinamika, kalor dan usaha merupakan dua bentuk energi yang paling banyak dan paling utama dipelajari.

Arti termodinamika

Tujuan dari bab ini adalah menjelaskan beberapa konsep-konsep dasar dan definisi-definisi yang diperlukan agar dikuasai berbagai gejala dasar termodinamika.

Tujuan bab

1.1. APLIKASI TERMODINAMIKA

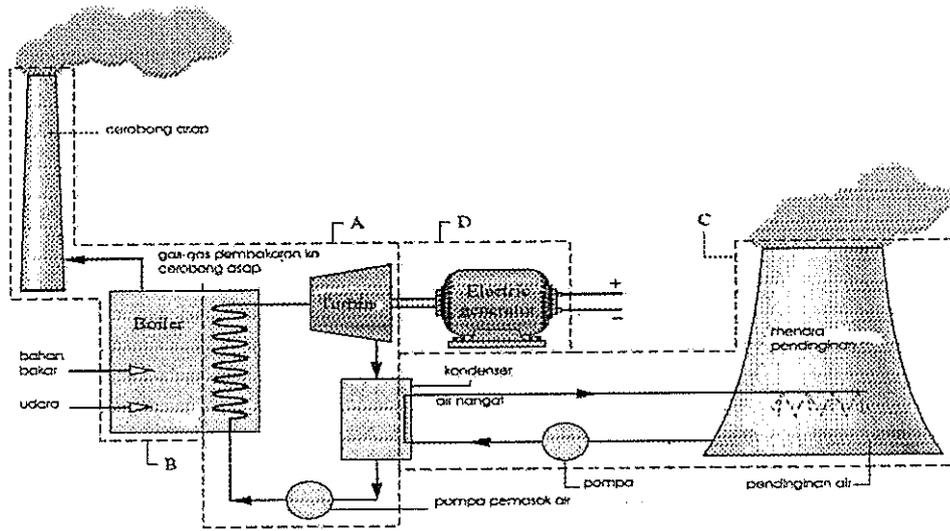
Prinsip dan metode termodinamika digunakan oleh para insinyur untuk merancang mesin-mesin pembakaran internal, pembangkit energi nuklir dan konvensional, sistem pengondisi udara, sistem penggerak propulsi roket; misil; pesawat terbang; kapal; dan kendaraan darat, sistem magnet dan listrik dan sistem termolistrik. Gambar 1-1 memperlihatkan beberapa aplikasi termodinamika.

Aplikasi termodinamika

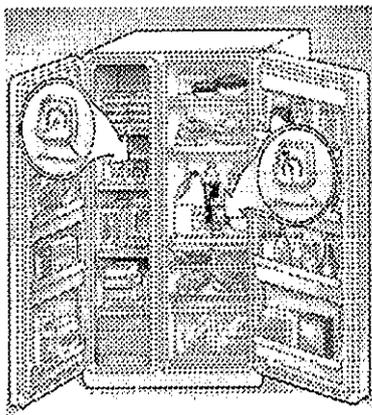
1.2. PEMERIAN MAKROSKOPIK DAN MIKROSKOPIK

Dalam meneliti gejala alam biasanya kita memusatkan perhatian pada satu bagian materi yang akan dipelajari, kita pisahkan dari lingkungannya.

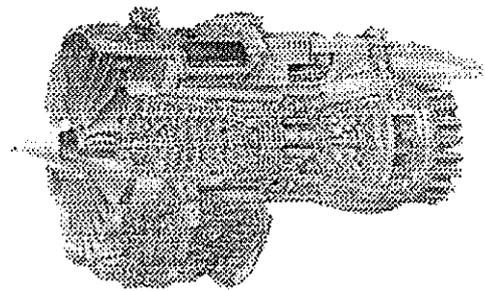
Gambar 1-1. Contoh beberapa aplikasi termodinamika



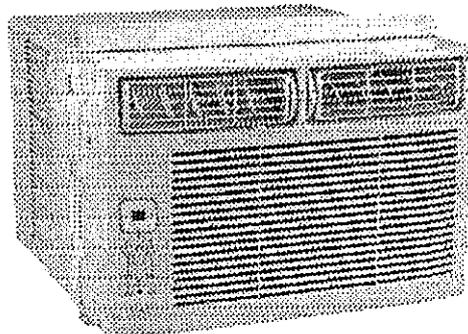
Sebuah pembangkit daya sederhana

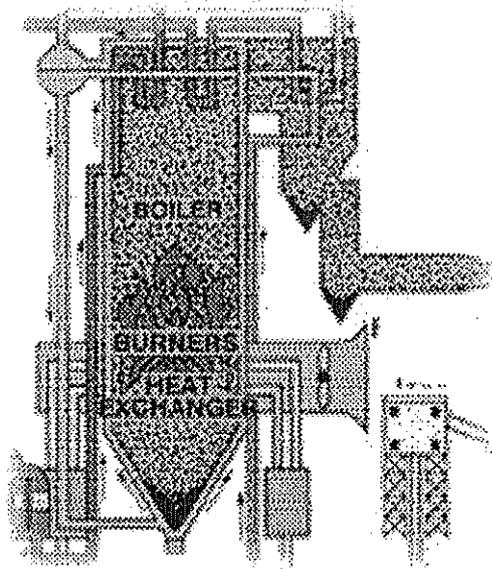


Refrigerator



Mesin turbo





Boiler

Gambar 1-1. Contoh beberapa aplikasi termodinamika

Sejumlah tertentu dari bahan yang sedang diteliti disebut *sistem*. *Permukaan batas* sistem dapat nyata atau imajiner, dapat diam atau bergerak, dapat berubah ukuran atau bentuknya. Segala sesuatu diluar sistem yang mempunyai pengaruh langsung terhadap sifat sistem disebut *lingkungan*. Terdapat dua pandangan untuk menyelidiki perilaku sistem atau interaksinya dengan lingkungan atau keduanya yaitu pandangan mikroskopik dan pandangan makroskopik.

Sistem
Permukaan batas
Lingkungan

Misalnya kita mempunyai sebuah sistem mengandung 10^{21} atom pada tekanan dan suhu atmosfer. Untuk memerikan posisi dari setiap atom pada sistem ini diperlukan tiga buah koordinat dan untuk memerikan kecepatan setiap atom kita memerlukan tiga komponen kecepatan. Jadi untuk memerikan perilaku sistem ini secara lengkap diperlukan sekurang-kurangnya 6×10^{21} persamaan. Jumlah persamaan yang sangat banyak, begitu banyaknya sehingga belum selesai ditulis semuanya, berbagai sifat telah berubah harganya. Meskipun dengan menggunakan bantuan komputer yang berkecepatan sangat tinggi, menyelesaikan sekian banyak persamaan hampir mustahil dapat dilakukan Walaupun demikian terdapat dua pendekatan yang dapat digunakan untuk mengurangi jumlah persamaan dan peubahnya agar dapat diselesaikan secara relatif mudah.

Pendekatan pertama adalah pendekatan statistik yang didasarkan pada perilaku statistik dari sejumlah besar molekul. Pendekatan pertama ini digunakan dalam disiplin ilmu yang dikenal sebagai teori kinetik dan *mekanika statistik*.

Mekanika statistik

Dalam mekanika statistik, teori kuantum digunakan untuk menjelaskan tentang atom-atom. Disini kita meninjau besaran-besaran yang menjelaskan tentang atom-atom dan molekul-molekul yang membentuk sistem tersebut seperti laju, massa, momentum, sifatnya selama tumbukan dan lain sebagainya. Sifat-sifat mikroskopik ini tidak langsung didasarkan pada penerimaan indera kita. Pemerian yang mengacu pada sifat-sifat mikroskopik disebut dengan *pemerian mikroskopik*

Pemerian mikroskopik

Pendekatan kedua menggunakan pandangan makroskopik.. Pada pendekatan makroskopik, perilaku sistem dipelajari tanpa memerlukan hipotesis mengenai struktur materi dalam skala atomik dan interaksi antara atom-atom penyusun materi tersebut. Pendekatan seperti ini seringkali disebut sebagai *termodinamika klasik*.

Termodinamika klasik

Misalkan gas dalam suatu tabung kita pilih sebagai sistem dan piston sebagai lingkungannya. Sifat gas dipengaruhi oleh aksi piston dan kita harus memilih besaran-besaran yang sesuai yang dapat diamati untuk menjelaskan sifat gas tersebut. Besaran-besaran ini diacu sebagai ciri umum atau sifat kasar sistem. Pemerian sistem berdasarkan ciri umum disebut pemerian *makroskopik*. Banyak besaran makroskopik yang terukur (seperti tekanan, volum, dan suhu) langsung didasarkan pada penerimaan indera kita.

Pemerian makroskopik

Besaran makroskopik yang dapat diukur secara langsung atau dihitung berdasarkan pengukuran lain sebenarnya merupakan rata-rata statistik perilaku sejumlah besar partikel atau rata-rata terhadap selang waktu tertentu dari sejumlah ciri khas mikroskopik. Sebagai contoh, tekanan gas dapat diindra dan diukur secara langsung dengan menggunakan manometer. Secara pandangan mikroskopik, tekanan dihubungkan dengan kecepatan rata-rata pergeseran terus menerus dari pergerakan molekul gas pada permukaan manometer yang memberikan momentum pada zalir manometer persatuan luas.

Makroskopik terhadap mikroskopik

1.3. DIMENSI DAN SISTEM SATUAN

Termodinamika adalah ilmu pengetahuan mengenai kalor dan mengenai sifat-sifat zat yang berhubungan dengan kalor dan usaha serta pengukurannya. Pengukuran dinyatakan dalam bentuk dimensi. *Dimensi* adalah nama yang diberikan kepada setiap besaran yang terukur dan *satuan* adalah nama yang digunakan untuk mengukur dimensi.

*Dimensi
Satuan*

Dimensi L adalah panjang, M adalah massa, t adalah waktu, T adalah suhu, q adalah muatan listrik, dan F adalah kakas merupakan dimensi dasar untuk mengembangkan persamaan termodinamika.

Dalam buku ini lambang q juga menyatakan kalor persatuan massa. SI menggunakan panjang, waktu, dan massa sebagai besaran dasar atau sistem MLT (massa-panjang-waktu). SI (*Systeme International*) atau sistem metrik digunakan untuk mencapai keseragaman sistem dunia dan bukan karena lebih unggul atau lebih sederhana. SI menggunakan dasar 10 sama dengan hitungan jari tangan. Dalam SI, massa dinyatakan dalam kilogram (kg), panjang dinyatakan dalam meter (m), waktu dinyatakan dalam detik (dt), dan kakas dinyatakan dalam newton (N).

Satuan SI

Sistem Inggris tempo dulu menggunakan besaran panjang, waktu, massa, dan kakas sebagai besaran dasar atau sistem $FMLT$ (kakas-massa-panjang-waktu). Dalam satuan sistem Inggris yang disebut juga satuan sistem keteknikan, massa dinyatakan dalam *pound mass* (lbm), panjang dinyatakan dalam *foot* (ft), waktu dinyatakan dalam detik (dt), dan kakas dinyatakan dalam *pon kakas* (lbf atau disingkat dengan lb saja).

Satuan Inggris / *lbf*

$$1 \text{ ft} = 12 \text{ in} = 30,48 \text{ cm}$$

$$1 \text{ lbm} = 14,59 \text{ kg}$$

$$1 \text{ lb} = 4,45 \text{ N}$$

Satuan dalam mekanika didasarkan pada hukum kedua Newton tentang gerak dan hukum Newton tentang gravitasi sejagad. Kedua hukum dapat kita tuliskan sebagai:

Hukum Newton

$$F = k_N ma$$

$$F = k_G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Persamaan Newton tentang gerak ini barangkali berbeda dari biasanya karena lebih dikenal k_N berharga satu. Harga k_N dalam sistem Inggris adalah

$$k_N = \frac{1}{32,1739} \text{ lb} - \text{ft}^2 / \text{ft} - \text{lbm}$$

Atau biasanya k_N dituliskan dengan

$$g_c = \frac{1}{k_N} = 32,1739 \text{ ft} - \text{lbm} / \text{lb} - \text{ft}^2$$

Dalam sistem ini g_c mempunyai harga yang sama dengan percepatan gravitas pada permukaan air laut tetapi g_c bukanlah percepatan gravitasi tetapi lebih merupakan tetapan berdimensi.. Dalam sistem satuan yang lain, harga g_c adalah

$$g_c = 1 \text{ slug ft/lb dt}^2$$

$$g_c = 1 \text{ kg m/N dt}^2$$

$$g_c = 1 \text{ gr cm/dyn dt}^2$$

$$g_c = 9,8066 \text{ kg m/kg kakas dt}^2$$

Karena satuan yang paling akhir tidak kita gunakan dalam buku ini, besaran g_c tidak dimunculkan secara eksplisit dalam persamaan-persamaan selanjutnya . Seiring dengan persetujuan internasional tentang penggunaan SI ditetapkan pula suatu standar untuk setiap besaran dasar yaitu massa, panjang, dan waktu. Terdapat Satuan khusus dalam termodinamika yaitu satuan termal, *British Thermal Unit* (Btu) dan kalori (kal) .

1 Btu adalah energi yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu 1 lbm air sebesar 1⁰F

1 kal adalah energi yang dibutuhkan untuk menaikkan 1 kg air sebesar 1⁰C

Faktor konversi yang banyak digunakan adalah:

$$1 \text{ W} = 3,413 \text{ Btu/jam}$$

$$1 \text{ hp} = 254,5 \text{ Btu/jam}$$

$$1 \text{ Btu} = 252, 16 \text{ kalori} = 1055,04 \text{ J}$$

$$1 \text{ hp} = 745,7 \text{ W} = 550 \text{ ft-lb/dt}$$

Tetapan tak berdimensi

Btu Kalori

1.4. SISTEM, KEADAAN DAN SIFAT TERMODINAMIK

Pada subbab ini akan diperkenalkan konsep dan terminologi yang dipergunakan untuk mempelajari sistem dan perilakunya

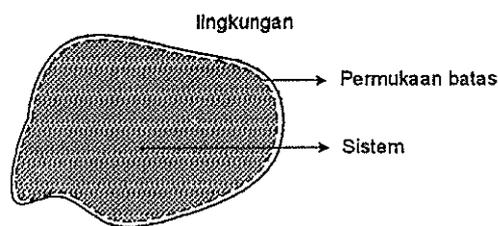
1.4.1. SISTEM TERMODINAMIK

Besaran makroskopik yang dikaitkan dengan bagian dalam dari sistem disebut *koordinat termodinamik*. Sistem yang diperikan oleh koordinat termodinamik disebut *sistem termodinamik*

Koordinat termodinamik

Sistem termodinamik

Untuk menganalisis termodinamika, terlebih dahulu dimulai dengan pemilihan sistem, permukaan batas sistem, dan lingkungan dari sistem. Gambar 1-2 memerikan sistem, permukaan batas dan lingkungannya. Apabila sistem telah dipilih, langkah berikutnya adalah memerikannya dalam besaran yang berkaitan dengan sifat sistem atau interaksinya dengan lingkungan atau keduanya. Berdasarkan interaksi dengan lingkungannya, sistem dibedakan menjadi tiga macam, yaitu sistem terbuka, tertutup dan



Batas sistem terbuka

Gambar 1-2. Sistem dan lingkungan

terisolasi. Gambar 1-3a memperlihatkan aliran massa zat alir (*fluid*) melalui sebuah pipa/saluran. Dalam kasus seperti kita dapat menetapkan suatu ruang (daerah) tertentu didalam pipa dimana aliran massa ini mengalir sebagai sistem. Daerah yang ditetapkan ini disebut *volum atur*. Permukaan batas volum atur disebut *permukaan atur* yang pada gambar ditunjukkan sebagai garis putus-putus. Permukaan dalam pipa dapat diambil sebagai bagian dari permukaan batas sistem yang nyata. Namun kenyataannya ada permukaan batas yang imajiner karena tidak ada permukaan nyata yang menandai posisi dari ujung-ujung yang terbuka, sehingga massa dapat mengalir melalui batas sistem volum atur. Sistem seperti ini disebut *sistem terbuka* karena terdapat pertukaran massa dan energi antara sistem dengan lingkungan melalui permukaan batas.

Volum atur
Permukaan atur

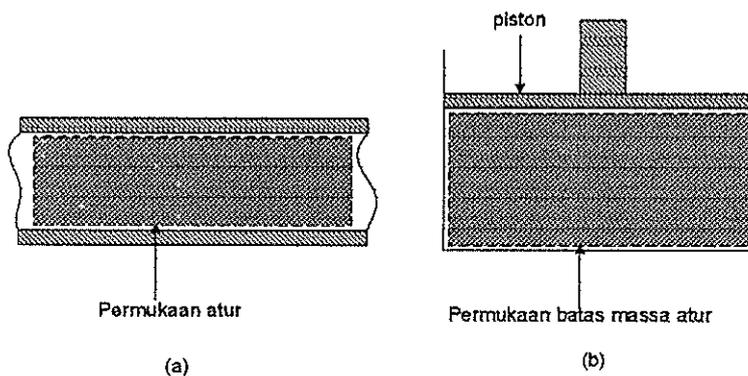
Sistem terbuka

Gambar 1-3b memperlihatkan silinder yang dilengkapi dengan piston berisi zat alir. Zat alir dalam silinder dipilih sebagai sistem.

Permukaan dalam silinder dan piston diambil sebagai permukaan batas sistem yang ditandai dengan garis putus-putus. Dalam contoh ini bentuk dan volum sistem dapat diubah dengan menaikkan atau menurunkan piston. Perubahan bentuk dan volume permukaan batas selalu diperbolehkan sepanjang perubahan ini dikenali dalam perhitungan selanjutnya.

Pada sistem ini tidak terdapat pertukaran massa dengan lingkungan. Sistem seperti ini disebut *sistem tertutup*. Meskipun sejumlah materi ditetapkan dalam sistem tertutup, energi masih dapat mengalir melewati permukaan batas sistem.

Sistem tertutup



Gambar 1-3. Permukaan batas dari 2 sistem termodinamis yang berbeda

Oleh karena itu sistem dikatakan tertutup apabila tidak terdapat pertukaran massa tetapi dapat terjadi pertukaran energi melalui permukaan batas dengan lingkungan. Sistem tertutup juga disebut *massa atur*.

Massa atur

Jenis khusus dari sistem tertutup adalah *sistem terisolasi* yaitu sistem yang tidak dapat melakukan pertukaran massa dan energi melewati permukaan batas. Permukaan batas semacam ini disebut *dinding adiabatik*. Lapisan kayu, yang tebal, beton, asbes, kain beludru, karet busa dan lain sebagainya merupakan hampiran percobaan yang baik percobaan untuk dinding adiabatik.

Sistem terisolasi
Dinding adiabatik

1.4.2. FASE DAN ZAT MURNI

Sistem dapat terdiri dari beberapa fase. *Fase* adalah besaran zat yang mempunyai struktur fisika dan komposisi kimia yang homogen. Struktur fisika dikatakan homogen apabila zat terdiri dari gas saja, cair

Fase

saja , atau padat saja . Sistem dapat terdiri dari dua fase seperti cair dan gas. Komposisi kimia dikatakan homogen apabila suatu zat hanya terdiri dari satu bahan kimia yang dapat berbentuk padat, cair, atau gas, atau campuran dari dua atau tiga bentuk itu. Campuran gas seperti udara atmosfer dianggap senyawa tunggal.

Zat murni adalah zat yang mempunyai komposisi kimia yang tetap dan homogen . Zat murni kebanyakan mengandung lebih dari satu fase, tetapi komposisi kimianya sama untuk semua fase. Misalnya, cairan air, campuran dari cairan air dan uap air, atau campuran dari padatan es dan cairan air adalah zat murni karena setiap fase mempunyai komposisi kimia sama. Namun, campuran udara cair dan udara gas bukan merupakan zat murni karena komposisi fase udara cair berbeda dengan fase udara uap. Seringkali zat murni disebut *zat yang dapat termampatkan sederhana*.

Zat murni

zat yang dapat termampatkan sederhana.

Kadang-kadang campuran gas seperti udara dianggap sebagai zat murni sepanjang tidak ada perubahan fase karena udara mempunyai beberapa karakteristik zat murni.

1.4.3. SIFAT TERMODINAMIK

Sifat sistem adalah ciri umum dari sistem yang mempunyai nilai. Nilai sifat ini seringkali dapat diukur secara langsung seperti tekanan p , volum V , dan suhu T . Dalam termodinamika terdapat besaran yang bukan merupakan sifat sistem, seperti *kerja* dan *kalor*. Keduanya merupakan sesuatu yang diterapkan terhadap suatu sistem untuk menghasilkan berbagai perubahan sifat. Misalkan mula-mula sistem mempunyai suhu T_1 kemudian suhunya dinaikkan menjadi T_2 . Pemanasan dapat dilakukan dengan berbagai cara yang tak berhingga banyaknya. Misalnya pemanasan dilakukan pada tekanan konstan, banyaknya kalor yang diperlukan adalah $\int mc_p dT$ yang besarnya sangat bergantung pada lintasan integral $c_p(T)$. Karena kalor bergantung pada lintasan, kalor bukanlah sifat sistem.

Sifat sistem

Kalor bukan sifat sistem

Sifat sistem digolongkan menjadi dua yaitu ekstensif dan intensif. Katakan terdapat suatu sistem yang dapat dibagi menjadi beberapa subsistem atau bagian. Jika harga sifat seluruh sistem sama dengan jumlah harga sifat subsistem atau bagian, sifat disebut *ekstensif*, contoh : volum

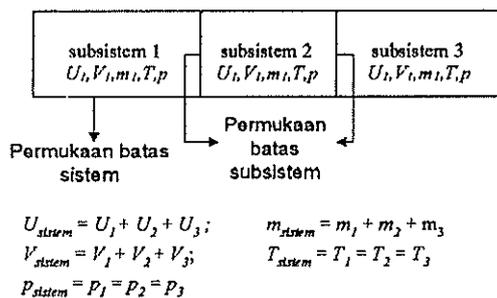
Sifat ekstensif
Sifat intensif

total dan energi total. Dan apabila harga sifat seluruh sistem tidak sama dengan jumlah harga sifat subsistem atau bagian, sifat ini disebut *intensif*. Besaran seperti suhu, tekanan dan rapat massa merupakan sifat intensif. Gambar 1-4 menunjukkan sebuah sistem yang dibagi menjadi tiga buah subsistem yang masing-masing dipisahkan oleh permukaan batas subsistem. Energi dalam U , volum V dan massa m merupakan besaran ekstensif, sedangkan suhu T dan tekanan p merupakan besaran intensif.

Sebarang besaran ekstensif apabila dibagi dengan massa atau jumlah mol menjadi besaran intensif. Pada umumnya persamaan termodinamika dinyatakan dalam besaran intensif karena persamaan menjadi tidak bergantung pada massa sistem. Perbandingan antara besaran ekstensif suatu sistem terhadap massa sistem disebut *harga jenis purata* dari sistem. Besaran ekstensif dituliskan dengan huruf besar dan harga jenis dituliskan dengan huruf kecil.

Harga jenis purata

Spesifikasi keadaan (*state*) dari sistem termodinamik bergantung pada sifat-sifat alami dari sistem seperti tekanan, suhu, volum, dan massa.



Gambar 1-4 Besaran ekstensif dan intensif

1.4.4. KEADAAN

Keadaan sistem dispesifikasikan oleh sederetan harga sifatnya. Mengingat pada umumnya terdapat hubungan antara sifat-sifat, keadaan dapat dispesifikasikan berdasarkan nilai pasangan sifatnya. Beberapa sifat yang lain dapat ditentukan berdasarkan nilai dari pasangan sifatnya yang telah digunakan untuk menspesifikasikan keadaan ini.

Keadaan

1.5. DUA SIFAT TERUKUR : VOLUM JENIS DAN TEKANAN.

Volum jenis, tekanan, dan suhu, merupakan tiga sifat yang penting dalam termodinamika. Suhu secara terpisah akan dibahas pada subbab berikutnya

1.5.1. VOLUM JENIS

Apabila volum sistem dinyatakan dengan V , harga jenis volum purata \bar{v} dituliskan sebagai:

Harga jenis volum purata

$$\bar{v} = \frac{V}{m} \quad (1-1)$$

Dari definisi densitas purata $\bar{\rho}$

Densitas purata

$$\bar{\rho} = \frac{m}{V} = \frac{1}{\bar{v}} \quad (1-2)$$

Jika bobot sistem dinyatakan dengan $W = mg$ (g adalah percepatan gravitasi), berat jenis w dituliskan:

Berat jenis

$$w = \frac{W}{V} = \frac{g}{\rho} \quad (1-3)$$

Untuk tiap titik dari sistem, didefinisikan volum jenis v dan densitas ρ

$$v = \frac{dV}{dm} \quad (1-4)$$

Volum jenis

$$\rho = \frac{dm}{dV} = \frac{1}{v} \quad (1-5)$$

Dalam keteknikan satuan volum yang digunakan adalah ft^3 , satuan massa adalah *pounds mass (lbm)*, volum jenis ft^3/lbm , rapat massa lbm/ft^3 . Dalam satuan internasional, satuan volum yang digunakan adalah m^3 , massa *kilogram (kg)*, volum jenis m^3/kg sedang rapat massa kg/m^3 .

Satuan

Suatu sistem dikatakan homogen apabila harga jenis besarnya sama disetiap titik. Harga jenis molal purata didefinisikan sebagai perbandingan antara harga besaran ekstensif dengan jumlah mol sistem. Jumlah mol n , diperoleh dengan membagi massa dengan berat molekul M

Sistem homogen

Jumlah mol

$$n = \frac{m}{M} \quad (1-6)$$

Maka volum jenis molal purata

$$\bar{v}^* = \frac{V}{n} = \frac{V}{m/M} = M\bar{v} = \frac{1}{\rho} \quad (1-7) \quad \text{Volum jenis molal purata}$$

Dalam keteknikan, satuan volum yang digunakan adalah ft^3 , jumlah molekul $lbm-mol$, berat molekul dalam $lbm/lbm-mol$, volum jenis molal dalam $ft^3/lbm-mol$. Dalam satuan metris, satuan volum digunakan adalah m^3 , jumlah molekul $kg-mol$, berat molekul $kg/kgm-mol.$, volum jenis molal $m^3/kg-mol$ sedang rapat massa kg/m^3 . Satuan

Keadaan sistem ditentukan oleh harga dari besaran ekstensif dan besaran intensifnya. Namun untuk zat murni, keadaan sistem hanya ditentukan oleh besaran intensifnya.

Contoh 1-1.

Sebuah tabung berisi 1,5 kg gas dengan volum 20 cm³, tentukan densitas dan berat jenis gas jika diketahui percepatan gravitasi bumi adalah 9,8 m/dt²

Diketahui:

| |
|--|
| $m = 1,5 \text{ kg}$ $V = 20 \text{ cm}^3 = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ |
|--|

Gambar 1-5

Ditanyakan (a). ρ (b) w

Penyelesaian:

(a). Densitas dihitung dengan menggunakan pers. (1-2)

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1,5}{20 \times 10^{-6}} = 75 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

(b). Berat jenis dihitung dengan menggunakan pers. (1-3)

$$w = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V}$$

$$= \frac{1,5 \times 9,8}{20 \times 10^{-6}} = 735 \times 10^3 \text{ N/m}^3$$

Contoh 1-2.

Volum jenis 1 $lbm-mol$ uap pada tekanan atmosfer adalah 26,80 ft^3/lbm : Tentukan (a). densitas dan (b). Jika diketahui berat molekul uap adalah 32, hitung massa, volum, dan volum jenis molal uap.

Diketahui:

$$v = 26,80 \text{ ft}^3 / \text{lbm}$$

$$n = 1 \text{ lbm-mol}$$

$$m = 32 \text{ lbm/lbm-mol}$$

Ditanyakan:

(a) ρ (b) massa, volum, dan volum jenis molal uap

Penyelesaian:

$$(a) \quad \rho = \frac{1}{v} = \frac{1}{26,8 \text{ ft}^3 / \text{lbm}} = 0,03731 \text{ lbm} / \text{ft}^3$$

$$(b) \quad m = nM = 1 \text{ lbm-mole} \cdot 32 \text{ lbm/lbm-mole} = 32 \text{ lbm}$$

$$V = mv = 32 \text{ lbm} \cdot 26,8 \text{ ft}^3 / \text{lbm} = 857,6 \text{ ft}^3$$

$$v^* = V/n = 857,6 \text{ ft}^3 / \text{lbm-mole} = 857,6 \text{ ft}^3 / \text{lbm-mole}$$

Contoh 1-3.

Jika densitas Hg adalah $13,600 \text{ kg/m}^3$. Hitung (a) densitas dalam lbm/ft^3

(b) berat jenis dalam N/m^2

$$\text{Diketahui : } \rho_{\text{Hg}} = 13,600 \text{ kg/m}^3$$

Ditanyakan: (a) ρ_{Hg} dalam lbm/ft^3

(b) w dalam N/m^2

Penyelesaian:

$$(a) \quad \rho_{\text{Hg}} = (13,600 \text{ kg} / \text{m}^3) (0,4535924 \text{ kg} / \text{lbm})^{-1} (0,3048 \text{ m} / \text{ft})^3 = 849 \text{ lb/ft}^3$$

$$(b) \quad w = \rho g = 13,600 (9,81) = 133,416 \text{ N/m}^2$$

1.5.2. TEKANAN

Pada zat tidak ada batasan kearah mana kakas permukaan beraksi terhadapnya. Berbeda dengan zat alir, kita tidak dapat menerapkan kakas permukaan seperti itu terhadapnya. Kakas harus selalu diarahkan tegak lurus pada permukaan zat alir yang diam karena zat alir diam tidak mampu menahan kakas tangensial. Kakas tangensial akan menyebabkan lapisan-lapisan zat alir menggelincir diatas lapisan lainnya. Namun ketidakmampuan zat alir menahan kakas tangensial memberikan kemampuan zat alir tersebut untuk mengalir. **Tekanan** (p) didefinisikan

Definisi tekanan

sebagai kakas normal (F) persatuan luas (A), yang dapat dituliskan secara matematis dengan:

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-8)$$

Secara mikroskopik, dalam uap atau gas, tekanan muncul dari pergeseran terus menerus dari pergerakan molekul pada bidang batas wadahnya. Jadi tekanan yang dikenakan akan sebanding dengan jumlah, massa, dan aktivitas molekul-molekulnya. Dalam satuan SI, tekanan biasanya dinyatakan dengan *pascal* (Pa),

Satuan tekanan

$$1 \text{ pascal} = 1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2$$

Satuan lain yang juga digunakan,

$$1 \text{ mikrobar} = 1 \text{ dyne/cm}^2 = 10^{-6} \text{ bar} = 0,1 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ millimeter} = 1 \text{ mmHg} = 1333,22 \text{ mickrobar}$$

$$1 \text{ torr} = 1 \text{ mmHg}$$

Dalam satuan keteknikan, tekanan dinyatakan dalam *psi* (lb/in^2)

Tekanan mutlak dan tekanan tolok.

Kebanyakan alat pengukur tekanan menggunakan atmosfer standar sebagai tekanan acuan. Alat pengukur tekanan digunakan untuk mengukur *tekanan tolok* yaitu perbedaan antara tekanan sesungguhnya dengan tekanan atmosfer. Tekanan sesungguhnya di suatu titik didalam zat alir yang diukur relatif terhadap tekanan nol mutlak disebut *tekanan mutlak*

Tekanan tolok
Tekanan mutlak

Tekanan atmosfer berbeda-beda disetiap tempat tergantung ketinggian dan suhunya. Semakin rendah letak suatu titik, tekanan atmosfer akan semakin berkurang. *Atmosfer standar* pada permukaan air laut didefinisikan sebagai tekanan yang dihasilkan oleh kolom air raksa tinggi 760 mm pada 273,15 K (0°C) dibawah gravitasi standar, maka satu atmosfer ekuivalen dengan;

Tekanan atmosfer
Atmosfer standar

$$1 \text{ atm} = 1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 (=1,013 \times 10^5 \text{ Pa})$$

$$= 2116 \text{ lb/ft}$$

$$= 14,696 \text{ lb/in}^2 (=14,696 \text{ psi})$$

$$= 1,01325 \text{ bar}$$

Tekanan tolok diberikan baik diatas maupun dibawah tekanan atmosfer. Apabila tekanan tolok sistem (P_g) di atas tekanan atmosfer (P_a), tekanan mutlak (P_{abs}) :

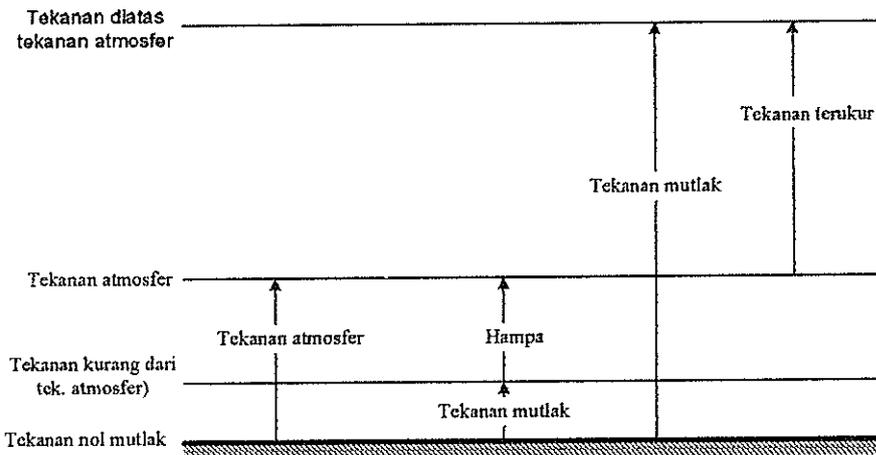
$$P_{abs} = P_g + P_{atm} \quad (1-9)$$

Apabila tekanan tolok di bawah tekanan atmosfer:

$$P_{abs} = P_{atm} - P_g \quad (1-10)$$

Tekanan tolok negatif seringkali disebut **tekanan hampa** terjadi apabila tekanan atmosfer lebih besar dari tekanan mutlak. Gambar 1-5 memeberikan gambaran secara grafis hubungan antara berbagai jenis tekanan yang digunakan dalam pengukuran. Sedangkan faktor konversi antara satuan-satuan tekanan yang umum digunakan diberikan pada tabel 1-1.

Tekanan hampa



Gambar 1-5. Ilustrasi istilah yang digunakan dalam pengukuran tekanan

Manometer dan Barometer.

Pengukur tekanan paling sederhana adalah manometer pipa terbuka, dilukiskan gambar 1-6(a). Pipa berbentuk U berisi cairan dihubungkan dengan sistem (tangki) yang tekanannya hendak diukur, sedang ujung lain dihubungkan dengan tekanan atmosfer. Selisih tekanan ($p_1 - p_2 = p - p_a$) harganya sebanding dengan perbedaan tinggi kolom cairan ($y_2 - y_1$), atau dituliskan :

Manometer

$$p - p_a = \rho g (y_2 - y_1) \quad (1-11)$$

p adalah tekanan mutlak. Selisih antara tekanan mutlak dengan tekanan atmosfer disebut tekanan tolok ($p - p_a$). Harga ρ tidak bergantung pada tekanan. Persamaan diatas dapat juga dituliskan dalam bentuk:

$$\Delta p = \rho g \Delta y \quad (1-12)$$

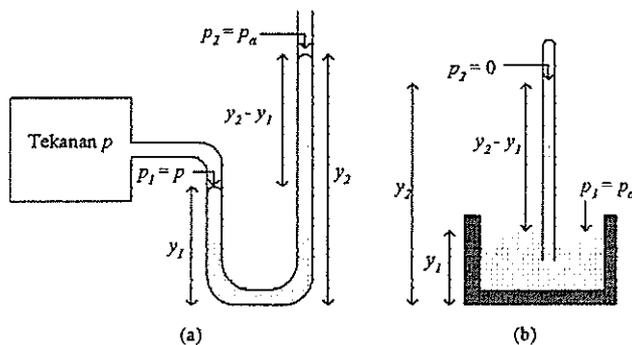
Cairan rapat seperti raksa dapat digunakan jika alat digunakan untuk mengukur tekanan tinggi sedang untuk tekanan rendah dapat digunakan air.

Barometer raksa terdiri atas pipa gelas panjang setelah diisi dengan raksa dibalik dan dimasukkan ke dalam bejana yang berisi raksa pula., gambar 1-6(b). Diatas kolom cairan hanya terdapat uap raksa yang pada suhu kamar tekanannya sangat kecil sehingga dapat diabaikan, maka:

Barometer

$$p_a = \rho g (y_2 - y_1) = \rho g \Delta y \quad (1-13)$$

Tekanan yang dilakukan oleh kolom raksa yang tingginya 1 millimeter biasa disebut **Torr**, untuk menghormati seorang sarjana Fisika yang bernama Torricelli yang pertama kali menyelidiki kolom barometer raksa.



Gambar 1-6. (a) Manometer pipa terbuka (b) Barometer

Contoh 1-3 .

Sebuah manometer, ditunjukkan gambar 1-6 digunakan untuk mengukur tekanan dari suatu tangki yang berisi minyak dengan rapat massa $0,6 \text{ gr cm}^{-3}$, tinggi cairan adalah 34 cm. Jika tekanan barometer adalah 98 kPa. Tentukan tekanan mutlak dalam tangki.

Diketahui:

$$\text{Rapat massa minyak} = \rho = 0,6 \text{ gr cm}^{-3} = 600 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\Delta y = 34 \text{ cm} = 34 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$p_a = 98 \text{ kPa}$$

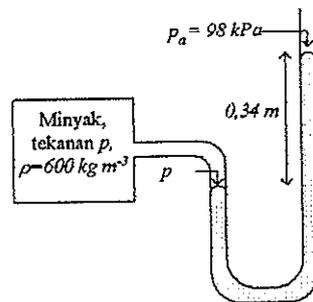
Ditanyakan: Tekanan mutlak dalam tanki p

Penyelesaian:

Dari persamaan (1-11):

$$p - p_a = \rho g \Delta y$$

$$p = 98 \cdot 10^3 + 600 \times 34 \cdot 10^{-2} = 19992 \cdot 10^3 \text{ Pa} = 19992 \text{ kPa}$$



Gambar 1-7. Contoh soal 1-3

Tekanan mutlak dalam tanki adalah 19,992 MPa

Contoh 1-4.

Jika barometer membaca tekanan 740 mmHg. Tentukan tekanan mutlak bila tekanan hampa terbaca -270 mmHg (a) dalam bar (b) dalam psi.

Diketahui:

$$P_a = 740 \text{ mmHg}$$

$$P_g = -270 \text{ mmHg}$$

Ditanyakan :

(a) p dalam bar

(b) p dalam psi

Penyelesaian

Dengan mengetahui tekanan barometer dan tekanan tolak, tekanan mutlak dapat dihitung

$$(a) P_{abs} = P_a + P_g = 740 - 270 = 470 \text{ mmHg} \times \frac{1,013 \text{ bar}}{760 \text{ mmHg}}$$

$$= 0,626 \text{ bar}$$

$$(b) P_{abs} = 0,626 \text{ bar} \times \frac{14,696 \text{ psi}}{1,01325 \text{ bar}} = 9,079 \text{ psi}$$

$$\text{Tekanan mutlak} = 0,626 \text{ bar} = 9,079 \text{ psi}$$

Tabel 1.1 Faktor konversi antara satuan-satuan tekanan yang umum. Setiap bilangan memberikan nilai 1 satuan tekanan yang bernama di sebelah kiri yang dinyatakan dalam satuan yang bernama di sebelah atas; misalnya, 1 lb/in.² sama dengan 51,7 mm Hg.

| | Pascal, Pa (N/m ²) | lb/in ² (psi) | atm | bar | mmHg/Torr | cmH ₂ O |
|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Pascal, Pa Pa(N/m ²) | 1 | 1,45 × 10 ⁻⁴ | 9,87 × 10 ⁻⁶ | 10 ⁻⁵ | 7,50 × 10 ⁻³ | 1,02 × 10 ⁻² |
| lb/in ² (psi) | 6,89 × 10 ³ | 1 | 6,80 × 10 ⁻² | 6,89 × 10 ⁻² | 51,7 | 70,3 |
| atm | 1,01 × 10 ⁵ | 14,7 | 1 | 1,01 | 760 | 1,03 × 10 ³ |
| bar | 10 ⁵ | 14,5 | 0,987 | 1 | 750 | 1,02 × 10 ³ |
| mmHg/Torr | 133 | 1,93 × 10 ⁻² | 1,32 × 10 ⁻³ | 1,33 × 10 ⁻³ | 1 | 1,36 |
| cmH ₂ O | 98,1 | 1,42 × 10 ⁻² | 9,68 × 10 ⁻⁴ | 9,81 × 10 ⁻⁴ | 0,736 | 1 |

1-6. KESETIMBANGAN.

Keadaan suatu sistem ditentukan oleh molekul-molekul di dalam batas sistem. Molekul-molekul akan mengalami perubahan keadaan secara berkesinambungan selama terjadi interaksi satu sama lain. Apabila sistem kemudian diisolasi dan molekul-molekulnya dibiarkan saling berinteraksi, sistem akan mengalami perubahan keadaan yang terukur secara makroskopik. Tetapi setelah beberapa saat, perubahan yang tadinya dapat diamati, berhenti, namun kegiatan mikroskopik berlangsung terus. Pada saat ini keadaan makroskopik telah mencapai keadaan kesetimbangan dan berbagai besaran makroskopik yang terukur yang telah mempunyai nilai tertentu menjadi konstan.

Sifat didefinisikan hanya jika sistem berada dalam keadaan kesetimbangan. Suatu campuran gas yang dinyatakan dalam komposisi, massa, tekanan, dan volum, dari percobaan ditemukan bahwa untuk komposisi dan massa konstan, harga volum dan tekanan sistem dapat berbeda-beda. Jika tekanan dibuat tetap, volumnya dapat diubah-ubah demikian pula sebaliknya. Sehingga dapat dikatakan tekanan dan volum merupakan koordinat bebas. Jadi pemerian untuk sistem dengan massa tetap dan komposisi tetap masing-masing hanya memerlukan sepasang koordinat bebas. Jadi sistem akan mencapai keadaan kesetimbangan apabila sistem memiliki sepasang koordinat bebas yang konstan selama

*Keadaan
setimbang*

kondisi eksternal tidak berubah. Kesetimbangan **termal** dapat dicapai apabila suhu pada setiap titik pada seluruh sistem adalah seragam dan sama dengan suhu lingkungan. Apabila kakas-kakas yang bekerja pada sistem sama besar dan berlawanan arah, kita katakan sistem berada dalam keadaan *kesetimbangan mekanis*. *Kesetimbangan fase* terjadi apabila tidak ada perpindahan satu atau lebih unsur kimia dari satu fase ke fase lainnya dalam sistem multifase, seperti difusi atau pelarutan. Apabila sistem dalam keadaan kesetimbangan mekanis tidak cenderung mengalami perubahan spontan dari struktur dalam, misalnya reaksi kimia, sistem dikatakan berada dalam keadaan *kesetimbangan kimia*. Jika sistem berada dalam kesetimbangan termal, mekanis, fase, dan kimia, sistem dikatakan dalam *kesetimbangan termodinamis*.

Kesetimbangan termal
Kesetimbangan mekanis
Kesetimbangan fase

Kesetimbangan kimia
Kesetimbangan termodinamis
Keadaan taksetimbang

Apabila satu dari persyaratan kesetimbangan tidak tercapai, dikatakan sistem berada dalam keadaan **taksetimbang**.

Keadaan taksetimbang

1-7. PROSES KUASISTATIK.

Suatu sistem disebut melakukan/mengalami **proses** apabila sistem berubah dari satu keadaan ke keadaan lain. Karena keadaan sistem ditentukan oleh sifatnya, maka pada suatu proses setidaknya-terkadang terjadi satu sifat sistem yang berubah harganya.

Proses

Proses **kuasistatik** adalah proses yang dilakukan dengan cara ideal. Pada setiap saat, selama proses kuasistatik berlangsung keadaan sistem sangat mendekati harga kesetimbangan termodinamisnya. Agar proses kuasistatik dapat dicapai laju proses harus terkendali. Walaupun proses kuasistatik adalah sebuah pengidealan namun banyak proses yang sesungguhnya mendekati keadaan ideal. Pengidealan seringkali perlu dan sesuai untuk menganalisis proses termodinamik yang dimodelkan sebagai proses kuasistatik. Keuntungan lain dari pemodelan proses sebagai kuasistatik adalah kemungkinan untuk merajah lintasan proses kuasistatik pada diagram sifat. Diagram sifat adalah diagram dua dimensi yang koordinatnya merepresentasikan sifat-sifat termodinamik.

Proses kuasistatik

Banyak proses dicirikan oleh beberapa besaran yang konstan selama proses, proses seperti ini merupakan proses kuasistatik. Suatu proses yang terjadi pada volum konstan disebut proses *isochoris* atau

isometris. Sedang proses yang terjadi pada tekanan konstan disebut proses *isobar* dan proses yang terjadi pada suhu konstan disebut proses *isothermal*.

Isometris
Isobar
isothermal

Proses dapat juga dicirikan oleh adanya pertukaran energi antara sistem dan lingkungannya. Walaupun belum didefinisikan istilah kalor namun dapat dikatakan jika dalam proses tidak terdapat pertukaran kalor antara sistem dengan lingkungan, proses disebut *adiabatik*.

adiabatik

1.8. SUHU DAN HUKUM KENOL TERMODINAMIKA

Meskipun merupakan besaran yang sangat dikenal, suhu sulit didefinisikan secara tepat. Perasaan melalui sentuhan adalah cara paling sederhana untuk membedakan benda-benda panas atau dingin. Ini merupakan taraf permulaan pengertian mengenai suhu. Makin terasa panas makin tinggi suhunya. Namun dengan hanya meraba kita tidak dapat memberikan harga pengukuran yang teliti dan bersifat sangat subyektif.

Suatu percobaan sederhana disarankan oleh John Locke pada tahun 1690. Seseorang diminta mencelupkan tangan satunya ke dalam wadah berisi air dingin dan tangan lainnya ke dalam wadah berisi air panas. Setelah itu kedua tangannya bersama-sama dimasukkan ke dalam air yang kepanasannya diantara yang panas dan yang dingin tersebut. Air ini terasa lebih hangat oleh tangan pertama dan terasa lebih sejuk oleh tangan kedua. Penilaian kita mengenai suhu menjadi keliru. Oleh karena itu kita membutuhkan alat untuk mengukur suhu.

1.8.1. KESETIMBANGAN TERMAL – HUKUM KENOL TERMODINAMIKA

Terdapat dua benda A dan B, benda A dirasa dingin oleh tangan dan benda B dirasa panas oleh tangan. Apabila kedua benda tersebut disentuh, pada keduanya akan terjadi perubahan sifat. Pada suatu saat tidak terasa lagi perubahan sifat tersebut maka A dan B dikatakan mencapai kesetimbangan termal. Sifat yang berubah ini disebut *suhu*.
Postulat: bila dua sistem satu sama lain berada dalam kesetimbangan termal, suhu kedua sistem tersebut sama. Jadi kita dapat mengatakan bahwa A dan B mempunyai suhu yang sama. Dari postulat ini timbul *hukum kenol termodinamika* yang berbunyi : *Jika dua sistem berada*

Kesetimbangan termal

dalam kesetimbangan termal dengan sistem ketiga, ketiga sistem tersebut berada dalam kesetimbangan termal satu sama lain. Apabila sistem A berada dalam kesetimbangan termal dengan sistem C, sedangkan sistem B dalam kesetimbangan termal dengan C, A dalam kesetimbangan termal dengan B. Dari hukum ini dapat kita simpulkan bahwa untuk mengetahui apakah dua sistem mempunyai suhu yang sama, tidak perlu kedua sistem tersebut disentuh. Gambar 1-8. menggambarkan pernyataan hukum ke nol termodinamika, gambar 1-8 (a) menunjukkan sistem A dan B dipisahkan dengan dinding adiabatik, tetapi masing-masing bersentuhan dengan C melalui sebuah dinding diatermal, *dinding diatermal* adalah permukaan batas yang menyebabkan adanya interaksi dengan lingkungan disebut. Dinding diatermal yang sering dijumpai adalah lempengan logam yang tipis. Seluruh sistem dikurung oleh dinding adiabatik. Sistem A dan B akan berada dalam kesetimbangan termal dengan C. Kemudian A dan B dipisahkan dengan dinding adiabatik terhadap C, sedang sistem A dan B dihubungkan dengan dinding diatermal, maka sistem A dan B akan berada dalam kesetimbangan termal, ditunjukkan pada gambar 1-8(b).

Hukum ke nol termodinamika

Dinding diatermal

Jadi suhu adalah sifat sistem yang menentukan apakah sistem itu setimbang termal dengan sistem lainnya atau tidak. Apabila dua sistem atau lebih berada dalam kesetimbangan termal, keduanya dikatakan mempunyai suhu yang *sama*.

Suhu sama

1.8.2. PENGUKURAN SUHU

Dinding diatermal

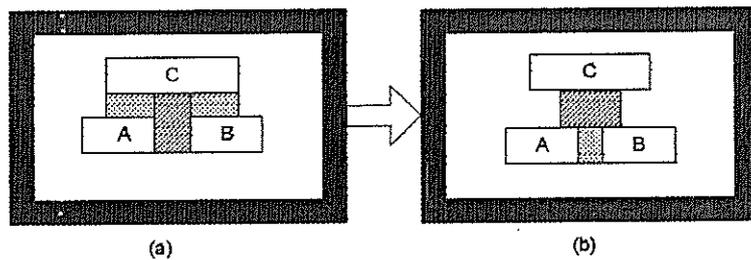
Cara yang paling sederhana untuk menentukan suhu sejumlah sistem adalah memilih salah satu sistem sebagai indikator kesetimbangan termal antara sistem ini dengan sistem-sistem lainnya. Sistem yang dipilih ini disebut *termometer*

Termometer

Suhu yang ditunjukkan tak lain adalah suhu sistem yang berada dalam kesetimbangan termal dengannya. Kualitas dari sebuah termometer ditentukan oleh *kepekaannya*, *ketelitiannya*, dan *keterulangannya* (dapat diperbanyak) serta *kecepatannya* mencapai kesetimbangan termal dengan sistem lainnya.

Kualitas termometer

Sifat termometrik



Gambar 1-8 Hukum ke nol termodinamika

Tabel 1-2 Termometer dengan sifat termometriknya

| Nama termometer | Sifat termometrik |
|-----------------------------------|----------------------------|
| Gas volum konstan | Tekanan |
| Termokopel tegangan mekanis tetap | Elektromotansi termal |
| Hambatan listrik tegangan tetap | Dayahambat tetap |
| Uap helium jenuh | Tekanan |
| Garam paramagnetik | Suseptibilitas magnetik |
| Radiasi benda hitam | Emitansi radian |
| Termometer semikonduktor | Tegangan atau arus listrik |
| Termometer LCD | Beda potensial |
| Pirometer radiasi | Radiasi |

Nilai suhu dapat ditentukan dengan mengukur beberapa sifat yang bergantung suhu. Sifat ini disebut *sifat termometrik*. Tabel 1-2 menunjukkan enam jenis termometer yang penting masing-masing dengan sifat termometriknya.

Pembentukan Skala Suhu

Untuk menentukan skala suhu mula-mula dipilih sifat termometrik X yang besarnya berubah dengan perubahan suhu. Untuk mendefinisikan skala suhu, kita dapat memilih hubungan antara suhu T dari suatu termometer berbanding lurus dengan sifat termometrik X . Setiap sistem yang berada pada kesetimbangan termal dengan termometer tersebut berlaku :

$$T = aX \quad (1-14)$$

a adalah sebuah tetapan yang nilainya masih harus dihitung. Untuk menghitung a harus ditentukan titik tetap terlebih dahulu. Pada titik tetap

Skala suhu

ini semua termometer harus memberikan pembacaan yang sama untuk suhu T . Sejak 1954 hanya ada satu titik tetap standar yaitu titik *tripel air*. Titik tripel air adalah suhu pada saat es, air dan uap dalam keadaan setimbang. Secara sekehendak titik tripel ini ditetapkan 273,16 K. Dengan demikian harga a dapat ditentukan, dari persamaan (1-14) diperoleh

$$a = \frac{273,16K}{X_{tp}} \quad (1-15)$$

X_{tp} adalah besaran sifat termometrik pada titik tripel air.

Jadi, untuk setiap termometer berlaku hubungan,

$$T(X) = 273,16K \frac{X}{X_{tp}} \quad (1-16)$$

Contoh 1-5.

Sebuah termometer hambatan platina mempunyai hambatan $R = 90,35 \Omega$ pada saat bola gelas termometer ditempatkan pada titik tripel. Berapakah suhunya ketika bola gelas termometer ditempatkan pada sistem yang hambatannya 120Ω ?

Diketahui :

$$R_{tp} = 90,35 \Omega \text{ dan } R = 120 \Omega$$

Ditanyakan:

$$T \text{ pada saat } R = 120 \Omega$$

Penyelesaian :

Hambatan R merupakan sifat termometrik termometer, jadi $R_{tp} = X_{tp} = 90,35 \Omega$ dan $R = X = 120 \Omega$

Dari persamaan (1-16), diperoleh:

$$\begin{aligned} T(X) &= 273,16K \frac{X}{X_{tp}} \\ &= 273,16K \frac{120}{90,35} = 362,8 \text{ K} \end{aligned}$$

Suhu yang ditunjukkan ketika $R = 120 \Omega$ adalah 362,8 K

1.8.3. SKALA SUHU CELCIUS, KELVIN, FAHRENHEIT, DAN RANKINE

Sejak tahun 1954, suhu 273,16 K ditetapkan sebagai harga suhu pada saat bentuk padat, cair dan gas dari air dalam kesetimbangan.

Keadaan pada saat tiga fase zat murni dalam kesetimbangan disebut *titik tripel zat*. Titik tripel air adalah 0,01 K (pada 1 atm) lebih tinggi dari titik es/titik beku normal air. Jadi air membeku pada 273,15 K yang didefinisikan sebagai 0°C pada skala suhu *Celcius*. Hubungan antara skala *Kelvin* dengan skala centigrade dituliskan

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15^{\circ} \quad (1-17)$$

Hubungan skala Celcius dengan skala Kelvin

Dalam buku ini seringkali 273,15 dibulatkan menjadi 273 apabila tidak diperlukan perhitungan dengan ketelitian tinggi. Skala suhu *Kelvin* dan *centrigrade* ini digunakan dalam satuan metris/ SI. Dua skala lain yang biasa digunakan dalam keteknikan di AS dan Inggris adalah suhu *Rankine* T_R (ditulis $^{\circ}R$) *Fahrenheit* (ditulis $^{\circ}F$). Hubungan antara skala suhu Rankine dan suhu skala Kelvin dituliskan sebagai:

$$T(^{\circ}R) = \frac{9}{5}T_K \quad (1-18)$$

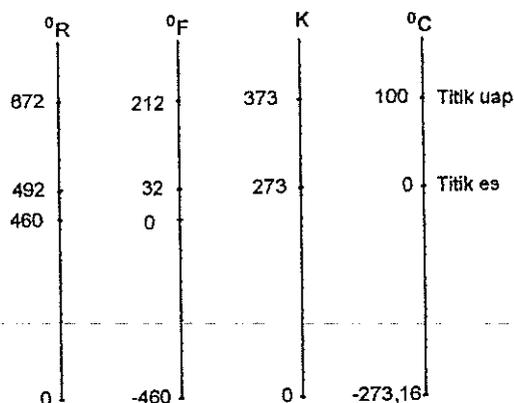
Hubungan skala Rankine dengan skala Kelvin

Sedangkan hubungan suhu dalam skala *Fahrenheit* T_F dengan Rankine dan skala suhu Celcius, dinyatakan sebagai:

$$T(^{\circ}F) = (T_R - 459,67^{\circ})R = \left(\frac{9}{5}T_C + 32^{\circ}\right)C \quad (1-19)$$

Hubungan antara skala Fahrenheit, skala Rankine, dan skala Celcius

Gambar 1-9 menunjukkan secara grafis hubungan antara suhu *Rankine*, *Fahrenheit*, *Kelvin* dan *Celsius*.



Gambar 1-9. Hubungan antara suhu Rankine, Fahrenheit, Kelvin, dan Celcius

Contoh 1-6.

Helium mempunyai titik didih 5,25K. Tentukan besarnya titik didih helium dalam $^{\circ}C$, $^{\circ}F$ dan $^{\circ}R$.

Penyelesaian

Titik didih helium $T_K = 5,25K$

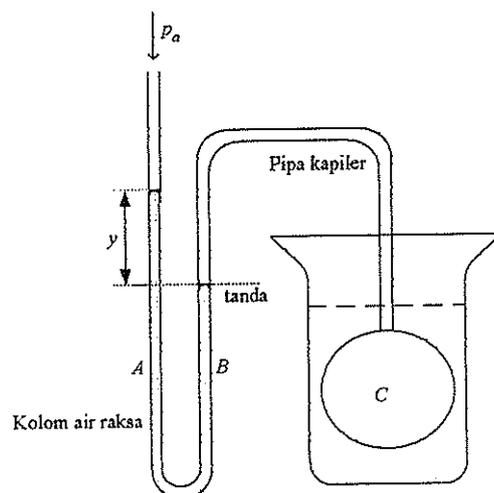
$$t_c = T_K - 273,16^0 = 5,25^0 - 273,16^0 C = -267,91^0C$$

$$t_i = 9/5 \cdot t_c + 32^0 = 9/5 (-267,91^0) + 32^0 = -450,238^0F$$

$$T_R = 9/5 \cdot T_K = 9/5 \cdot 5,25^0 = 9,45^0 R$$

1.9. TERMOMETER GAS IDEAL

Diantara sifat termometrik yang digunakan dalam pengukuran suhu adalah tekanan gas dijaga pada volum konstan. Termometer gas volum konstan atau termometer gas ideal, diberikan pada gambar 1-10. *Termometer gas ideal*

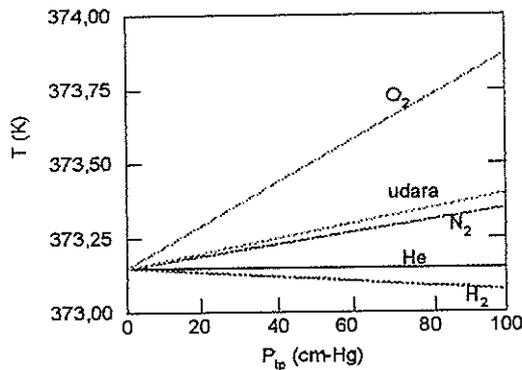


Gambar 1-10. Termometer gas volum konstan

Termometer ini biasanya besar dan lambat mencapai kesetimbangan termalnya. Termometer terdiri dari sebuah tabung yang dapat terbuat dari gelas, porselen, kuarsa, platinum, atau platinum iridium dan manometer raksa. Keduanya dihubungkan dengan pipa kapiler. Tabung C diisi gas, umumnya hidrogen atau helium ditempatkan pada sistem yang akan diukur suhunya. Pipa A dinaikkan atau diturunkan hingga raksa pada pipa B berada pada tanda yang diberikan. Tinggi kolom cairan y sebanding dengan tekanan tolak gas dalam bola gelas. Tinggi y akan berubah bila tekanan gas dalam bola gelas berubah

Dari data percobaan yang dilakukan dalam gambar 1-10, kita lihat bahwa semua gas pada suhu tertentu memberikan nilai pV yang sama ketika tekanannya sangat rendah yang ditunjukkan gambar 1-11. Oleh

karenanya besaran pV dapat digunakan sebagai sifat termometrik untuk mengukur suhu, tak peduli apapun gasnya. Pada tekanan yang sangat rendah, pV berubah secara linier terhadap T . Artinya, pada *termometer gas volum konstan, takpeduli sifat gasnya, semua termometer gas mendekati pembacaan yang sama ketika tekanan gasnya mendekati nol.*



Gambar 1-11. Pembacaan termometer gas volum konstan untuk mengatur pengembangan uap air dan benda yang sedang diuji.

Apabila termometer dikontakkan pada sistem yang hendak diukur suhunya dan kemudian dikontakkan pada sistem acuan, persamaan(1-14) berlaku dan diperoleh;

$$T(K) = 273,16 \frac{P}{P_{tp}} \quad (1-20)$$

p_{tp} adalah tekanan mutlak pada saat termometer dalam keadaan kesetimbangan dengan titik tripel air

Apabila termometer ini diisi gas ^3He tekanan rendah, suhu gas ideal yang dapat diukur adalah sekitar 5 K

1.10. SKALA SUHU INTERNASIONAL

Pada tahun 1927, pada konperensi Umum Ketujuh tentang Bobot dan Pengukuran, skala suhu internasional ditetapkan sebagai sarana untuk kalibrasi alat ilmiah dan industri dengan mudah dan cepat.

Skala suhu praktis internasional (IPTS) disempurnakan tahun 1975, terdiri atas seperangkat titik tetap yang diukur dengan termometer gas volum konstan dan seperangkat prosedur untuk menginterpolasi anantara titik tetap itu. Suhu titik didih normal (NBP, *normal boiling*

Skala suhu praktis internasional (IPTS)
Suhu titik didih normal(NBP)
Titik lebur normal(NMP)

points), titik lebur normal (NMP, *normal melting points*), dan keadaan setimbang sejumlah bahan yang telah diukur diberikan dalam tabel (1-3)

Skala internasional didasarkan pada beberapa titik tetap yang perumusannya tergantung pada alat yang dipakai dan karenanya hanya berlaku untuk kisaran-kisaran tertentu.

a. Pada kisaran $-182,97^{\circ}\text{C}$ (titik oksigen) sampai 0°C , suhu ditentukan dari hubungan

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3]$$

Dengan:

R_t adalah tahanan kawat platina pada suhu t

R_0 adalah tahanan kawat platina pada suhu 0°C

A, B, C adalah tetapan-tetapan yang dapat dihitung.

b. Pada kisaran 0°C sampai $630,3^{\circ}\text{C}$ (titik beku antimon), berlaku hubungan:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2]$$

Titik beku antimon

c. Pada kisaran $630,3^{\circ}\text{C}$ sampai 1063°C (titik emas)

t ditentukan dengan memakai termokopel platina radium, berlaku hubungan:

$$\varepsilon = 1 + at + bt^2]$$

Titik emas

dengan ε adalah emf yang timbul pada termokopel apabila titik hubung yang satu pada 0°C sedang lainnya pada suhu t

a, b, c diperoleh dengan mengukur ε pada titik beku antimon ($630,3^{\circ}\text{C}$), titik perak ($960,80^{\circ}\text{C}$), titik emas (1060°C)

d. Di atas titik emas akan terjadi radiasi pada sebuah benda dipakai hukum Planck.

$$\frac{J_t}{J_{Au}} = \frac{\exp[C_2 / \lambda \lambda (t_{Au} + T_0)] - 1}{\exp[C_2 / \lambda (t + T_0)] - 1}$$

J_t dan J_{Au} adalah daya radiasi/satuan luas yang diemisikan pada radiator sempurna pada suhu t dan titik emas t_{Au}

$C_2 = 1,438 \text{ cmK}$

T_0 adalah suhu titik es (K)

Tabel 1-3. Suhu titik tetap IPTS-68

| | Titik Tetap | T(K) | T (°C) | |
|---|--|---------------------|----------|----------|
| Baku | TP air | 273,16 | 0,01 | |
| Titik tetap pendefinisi | TP kesetimbangan hidrogen | 13,81 | -259,34 | |
| | TP kesetimbangan hidrogen pada 3333,6 Pa | 17,042 | -256,108 | |
| | NBP kesetimbangan hidrogen | 20,28 | -252,87 | |
| | NBP neon | 27,102 | -246,048 | |
| | TP oksigen | 54,361 | -218,789 | |
| | TP argon | 83,798 | -189,352 | |
| | NBP oksigen | 90,188 | -182,962 | |
| | NPB air | 373,125 | 99,975 | |
| | NMP timah | 505,074 | 231,924 | |
| | NWP seng | 692,664 | 419,514 | |
| | NWP perak | 1235,08 | 961,93 | |
| | NMP emas | 1337,58 | 1064,43 | |
| | Titik acuan sekunder | TP hidrogen normal | 13,965 | -259,194 |
| | | NBP hidrogen normal | 20,397 | -252,753 |
| TP neon | | 24,561 | -248,589 | |
| TP nitrogen | | 63,146 | -210,004 | |
| NBP nitrogen | | 77,344 | -195,806 | |
| NBP argon | | 87,294 | -185,856 | |
| NSP karbon dioksida | | 194,674 | -78,476 | |
| NMP air raksa | | 234,314 | -38,836 | |
| Kesetimbangan es dan air jenuh udara | | 273,15 | 0 | |
| TP fenoksibensin | | 300,02 | 26,87 | |
| TP asam benzoat | | 395,52 | 122,37 | |
| NMP indium | | 429,784 | 156,634 | |
| NMP bismut | | 544,592 | 271,462 | |
| NMP kadmium | | 594,258 | 321,108 | |
| NMP timbal | | 600,652 | 327,502 | |
| NBP air raksa | | 629,81 | 356,66 | |
| NBP belerang | | 717,824 | 444,674 | |
| NMP antimon | | 903,905 | 630,755 | |
| NMP aluminium | | 933,61 | 660,46 | |
| NMP tembaga | | 1358,03 | 1084,88 | |
| NMP nikel | | 1728 | 1455 | |
| NMP kobal | | 1768 | 1495 | |
| NMP paladium | | 1827 | 1554 | |
| NMP platina | | 2042 | 1769 | |
| NMP rodium | | 2236 | 1963 | |
| NMP indium | | 2720 | 2447 | |
| NMP niobium | | 2750 | 2477 | |
| NMP molibdenum | 2896 | 2623 | | |
| NMP tungsten | 3695 | 3422 | | |

1.11. SISTEM TERMODINAMIK SEDERHANA : PERSAMAAN KEADAAN GAS IDEAL

Sejumlah kecil gas mengandung sangat banyak molekul N . Jika massa masing-masing molekul dinyatakan dengan M' , massa total m gas adalah: *Berat molekul*

$$m = NM'$$

Bila M menyatakan massa molar dalam kilogram per kilomol (dahulu disebut berat molekul), banyak mol n adalah

$$n = \frac{m}{M} = \frac{NM'}{M} \quad (1-21)$$

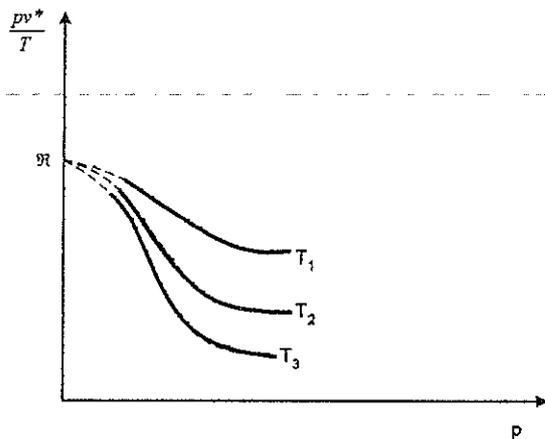
Banyaknya molekul per mol gas disebut bilangan *Avogadro* N_A , dengan

$$N_A = \frac{N}{n} = \frac{M}{M'} \quad (1-22) \quad \text{Bilangan Avogadro}$$

$$= 6,0225 \times 10^{23} \text{ molekul/mol}$$

Sifat gas sangat luarbiasa sehingga sangat berharga dalam termometri. Pada serangkaian percobaan yang telah dilakukan untuk berbagai macam gas dengan tekanan, volum, dan suhu diukur pada 1 mol gas pada berbagai tekanan dan suhu. Hasil percobaan ditunjukkan pada gambar 1-9. Pada gambar ini, perkalian pv^* dirajah terhadap tekanan p untuk satu macam gas. Untuk semua jenis gas, ketika tekanan gas mendekati nol, perkalian pv^* mendekati harga yang sama atau dituliskan sebagai:

$$\mathfrak{R} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{pv^*}{T} \quad (1-23)$$



Gambar 1-12. Penentuan tetapan gas universal

\mathfrak{R} disebut tetapan gas universal. Dalam tahun 1972 Batuecas menemukan bahwa besarnya $\mathfrak{R} = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{pv^*}{T}$ untuk gas oksigen adalah

Tetapan gas universal

22,4132 liter-atm/mol $^{\circ}\text{C}$ atau

$$\begin{aligned}\mathfrak{R} &= 8,31 \cdot 10^3 \text{ joule/kgm-mole } K \\ &= 0,08 \text{ liter atm/gr-mole } K \\ &= 8,31 \cdot 10^7 \text{ erg/gr-mole } K\end{aligned}$$

Dalam satuan keteknikan

$$\mathfrak{R} = 1545,3 \text{ ft lb/lbm mole } ^{\circ}\text{R}$$

Sebagai pendekatan, semua gas pada tekanan rendah berlaku hubungan yang sederhana,

$$\frac{pv^*}{T} = \mathfrak{R} \quad (1-24)$$

Postulat : Semua gas yang mempunyai hubungan $pv^* = \mathfrak{R}T$ pada tekanan rendah disebut gas ideal.

Persamaan keadaan gas ideal

Maka persamaan keadaan gas ideal dapat dituliskan :

$$pv^* = \mathfrak{R} T \quad (1-25)$$

dengan menggunakan hubungan

$$v^* = V/n \text{ dan } n = m/M,$$

diperoleh:

$$pV = n \mathfrak{R} T \quad (1-26)$$

Apabila berat molekul adalah M , $R = \frac{\mathfrak{R}}{M}$, persamaan keadaan dapat

ditulis:

$$\begin{aligned}pV &= mRT \\ pv &= RT\end{aligned}$$

Tabel 1-4. Harga R untuk gas-gas yang umum

| Jenis gas | BM | R (J/kg K) | R (ft-lb/lbm $^{\circ}\text{R}$) |
|-----------|-------|--------------|-------------------------------------|
| Udara | 28,97 | 287 | 53,35 |
| Hidrogen | 2,016 | 4120 | 766,53 |
| Nitrogen | 28,02 | 297 | 55,12 |
| Oksigen | 32 | 260 | 48,29 |
| uap | 18,02 | 462 | 85,8 |

Contoh 1-7.

Sebuah tangki dengan volum total 10 ft^3 diisi udara dengan tekanan tolok 20 psi pada suhu 100°F . Hitung volum jenis dan massa total udara dalam tangki

Penyelesaian:

$$V = 10 \text{ ft}^3$$

$$p = p_g + p_{\text{atm}} = (20 + 14,7) \text{ psi} = 34,7 \text{ psi} = 4996,8 \text{ lb/ft}^2$$

$$T = 460 + 100 = 560^\circ\text{R}$$

$$R = 53,35 \text{ ft-lb/lbm}^\circ\text{R}$$

$$\text{Persamaan gas ideal: } p v = RT \rightarrow v = \frac{RT}{p}$$

$$v = \frac{53,35 \text{ ft-lb/lbm}^\circ\text{R} \times 560^\circ\text{R}}{4996,8 \text{ lb/ft}^2} = 5,97 \text{ ft}^3 / \text{lbm}$$

$$m = \frac{V}{v} = \frac{10 \text{ ft}^3}{5,97 \text{ ft}^3 / \text{lbm}} = 1,675 \text{ lbm}$$

Contoh 1-8:

Sebuah bejana mempunyai volum 150 cm^3 pada tekanan $2,2 \text{ atm}$ dengan suhu 200°C .

Hitung jumlah molekul gas H_2 (anggap sebagai gas ideal) dalam bejana tersebut.

$$V = 150 \text{ cm}^3 = 150 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$P = 2,2 \text{ atm} = 2,2730 \text{ Pa}$$

$$T = 200^\circ\text{C} = 473 \text{ K}$$

$$R = 8314 \text{ J/kg mol K}$$

$$n = \frac{pV}{RT} = \frac{(2,2730 \times 10^5) \times (150 \times 10^{-6})}{(8314)(473)}$$

$$= 8,67 \times 10^{-6} \text{ kg-mol}$$

Jumlah molekul N adalah

$$N = nN_A = (8,67 \times 10^{-6}) (6,0225 \times 10^{23}) \text{ molekul/mol}$$

$$= 52 \times 10^{17} \text{ molekul/mol}$$

1.11.1. DEFINISI MIKROKOPIK DARI GAS IDEAL

Gas ideal terdiri dari partikel-partikel yang dinamakan molekul-molekul. Molekul dapat terdiri dari satu atom atau lebih bergantung pada jenis gasnya. Jika gas tersebut merupakan senyawa dan berada dalam keadaan stabil, molekul-molekulnya dianggap identik.

Definisi mikroskopik gas ideal

Molekul-molekul bergerak secara serampangan dan menuruti hukum gerak Newton. Molekul-molekul bergerak ke segala arah dengan berbagai laju. Dalam menghitung gerak molekul kita anggap hukum gerak mekanika newton berlaku.

Jumlah seluruh molekul adalah sangat besar. Molekul-molekul dianggap saling berinteraksi melalui tumbukan atau melalui kakas yang ditimbulkan oleh medan yang menyebabkan perubahan arah dan laju gerakan. Karena jumlah molekul sangat besar, kita anggap banyaknya jumlah tumbukan yang terjadi mempertahankan distribusi kecepatan molekuler secara keseluruhan dan keserampangan gerakan.

Volume molekul-molekul adalah pecahan kecil yang dapat diabaikan terhadap volume yang ditempati gas tersebut. Walaupun jumlah molekulnya sangat banyak namun molekul-molekul tersebut sangatlah kecil. Suatu gas yang mengembun, volum cairan tersebut beribu-ribu lebih kecil daripada volum yang ditempati oleh gas.

Tidak ada kakas-kakas yang cukup besar yang beraksi pada molekul-molekul kecuali selama tumbukan.

Tumbukan-tumbukan yang terjadi adalah elastik dan tumbukan-tumbukan terjadi didalam waktu yang singkat.

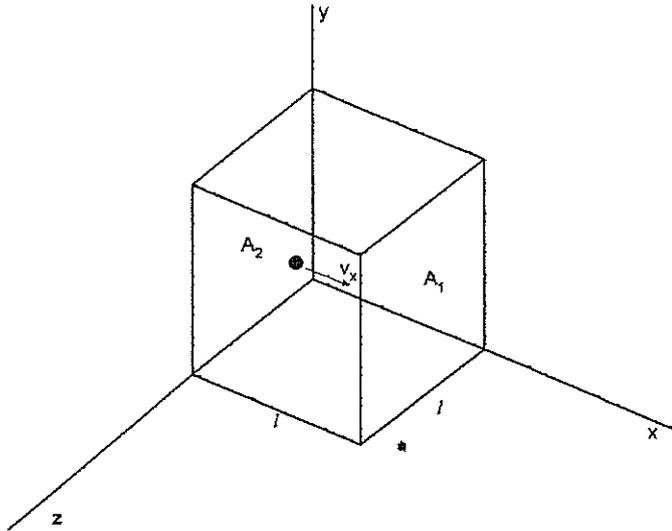
1.11.2. TEORI KINETIK GAS IDEAL

Untuk menyederhanakan masalah, kita tinjau gas didalam bejana yang berbentuk kubus dan dinding-dindingnya elastik sempurna. Kita misalkan panjang sisi-sisi kubus adalah l dan luas permukaan yang normal terhadap sumbu x adalah A_1 dan A_2 , ditunjukkan gambar 1-11. Kita andaikan semua molekul gas berbentuk bola. Sebuah partikel bergerak dalam arah x menumbuk dinding A_1 . Karena dinding elastik sempurna, partikel akan dipantulkan kembali dalam arah sebaliknya (x negatif) setelah menumbuk dinding. Jika massa setiap partikel adalah M' dan kecepatannya adalah v_x , impuls terhadap dinding yang ditumbuk oleh setiap partikel akan sama dengan

Teori kinetik gas ideal

Impuls = momentum akhir-momentum mula-mula

$$Fdt = -M'v_x - (M'v_x) = -2M'v_x$$



Gambar 1-13. Sebuah bejana berbentuk kubus dengan sisi l berisi gas ideal

Momentum yang dipindahkan oleh partikel ini ke A_1 persatuan waktu adalah:

$$2M'v_x \frac{v_x}{2l} = \frac{M'v_x^2}{l} \quad (1-27)$$

Luas permukaan A_1 adalah l^2 , maka tekanan yang dikenakan pada dinding A_1 oleh partikel adalah

$$p = \frac{M'}{l^3} (v_x^2) \quad (1-28)$$

Bila didalam wadah terdapat N partikel gas, banyaknya partikel persatuan volum n_v adalah

$$n_v = \frac{N}{l^3}$$

Bila kecepatan masing-masing partikel adalah v_{x1}, v_{x2}, \dots , tekanan seluruh partikel sama dengan

$$p = M'n_v \left(\frac{v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + \dots}{N} \right) \quad (1-29)$$

Perkalian $M'n_v$ adalah massa persatuan volum atau massa jenis ρ .

Besaran $(v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + \dots)/N$ adalah nilai rata-rata dari v_x^2 untuk semua partikel dalam bejana tersebut. Tekanan p dapat dituliskan dengan:

$$p = \rho \overline{v_x^2} \quad (1-30)$$

Pada kenyataannya, setiap partikel bergerak dengan kecepatan berbeda. Oleh karena itu faktor kecepatan pada persamaan (1-30) harus menggunakan kecepatan rata-rata. Semua partikel bergerak secara serampangan dengan kecepatan masing-masing;

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

dari asumsi gerak acak, nilai rata-rata dari $v_x^2, v_y^2, dan v_z^2$ adalah sama dan sama dengan

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2} \quad (1-31)$$

Sehingga pers. (1-30) dapat kita tuliskan dengan:

$$p = \rho \overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2} \quad (1-32)$$

Akar purata kuadrat

$$\boxed{v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}} \quad (1-33) \quad \text{Akar purata kuadrat}$$

Kita kalikan persamaan (1-32) dengan volume V

$$pV = \frac{1}{3} \rho V \overline{v^2} \quad (1-34)$$

Perkalian ρV adalah massa total gas. Massa gas juga dapat dituliskan sebagai nM . Dengan menyulihkannya dalam persamaan diatas diperoleh:

$$pV = \frac{1}{3} nM \overline{v^2} \quad (1-35)$$

Dan:

$$pV = \frac{2}{3} \frac{1}{2} nM \overline{v^2} \quad (1-36)$$

Jika persamaan gas ideal dinyatakan oleh $pV = n\mathcal{R}T$, kita peroleh

$$\boxed{\frac{1}{2} M \overline{v^2} = \frac{3}{2} \mathcal{R}T} \quad (1-37) \quad \text{Interprestasi kinetik gas ideal}$$

Pers (1-37) merupakan interprestasi kinetik dari gas ideal. Bila tenaga kinetik purata gas dapat diukur, suhu gas ideal dapat ditentukan

Contoh 1-10

Hitung kecepatan purata kuadrat dari molekul H_2 pada tekanan 2,2 atm dan suhu $200^\circ C$.

$$p = 2,2 \text{ atm} = 2,2730 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$T = 200^{\circ}\text{C} = 473 \text{ K}$$

$$\mathfrak{R} = 8314 \text{ J/kg mol K}$$

Penyelesaian

$$R_{H_2} = \frac{\mathfrak{R}}{M_{H_2}} = \frac{8314}{2} = 4157 \text{ J/kgK}$$

$$\overline{v^2} = 3RT = 3 (4157)(473) = 5898763 \text{ J/kg}$$

Untuk memberikan satuan yang tetap untuk $\overline{v^2}$ cukup dikalikan dengan g_c

$$g_c = 1 \frac{\text{kg.m}}{\text{N.det}^2}, \text{ maka}$$

$$\overline{v^2} = (5898763 \text{ Nm/kg})(1 \text{ kg m/N det}^2) = 5898763 (\text{m/det})^2$$

Jadi kecepatan purata kuadrat

$$v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} = 2428,74 \text{ m/det}$$

Contoh 1-11.

Kerapatan gas pada suhu 273 K dan tekanan $1,5 \times 10^{-2}$ atm adalah $1,3 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$

(a) Hitunglah kecepatan purata kuadrat molekul-molekul gas tersebut (b) Hitung berat molekul gas tersebut

$$T = 273 \text{ K}$$

$$p = 1,5 \times 10^{-2} \text{ atm} = 1,5 \times 10^{-2} \times 1,01 \times 10^5 \text{ Pa} = 1,515 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$\rho = 1,3 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$$

$$\mathfrak{R} = 8314 \text{ J/kg mol K}$$

Penyelesaian:

$$\begin{aligned} \text{(a) } v_{rms} &= \sqrt{\frac{3p}{\rho}} \\ &= \sqrt{\frac{3 \times 1,515 \times 10^3}{1,3 \times 10^{-2}}} = 591,28 \text{ m/det} \end{aligned}$$

$$\text{(b) } \frac{1}{2} M \overline{v^2} = \frac{3}{2} \mathfrak{R} T$$

$$\overline{v^2} = (v_{rms})^2 = 349612,04 \text{ m}^2/\text{dt}^2$$

$$M = (3/2 \times 8314 \times 273) / (0,5 \times 349612,04) = 19,48 \text{ kg/kg-mol}$$

1.12. KOEFISIEN PEMUAIAN DAN KETERMAMPATAN

Besarnya perubahan sistem karena adanya perubahan suhu atau perubahan tekanan tergantung dua karakteristik sistem yaitu koefisien pemuaian dan koefisien ketertampatan yang mempengaruhi.

1.12.1. DUA TEOREMA MATEMATIS

Teorema 1: Jika terdapat suatu hubungan antara x , y , dan z , kita dapat membayangkan z dinyatakan sebagai fungsi x dan y .

$$z = f(x, y) \quad (1-39)$$

$$dz = \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)_y dx + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_x dy \quad (1-40)$$

Yang dapat dituliskan dalam bentuk

$$dz = Mdx + Ndy \quad (1-41)$$

dengan

$M = \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)_y$ adalah derivatif parsial dari z terhadap x (peubah y konstan)

$N = \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_x$ adalah derivatif parsial dari z terhadap y (peubah x konstan)

Teorema 2: Jika terdapat suatu kuantitas f merupakan fungsi dari x, y , dan z dan terdapat hubungan antara x, y , dan z , f dapat dipandang sebagai fungsi dari setiap pasangan x, y , dan z . Demikian juga dengan salah satu dari x, y , dan z dapat dipandang sebagai fungsi dari f dan salah satu dari x, y , dan z .

Anggap tiga peubah memenuhi persamaan:

$$f(x, y, z) = 0 \quad (1-42)$$

Penyelesaian dari persamaan ini, pertama x kemudian y , maka diperoleh:

$$x = f_1(y, z), \quad y = f_2(x, z)$$

Maka:

$$dx = \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right)_z dy + \left(\frac{\partial x}{\partial z} \right)_y dz \quad (1-43)$$

$$dy = \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_z dx + \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_x dz \quad (1-44)$$

Jika dy pada persamaan diatas dieliminir dan suku-suku dx dan dy dikumpulkan akan diperoleh:

$$\left[1 - \left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_z\right] dx = \left[\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_x + \left(\frac{\partial x}{\partial z}\right)_y\right] dz$$

dx dan dz merupakan peubah bebas.

Jika dipilih $dz = 0$ dan $dx \neq 0$

$$1 - \left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_z = 0 \quad (1-45)$$

$$\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z = \frac{1}{\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_z} \quad (1-46)$$

Jika $dx = 0$ dan $dz \neq 0$, maka akan diperoleh:

$$\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_x + \left(\frac{\partial x}{\partial z}\right)_y = 0$$

$$\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_x = -\left(\frac{\partial x}{\partial z}\right)_y$$

$$\boxed{\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_x \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y = -1} \quad (1-47)$$

1.12.2. KOEFISIEN PEMUAIAN

Jika sistem diganggu dengan menaikkan suhunya dari T_1 ke T_2 , akan terjadi perubahan volum untuk setiap kenaikan suhu. **Koefisien kubik pemuaian purata** ($\bar{\beta}$) didefinisikan sebagai fraksi perubahan volum perderajad kenaikan suhu. Jika suhu dan volum mula-mula adalah T_1 dan V_1 sedangkan suhu dan volum akhir adalah T_2 dan V_2 , $\bar{\beta}$ sama dengan:

$$\bar{\beta} = \frac{1}{V_1} \left(\frac{V_2 - V_1}{T_2 - T_1} \right) = \frac{\Delta V}{V_1 \Delta T}$$

Apabila tekanan dijaga konstan, koefisien muai kubik pada suhu T adalah:

Koefisien pemuaian purata

$$\bar{\beta} = \left(\frac{\Delta V}{V_1 \Delta T} \right)_p \quad (1-48)$$

Koefisien muai pada sebarang suhu T dan tekanan p didefinisikan sebagai limit dari pers. (1-48) bila ΔT tak berhingga kecilnya.

$$\beta = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta V}{V_1 \Delta T} \right)_p = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (1-49) \quad \text{Koefisien pemuaian}$$

Satuan β dalam keteknikan adalah $1/^\circ F$ atau $1/^\circ R$ dan dalam satuan internasional adalah $1/K$ atau $1/^\circ C$. Secara analogi dapat diperoleh:

$$\beta = \frac{1}{v^*} \left(\frac{\partial v^*}{\partial T} \right) \quad (1-50)$$

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right) \quad (1-51)$$

Koefisien pemuaian dari berbagai zat diberikan pada tabel 3-4

1.12.3. KOEFISIEN KETERMAMPATAN

Apabila suatu bahan mendapat tekanan, bahan akan mengalami perubahan volum. Misalnya tekanan dan volum mula-mula bahan adalah p_1 dan V_1 . Kemudian tekanan diubah menjadi p_2 , karena adanya perubahan tekanan sebesar $\Delta p = p_2 - p_1$, volum mengecil menjadi V_2 . Koefisien *ketermampatan purata* $\bar{\kappa}$ dari suatu bahan $\bar{\kappa}$ didefinisikan sebagai:

$$\bar{\kappa} = -\frac{1}{V_1} \left(\frac{V_2 - V_1}{p_2 - p_1} \right) = -\left(\frac{\Delta V}{V_1 \Delta p} \right)_T \quad (1-52) \quad \text{Koefisien ketermampatan purata}$$

Koefisien ketermampatan pada sebarang tekanan dan suhu didefinisikan sebagai limit pers. (2-23) bila Δp mendekati tak berhingga kecilnya.

$$\kappa = -\lim_{\Delta p \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta V}{V_1 \Delta p} \right)_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad (1-53) \quad \text{Koefisien ketermampatan}$$

atau dapat ditulis dalam bentuk

$$\kappa = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \quad (1-54)$$

$$\kappa = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \quad (1-55)$$

Contoh 1-12

Hitung β dan κ untuk gas ideal

Penyelesaian

Untuk gas ideal, persamaan keadaan dinyatakan oleh:

$$pv = RT$$

Sehingga

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p}$$

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right) = \frac{1}{v} \frac{R}{p} = \frac{1}{v} \frac{v}{T} = \frac{1}{T}$$

$$\kappa = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T = -\frac{1}{v} \left(-\frac{RT}{p^2}\right) = \frac{1}{p}$$

1.12.4. HUBUNGAN ANTARA β DAN κ

Dengan menggabungkan persamaan (1-51) dan persamaan (1-54), diperoleh persamaan:

$$\frac{dV}{V} = \beta dT - \kappa dp \quad (1-56)$$

Pada umumnya β dan κ merupakan bilangan positif, β dapat berupa bilangan negatif dalam kasus-kasus tidak biasa. Biasanya β dan κ merupakan fungsi tekanan dan suhu. Apabila perubahan T dan p sangat kecil, β dan κ dapat dianggap sebagai tetapan, persamaan (1-56) dapat diintegrasikan menjadi:

$$\ln \frac{V_2}{V_1} = \beta(T_2 - T_1) - \kappa(p_2 - p_1) \quad (1-57)$$

Apabila nilai β dan κ tidak konstan,

$$\ln \frac{V_2}{V_1} = \int_{T_1}^{T_2} \beta dT - \int_{p_1}^{p_2} \kappa dp \quad (1-58)$$

Tabel 1-4 Koefisien pemuaian volum untuk berbagai zat pada suhu 25°C

| Nama Zat | β | |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | $^{\circ}\text{F}^{-1} \times 10^6$ | $^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^6$ |
| Padatan | 39,9 | 71,8 |
| <i>Aluminium</i> | 27,6 | 49,7 |
| Tembaga | 23,7 | 42,7 |
| Emas | 19,5 | 35,1 |
| Besi | 42,0 | 75,6 |
| <i>Magnesium</i> | 21,6 | 38,9 |
| Nikel | 33,0 | 59,4 |
| Baja, <i>AISI 305 sheet</i> | 29,7 | 53,5 |
| <i>Tungsten</i> | 7,5 | 13,5 |
| Gelas pireks | 5,4 | 9,7 |
| Es | 84,9 | 152,8 |
| <i>Wool</i> | 8,1 | 14,6 |
| Beton | 24,0 | 43,2 |
| Cairan | | |
| Asam asetat | 600 | 1080 |
| Etil Alkohol | 610 | 1098 |
| Bensin | 770 | 1386 |
| Gliserin | 280 | 504 |
| Asam hidroklorik | 270 | 486 |
| Minyak mentah | 450 | 810 |
| Air | 115 | 207 |

RANGKUMAN

Sistem termodinamik adalah suatu sistem yang keadaannya diperikan oleh besaran-besaran termodinamik. Berdasarkan interaksi dengan lingkungannya, sistem dibedakan menjadi tiga macam, yaitu sistem terbuka, tertutup dan terisolasi.

Keadaan suatu sistem ditentukan oleh beberapa syarat yang disebut sifat sistem, yang biasanya diamati secara kuantitatif yang disebut besaran. Besaran dibagi menjadi dua yaitu, besaran ekstensif dan besaran intensif

Perbandingan antara besaran ekstensif suatu sistem terhadap massa sistem disebut harga jenis purata dari sistem. Harga jenis molal purata didefinisikan sebagai perbandingan antara harga dari besaran ekstensif dengan jumlah mol dari sistem.

Apabila suatu sistem memenuhi syarat-syarat kesetimbangan mekanis, termal dan kimiawi maka sistem disebut dalam keadaan kesetimbangan termodinamik.

Proses adalah perubahan suatu sistem dari satu keadaan ke keadaan lain. Dikenal dua jenis proses yaitu kuasistatis dan tidak kuasistatis. Proses kuasistatis dibedakan menjadi proses isothermal, isochoris, isobaris dan adiabatikis. Terdapat tiga sifat sistem yang penting yaitu volume, tekanan, dan suhu.

Bila dua sistem satu sama lain berada dalam kesetimbangan termal maka suhu kedua sistem tersebut sama. Alat untuk mengukur suhu disebut termometer. Termometer yang baik ditentukan oleh kepekaannya, ketelitiannya, dan keterulangannya (dapat diperbanyak) serta kecepatannya mencapai kesetimbangan termal dengan sistem lainnya. Skala yang digunakan dalam keteknikan adalah Rankine dan Fahrenheit, sedangkan dalam satuan metris digunakan skala Kelvin dan Celcius.

Perilaku gas pada tekanan rendah mempunyai hubungan $pv^* = \mathcal{R}T$ dan disebut sebagai gas ideal.

Koefisien pemuaian dan ketermampatan zat dapat dituliskan sebagai

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right) \text{ dan } \kappa = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$$

PERTANYAAN-PERTANYAAN

1. Ada berapa metode untuk mempelajari hubungan antara sifat termodinamik dan energi ? sebutkan dan jelaskan!
2. Sebutkan ciri-ciri khas dari koordinat makroskopik
3. Nyatakan kakas 10 N dalam ft-lb
4. Nyatakan energi 1500 joule dalam Btu, kalori
5. Apakah yang dimaksud dengan tetapan tak berdimensi
6. Apakah yang dimaksud dengan sistem termodinamik, fase, zat murni, dan keadaan?
7. Terdapat berapa jenis sifat sistem? Sebutkan dan jelaskan masing-masing
8. Jelaskan tentang syarat kesetimbangan termodinamik
9. Bagaimana suatu sistem dikatakan tak setimbang?
10. Apakah yang dimaksud dengan tekanan negatif?
11. Sebutkan hukum ke nol termodinamika
12. Bagaimanakah skala suhu terbentuk?
13. Apakah yang dimaksud titik tripel air?
14. Jelaskan hubungan antara skala Rankine, Fahrenheit, Kelvin, dan Celcius

- 1.1. Tentukan berat dalam newton sebuah benda yang massanya 30 kg pada suatu tempat yang memiliki percepatan gravitasi $9,8 \text{ m/s}^2$.
- 1.2. Tentukan massa sebuah benda yang beratnya 30 N pada suatu tempat yang memiliki percepatan gravitasi $9,8 \text{ m/s}^2$.
- 1.3. Sebuah benda bermassa 30 kg mempunyai berat 291 N. Tentukan
(a) percepatan gravitasi setempat, dalam m/dt .
(b) massa dalam kg dan beratnya dalam N benda tersebut, di suatu lokasi dengan $g = 9,81 \text{ m/s}$.
- 1.4. Tentukan massa
(a) 2 kg-mol CO_2
(b) 4 kg-mol H_2O
- 1.5. Tentukan berat dalam lb sebuah benda yang massanya 30 lbm pada suatu tempat yang memiliki percepatan gravitasi 32 ft/dt^2 .
- 1.6. Tentukan massa sebuah benda yang beratnya 30 lb pada suatu tempat yang memiliki percepatan gravitasi 32 m/dt^2 .
- 1.7. Sebuah benda bermassa 30 lb mempunyai berat 930 lb. Tentukan
(a) percepatan gravitasi setempat, dalam ft/dt^2 .
(b) massa dalam lbm dan beratnya dalam lb benda tersebut, di suatu lokasi dengan $g = 32,2 \text{ m/s}$.

SOAL-SOAL

Kakas dan Massa

Volum jenis dan tekanan

1.8. Sebuah tabung berisi 2 kg-mol gas CO_2 , volumenya $0,6 \text{ m}^3$, percepatan gravitasi lokal $9,65 \text{ m/dt}^2$. Tentukan

- (a) massa
- (b) volum jenis
- (c) volum jenis molal
- (d) densitas
- (e) berat jenis
- (f) jumlah mol

1.9. Sebuah tabung berisi 2 lbm-mol gas CO_2 , volumenya $0,6 \text{ ft}^3$, dan percepatan gravitasi lokal $31,5 \text{ ft/dt}^2$. Tentukan

- (a) massa
- (b) volum jenis
- (c) volum jenis molal
- (d) densitas
- (e) berat jenis
- (f) jumlah mol

1.10. Pembacaan pada tekanan tolok adalah $1,60 \text{ Mpa}$, barometer lokal terbaca 92 kPa . Berapa tekanan mutlaknya?

1.11. Tinggi kolom manometer air raksa, digunakan untuk mengukur hampa 700 mm , barometer lokal terbaca 95 kPa , berapakah tekanan mutlaknya?

1.12. Tinggi air dalam tangki air tertutup adalah 27 m diatas tanah. Tekanan udara diatas air adalah 96 kPa . Densitas air adalah 1000

kg/m^3 . Hitung tekanan air tepat diatas tanah.

1.13. Lengkapilah tabel dibawah ini

| N/m^2 | si | m | ar | inHg |
|----------------|----|----|----|------|
| 10 | | | | |
| | 10 | | | |
| | | 10 | | |
| | | | 10 | |
| | | | | 10 |

1.14. Pembacaan pada tekanan tolok adalah $2 \cdot 10^2 \text{ psi}$, barometer lokal terbaca 13 psi . Berapa tekanan mutlaknya?

1.15. Tinggi kolom manometer air raksa, digunakan untuk mengukur hampa 28 in , barometer lokal terbaca 14 psi , berapakah tekanan mutlaknya?

1.16. Tinggi air dalam tangki air tertutup adalah 90 ft diatas tanah. Tekanan udara diatas air adalah 14 psi . Densitas air adalah $62,4 \text{ lbm/ft}^3$. Hitung tekanan air tepat diatas tanah.

Suhu

1.17. Lengkapilah tabel berikut

| $^{\circ}\text{C}$ | K | $^{\circ}\text{F}$ | $^{\circ}\text{R}$ |
|--------------------|-----|--------------------|--------------------|
| 50 | | | |
| | 350 | | |
| | | 80 | |
| | | | 760 |

1.18. Tentukan harga suhu benda jika skala Celcius dan skala Fahrenheit menunjukkan harga yang sama.

- 1.19. Suhu T didefinisikan sebagai fungsi linier dari sifat termometris X

$$T = aX + b$$

Jika X adalah panjang kolom cairan dalam termometer gelas yang berisi cairan, pada titik tripel tinggi kolom cairan menunjukkan 5 cm, pada suhu 373 K tinggi kolom cairan adalah 25 cm. Tentukan jarak dalam *cm* antara pembagian $T = 273\text{K}$ dan $T = 373\text{K}$, dan antara $T = 363\text{K}$ dan $T = 373\text{K}$.

- 1.20. Apabila titik hubung yang satu dari termokopel platina-radium dijaga pada titik es dan titik hubung yang lainnya pada suhu t yang diukur dengan termometer air raksa, emf ε yang timbul diantara titik hubung diberikan oleh fungsi kuadrat dari t ,

$$\varepsilon = 1 + \alpha t + \beta t^2$$

Jika ε dalam millivolt dan harga α dan β diberikan oleh:

$$\alpha = 0,2; \beta = -5,0 \times 10^{-4}$$

- (a) Hitung emf pada $t = 700^\circ\text{C}$, 800°C , dan 900°C

- (b). Jika ε diambil sebagai sifat termometrik dan suatu skala suhu t^* didefinisikan oleh persamaan linier,

$$t^* = a\varepsilon + b$$

$t^* = 0$ pada titik es dan $t^* = 100$ pada titik uap. Hitung harga a dan b , rajah grafik ε vs t^*

- 1.21. Tentukan harga suhu benda jika skala Kelvin dan skala Rankine menunjukkan harga yang sama.

Gas Ideal

- 1.22.2 kg-mol gas nitrogen (anggap sebagai gas ideal) mempunyai tekanan 7 kPa pada suhu 25°C . Tentukan:

- (a). Massa gas
(b). Volum jenis gas
(c) Jumlah molekul gas

- 1.23. Mula-mula udara mempunyai tekanan 1 atm, suhu 310°C , dan volum 80 m^3 . Setelah dikompresi secara isothermal volumenya berubah menjadi 5 m^3 . Tentukan

- (a) massa udara
(b) tekanan akhir.

- 1.24. Mula-mula udara mempunyai tekanan 1 atm, suhu 310°C , dan volum 80 m^3 . Kemudian udara didinginkan secara isobarik hingga suhunya turun menjadi 80°C . Tentukan

- (a) massa udara
(b) volum akhirnya.

- 1.25. Sebuah bejana berisi 1 kg gas ideal dan volumenya $0,2\text{ m}^3$ pada tekanan 1 MPa. Tentukan kecepatan purata kuadrat dari molekul.

1.26. 2 lbm-mol gas nitrogen (anggap sebagai gas ideal) mempunyai tekanan 1 psi pada suhu 25°C. Tentukan:

- (a). Massa gas
- (b). Volum jenis gas
- (c) Jumlah molekul gas

1.27. Mula-mula udara mempunyai tekanan 14,7 psi, suhu 310°C, dan volum $3 \times 10^3 \text{ ft}^3$. Setelah dikompresi secara isothermal volumenya berubah menjadi 175 ft^3 . Tentukan

- (a) massa udara
- (b) tekanan akhirnya.

1.28. Mula-mula udara mempunyai tekanan 14,7 psi, suhu 310°C, dan volum $3 \times 10^3 \text{ ft}^3$. Kemudian udara didinginkan secara isobarik hingga suhunya turun menjadi 80°C. Tentukan

- (a) massa udara
- (b) volum akhirnya.

1.29. Sebuah bejana berisi 7×10^{-2} lbm gas ideal dan volumenya 7 ft^3 pada tekanan 145 psi. Tentukan kecepatan

purata kuadrat dari molekul.

Koefisien pemuaian dan ketermampatan

1.29. Persamaan keadaan gas van der Waals dinyatakan oleh

$$pv = RT \left(1 - \frac{b}{v} \right)^{-1} - \frac{a}{v}$$

Buktikan bahwa:

$$(a) \beta = \frac{Rv^2(v-b)}{RTv^3 - 2a(v-b)^2}$$

$$(b) \kappa = \frac{v^2(v-b)}{RTv^3 - 2a(v-b)^2}$$

1.30. Koefisien ketermampatan suatu zat pada tekanan atmosfer adalah $3 \times 10^{-5} \text{ atm}^{-1}$. Tentukan besarnya fraksi perubahan volum bila dikenai tekanan 1100 atm.

1.31. Koefisien ketermampatan suatu zat pada tekanan 14,7 psi adalah $3 \times 10^{-5} \text{ atm}^{-1}$. Tentukan besarnya fraksi perubahan volum bila dikenai tekanan 16170 psi.

BAB II

KALOR, USAHA, DAN HUKUM PERTAMA TERMODINAMIKA

Dalam mekanika, dikenal hukum kekekalan energi yaitu energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan hanya dapat berubah bentuk dari satu kelainnya dan jumlah energi total selalu konstan. Hukum ini terbukti sangat penting dalam memecahkan persoalan mekanika. Dalam termodinamika, akan dibahas perubahan energi mekanis ke kalor dan sebaliknya.

Dalam pokok bahasan ini kita akan mengenalkan hukum kekekalan energi yang berlaku lebih luas daripada yang telah dipaparkan dalam mekanika yang disebut hukum pertama termodinamika. Oleh karena itu hukum pertama termodinamika seringpula disebut hukum kekekalan energi.

Tujuan dari bab ini adalah menjelaskan tentang definisi usaha, energi, dan kalor secara tepat dan menjelaskan bagaimana tiga besaran ini dapat dihubungkan melalui sebuah persamaan yang disebut hukum pertama termodinamika.

Tujuan bab

2.1. USAHA DAN ENERGI MEKANIS

Dalam mekanika, usaha dibutuhkan untuk memindahkan suatu obyek dari satu titik ke titik lainnya.

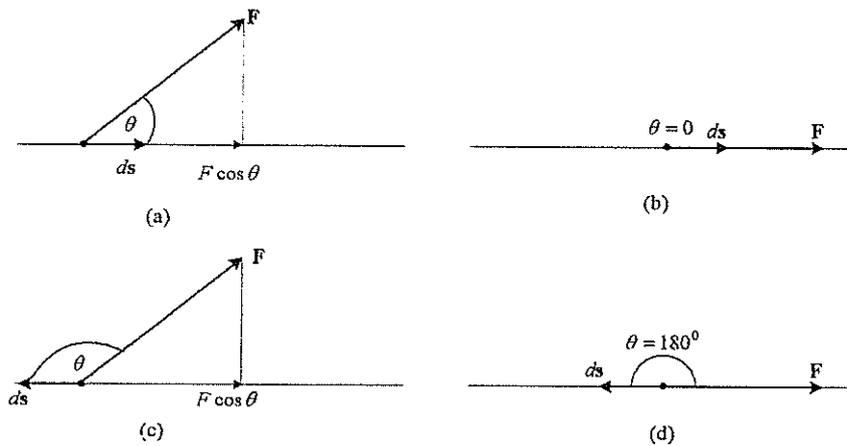
2.1.1. USAHA MEKANIS

Apabila suatu kakas F diberikan kepada sebuah partikel dan menyebabkan partikel tersebut mengalami pergeseran sebesar ds , *usaha mekanis* yang dilakukan oleh kakas tersebut sama dengan:

Usaha mekanis

$$\delta W = F \cdot ds = F \cos \theta ds \quad (2-1)$$

dengan F dan ds besaran skalar dari vektor \mathbf{F} dan ds dan θ adalah sudut antara \mathbf{F} dan ds . Usaha merupakan besaran skalar. Besarnya sudut θ akan mempengaruhi tanda dari usaha, usaha dapat berharga positif atau negatif. Gambar 2-1(a) dan 2-1(b) menunjukkan kakas luar yang



Gambar 2-1. Usaha yang dilakukan oleh kakas \mathbf{F}

bekerja *searah* dengan pergeseran, maka usaha yang dilakukan oleh kakas berharga *positif* dan gambar 2-1(c) dan 2-1(d) menunjukkan kakas luar bekerja *berlawanan* arah dengan pergeseran berarti, maka usaha yang dilakukan oleh kakas berharga *negatif*. Usaha positif berarti usaha dilakukan *pada* sistem. Usaha negatif berarti usaha dilakukan *oleh* sistem.

Gambar 2-1(b) menunjukkan bahwa kakas \mathbf{F} paralel dengan pergeseran ds atau $\theta = 0^\circ$ sehingga $\cos\theta = 1$, maka,

$$\delta W = Fds$$

Sedang Gambar 2-1(d) menunjukkan bahwa kakas \mathbf{F} antiparalel dengan pergeseran ds atau $\theta = 180^\circ$ sehingga $\cos\theta = -1$, maka,

$$\delta W = -Fds$$

Jika $\theta = 90^\circ$, kakas tidak mempunyai komponen dalam arah pergeseran sehingga tidak ada usaha yang dilakukan pada partikel.

*Usaha mekanis
positif
Usaha mekanis
negatif*

Apabila partikel bergerak dari titik 1 ke titik 2, usaha yang dilakukan adalah integral dari persamaan (2-1)

$$W = \int_1^2 F \cdot ds \quad (2-2)$$

Satuan Usaha

Usaha positif berarti usaha dilakukan *pada* sistem dan usaha negatif berarti usaha dilakukan *oleh* sistem. Jadi usaha positif berarti energi meninggalkan sistem dan usaha negatif berarti energi ditambahkan pada sistem. Usaha didefinisikan sebagai perkalian kacas (dalam *newton*) dengan jarak (dalam meter). Satuan usaha dalam satuan SI adalah *joule* (J);

1 Joule = 1 Nm

Dalam sistem teknik, satuan dari kacas adalah *pound-force (lb)* dan satuan panjang adalah *kaki (ft)*. Oleh karena itu satuan usaha dalam sistem ini adalah *ft-lb*. Dalam sistem cgs, satuan usaha adalah *dyne-centimeter (Dcm)* atau *erg*. Dengan menggunakan hubungan antara newton, dyne, erg, pon, meter, centimeter dan kakidiperoleh hubungan

$$1 \text{ joule} = 10^7 \text{ erg} = 0,7376 \text{ pon-kaki}$$

Contoh 2-1.

Sebuah kacas sebesar 1000 N dikenakan pada sebuah balok bermassa 50 kg. Kacas membentuk sudut 60° dengan bidang mendatar positif. Tentukan usaha yang dilakukan oleh kacas agar balok bergeser horisontal sepanjang 60 m.

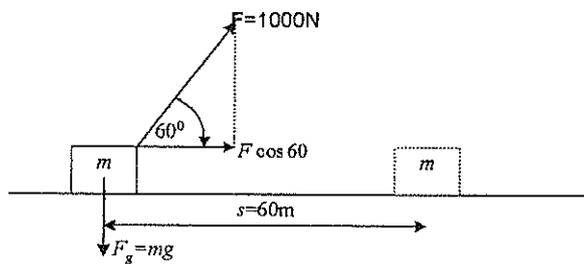
Diketahui:

$$F = 1000 \text{ N} \quad \theta = 60^\circ$$

$$m = 50 \text{ kg} \quad s = 60 \text{ m}$$

Ditanyakan: usaha yang dilakukan oleh kacas agar balok bergeser horisontal sepanjang 60 m

Penyelesaian:



Gambar 2-2. Gambar contoh soal 2-1.

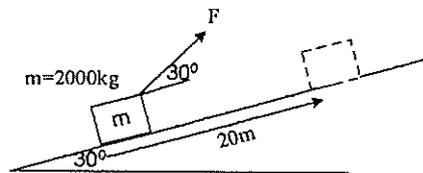
$$W = \int_1^2 F \cos 60 ds$$

$$W = (1000 \cos 60) (60) = 3 \times 10^4 \text{ J} = 30 \text{ kJ}$$

Contoh 2-2.

Sebuah mobil yang terletak pada bidang miring dengan sudut kemiringan 30° (bidang dianggap licin sempurna) didorong keatas dengan kakas F yang membentuk sudut 30° dengan bidang miring dengan laju konstan. Hitung usaha yang dibutuhkan untuk menaikkan mobil sejauh 20 m.

Diketahui: Keadaan sistem ditunjukkan gambar 2-3



Gambar 2-3. Contoh soal 2-2

Ditanyakan: usaha W yang dilakukan untuk menaikkan mobil sampai 20 m

Penyelesaian:

Pertama-tama harus kita cari besarnya kakas F yaitu kakas yang mendorong keatas,

$$F \cos 30^\circ - mg \sin 30^\circ = 0$$

$$F = (2000)(9,80)(0,50)/0,87 = 11264,368 \text{ N}$$

Karena kakas F membentuk sudut 30° dengan pergeseran, usaha yang dilakukan oleh kakas F adalah

$$W = F \cos 30^\circ \times s$$

$$= 11264,368 \times 0,866 \times 20 = 196 \times 10^3 \text{ J} = 196 \text{ kJ}$$

2.1.2. ENERGI MEKANIS.

Penggunaan hukum kedua Newton akan membawa kita pada konsep usaha dan energi kinetik dan pada pengembangan teorema usaha-energi. Tinjauan energi akan diperluas mencakup hukum kekekalan energi mekanis.

Energi kinetik.

Hukum kedua Newton menyatakan:

$$F = ma$$

Kita sulihkan ke pers. (2-2) diperoleh:

$$W = \int_1^2 ma \cdot ds$$

Karena $a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{ds} \frac{ds}{dt}$, sehingga kita peroleh:

$$W = \int_1^2 mv \cdot dv$$

$$W = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \quad (2-3)$$

Setengah kali massa dikalikan benda dikalikan kuadrat lajunya disebut energi kinetik benda atau apabila tenaga kinetik dinyatakan dengan KE ,

$$\boxed{KE = \frac{mv^2}{2}} \quad (2-4)$$

Jika massa benda dan kecepatan sesaat terhadap kerangka acuan tertentu diketahui, besarnya energi kinetik dapat dihitung. Oleh karena itu energi

kinetik merupakan *sifat* dari benda tersebut. Energi kinetik persatuan massa adalah

$$ke = \frac{v^2}{2}$$

Pers. (2-3) dapat kita tuliskan sebagai,

$$\boxed{W_{12} = (KE)_2 - (KE)_1 = \Delta KE} \quad (2-5)$$

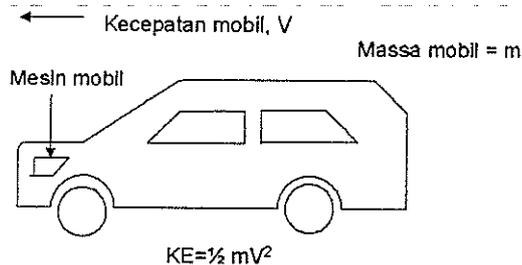
Artinya *usaha yang dilakukan oleh kakas resultan yang bekerja terhadap sebuah partikel sama dengan perubahan energi kinetik partikel itu*. Pernyataan ini disebut *teorema usaha-energi*.

Teorema usaha-energi

Satuan energi kinetik sama dengan satuan usaha, energi kinetik adalah kuantitas skalar. Energi kinetik sekelompok partikel sama dengan jumlah skalar energi kinetik masing-masing partikel anggota kelompok tersebut. Karenanya energi kinetik merupakan *sifat ekstensif*.

Konversi usaha menjadi energi kinetik.

Tinjau sebuah mobil yang bermassa m yang ditunjukkan gambar 2-4. Prinsip dasar untuk menjalankan mobil adalah sebagai berikut, mesin kendaraan mengenakan torsi pada poros keluaran yang menyebabkan poros ini berputar dan menghasilkan usaha. Kemudian usaha ini digunakan untuk menggerakkan roda sehingga mobil dapat berjalan di sepanjang jalan. Disini terjadi perubahan dari usaha mekanis menjadi energi kinetik.

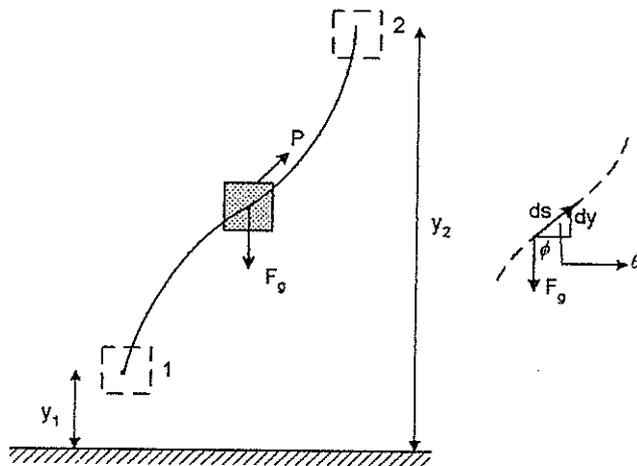


Gambar 2-4 Usaha yang dilakukan oleh mesin digunakan untuk menghasilkan energi kinetik

Energi potensial .

Kakas *konservatif* adalah kakas yang melakukan usaha yang sama ($=W_{12}$) untuk menggerakkan benda pada semua lintasan yang menghubungkan titik 1 dan 2. Gravitasi adalah contoh dari kakas konservatif.

Kakas konservatif



Gambar 2-5. Usaha kakas gravitasi F_g untuk menggerakkan benda dari titik 1 ke titik 2

Umpamakan benda bermassa m digerakkan keatas oleh kakas P dari titik yang berketinggian y_1 ke titik yang berketinggian y_2 , ditunjukkan pada gambar 2-5. Usaha gravitasi yang disebabkan oleh kakas gravitasi adalah :

$$W_{12} = \int_1^2 -mg \cos \phi ds$$

$$W_{12} = mgy_1 - mgy_2 \quad (2-6)$$

Besaran mgy , hasil kali berat mg dengan tinggi y terhadap acuan tertentu disebut *energi potensial PE* **Energi potensial**

$$PE = mgy \quad (2-7)$$

Usaha W yang dilakukan oleh kakas konservatif hanya bergantung pada titik awal dan titik akhir saja, tidak bergantung pada lintasan yang ditempuhnya yang menghubungkan antara titik awal dan titik akhir.

atau dituliskan

$$W_{12} = (PE)_1 - (PE)_2 = -\Delta PE \quad (2-8)$$

Energi potensial persatuan massa dituliskan dengan

$$pe = gy$$

Dengan menyamakan persamaan (2-5) dan persamaan (2-8), kita peroleh:

$$W_{12} = \Delta KE = -\Delta PE \quad (2-9)$$

Artinya apabila hanya ada kakas konservatif yang bekerja, perubahan energi kinetik sistem selalu diikuti oleh perubahan energi potensial yang besarnya sama tetapi berlawanan tanda, sehingga jumlah kedua perubahan sama dengan nol.

$$\Delta KE + \Delta PE = 0 \quad (2-10)$$

atau dapat kita katakan setiap perubahan energi kinetik sistem selalu diimbangi oleh perubahan energi potensial sistem sehingga jumlah tenaga kinetik dan tenaga potensial selalu konstan

$$KE + PE = \text{konstan}$$

Jumlah energi potensial dan energi kinetik didefinisikan sebagai *energi mekanis (ME)*,

$$ME = KE + PE \quad (2-11)$$

Energi mekanis besarnya selalu konstan selama gerak, oleh karena itu persamaan (2-11) sering disebut sebagai *hukum kekekalan energi mekanis* untuk kakas-kakas konservatif.

Energi mekanis

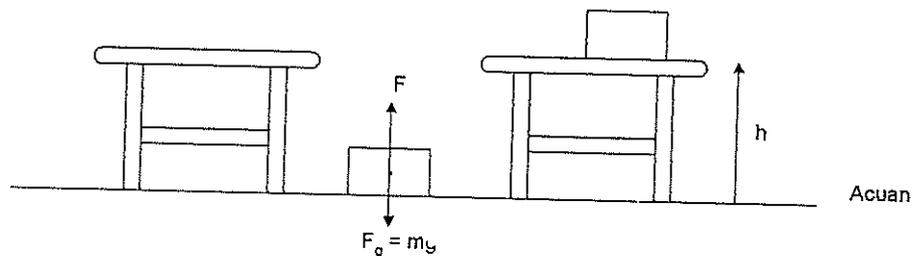
Hukum kekekalan energi mekanis

Satuan energi potensial sama dengan satuan usaha. Hanya dengan mengetahui massa dan ketinggiannya, energi potensial gravitasi dapat dihitung untuk nilai spesifik g maka energi potensial merupakan *sifat* sistem. Tenaga potensial adalah milik benda dan bumi bersama, dipandang sebagai satu sistem benda. Jadi energi potensial merupakan *sifat ekstensif*.

Konversi usaha menjadi energi potensial

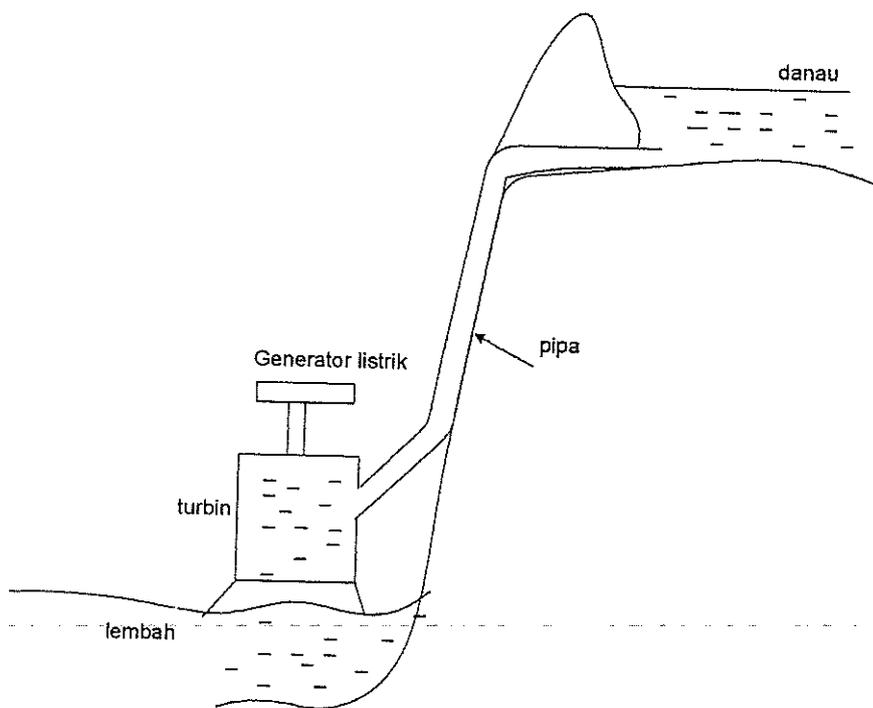
Seseorang mengangkat sebuah balok bermassa m dari lantai dan menempatkan diatas meja pada ketinggian h dari lantai, ditunjukkan

gambar 2-6. Orang tersebut melakukan usaha pada balok sebesar $W = Fx = mgh$ yang disimpan sebagai energi potensial balok $PE = mgh$



Gambar 2-6. Usaha yang dilakukan untuk mengangkat benda disimpan sebagai energi potensial.

Konversi energi potensial menjadi energi kinetik.



Gambar 2-7. Konversi energi potensial menjadi energi kinetik

Gambar 2-7 menunjukkan gambar skematik dari pembangkit listrik tenaga air. Danau yang merupakan sumber air terletak jauh lebih tinggi dari pembangkit listrik. Air mempunyai energi potensial karena ketinggiannya.

Ketika air berjalan turun sepanjang pipa, energi potensial dikonversi menjadi energi kinetik. Energi ini akan dimanfaatkan untuk memutar turbin yang akan menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik

2.2. USAHA UNTUK MENGUBAH VOLUM

Prinsip usaha sangat erat hubungannya dengan proses atau dengan perubahan keadaan dari suatu sistem. Kakas luar yang dikenakan pada suatu sistem hanya dapat melakukan usaha apabila terdapat perpindahan bidang batas sistem. Kakas *luar* adalah kakas yang dikenakan pada sistem oleh lingkungan. Sedangkan kakas yang dikenakan pada bagian-bagian dari suatu sistem oleh bagian-bagian lain dari sistem yang sama disebut kakas *dalam*. Persamaan termodinamika pada umumnya dituliskan dalam bentuk usaha yang disebabkan oleh kakas luar saja. Dalam termodinamika, tanda yang digunakan berkebalikan dengan tanda untuk usaha yang dipakai dalam mekanika. Pemakaian tanda yang berbeda ini dikarenakan pada awal pengembangan ilmu termodinamika problem terbesar dalam terapan praktis adalah menghitung kerja yang dilakukan pada saat uap berekspansi melawan piston dan akan lebih memudahkan apabila kerja yang dilakukan tersebut diberi tanda positif. Apabila kakas *F searah* dengan pergeseran *ds*, usaha adalah *negatif* artinya usaha dilakukan *pada* sistem. Apabila *F berlawanan arah* dengan pergeseran *ds*, usaha adalah *positif* yang berarti usaha dilakukan *oleh* sistem.

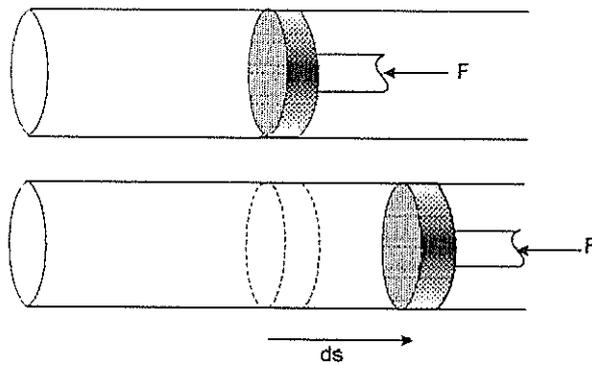
Kakas luar
Kakas dalam

$W > 0$: kerja dilakukan *oleh* sistem

$W < 0$: kerja dilakukan *pada* sistem

Tanda untuk usaha termodinamik

Usaha *bukanlah sifat sistem* karena usaha hanya ada apabila terdapat proses. Oleh karena itu kita menuliskan diferensial usaha sebagai δW bukan dW . Simbol δW menyatakan "sejumlah kecil dari usaha", bukan berarti "suatu perubahan kecil dari besaran W " (W bukanlah *sifat* sistem)



Gambar 2-8 Pemuaian gas

Pemuaian gas

Marilah sekarang kita hitung usaha yang dilakukan oleh sebuah proses termodinamika yang spesifik. Andaikan sebuah silinder dengan luas penampang A seperti yang ditunjukkan pada gambar 2-8 berisi uap (atau gas lain). Silinder dilengkapi dengan piston yang dapat bergerak sehingga sistem dan lingkungannya dapat berinteraksi melalui piston ini. Kita pilih gas sebagai sistem. Mula-mula sistem dalam kesetimbangan dengan lingkungan luar dengan tekanan p . Permukaan batas terdiri dari dinding dalam silinder dan muka sebelah kiri piston. Kakas yang dikenakan pada piston diatur dari luar sehingga piston bergerak sejauh ds kekanan. Tidak ada usaha yang dilakukan oleh kakas yang dikenakan oleh dinding silinder karena dinding silinder tidak bergerak. Gas memuai melawan penghisap, usaha δW yang dilakukan oleh gas untuk menggeserkan piston sejauh jarak kecil ds adalah:

$$\delta W = Fds$$

Tekanan pada piston sama dengan kakas persatuan luas atau

$$F = pA$$

dengan A adalah luas tampang piston, sehingga

$$\delta W = pA ds$$

Diferensial pergeseran ds dapat dinyatakan dalam bentuk perubahan volum,

$$ds = \frac{dV}{A}$$

Sehingga diperoleh:

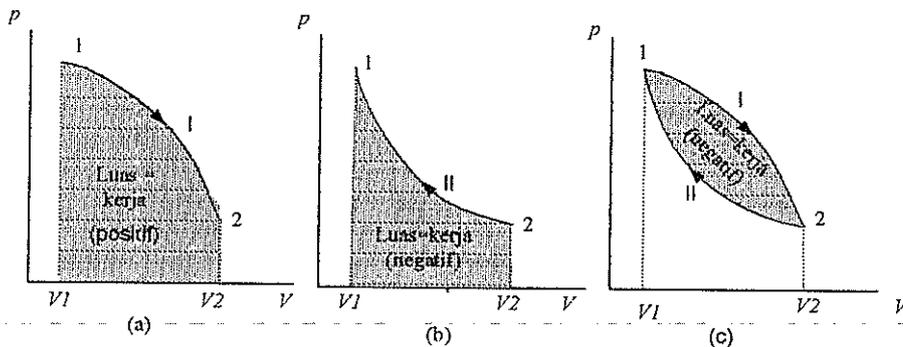
$$\boxed{\delta W = pdV} \quad (2-12)$$

Usaha total W untuk mengubah volum dari V_1 menjadi V_2 , adalah:

$$\boxed{W = \int_1^2 pdV} \quad (2-13)$$

Usaha mengubah volum

Usaha yang dilakukan oleh muka piston terhadap gas adalah positif karena F berlawanan arah dengan pergeseran ds bila piston bergerak searah dengan kakas (dV adalah positif), diilustrasikan oleh gambar 2-8. Namun apabila kita mengambil muka piston sebagai sistem. Usaha dilakukan pada muka piston oleh kakas tekanan gas akan berharga negatif ($W = -\int_1^2 pdV$) karena kakas resultan yang dikenakan oleh gas pada muka piston searah dengan pergeseran ds (dV positif). Jadi dapat kita lihat bahwa tanda pada usaha tergantung pada pemilihan sistem.



Gambar 2-10. (a) Kurva I, pemuaian (b) Kurva II, pemampatan (c) Kerja netto ditunjukkan oleh luas kurva yang diarsir

Persamaan (2-13) menyatakan bahwa dV positif (memuai) akan menghasilkan usaha positif dan jika dV negatif (mampat) menghasilkan usaha negatif. Usaha yang dilakukan oleh sistem dalam perubahan volum

Usaha untuk memuai

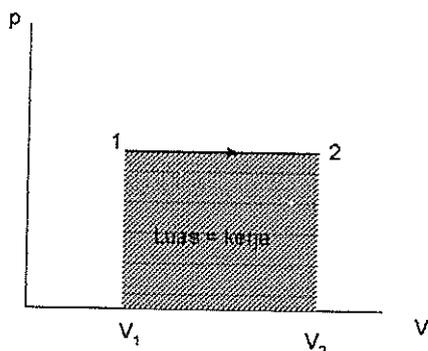
kuasistatik dinyatakan oleh luasan dibawah kurva p versus V . Jika volum bertambah seperti ditunjukkan gambar 2-10(a), usaha adalah positif. Jika volum berkurang, usaha adalah negatif. Gambar 2-10(c) menggambarkan proses siklus kuasistatik, yaitu proses atau gabungan proses yang membawa gas kembali ke keadaan semula. Jadi grafik p vs V merupakan kurva tertutup. Usaha positif dilakukan oleh sistem dari keadaan 1 ke 2, usaha negatif dilakukan pada sistem kembali dari keadaan 2 ke keadaan 1. Usaha neto adalah positif atau usaha dilakukan oleh sistem tersebut.

Jika tekanan p konstan atau pada proses *isobarik*, usaha yang dilakukan:

Proses isobarik

$$W = p(V_2 - V_1) \tag{2-14}$$

Andaikan kita buat grafik p vs V , seperti pada 2-10, maka usaha sama dengan luasan dibawah kurva, dibatasi oleh garis vertikal oleh V_1 dan V_2 .



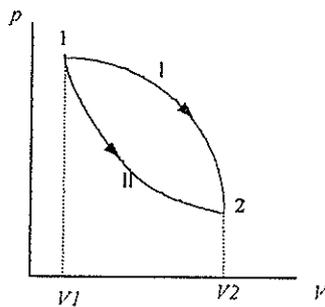
Gambar 2-101 Usaha oleh proses isobaris = luas daerah yang diarsir

Usaha sebagai fungsi lintasan

Sekarang kita tinjau sebuah sistem yang dibawa dari keadaan kesetimbangan awal 1 ke keadaan kesetimbangan akhir 2 melalui dua proses kuasistatik yang berbeda. Kedua proses ini dinyatakan oleh kurva I dan kurva II, ditunjukkan gambar 2-11. Luas dibawah kedua kurva berbeda, oleh karena itu besar usahanya juga berbeda. Dengan kata lain:

$$W = \int_1^2 d'W = \int_1^2 p dV$$

berbeda untuk proses yang berbeda antara dua keadaan yang sama. Usaha tidak dapat dinyatakan sebagai perbedaan antara harga pada keadaan awal dan akhir atau dituliskan:



Gambar 2-11. Kerja sebagai fungsi lintasan

$$W = \int_1^2 d'W \neq W_2 - W_1$$

Batas 1 dan 2 menunjukkan keadaan awal dan akhir dari sistem. Dengan demikian kita tidak mungkin dapat menyebutkan harga tunggal W_1 dan W_2 . Dengan kata lain kita tidak dapat mengatakan “usaha dalam suatu sistem” atau “usaha dari suatu sistem” seperti cara kita mengatakan tekanan dan suhu suatu sistem. Jadi kuantitas δW merupakan diferensial tak eksak atau W bukan sifat dari sistem dan integral δW tidak dapat dinyatakan sebagai perbedaan dua kuantitas yang bergantung hanya pada batas atas dan batas bawah dari lintasan integral. Jadi itu sebabnya kita menuliskan diferensial sebagai δW bukan dW sehingga kita katakan bahwa usaha adalah *fungsi lintasan* yang berarti usaha bergantung pada proses. Hal ini berlawanan dengan *fungsi titik* atau yang menyatakan suatu kuantitas dari suatu sistem seperti tekanan dan suhu.

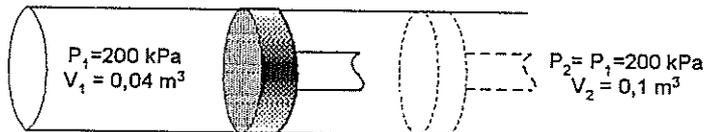
Usaha bukan sifat sistem

Usaha sebagai fungsi lintasan

Contoh 2-3.

Silinder berisi gas dengan tekanan dan volum mula-mula adalah 200 kPa dan 0,04 m³ kemudian volum diperbesar sampai 0,1 m³. Tentukan usaha yang dilakukan selama proses, jika tekanan dijaga konstan.

Diketahui :



Gambar 2-12. Contoh soal 2-4

Ditanyakan : Usaha yang dilakukan melalui proses isobarik.

Jawab:

Keadaan sistem ditunjukkan gambar 2-12. Gas memuai melalui proses isobarik, sehingga usaha W sama dengan

$$\begin{aligned} W &= \int_1^2 p dV = p(V_2 - V_1) \\ &= 2 \cdot 10^5 \text{ Pa} \times (0,1 - 0,004) \text{ m}^3 = 12 \cdot 10^3 \text{ J} = 12 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Contoh 2-4.

Silinder berisi gas dengan tekanan dan volum mula-mula adalah 200 kPa dan 0,04 m³ kemudian volum diperbesar sampai 0,1 m³. Tentukan usaha yang dilakukan selama proses, jika tekanan dijaga konstan.

Penyelesaian:

$$P_1 = 200 \text{ kPa} = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}; \quad V_1 = 0,04 \text{ m}^3; \quad V_2 = 0,1 \text{ m}^3.$$

Proses isobaris,

Karena gas memuai, sehingga usaha W sama dengan

$$\begin{aligned} W &= \int_1^2 p dV = p(V_2 - V_1) \\ &= 2 \cdot 10^5 \text{ Pa} \times (0,1 - 0,004) \text{ m}^3 = 12 \cdot 10^3 \text{ J} = 12 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Contoh 2-5.

Gas memuai melalui hubungan $pV^{1,2} = \text{konstan} = C$. Volum gas mula-mula adalah $0,5 \text{ m}^3$ dan tekanan mula-mula sebesar $5 \times 10^5 \text{ Pa}$. Volum akhir adalah 1 m^3 . Hitung usaha yang dilakukan oleh gas.

$$pV^{1,2} = C$$

$$V_1 = 0,5 \text{ m}^3$$

$$p_1 = 5 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$V_2 = 1 \text{ m}^3$$

Penyelesaian:

Pertama harus kita cari tekanan akhir terlebih dahulu dari persamaan $pV^{1,2} = C$

$$p_1V_1^{1,2} = p_2V_2^{1,2}$$

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{1,2} = \frac{p_2}{p_1}$$

$$\left(\frac{0,5}{1}\right)^{1,2} = \frac{p_2}{5 \cdot 10^5}$$

$$p_2 = 2,18 \times 10^5 \text{ Pa}$$

usaha untuk mengubah volum dari $0,5 \text{ m}^3$ menjadi 1 m^3

$$W = \int_1^2 p dV = \int_1^2 \frac{C}{V^{1,2}} dV = \frac{C}{-0,2} (V^{-0,2}) \Big|_1^2$$

$$W = \frac{p_2V_2 - p_1V_1}{-0,2}$$

$$= \frac{2,18 \cdot 10^5 \cdot 1 - 5 \cdot 10^5 \cdot 0,5}{-0,2} = 1,6 \cdot 10^5 \text{ J}$$

Usaha dalam pemuaian bebas.

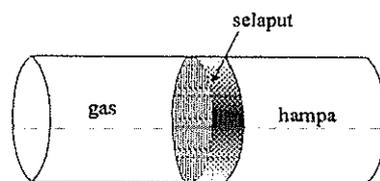
Sebuah proses yang sangat penting dari segi teoritis adalah proses pemuaian (*expansion*) bebas yaitu proses adiabatik tanpa ada usaha yang dilakukan oleh atau pada sistem. Prosesnya dapat dijelaskan sebagai *Pemuaian bebas*

berikut. Gambar 2-13 memperlihatkan sebuah bejana yang dibagi menjadi dua bagian oleh selaput. Bejana diisolasi secara termal. Ruang sebelah kiri selaput diisi gas dan yang sebelah kanan selaput dihampakan. Jika kemudian selaput dilubangi, gas akan memasuki bagian hampa dan memuai secara bebas. Karena bejana diisolasi secara termal, proses yang terjadi merupakan proses adiabatik ($Q = 0$). Berapa besar usaha yang dilakukan dalam proses pemuaian bebas? Proses pemuaian bebas adalah proses tidak kuasistatik, tekanan dan volum selama pemuaian tidak dapat dihubungkan melalui persamaan keadaan. Kita kembali ke definisi semula dari usaha. Usaha dalam proses didefinisikan sebagai usaha total yang dilakukan kaskas luar yang diberikan oleh lingkungan terhadap sistem.

Proses pemuaian bebas adalah proses tidak kuasistatik,

Kita ambil sekarang permukaan batas dari sistem adalah permukaan dalam dari bejana. Permukaan batas akan menerapkan kaskas pada gas tetapi permukaan batas tidak bergerak maka tidak ada usaha yang dilakukan. Jadi kita dapat menyimpulkan bahwa *usaha yang dilakukan pada proses pemuaian bebas adalah nol ($W=0$)*. Menurut hukum pertama termodinamika, untuk $Q = 0$ dan $W = 0$ maka $\Delta U = 0$. Kita dapat mengatakan bahwa dalam proses pemuaian bebas, energi dalam mula-mula dan energi dalam akhir adalah sama. Pada saat memuai tentu saja satu bagian gas melakukan usaha pada bagian lainnya, namun ini merupakan usaha dalam

Usaha pemuaian bebas



Gambar 2-13. Proses pemuaian bebas

2.3. ENERGI SISTEM

Energi termodinamik dapat dipelajari dari konsep usaha adiabatik antara dua keadaan kesetimbangan.

2.3.1. DEFINISI PERUBAHAN ENERGI

Perubahan keadaan kesetimbangan suatu sistem bisa dicapai lewat berbagai proses. Kita pilih sistem yang diisolasi secara termal dari sekelilingnya, jadi prosesnya adalah adiabatik. Banyak lintasan adiabatik yang dapat dialami antara keadaan awal and akhir yang sama. Dari percobaan tidak langsung yang dilakukan ditemukan bahwa usaha adiabatik (W_{ad}) yang dilakukan oleh sistem melalui semua lintasan adiabatik ini adalah sama. Dengan kata lain meskipun usaha merupakan fungsi lintasan yang harganya bergantung pada proses, *usaha yang dilakukan pada proses adiabatik antara dua keadaan bergantung hanya pada keadaan awal dan akhir dan tidak pada prosesnya.*

Usaha adiabatik

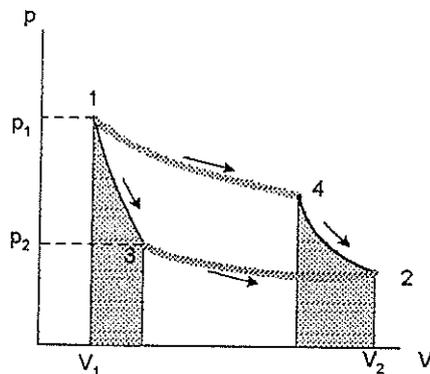
Usaha adiabatik adalah sifat sistem

Sebagai contoh, kita tinjau dua proses adiabatik dari gas yang berubah dari keadaan kesetimbangan 1 ke keadaan kesetimbangan 2, ditunjukkan gambar 2-14. Pada proses pertama, kita tempuh melalui pemuaian adiabatik kuasistatik dari titik 1 ke titik 3, diikuti muaiian bebas adiabatik dari titik 3 ke titik 2. Sedangkan proses lainnya, mula-mula kita bawa melalui proses muaiian bebas adiabatik dari titik 1 ke titik 4, diikuti pemuaian adiabat dari titik 4 ke titik 2. Pemuaian bebas dinyatakan dengan garis-garis silang.

Seperti telah dijelaskan pada subpokok bahasan 2-3, tidak ada usaha yang dilakukan pada proses muaiian bebas. Dalam pemuaian kuasistatik, gas memuai secara perlahan melawan piston, dan usaha yang dilakukan dinyatakan dengan luasan yang diarsir dibawah kurva. Dari percobaan ditemukan bahwa kedua luasan dibawah kurva 1-2 dan kurva 4-2 adalah sama.

Karena untuk sistem tertentu, usaha yang dilakukan adalah sama untuk semua lintasan adiabat antara dua keadaan yang sama, kita dapat mendefinisikan suatu *besaran* yang berubah antara dua keadaan kesetimbangan. Besaran yang berubah ini sama dengan usaha adiabatik.

Jika kita sebut E_1 dan E_2 adalah besaran pada keadaan 1 dan keadaan 2, secara unik berkurangnya besaran ini didefinisikan sebagai



Gambar 2-14. Proses adiabatik antara dua kesetimbangan

$$E_1 - E_2 = W_{ad} \quad (2-15)$$

Jika perubahan keadaan 1 ke keadaan 2 sangat kecil,

$$-dE = \delta W_{ad} \quad (2-16)$$

Besaran yang dinyatakan dengan E disebut **energi** dari sistem. Dan pers. (2-15) mendefinisikan bahwa berkurangnya energi suatu sistem antara dua keadaan kesetimbangan sebagai usaha yang dilakukan oleh sistem pada sebarang proses adiabat antara dua keadaan.

Definisi energi sistem

Pengukuran secara langsung dan teliti untuk membuktikan bahwa usaha secara eksak adalah sama untuk semua proses adiabat diantara dua keadaan kesetimbangan yang sama belum pernah dilakukan. Postulat yang menyatakan bahwa usaha adiabat adalah benar-benar sama untuk semua lintasan adiabat yang menghubungkan dua keadaan disebut **prinsip pertama** atau **hukum pertama termodinamika**. Jika postulat ini benar, perubahan energi dari sistem antara dua keadaan dapat didefinisikan secara unik. Karena energi hanya bergantung pada keadaan awal dan akhir saja, energi merupakan **sifat sistem**.

Hukum pertama termodinamika

Energi adalah sifat sistem

2.3.2. ENERGI DALAM

Pada pers. (2-11), E menyatakan energi total dari sistem. Termasuk energi E adalah kinetik dan energi potensial. Perubahan energi total E suatu sistem dibagi menjadi tiga bagian. Pertama adalah perubahan energi kinetik ($KE_2 - KE_1$). Kedua adalah perubahan energi potensial luar ($PE_2 - PE_1$). Perubahan semua energi yang lain dimasukkan dalam bagian ketiga yang disebut perubahan energi dalam dari sistem. Energi dalam dinyatakan dalam simbol U dan perubahan pada sebarang proses adalah $U_2 - U_1$, oleh karena itu kita tuliskan:

$$(E_2 - E_1) = (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) + (U_2 - U_1) \quad (2-17)$$

Energi dalam

Perubahan energi sistem

Atau dapat dituliskan dalam bentuk

$$\Delta E = \Delta KE + \Delta PE + \Delta U$$

Perubahan tenaga dalam adalah

$$\Delta U = \Delta E - \Delta KE - \Delta PE$$

Energi kinetik dan energi potensial luar dari sistem bergantung koordinat mekanik, seperti posisi, kecepatan dari pusat gravitas. Energi dalam adalah bagian dari energi total yang hanya bergantung pada keadaan dalam sistem, yang disebut koordinat termodinamika.

Perubahan energi dalam hanya bergantung pada keadaan awal dan akhir juga. Jadi energi dalam adalah *sifat* dari suatu sistem.

Energi dalam adalah sifat sistem

2.4. KALOR DAN PERPINDAHAN KALOR

Dalam fisika dasar, konsep kalor biasanya diawali dengan percobaan menggunakan kalorimeter. Bila dua zat dengan suhu berbeda disentuh dalam kalorimeter, suhu keduanya akan mendekati sama dan akhirnya menjadi sama. Fenomena ini dapat dijelaskan bahwa ada perpindahan kalor keluar dari benda bersuhu lebih tinggi masuk ke benda bersuhu lebih rendah dengan jumlah kalor yang keluar dan masuk adalah sama.

2.4.1. KALOR.

Sampai pada abad ke sembilan belas orang percaya bahwa *kalorik* adalah suatu *zat* bahan (*material substance*) yang terdapat pada setiap benda dan setiap benda yang bersuhu lebih tinggi mempunyai kalorik yang lebih banyak daripada benda lainnya yang bersuhu lebih rendah. Bila dua benda mempunyai suhu yang berbeda disentuh, benda yang kaya akan kalorik akan memberikan sebagian kaloriknya kepada benda yang kurang kaloriknya akhirnya kedua benda tersebut akan mempunyai suhu yang sama. Akan tetapi konsep kalor sebagai sebuah zat yang jumlah seluruhnya tetap konstan tidak mendapat dukungan eksperimen. Namun demikian kita masih dapat menjelaskan bahwa ada “sesuatu” yang berpindah dari benda yang bersuhu lebih tinggi ke benda yang bersuhu lebih rendah. Sesuatu ini disebut *kalor*. Jadi dapat kita definisikan, kalor adalah *sesuatu yang dipindahkan dari sistem ke sekelilingnya akibat perbedaan suhu*. Berkat penelitian yang dilakukan oleh Rumford dan Joule ditemukan bahwa kalor adalah sebuah bentuk energi bukan sebuah zat.

Kalorik

Definisi kalor

Perjanjian tanda

Jumlah energi yang dipindahkan dari sistem ke lingkungannya akibat perbedaan suhu ini diberi simbol Q . Perpindahan kalor masuk ke dalam sistem atau dikatakan sistem menyerap kalor diberi tanda *positif*. Sedangkan perpindahan kalor keluar sistem atau dikatakan sistem melepas/membuang kalor diberi tanda *negatif*.

Tanda untuk kalor

$Q > 0$, sistem menyerap kalor

$Q < 0$, sistem melepas kalor

Penggunaan anak panah untuk menggambarkan perpindahan energi secara skematis dalam suatu sistem akan sangat membantu. Arah anak panah menyatakan arah perpindahan kalor dan kerja, energi ditambahkan/diambil ke/dari sistem.

Perjanjian tanda untuk perpindahan kalor adalah *berkebalikan* dengan tanda yang digunakan untuk kerja. Q negatif dan W positif menyatakan kalor dan kerja *keluar* dari sistem menuju lingkungan.

Satuan Kalor

Satuan kalor didefinisikan dalam bentuk perubahan suhu dari massa air yang ditentukan. 60° BTU didefinisikan sebagai jumlah panas yang mengalir pada 1 *lbm* air jika pada tekanan 1 atm suhu bertambah dari $59,5^{\circ}F$ ke $60,5^{\circ}F$, selanjutnya ditulis BTU saja. Sedang 15° kalori didefinisikan sebagai jumlah panas yang mengalir pada 1 *gram* air jika pada tekanan 1 atm suhu bertambah dari $14,5^{\circ}C$ ke $15,5^{\circ}C$ dan ditulis *kalori* saja.

Kalori
BTU

Kalor dapat disebabkan aliran kalor keluar dari suatu benda sebarang jika usaha mekanis dilakukan pada benda tersebut dan diubah menjadi kalor oleh gesekan. *Tara kalor mekanis* didefinisikan sebagai perbandingan usaha yang dinyatakan dalam satuan mekanik *ft-lb* atau *joule*, terhadap kalor yang dinyatakan dalam *Btu* atau *kalori*.

Tara kalor mekanis

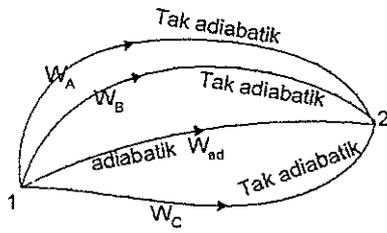
Kuantitas kalor

Kita akan menggunakan cara yang lebih modern untuk menunjukkan bagaimana kalor didefinisikan dalam bentuk usaha. Untuk melakukan ini, anggap semua lintasan diantara sepasang keadaan kesetimbangan dari sistem (kesetimbangan awal pada titik 1 dan kesetimbangan akhir pada titik 2) adalah *tidak* adiabatik, ditunjukkan gambar 2-15. Dalam proses ini, sistem tidak diisolasi secara termal tetapi sistem yang ditinjau disentuh dengan satu atau lebih sistem yang mempunyai suhu yang berbeda. Ternyata usaha yang dilakukan untuk semua lintasan (kecuali dalam keadaan khusus) berbeda dan berbeda pula dengan usaha adiabatik yang dilakukan diantara dua keadaan yang sama.

$$W_A \neq W_B \neq W_C \neq W_{ad}$$

* hasil operasi antara British System dan metrik
SI unit

$$60^{\circ}F = (60 - 32) \times \frac{5}{9} = 15^{\circ}C$$



Gambar 2-15. Usaha untuk proses adiabatik dan tak adiabatik

W_A , W_B , dan W_C adalah usaha dalam proses tak adiabatik dan W_{ad} adalah usaha adiabatik antara dua keadaan yang sama. Karena titik awal dan titik akhir semua proses adalah sama, sistem akan mengalami perubahan energi yang sama untuk masing-masing proses. Jika W menyatakan kerja untuk proses tidak adiabatik, kita definisikan kuantitas kalor Q yang mengalir ke dalam sistem dalam proses tak adiabatik adalah sebanding dengan perbedaan antara usaha adiabatik W_{ad} dan usaha W atau dapat dikatakan kalor sama dengan selisih antara kedua usaha dikalikan dengan tetapan kesebandingan. Dalam notasi termodinamika, kita tuliskan tetapan kesebandingan ini sebagai $1/J$. Maka kalor didefinisikan sebagai:

$$Q = \frac{1}{J}(W - W_{ad}) \quad (2-18)$$

2.4.2. CARA PERPINDAHAN KALOR

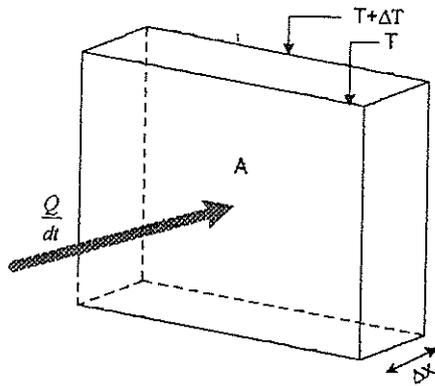
Terdapat tiga cara perpindahan kalor yaitu hantaran, konveksi, dan radiasi. Perpindahan kalor yang terjadi karena perbedaan suhu disebut hantaran kalor. Pada umumnya konduktor listrik yang baik juga konduktor kalor yang baik pula.

Hantaran (konduksi).

Kita tinjau sebuah lempeng bahan yang mempunyai luas A dengan ketebalan Δx , yang kedua permukaannya mempunyai suhu berbeda, ditunjukkan gambar 2-16. Kalor Q yang mengalir tegak lurus permukaan dalam waktu Δt , dari percobaan ditunjukkan bahwa

konduksi

Hantaran



Gambar 2-16. Perpindahan kalor melalui hantaran

$$\frac{Q}{\Delta t} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2-19)$$

Apabila k adalah tetapan perbandingan yang disebut *konduktivitas termal*, banyaknya perpindahan kalor persatuan waktu melalui permukaan luas A adalah:

Konduktivitas termal

$$q_x = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2-20)$$

Untuk ketebalan lempeng yang sangat tipis dengan perbedaan suhu yang sangat kecil dT , kita dapatkan hukum hantaran kalor fundamental yang kita sebut pula hukum Fourier, pers. (2-20) menjadi:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2-21)$$

$\frac{dT}{dx}$ disebut *gradien suhu*. Tanda minus artinya kalor harus mengalir dari

suhu tinggi ke suhu rendah yaitu q_x adalah positif bila $\frac{dT}{dx}$ adalah negatif.

Gradien suhu

Satuan k adalah $W/m^{\circ}C$ atau $Btu/h\ ft^{\circ}F$. Tabel 2-1 memperlihatkan nilai k untuk berbagai macam bahan.

Kita akan meninjau gabungan dua lempeng tipis dari bahan yang dengan ketebalan masing-masing L_1 dan L_2 . Konduktivitas masing-masing

Perpindahan kalor melalui dua lempeng tipis

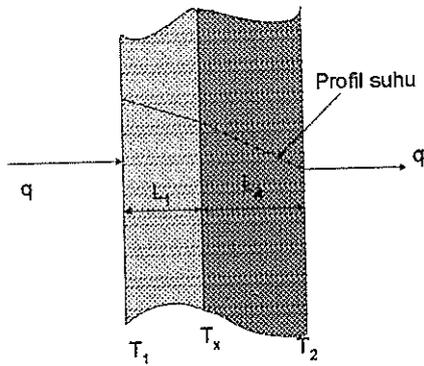
bahan adalah k_1 dan k_2 , seperti ditunjukkan gambar 2-17. Hnaturan kalor yang melalui lempeng 1 dan lempeng 2 adalah

$$q_1 = k_1 A \frac{T_1 - T_x}{L_1}$$

$$q_2 = k_2 A \frac{T_x - T_2}{L_2}$$

Tabel 2-1. Harga k untuk berbagai macam zat pada 0°C

| Bahan | Konduktivitas Termal, k | |
|----------------------------------|---------------------------|--|
| | W/m°C ($\frac{J}{s}$) | Btu/h ft°F ($\frac{Btu}{h \cdot ft \cdot ^\circ F}$) |
| Logam | | |
| Perak (murni) | 410 | 237 |
| Perunggu (murni) | 385 | 223 |
| Aluminium (murni) | 202 | 117 |
| Nikel (murni) | 93 | 54 |
| Besi (murni) | 73 | 42 |
| Baja karbon, 1%C | 43 | 25 |
| Timah (murni) | 35 | 20,3 |
| Baja chrome-nikel(18% Cr, 8% Ni) | 16,3 | 9,4 |
| Padatan bukan logam | | |
| Kuarsa | 41,6 | 24 |
| Magnesit | 4,15 | 2,4 |
| Marmer | 2,08-2,94 | 1,2 - 1,7 |
| Batu pasir | 1,83 | 1,06 |
| Kaca, jendela | 0,78 | 0,45 |
| Kayu oak | 0,17 | 0,096 |
| Serbuk gergaji | 0,059 | 0,034 |
| Glass wool | 0,038 | 0,022 |
| Cairan | | |
| Merkuri | 8,21 | 4,74 |
| Air | 0,556 | 0,327 |
| Amoniak | 0,540 | 0,312 |
| SAE 50 | 0,147 | 0,085 |
| Freon 12 | 0,073 | 0,042 |
| Gas | | |
| Hidrogen | 0,175 | 0,101 |
| Helium | 0,141 | 0,081 |
| Udara | 0,024 | 0,0139 |
| Uap air (dijenuhkan) | 0,0206 | 0,0119 |
| Karbon diokasida | 0,0146 | 0,00844 |



Gambar 2-17. Perpindahan kalor melalui dua lempeng bahan yang berbeda satu dimensi

Didalam keadaan tunak $q = q_1 = q_2$ atau

$$q = k_1 A \frac{T_1 - T_x}{L_1} = k_2 A \frac{T_x - T_2}{L_2}$$

Atau

$$q = \frac{A(T_1 - T_2)}{(L_1/k_1) + (L_2/k_2)} \quad (2-22)$$

Secara umum untuk sebarang banyaknya bagian yang disusun seri, perpindahan kalor adalah

$$q = \frac{A(T_1 - T_2)}{\sum (L_i/k_i)} \quad (2-23)$$

Contoh 2-6

Batang logam yang terbuat dari aluminium dengan panjang 20 cm dan luas penampang 2 cm^2 dengan suhu $T_1 = 10^\circ\text{C}$ dan $T_2 = 100^\circ\text{C}$ ditunjukkan gambar 2-17. Hitung

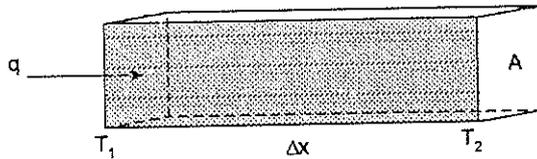
- Gradien suhu
- Kalor yang mengalir persatuan waktu

Diketahui

$$\Delta x = 20 \text{ cm} = 20 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$A = 2 \text{ cm}^2 = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$T_1 = 10^\circ\text{C}, T_2 = 100^\circ\text{C}$$



Gambar 2-18. Contoh soal 2-4

$$k = 202 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Penyelesaian

(a) Besarnya gradien suhu

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{100 - 10}{20 \times 10^{-2}} = 450^\circ\text{C/m} \approx 4,5^\circ\text{C/cm}$$

(b) Perpindahan kalor dengan cara hantaran

$$q = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} = 202 \times (2 \times 10^{-4}) \times \frac{100 - 10}{20 \times 10^{-2}} = 18,18 \text{ J}$$

Perpindahan kalor
ada 3 macam
1. Konveksi
2. Radiasi
3. Konduksi → ~~Dipilih~~

Konveksi.

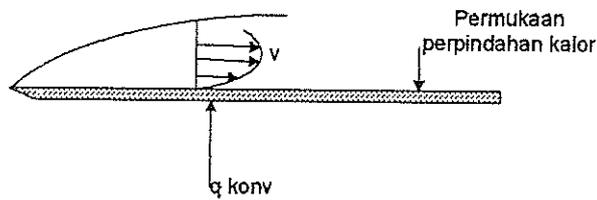
Konveksi adalah perpindahan kalor akibat pergerakan zat alir yang dipanaskan pada permukaannya. Energi (atau kalor) yang dipindahkan bergantung pada laju dari aliran zat alir pembawa kalor. Untuk aliran malar, kecepatan lapisan zat alir dekat permukaan perpindahan kalor adalah nol, ditunjukkan gambar 2-19.

Terdapat tiga jenis utama perpindahan kalor dengan cara konveksi:

1. Konveksi yang dipaksa adalah jika zat alir yang dipanaskan dipaksa bergerak dengan alat peniup atau pompa seperti gambar 2-19

Konveksi

Tiga jenis
perpindahan kalor
dengan cara
konveksi



Gambar 2-19. Perpindahan kalor konveksi

2. Konveksi alamiah adalah konveksi dimana zat alir mengalir akibat perbedaan rapat massa seperti gambar 2-20
3. Konveksi perubahan fase seperti yang diamati pada fenomena penguapan atau pengembunan. Mekanisme proses ini sangat rumit.

Teori matematika konveksi kalor sangat ruwet sekali. Tidak ada persamaan sederhana untuk menyelesaikan arus konveksi seperti arus konduksi. Hal ini disebabkan karena kalor yang diperoleh atau dilepaskan dari permukaan yang berhubungan pada suatu suhu dengan zat alir yang bersuhu lain bergantung pada berbagai keadaan, misalnya saja (a) bentuk permukaan : mendatar atau melengkung (b) posisi permukaan : horisontal atau vertikal (c) jenis zat alir : gas atau cairan (d) sifat zat : rapat massa, viskositas, kalor jenis, dan konduktivitas termal (e) jenis aliran : laminar atau turbulen.

Prosedur yang ditempuh dalam perhitungan praktek adalah:

$$q_{konv} = hA(T_{permk} - T_{zalir}) \quad (2-24)$$

h adalah arus konveksi kalor, A adalah luas permukaan untuk perpindahan kalor konveksi. Satuan dari h adalah W/m^2 . Persamaan (2-24) sering disebut ***hukum Newton tentang pendinginan***.

Arus konveksi

Hukum Newton tentang pendinginan

Perpindahan kalor konveksi bergantung pada perilaku sistem aliran yang dikarakterisasi oleh bilangan Reynold untuk konveksi paksa dan bilangan Grashof untuk konveksi bebas. Cara zat alir mengalir dibedakan menjadi dua yaitu aliran laminar dan turbulen. Dari percobaan menunjukkan bahwa ada kombinasi empat faktor yang menentukan aliran zat alir bersifat laminar atau turbulen

Bilangan Reynold
Bilangan Grashof

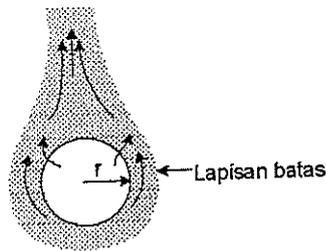
Aliran laminar
Aliran turbulen

Bilangan Reynold dan bilangan Grashof adalah besaran tak berdimensi yang dinyatakan oleh:

Untuk konveksi paksa

$$Nu = f(Re, Pr, Ma)$$

Nu adalah bilangan Nusselt, Pr adalah bilangan Prandtl, Re adalah bilangan Reynolds, Ma adalah bilangan Mach.



Gambar 2-20. Konveksi bebas dari sebuah silinder yang horisontal. Zat alir hangat naik karena perbedaan rapat massa

Bila kecepatan zat alir mengalir adalah rendah, pengaruh bilangan Mach dapat diabaikan, sehingga:

$$Nu = f(Pr, Re)$$

Untuk konveksi bebas

$$Nu = f(Gr, Pr)$$

Tabel 2-2, tabel 2-3, dan tabel 2-4 menunjukkan hubungan dari parameter-parameter tersebut.

Tabel 2-2. Bilangan tak berdimensi yang digunakan dalam perpindahan kalor

| konveksi | | |
|------------------|---------|--|
| Nama | Lambang | Hubungan |
| Bilangan Grashof | Gr | $Gr_x = \frac{g\beta\rho^2(T_w - T_\infty)x^3}{\mu^2}$ $Gr_L = \text{sama dengan } x = L$ $Gr_d = \frac{g\beta\rho^2(T_w - T_\infty)d^3}{\mu^2}$ |

| | | |
|---------------------------------|-----------------|---|
| Bilangan Nusselt | Nu | $Nu_x = \frac{h_x x}{k}$ |
| | | $Nu_d = \frac{hd}{k}$ |
| Bilangan Nusslet purata | \overline{Nu} | $\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}L}{k}$ |
| | | $\overline{Nu}_d = \frac{\overline{h}d}{k}$ |
| Bilangan Reynold | Re | $Re_x = \frac{\rho u_\infty x}{\mu} = \frac{u_\infty x}{\nu}$ |
| Untuk aliran diatas pelat datar | | $Re_L = \frac{\rho u_\infty L}{\mu} = \frac{u_\infty L}{\nu}$ |
| Untuk aliran melintas silinder | | $Re_d = \frac{\rho u_\infty d}{\mu} = \frac{u_\infty d}{\nu}$ |
| Untuk aliran pipa | | $Re_d = \frac{\rho u_\infty d}{\mu} = \frac{u_\infty d}{\nu}$ |
| Bilangan Prandtl | Pr | $Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha}$ |

Tabel 2-3.

| Lambang | Arti | Satuan |
|----------------------------------|--|---|
| A | Luas permukaan untuk perpindahan kalor | m ² , ft ² |
| A _c | Luas tampang lintang aliran dalam pipa | m ² , ft ² |
| d | Diameter silinder atau pipa | M, ft |
| g | Percepatan gravitasi | m/dt ² , ft/dt ² |
| h _x | Koefisien perpindahan kalor lokal pada jarak x dari ujung pelat | W/m ² °C, Btu/h ft ² °F |
| \overline{h} | Koefisien perpindahan kalor purata diatas seluruh pelat atau silinder, atau didalam pipa | W/m ² °C, Btu/h ft ² °F |
| k | Konduktivitas termal | W/m °C, Btu/h ft ² °F |
| L | Panjang pelat datar | m, ft |
| \dot{m} | Laju aliran massa | kg/dt, lbm/dt |
| T _b | Suhu bulk dalam aliran pipa | °C, °F |
| \overline{T}_b | Suhu bulk purata dalam aliran pipa | °C, °F |
| $T_f = \frac{T_\infty - T_w}{2}$ | Suhu film | |
| T _∞ | Suhu arus bebas | °C, °F |
| T _w | Suhu permukaan atau dinding | °C, °F |

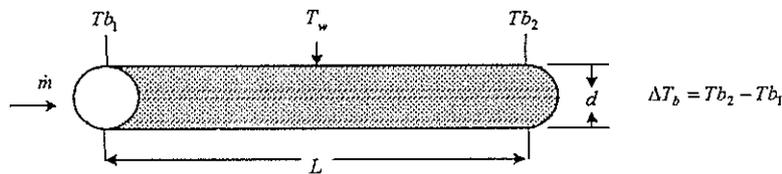
| | | |
|--|---|-------------------------|
| u_∞ | Kecepatan arus bebas melintas pelat atau silinder | m/dt, ft/dt |
| u_m | Kecepatan aliran purata dalam pipa | m/dt, ft/dt |
| x | Jarak dari ujung pelat | m, ft |
| $\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$ | Koefisien muai volum | $K^{-1}, ^\circ R^{-1}$ |
| μ | Kecepatan dinamik | m/dt, ft/dt |
| $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ | Viskositas kinematika | $m^2/dt, ft^2/dt$ |
| ρ | densitas | $kg/m^3, lbm/ft^3$ |

Tabel 2-4. Korelasi perpindahan kalor konveksi untuk konveksi paksa.

Aliran dalam pipa

Perpindahan kalor konveksi dalam pipa dinyatakan oleh:

$$q = \bar{h}A(T_w - \bar{T}_b) = \dot{m}c_p T_b$$



Aliran laminar,

$$Re_d = \frac{\rho \mu_\infty d}{\mu} < 2000 \quad \frac{L/d}{Re_d Pr} > 0,05$$

$$\overline{Nu}_d = 4,364 \quad \text{untuk fluks kalor dinding konstan}$$

$$\overline{Nu}_d = 3,66 \quad \text{untuk suhu dinding konstan}$$

Aliran turbulen,

$$Re_d = \frac{\rho \mu_\infty d}{\mu} > 2000$$

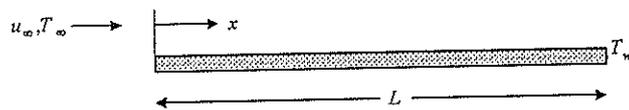
$$Nu_d = 0,023 Re_d^{0,8} Pr^n$$

$n = 0,4$ untuk pemanasan

$n = 0,3$ untuk pendinginan

Aliran diatas pelat datar, suhu dinding konstan

$$q = \bar{h}A(T_w - T_\infty)$$



Aliran laminar

$$Re_L < 5 \times 10^5$$

$$Nu_x = 0,332 Re_x^{0,5} Pr$$

$$\bar{Nu}_L = 0,664 Re_L^{0,5} Pr$$

Aliran turbulen,

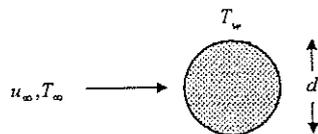
$$Re_L > 5 \times 10^5$$

$$Nu_x = 0,0296 Re_x^{0,8} Pr^{1/3}$$

$$\bar{Nu}_L = (0,664 Re_L^{0,8} - 850) Pr^{1/3}$$

Aliran melintasi silinder dengan suhu dinding konstan

$$q = \bar{h}A(T_w - T_\infty)$$



$$\bar{Nu}_d = C Re_d^n Pr^{1/3}$$

| Re_d | C | n |
|----------------|--------|-------|
| 0,4 - 4 | 0,989 | 0,330 |
| 4 - 40 | 0,911 | 0,385 |
| 40 - 4000 | 0,683 | 0,466 |
| 4000 - 40000 | 0,193 | 0,618 |
| 40000 - 400000 | 0,0266 | 0,805 |

Aliran melintasi bola dengan suhu dinding konstan

$$\text{Gas : } \overline{Nu}_d = 0,37 Re_d^{0,6}$$

$$\text{Air dan minyak : } \overline{Nu}_d = (1,2 + 0,53 Re_d^{0,54}) Pr^{0,3}$$

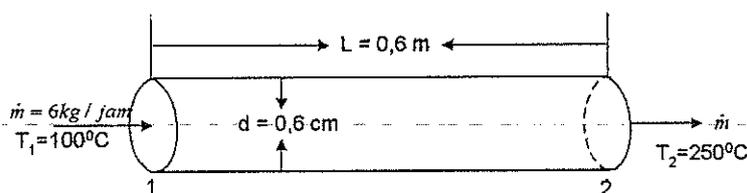
Tatacara menghitung perpindahan kalor konveksi

1. Tentukan apakah perpindahan kalor merupakan konveksi paksa atau konveksi bebas
2. Tentukan geometrinya
3. Tentukan daerah aliran dengan menghitung bilangan Reynold bila konveksi paksa dan bilangan Prandtl bila konveksi bebas. Kemudian hitung bilangan Nu, pilih persamaan yang sesuai pada tabel 2-3 dan tabel 2-4,
4. Kemudian hitung h dari nilai bilangan Nu
5. Jika diperlukan, hitung laju perpindahan kalor q

Contoh 2-7

Udara mengalir melalui sebuah silinder berdiameter 0,6 cm dengan debit 6 kg/jam yang dipanaskan secara listrik. Panjang tabung adalah 0,6 m dan aliran masuk dengan suhu 100°C dan suhu aliran keluar adalah 254°C . Disipasi daya sebesar 257,69 W. Hitung suhu dinding silinder

Diketahui :



Gambar 2-21. Contoh soal 2-5

Ditanyakan : T_{dinding}

Penyelesaian:

Dari tabel 2-4, laju perpindahan kalor adalah

$$q = hA(T_w - T_2)$$

Fluks kalor

$$q' = \frac{q}{A} = h(T_w - T_2)$$

Suhu zat alir purata

$$\bar{T}_b = 177^\circ C = 450 K$$

Sifat-sifat udara pada suhu 450 K

$$\mu = 2,484 \times 10^{-5} \text{ kg/m dt}$$

$$k = 0,03707 \text{ W/m K}$$

$$Pr = 0,683$$

Bilangan Reynold

$$\begin{aligned} Re_d &= \frac{\rho u_\infty d}{\mu} = \frac{\dot{m}d}{A\mu} \\ &= \frac{6 \times (6 \times 10^{-3})}{3600 \times \pi \times (0,5 \times 6 \times 10^{-3})^2 \times (2,484 \times 10^{-5})} = 14245 \end{aligned}$$

Re_d jauh lebih besar dari 2000, jadi alirannya adalah turbulen, maka bilangan Nusselt akan sama dengan

$$\begin{aligned} Nu_d &= 0,023 Re_d^{0,8} Pr^{0,4} \\ &= 0,023 \times 14245^{0,8} \times 0,683^{0,4} \\ &= 41,54 \end{aligned}$$

Untuk menghitung h , $Nu_d = \frac{hd}{k}$

$$h = Nu_d \frac{k}{d} = 41,54 \frac{0,03707}{0,006} = 256,62 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ C$$

Fluks kalor

$$q' = \frac{q}{A} = \frac{q}{\pi dl} = \frac{257,69}{\pi \times 0,006 \times 0,6} = 22796 \text{ W/m}^2$$

Suhu dinding silinder maksimum dapat dicari dari $q' = \frac{q}{A} = \bar{h}(T_w - T_2)$

$$T_w = \frac{q'}{h} + T_2 = \frac{22796}{256,62} + 254 = 342,83^\circ C$$

Radiasi → nyala kembang radiasinya lebih besar dr yang nyalanya kembang :

Perpindahan kalor akibat pancaran dari permukaan benda. Apabila kita mendekatkan tangan kita pada permukaan radiator air panas, kita akan merasakan panas di tangan kita artinya ada perpindahan kalor konveksi. Apabila tangan kita sentuhkan pada permukaan, kita merasakan panas karena adanya perpindahan kalor konduksi. Namun apabila tangan kita, kita tempatkan pada samping radiator tanpa menyentuhnya tetapi tangan kita masih merasakan panas, memang ada arus konduksi lewat udara namun kecil sekali dan tangan kita tidak ada pada jalan arus konveksi, cara kalor berpindah seperti ini disebut **radiasi**. Energi yang dipancarkan dengan cara radiasi disebut **energi radian**.

Contoh kalium Pembakaran minyak lebih besar dr gas

Radiasi
Energi radian

Pengukuran eksperimental banyaknya energi radian yang dipancarkan dari permukaan sebuah benda oleh Stefan-Boltzman ditetapkan sebesar

$$\frac{q}{A} = e\sigma T^4 \quad (2-25)$$

q/A disebut **emitansi radian** sama banyaknya energi radian yang dipancarkan persatuan luas. σ adalah faktor perbandingan yang disebut sebagai **tetapan Boltzman** dan mempunyai harga :

Emitansi radian

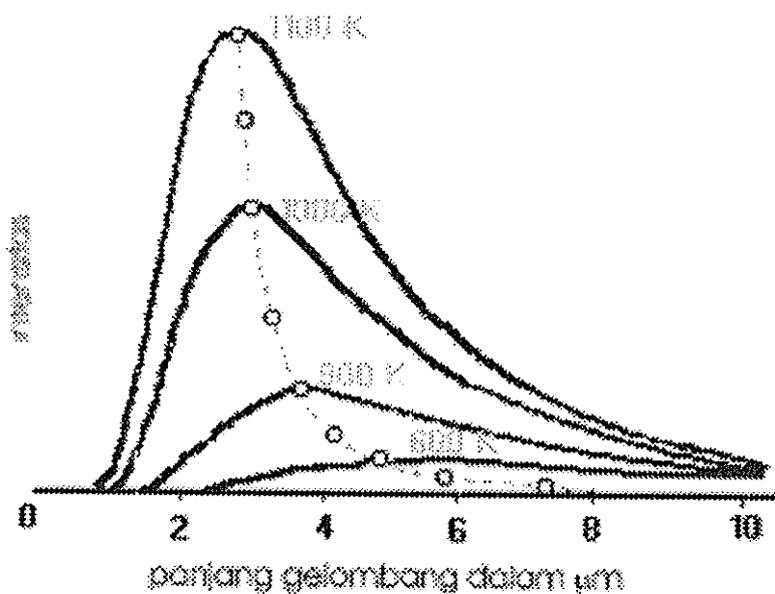
Tetapan Boltzman

$$\begin{aligned} \sigma &= 5,6699 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 \\ &= 0,1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/h ft}^2 \text{ R}^4 \end{aligned}$$

e adalah daya pancar (emisivitas) permukaan yang nilainya antara nol sampai satu. Pemancar yang terbaik adalah permukaan yang menyerap terbaik. Namun tak ada permukaan yang dapat menyerap semua energi yang datang padanya. Permukaan yang dapat menyerap seluruh energi yang datang padanya tidak memantulkan energi radian, oleh karena itu warnanya nampak hitam. Permukaan yang dapat menyerap seluruh energi

Benda hitam

yang datang padanya disebut permukaan hitam sempurna dan benda yang permukaannya seperti ini disebut *benda hitam sempurna (blackbody)* atau *radiator sempurna* atau *benda hitam* saja. Nilai e untuk benda hitam adalah satu. Gambar 2-22 memperlihatkan beberapa kurva Planck untuk benda-benda hitam Intensitas adalah dalam satuan energi persatuan luas persatuan sudut pada persatuan waktu persatuan interval panjang gelombang. Garis patah-patah mengilustrasikan variasi dari panjang gelombang suhu dari puncak-puncak kurva (gambar diadaptasi dari www.buythermocouple.com)



Gambar 2-22 Beberapa kurva Planck untuk benda-benda hitam

Contoh 2-8.

Tentukan emitasi radian dari sebuah benda hitam sempurna pada suhu 37°C .

Diketahui $T = 37^{\circ}\text{C} = 310\text{ K}$

Ditanyakan : q/A

Penyelesaian :

Untuk benda hitam sempurna $e = 1$

Emitansi radian dapat dihtiung dari

$$\frac{q}{A} = e\sigma T^4 = 1 \times 5,6699 \times 10^{-8} \times 310^4$$

$$= 523,63 \text{ W/m}^2$$

2.5. HUKUM PERTAMA TERMODINAMIKA

Dengan menggantikan $-W_{ad}$ dengan $E_2 - E_1$, kita peroleh:

$$E_2 - E_1 = JQ - W \quad (2-26)$$

Kekkekalan energi

JQ dan W keduanya dapat dinyatakan dalam bentuk energi. JQ menyatakan aliran energi masuk ke sistem dan W menyatakan aliran energi keluar sistem. Pertambahan energi neto dari sistem ($E_2 - E_1$) sama dengan JQ yang mengalir masuk ke sistem sebagai kalor dikurangi energi yang keluar sebagai usaha. Pers. (2-26) merupakan *pernyataan dari prinsip kekekalan energi* yang menyatakan bahwa aliran kalor masuk kedalam sistem berarti terdapat aliran energi masuk ke sistem. Pers. (2-14) merupakan pernyataan analitis *hukum pertama termodinamika*. *Hukum pertama berisi postulat bahwa W_{ad} mempunyai harga yang sama untuk semua lintasan-lintasan adiabatik antara dua keadaan yang sama.*

Harga J dicari secara eksperimen dengan mengukur usaha W dalam *ft-lb* atau *joule*, dan mengukur kalor Q dalam *btu* atau dalam *kalori*. Harga J sama dengan perbandingan W dengan Q . Hal ini merupakan salah satu metode untuk menentukan tara kalor mekanis. Banyak eksperimen telah dilakukan dengan sangat teliti untuk menentukan besaran ini. Harga eksperimental terbaik dalam satuan keteknikan yang diperoleh adalah:

$$J = 778 \frac{\text{ft-lb}}{\text{BTU}}$$

Bila kalor dalam kalori, harga terbaik J ,

$$J = 4,1858 \frac{\text{joule}}{\text{kalori}}$$

Pada dasarnya, hal ini dimaksudkan untuk mendefinisikan satuan kalor baru dari *ft-lb* dan *joule* menjadi *Btu* dan *kalori*. Jika harga J diambil sama dengan satu, untuk menyatakan usaha dan kalor dalam satuan yang sama, diperoleh:

$$1 \text{ Btu} = 778,16 \text{ ft-lb}; \quad 1 \text{ kalori} = 4,1858 \text{ J}$$

Bila $J=1$, maka J tidak muncul secara eksplisit dalam pers. (2-27). Pers. (2-26) akan mempunyai bentuk yang lebih sederhana:

$$\boxed{E_2 - E_1 = Q - W} \quad (2-27)$$

atau dituliskan

$$\boxed{\Delta E = Q - W} \quad (2-28)$$

Pers. (2-28) merupakan pernyataan matematis dari hukum pertama termodinamika

Selanjutnya kita akan selalu mengasumsikan bahwa harga $J = 1$.

Untuk proses dengan perubahan yang sangat kecil, pers. (2-28) menjadi:

$$\boxed{dE = \delta Q - \delta W} \quad (2-29)$$

Besaran δQ an δW merupakan diferensial tak eksak jadi kita tak dapat menuliskan dengan

$$Q = \int_1^2 d'Q \neq Q_2 - Q_1$$

Kita katakan Q sebagai *fungsi lintasan* karena harganya tidak bergantung pada keadaan awal dan akhir saja. Jadi Q *bukan* merupakan sifat sistem. Oleh karena itu kita tidak dapat menyebut “kalor dalam sistem” atau “kalor dari sistem”.

*Kalor sebagai
fungsi lintasan*

Dalam termodinamika, istilah kalor selalu dihubungkan dengan proses, tidak dengan keadaan suatu sistem, dan itu berarti kalor melintas bidang batas sistem karena adanya perbedaan suhu antara sistem dan lingkungannya.

2.6. LAJU PERUBAHAN ENERGI UNTUK SISTEM TERTUTUP

Penggunaan hukum pertama sebagai persamaan laju baik yang menyatakan laju sesaat maupun laju purata saat energi melintasi permukaan batas sistem sebagai kalor dan kerja seringkali kita perlukan. Bentuk laju dari hukum pertama ini akan digunakan dalam pengembangan hukum pertama untuk volum atur yang akan dibahas pada bab berikutnya.

Bentuk neraca energi untuk sistem tertutup diperoleh dengan menyulihkan pers. (2-17) ke pers (2-27) sehingga

$$\delta Q = \Delta KE + \Delta PE + \Delta U + \delta W \quad (2-30)$$

Perpindahan energi dalam interval waktu Δt adalah

$$\frac{\delta Q}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{\Delta t} + \frac{\delta W}{\Delta t} \quad (2-31)$$

Untuk perubahan infinitesimal

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta Q}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta t} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta W}{\Delta t}$$

Dengan

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta Q}{\Delta t} = \dot{Q}, \text{ laju perpindahan kalor}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta W}{\Delta t} = \dot{W}, \text{ daya}$$

Bentuk persamaan laju dari hukum pertama dituliskan

$$\dot{Q} = \frac{dE}{dt} + \dot{W} \quad (2-32)$$

Karena $\frac{dE}{dt} = \frac{dKE}{dt} + \frac{dPE}{dt} + \frac{dU}{dt}$, pers. (2-32) dapat dituliskan dalam

bentuk

$$\dot{Q} = \frac{dKE}{dt} + \frac{dPE}{dt} + \frac{dU}{dt} + \dot{W} \quad (2-33)$$

Laju perubahan energi

Pers. (2-32) dan (2-33) disebut pula sebagai *laju perubahan energi*

Contoh 2-9.

Pada suatu proses, energi dalam turun 500 kJ/kg dan 230 kJ/kg usaha dilakukan pada sistem.

Cari kalor yang dilepas atau diserap.

Diketahui : $u_2 - u_1 = (-) 500 \text{ kJ/kg}$

$$w_{12} = (-) 230 \text{ kJ/kg}$$

Ditanyakan: kalor yang dilepas/diserap oleh sistem

Penyelesaian:

Jumlah kalor yang dilepas/ diserap oleh sistem dihitung dengan menggunakan hukum pertama :

$$\begin{aligned} q_{12} &= w_{12} + (u_2 - u_1) \\ &= -500 \text{ kJ/kg} - 230 \text{ kJ/kg} = -730 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Jadi sistem melepas kalor sebesar -730 kJ/kg

2-7. KAPASITAS KALOR.

Kapasitas kalor dari suatu sistem C dalam suatu proses yang suhunya berubah sebesar dT , didefinisikan sebagai nisbah besaran kalor δQ yang mengalir masuk ke dalam sistem terhadap perubahan suhu. Dianggap sistem mempunyai energi kinetik dan energi potensial konstan, maka:

$$C = \frac{\delta Q}{dT} = \frac{dU + \delta W}{dT} \quad (2-34)$$

Jika δQ dinyatakan dalam Btu, maka C dalam Btu°R . Jika δQ dinyatakan dalam ft-lb, maka C dalam $\text{ft-lb}^\circ\text{R}$. Jika δQ dinyatakan dalam kalori, maka C dalam $\text{kalori}^\circ\text{C}$ dan jika δQ dinyatakan dalam *joule*, maka C dalam J/K

Kapasitas kalor

Satuan kapasitas kalor

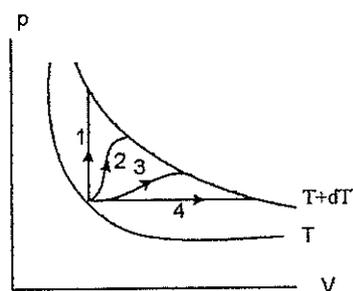
Namun suatu proses tidak secara lengkap dispesifikasikan dengan perubahan suhu dalam proses. Gambar 2-22 menunjukkan dua proses isothermal dari suatu sistem pada suhu T dan $T+dT$, diproyeksikan pada

bidang p - V , dan sejumlah proses berbeda dengan suhu sistem berubah dari T ke $T+dT$. Usaha δW , dinyatakan oleh luas dibawah lintasan berturut-turut yang berbeda untuk setiap proses. Dari penelitian ditemukan bahwa besarnya kalor δQ yang diberikan kedalam sistem berbeda pula. Karena dT sama dalam semua proses, maka kapasitas kalor pada umumnya juga berbeda dalam setiap proses.

Kapasitas kalor bergantung

Kapasitas kalor dari suatu sistem tidak dapat dihitung dari persamaan keadaan zat (atau zat-zat) penyusun sistem. Kapasitas kalor harus diukur melalui eksperimen, atau dihitung dari teori molekuler dari materi. Banyak pengukuran eksperimental dari kapasitas kalor dilakukan dengan tekanan luar konstan. Harga kapasitas kalor yang diperoleh disebut *kapasitas kalor pada tekanan konstan* dan dinyatakan dengan C_p .

Kapasitas kalor pada tekanan konstan



Gambar 2-22. Kalor bergantung lintasan

Jika volum sistem konstan selama proses dengan suhu berubah, kapasitas kalor disebut *kapasitas kalor pada volum konstan* dan dinyatakan dengan C_v . Usaha yang dilakukan dalam proses volum konstan adalah nol, maka dari pers. (2-27) kalor mengalir masuk ke sistem sama dengan perubahan energi dalam. Seperti untuk C_p , harga C_v (kecuali dalam kasus khusus) sebagai fungsi suhu dan tekanan. Tabel 2-2, menunjukkan harga C_p dan C_v untuk berbagai jenis gas pada suhu $80^{\circ}F$ atau $300 K$.

Kapasitas kalor pada volum konstan

Tabel 2-5. Harga c_p dan c_v untuk berbagai jenis gas

| Gas | γ | Berat Molekul | c_p | | c_v | |
|-----------------|----------|---------------|----------|--------------------|----------|--------------------|
| | | | kJ/kgK | $Btu/lbm^{\circ}R$ | kJ/kgK | $Btu/lbm^{\circ}R$ |
| Udara | 1,40 | 28,97 | 1,0035 | 0,24 | 0,7165 | 0,171 |
| CO ₂ | 1,29 | 44,01 | 0,8418 | 0,203 | 0,6529 | 0,158 |
| He | 1,66 | 4,003 | 5,1926 | 1,25 | 3,1156 | 0,753 |
| H ₂ | 1,40 | 2,016 | 14,2091 | 3,43 | 10,0849 | 2,74 |
| N ₂ | 1,40 | 28,013 | 1,0416 | 0,248 | 0,7448 | 0,177 |
| O ₂ | 1,40 | 31,999 | 0,9216 | 0,219 | 0,6618 | 0,157 |

Untuk sistem yang terdiri dari zat murni, kita definisikan kapasitas kalor jenis zat pada tekanan konstan atau volum konstan, sebagai perbandingan kapasitas kalor dengan massa sistem:

$$\boxed{c_p = \frac{C_p}{m}}; \quad \boxed{c_v = \frac{C_v}{m}} \quad (2-35)$$

Kapasitas kalor jenis

Jika C_p dan C_v dalam $Btu^{\circ}R$, maka c_p dan c_v dalam $Btu/lbm^{\circ}R$, Jika C_p dan C_v dalam $J^{\circ}C$, maka c_p dan c_v dalam $J/kg^{\circ}C$.

Kalor persatuan massa yang mengalir masuk dalam suatu sistem yang mengalami proses dengan suhu berubah sebesar dT adalah:

$$\delta q = c dT \quad (2-36)$$

Dengan c kapasitas kalor jenis untuk bahan. Kalor total yang mengalir persatuan massa dimana suhunya berubah dari T_1 ke T_2 adalah:

$$q = \int_1^2 c dT \quad (2-37)$$

Untuk massa m ,

$$Q = m \int_1^2 c dT \quad (2-38)$$

Proses yang terjadi pada tekanan konstan atau volum konstan, kalor yang masuk/keluar sistem adalah:

$$\boxed{Q = m \int_1^2 c_p dT}; \quad \boxed{Q = m \int_1^2 c_v dT} \quad (2-39)$$

Akan sangat bermanfaat mendefinisikan *kapasitas kalor jenis molal* dari suatu zat murni sebagai perbandingan kapasitas kalor per jumlah mol zat n ,

$$c_p^* = \frac{C_p}{n}; \quad c_v^* = \frac{C_v}{m} \quad (2-40)$$

Pada suhu tinggi, c_p^* bertambah secara malar dan c_v^* mendekati konstan dan sama dengan kira-kira 6 Btu/lbm-mol⁰R atau sama dengan 3 R. Banyak zat padat yang mempunyai nilai c_v^* yang sama (=3 R). pada suhu tinggi yang disebut *harga Dulong dan Petit*.

Kapasitas kalor jenis molal

Harga Dulong dan Petit

Untuk gas monoatomik seperti Helium, argon, dan uap merkuri mempunyai nilai kapasitas kalor jenis molal yang sangat mendekati sama

Gas monoatomik

yaitu $c_v^* \approx \frac{3}{2}R \approx 3 \text{ Btu/lbm-mol}^0R$ dan $c_p^* \approx \frac{5}{2}R \approx 5 \text{ Btu/lbm-mol}^0R$

dan secara praktis nilai c_v^* tidak bergantung pada suhu

Gas diatomik

Untuk gas diatomik permanen seperti H₂, O₂, N₂, dan CO, harga $c_v^* \approx \frac{5}{2}R$ atau sekitar 5 Btu/lbm-mol⁰R dan $c_p^* \approx \frac{7}{2}R$. Nilai c_v^*

bertambah dengan kenaikan suhu.

Untuk gas poliatomik: seperti NH₃ dan CH₄, nilai $c_v^* > \frac{5}{2}R$ dan

Gas poliatomik

nilainya berubah terhadap perubahan suhu dan bergantung pada jenis zat.

Contoh 2-10.

Sebuah silinder berisi 0,2 kg udara pada keadaan awal suhunya 25⁰C dan tekanannya 140 kPa. Sesudah proses tekanan konstan, suhu udara naik menjadi 175⁰C. Volum mula-mula adalah 0,03 m³ dan volum akhir 0,045 m³. Kalor jenis pada tekanan konstan adalah 1,0048 kJ/kgK, Hitunglah a). kalor yang diserap, kJ (b). usaha yang dilakukan, kJ (c). perubahan energi dalam, kJ

Diketahui: Sistem : $m = 0,2 \text{ kg}$ udara, $c_p = 1,0048 \text{ kJ/kgK}$

$$\begin{aligned} \text{Keadaan awal : } T_1 &= 25 + 273 = 298 \text{ K}; & V_1 &= 0,03 \text{ m}^3 \\ \text{Keadaan akhir : } T_2 &= 175 + 273 = 448 & V_2 &= 0,045 \text{ m}^3 \\ p &= p_1 = p_2 = 140 \text{ kPa} = 140 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

- Ditanyakan: (a). kalor yang diserap, kJ
 (b). usaha yang dilakukan, kJ
 (c). perubahan energi dalam, kJ

Penyelesaian:

- (a). Karena prosesnya adalah isobarik, besarnya kalor yang diserap adalah

$$\begin{aligned} Q_{12} &= m q_{12} = m c_p (T_2 - T_1) \\ &= (0,2)(1,0048)(448-298) = 30,1 \text{ kJ} \end{aligned}$$

- (b). Untuk proses isobarik, kerja yang dilakukan, $W_{12} = p (V_2 - V_1)$

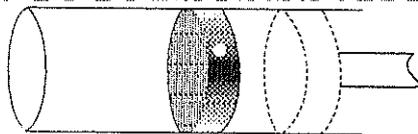
$$W_{12} = (140)(0,045-0,03) = 2,1 \text{ kJ}$$

- (c). Menurut hukum pertama

$$\begin{aligned} U_2 - U_1 &= Q_{12} - W_{12} \\ &= 30,1 - 2,10 = 28 \text{ kJ} \end{aligned}$$

2.8. ENTALPI

Gambar 2-23 menunjukkan suatu proses yang berlangsung pada tekanan konstan kuasistatik. Andaikan tidak terdapat perubahan energi potensial maupun kinetik dan hanya usaha yang dilakukan selama proses karena pergerakan penghisap



Gambar 2-23. Proses kesetimbangan kuasistatik pada tekanan konstan

Dipilih gas sebagai sistem, dengan menggunakan hukum pertama, perubahan energi dalam yang terjadi:

$$U_2 - U_1 = Q - W \quad (2-41)$$

Usaha yang dilakukan adalah:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (2-45)$$

Karena tekanan konstan selama proses, maka:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1)$$

Oleh karena itu,

$$\begin{aligned} Q &= U_2 - U_1 + p_2V_2 - p_1V_1 \\ &= (U_2 + p_2V_2) - (U_1 + p_1V_1) \end{aligned}$$

Definisi entalpi

Persamaan ini menunjukkan panas yang diberikan sama dengan perubahan jumlah $U + pV$ antara keadaan awal dan akhir. Didefinisikan besaran ekstensif baru yaitu **entalpi** H sebagai:

$$\boxed{H = U + pV} \quad (2-46)$$

Ditulis dalam bentuk **entalpi jenis**:

$$\boxed{h = \frac{H}{m} = u + pv} \quad (2-47)$$

Entalpi jenis

Entalpi jenis molal:

$$\boxed{h^* = \frac{H}{n} = u^* + pv^*} \quad (2-48)$$

Entalpi jenis molal

Jika perubahan pada proses sangat kecil antara dua keadaan ketimbangan, maka perubahan entalpi dapat dituliskan sebagai:

$$dh = d(u + pv) = du + p dv + v dp$$

Hukum pertama untuk proses kuasistatik:

$$\delta q = du + p dv$$

maka;

$$dh = \delta q + v dp$$

Dalam proses isobarik kuasistatik, $dp = 0$ dan $\delta q = c_p dT_p$, jadi:

$$dh_p = c_p dT_p$$

dan

$$\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p = c_p \quad (2-49)$$

Pada sebarang proses isobarik pada tekanan p antara dua keadaan kesetimbangan,

$$(h_2 - h_1)_p = (u_2 - u_1)_p + p(v_2 - v_1)_p$$

Jika prosesnya kuasistatik, menurut hukum pertama, ruas kanan sama dengan panas q_p yang diserap oleh sistem, maka:

$$(h_2 - h_1)_p = q_p \quad (2-50)$$

Entalpi pada proses isobarik memainkan peran yang sama seperti energi dalam pada proses isovolumik untuk proses kuasistatik,

$$\boxed{c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p}; \quad \boxed{q_p = (h_2 - h_1)_p}$$

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v; \quad q_v = (u_2 - u_1)_v$$

*Kapasitas kalor jenis
pada tekanan konstan
dan volum konstan*

2.9. ANEKA RAGAM PROSES GAS IDEAL

Menurut Joule, energi dalam gas ideal hanya bergantung pada suhu saja. Pada gas ideal berlaku hukum Boyle dan Charles yang didasarkan pada penyelidikan eksperimental.

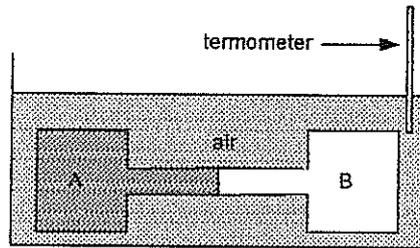
2.9.1 ENERGI DALAM GAS

Gambar 2-24 menunjukkan alat yang digunakan oleh Joule. Dua bejana dihubungkan dengan pipa dan katup dan dimasukkan dalam tangki berisi air. Bejana A diisi gas bertekanan 22 atm dan bejana B dihampakan. Ketika kesetimbangan termal dicapai katakan pada T_1 , katup dibuka, tekanan A dan B menjadi sama. Kalor mengalir dari air ke bejana A masuk ke bejana B sehingga suhu bejana A turun dan bejana B naik dan akan tercapai kesetimbangan termal kedua katakan pada suhu T_2 . Dinding bagian dalam bejana diambil sebagai bidang batas sistem dan gas sebagai

sistem yang diselidiki. Lingkungan terdiri dari bejana, pipa dan tangki air. Tak ada usaha luar yang dilakukan karena bidang batas diam.

Jumlah kalor yang mengalir masuk sistem sama dengan jumlah kalor yang keluar dari lingkungan ke sistem. Jika C kapasitas kalor lingkungan,

$$Q = C (T_1 - T_2) \quad (2-51)$$



Gambar 2-24. Percobaan Joule

Hukum pertama termodinamika,

$$U_2 - U_1 = Q - W$$

Dan karena $W = 0$, maka:

$$U_2 - U_1 = C (T_1 - T_2) \quad (2-52)$$

Karena C , T_2 dan T_1 dapat diukur, perubahan energi dalam gas dapat dihitung.

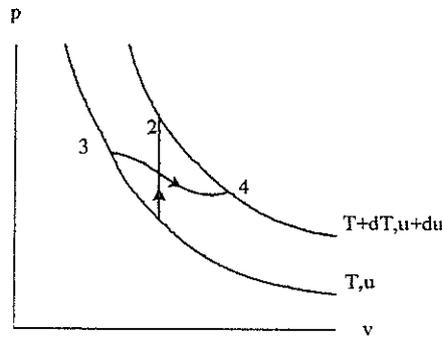
Namun pada percobaan ini perubahan suhu sangat kecil sehingga tidak dapat diukur sehingga dipostulatkan suatu sifat dari gas ideal, pada gas ideal tidak terjadi perubahan suhu apabila digunakan dalam percobaan. Jika tidak ada perubahan suhu, tak ada kalor masuk ke gas, karena usaha yang dilakukan nol maka energi dalam konstan meskipun

Energi dalam gas ideal

volumnya berubah. Jadi *energi dalam gas ideal pada suhu konstan tidak tergantung pada volumenya*, dituliskan:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = 0$$

Perhatikan gambar 2-25, dua buah proses isotermik pada suhu T dan $T+dT$ dengan demikian energi dalam pada suhu T adalah u dan pada suhu $T+dT$ adalah $u+du$. Perbedaan energi dalam dapat dicari dengan memandang proses 1-2 isochoris.



Gambar 2-25. Dua proses isotermik

Kalor yang diserap adalah:

$$\delta q = c_v dT$$

Karena usaha yang dilakukan sama dengan nol, maka perubahan energi dalam

$$du = c_v dT$$

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (2-53)$$

Jika suhunya berubah dari T_1 ke T_2 , maka:

$$u_2 - u_1 = \int_1^2 c_v dT \quad (2-54)$$

Perubahan energi dalam gas

Untuk c_v konstan,

$$u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1) \quad (2-55)$$

Perubahan energi dalam gas pada c_v konstan

Contoh 2-11.

1 lbm CO₂ dipanaskan pada tekanan konstan 14,7 psi pada suhu 68°F sampai 86°F. Tentukan (a) besar energi yang dipindahkan sebagai kalor (b) kerja yang dilakukan (c) perubahan tenaga dalam selama proses (d) perubahan entalpi

Diketahui :

Keadaan awal: $m = 1$ lbm, $T_1 = 540^\circ\text{R}$, $p_1 = 14,7$ psi = 2116,8 lb/ft²,

Keadaan akhir : $T_2 = 580^\circ\text{R}$, $p_2 = p_1 = 2116,8$ lb/ft²

$$c_p = 157,9 \text{ ft-lb/lbm}^{\circ}\text{F}, \quad R = 35,12 \text{ ft-lb/lbm}^{\circ}\text{R}$$

Ditanyakan : (a) Jumlah kalor yang dipindahkan

(b) Kerja yang dilakukan

(c) Perubahan tenaga dalam

(d) Perubahan entalpi

Penyelesaian:

(a) Untuk c_p konstan, jumlah kalor yang dipindahkan adalah

$$Q = mc_p (T_2 - T_1) = 1 \times 157,9 \times (86 - 68) = 2842,2 \text{ ft-lb}$$

(b) Volum pada keadaan 1 dan keadaan 2 harus dihitung terlebih dahulu

Keadaan awal:

$$p_1 V_1 = mRT_1$$

$$V_1 = \frac{mRT_1}{p_1} = \frac{1 \times 35,12 \times 540}{2116,8} = 8,96 \text{ ft}^3$$

Keadaan akhir:

$$V_2 = \frac{mRT_2}{p_1} = \frac{1 \times 35,12 \times 580}{2116,8} = 9,62 \text{ ft}^3$$

Usaha yang dilakukan

$$W = p(V_2 - V_1) = 2116,8 (9,62 - 8,96) = 1397,088 \text{ ft-lb}$$

(c) Menurut hukum pertama termodinamika

$$\Delta U = W - Q$$

$$= 1397,088 - 2842,2 = 1445,112 \text{ ft-lb}$$

(d) Perubahan entalpi dapat dihitung dari,

$$\Delta H = U_2 + p_2 V_2 - (U_1 + p_1 V_1)$$

$$= \Delta U + p(V_2 - V_1)$$

$$= 1445,112 + 2116,8 (9,62 - 8,96) = 2842,2 \text{ ft-lb}$$

2.9.2. PROSES UNTUK GAS IDEAL

Perubahan keadaan gas ideal dari keadaan 1 ke keadaan 2 dapat ditempuh melalui beberapa proses yaitu:

1. Suhu konstan, isotermal
2. Tekanan konstan, isobarik
3. Volum konstan, isometrik atau isochorik
4. Perpindahan kalor nol, adiabatik

Persamaan politropik umum

Keadaan gas hanya ditentukan oleh dua sifat termodinamik, oleh karenanya persamaan proses dapat ditulis dalam bentuk dua sifat sebarang yang dipilih. Misalkan sifat yang kita pilih adalah tekanan dan volum jenis, persamaan dapat ditulis dalam bentuk;

$$pv^n = \text{pangguh} = C \quad (2-48)$$

Persamaan ini disebut *persamaan politropik umum*

Dalam bentuk logaritmis dituliskan

$$\ln p = -n \ln v + \ln C \quad (2-49)$$

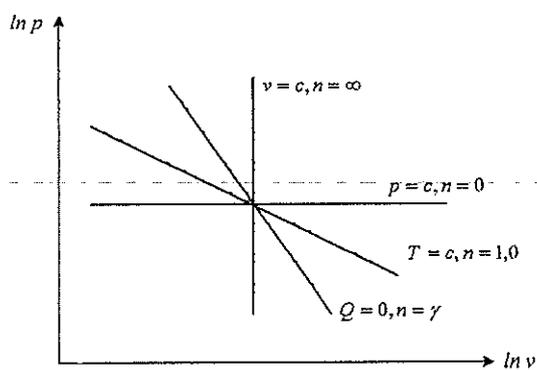
dengan n disebut sebagai *eksponen politropik*. Untuk gas ideal

$$pv = RT \quad (2-50)$$

Kita rajah .Pers. (2-49) dalam diagram $\ln p$ dan $\ln v$, dari gambar 2-26 dapat kita lihat n merupakan kemiringan untuk setiap proses

Persamaan politropik umum

Eksponen politropik



Gambar 2-26. Proses politropik untuk $pv^n = \text{konstan}$

Persamaan (2-48) dapat kita tuliskan sebagai:

$$\boxed{p_1 v_1^n = p_2 v_2^n} \quad (2-51)$$

Kita tinjau harga n untuk keempat proses diatas

Proses volum konstan

$$v_1 = v_2 \quad p_1 \neq p_2$$

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n \quad \text{atau} \quad v_1 = v_2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Karena $v_1 = v_2$, maka nisbah tekanan $\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}}$ harus sama dengan 1 dan

Proses volum konstan

akan diperoleh untuk nilai n

$$n = \pm \infty \quad (2-52)$$

Proses pada suhu konstan,

Pada proses suhu konstan, $T_1 = T_2$ sehingga persamaan untuk gas ideal menjadi

$$p_1 v_1 = p_2 v_2$$

dan

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$$

dari kedua persamaan jelaslah bahwa

$$\boxed{n = 0} \quad (2-53)$$

Proses suhu konstan

Proses pada tekanan konstan

Pada proses tekanan konstan, $p_1 = p_2$ dan $v_1 \neq v_2$

Proses tekanan konstan

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n \quad \text{atau} \quad p_1 = p_2 \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^n$$

Sehingga kita peroleh:

$$\boxed{n = 0} \quad (2-54)$$

Proses adiabatik,

Untuk perubahan keadaan 1 ke keadaan 2, dengan mengkombinasikan pers (2-50) dan pers. (2-51) dapat kita tuliskan sebagai:

Proses adiabatik

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1/n} \quad (2-55)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} \quad (2-56)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{(n-1)} \quad (2-57)$$

Pers. (2-55) sampai pers. (2-57) hanya berlaku untuk gas ideal.

Pada proses adiabatik tidak ada kalor keluar dan masuk sistem atau $Q = 0$

$$n = \gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (2-58)$$

Pers. (2-55) sampai (2-57) dapat dituliskan dalam bentuk

$$pv^\gamma = pv^\gamma \quad (2-59)$$

$$Tp^{(1-\gamma)/\gamma} = \text{kons tan} \quad (2-60)$$

$$Tv^{(\gamma-1)} = \text{kons tan} \quad (2-61)$$

Untuk gas monoatomik

Gas monoatomik

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_p}{c_p - R} = \frac{5R/2}{(5R/2) - R} = \frac{5}{3} = 1,67$$

Untuk gas diatomik

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_p}{c_p - R} = \frac{7R/2}{(7R/2) - R} = \frac{7}{5} = 1,4$$

Gas diatomik

Usaha

Secara umum, usaha yang dilakukan:

Usaha gas ideal

$$W = -\int p dv$$

Dari hubungan politropik

$$w = -\int_1^2 C v^{-n} dv = C \left(\frac{v^{1-n}}{n-1} \right)_1^2$$

Karena $C = p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$, diperoleh:

$$w = \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{n-1} \quad (2-62)$$

yang dapat juga dituliskan dalam bentuk:

$$w = \frac{R(T_2 - T_1)}{n-1} \quad (2-63)$$

Usaha pada proses isothermal

Untuk proses isothermal, T konstan dan $n=1$

$$w = -\int_1^2 C v^{-1} dv = C \ln \frac{v_1}{v_2}$$

Usaha pada proses isothermal

Dari pers keadaan gas ideal $p v = C = RT$ kita dapatkan

$$w = p_1 v_1 \ln \frac{v_1}{v_2} = RT \ln \frac{v_1}{v_2} \quad (2-64)$$

Usaha yang dilakukan melalui proses isothermal adalah

$$w = RT \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (2-65)$$

Usaha pada proses adiabatik kuasistatik

Usaha pada proses adiabatik

Dari pers. (2-62), karena $n = \gamma$ maka usaha yang dilakukan oleh proses

adiabatik kuasistatik untuk gas ideal sama dengan:

$$w = \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{\gamma - 1} \quad (2-66)$$

Dengan menggunakan persamaan gas ideal, besarnya usaha yang dilakukan

$$w = \frac{R(T_2 - T_1)}{\gamma - 1} \quad (2-67)$$

Karena pada proses adiabatik $q = 0$, dengan menggunakan hukum pertama diperoleh:

$$w = u_2 - u_1$$

Untuk c_v konstan, maka:

$$w = c_v(T_1 - T_2)$$

(2-68)

*kapasitas kalor
jenis pada volum
konstan*

Contoh 2-12.

Gas helium $R = 2,077$ kJ/kgK dan dipanaskan dari suhu awal 30°C ke suhu akhir 80°C .

Tentukan (a). nilai c_v (b). nilai c_p (d). perubahan entalpi.

- Diketahui:** Sistem : gas helium
 Keadaan 1 : $T_1 = 30^{\circ} + 273^{\circ} = 303$ K
 Keadaan 2 : $T_2 = 80^{\circ} + 273^{\circ} = 353$ K
 $R = 2,077$ kJ/kgK, $\gamma = 1,67$

Penyelesaian:

- (a). Untuk gas ideal, terdapat hubungan : $c_p - c_v = R$ dan $\frac{c_p}{c_v} = \gamma$

Sehingga kapasitas kalor pada volum konstan dapat dihitung.

$$c_v\gamma - c_v = R \quad c_v(\gamma - 1) = R$$

$$c_v = \frac{R}{\gamma - 1} = \frac{2,077}{(1,67 - 1)} = 3,1 \text{ kJ/kgK}$$

- (b). $c_p = c_v\gamma = 1,67 \times 3,1 = 5,177$ kJ/kg K

- (c). Perubahan entalpi

$$h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1) = 5,177 (353 - 303) = 258,85 \text{ kJ/kg}$$

Contoh 2-13.

Udara dikompres dalam silinder dari tekanan mula-mula 100 kPa ke tekanan 600 kPa secara adiabatik ($\gamma = 1,4$). Suhu dan volum mula-mula masing-masing adalah 15°C dan $0,2 \text{ m}^3$. Tentukan: (a). massa udara dalam silinder (b). usaha yang dilakukan

Diketahui : Keadaan awal : $p_1 = 100 \text{ kPa}$;

$$T_1 = 15 + 273 = 288 \text{ K}, \quad V_1 = 0,2 \text{ m}^3$$

Keadaan akhir : $p_2 = 600 \text{ kPa}$

$$R_{\text{udara}} = 287 \text{ J/kg K}$$

- (a). Massa udara dalam silinder dapat dihitung dengan menggunakan persamaan gas ideal

$$p_1 V_1 = m R T_1$$

$$m = \frac{p_1 V_1}{R T_1} = \frac{10^5 \times 0,2}{287 \times 288} = 1,2 \text{ kg}$$

- b). Untuk proses adiabatik, $p_1 v_1^\gamma = p_2 v_2^\gamma$ dan $T p^{(1-\gamma)/\gamma} = \text{konstan}$, maka

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1-\gamma/\gamma}; \quad T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1-\gamma/\gamma}$$

$$T_2 = 288 \left(\frac{600}{100} \right)^{1-1,4/1,4} = 171,29 \text{ K}$$

$$w = \frac{1}{1-\gamma} R (T_2 - T_1)$$

$$= \frac{1}{1-1,4} \times 287 \times (171,29 - 288) = 83739,42 \text{ J/kg}$$

Usaha yang dilakukan = $W = m \times w = 1,2 \times 83739,42 = 100487,31 \text{ J}$ atau udara melakukan usaha sebesar 100487,31 J

Contoh 2-14

2 kg mol gas O_2 (anggap sebagai gas ideal) mula-mula volum 1 m^3 yang bertekanan 200 kPa melalui proses isobar volum diperbesar hingga dua kalinya. Setelah itu gas dimampatkan hingga tekanan menjadi 400 kPa secara iosterm kemudian gas dikembalikan kekeadaan semula melalui proses isochorik. Gambarkan prosesnya dan kemudian hitung (a) usaha, perubahan energi dalam, jumlah kalor yang dilepas/diserap

asing-masing proses (b) usaha netto yang dilakukan (b) kalor netto yang akan jika diketahui $c_p = 0,9216 \text{ kJ/kg K}$ dan $c_v = 0,6618 \text{ kJ/kg K}$

ui :

Keadaan 1 : $V_1 = 1 \text{ m}^3$, $p_1 = 200 \text{ kPa}$

Keadaan 2 : $V_2 = 2 V_1 = 2 \text{ m}^3$, $p_2 = p_1 = 200 \text{ kPa}$

Keadaan 3 : $V_3 = V_1 = 1 \text{ m}^3$, $p_3 = 400 \text{ kPa}$, $T_3 = T_1$

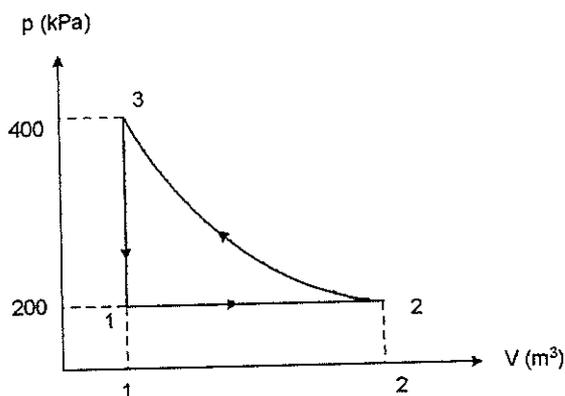
$n = 2 \text{ kg-mol}$

$\mathfrak{R} = 8,31 \times 10^3 \text{ J/kg-mol K}$

$c_p = 0,9216 \text{ kJ/kg K}$

$c_v = 0,6618 \text{ kJ/kg K}$

lesaian:



Gambar 2-27. Contoh soal 2-8

ma-tama dihitung sifat-sifat yang belum diketahui pada masing-masing keadaan yaitu m , T_1 , T_2 , dan T_3

$$M = n M = 2 \times 32 = 64 \text{ kg}$$

$$p_1 V_1 = n \mathfrak{R} T_1$$

$$T_1 = \frac{p_1 V_1}{n \mathfrak{R}} = \frac{(200 \times 10^3) \times 1}{2 \times (8,31 \times 10^3)} = 12,03 \text{ K}$$

es 1 – 2 isobarik

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$\frac{V_1}{12,03} = \frac{2V_1}{T_2} \quad \text{maka} \quad T_2 = 24,06 \text{ K}$$

$$T_3 = T_1 = 12,03 \text{ K}$$

(a). Proses 1-2, proses isobarik

$$W_{12} = \int_1^2 p dV = p(V_2 - V_1)$$

$$= 200 \times 10^3 (2-1) = 200 \text{ kJ}$$

$$Q_{12} = mc_p \Delta T = 64 \times 0,9216 \times 10^3 \times (24,06 - 12,03) = 709,5583 \text{ kJ}$$

Menurut hukum pertama

$$\Delta U_{12} = Q_{12} - W_{12}$$

$$= 709,5583 \times 10^3 - 200 \times 10^3 = 509,5583 \times 10^3 \text{ J}$$

Proses 2 - 3 , isoterm

$$W_{23} = \int_2^3 p dV = nRT_2 \ln \frac{V_3}{V_2}$$

$$= 2 \times 8,31 \times 10^3 \times 24,06 \times \ln \frac{1}{2} = -277,17 \times 10^3 \text{ J} = -277,17 \text{ kJ}$$

$$\Delta U_{23} = 0$$

Menurut hukum pertama

$$Q_{23} = W_{23} = -277,17 \text{ kJ}$$

Proses 3 -1 isometris

$$W_{31} = 0$$

$$Q_{31} = mc_v (T_1 - T_3)$$

$$= 64 \times 0,6618 \times 10^3 \times (12,03 - 24,03) = -509,2624 \text{ kJ}$$

Menurut hukum pertma

$$\Delta U_{31} = Q_{31} = -509,2624 \text{ kJ}$$

(b) Usaha netto yang dilakukan adalah

$$W_{netto} = W_{12} + W_{23} + W_{31}$$

$= 200 \text{ kJ} - 277,17 \text{ kJ} = -177,17 \text{ kJ}$. Karena usaha netto bernilai negatif jadi usaha dilakukan pada sistem

). Kalor netto yang dipindahkan

$$Q_T = Q_{12} + Q_{23} + Q_{31}$$

$= 709,5583 - 277,17 - 509,2624 = -75,8741 \text{ kJ}$. Karena Q_{netto} adalah negatif, jadi sistem melepas kalor sebesar $75,8741 \text{ kJ}$

ANGKUMAN

Yang dimaksud dengan usaha δW dari suatu kakas [✓] adalah usaha yang dilakukan oleh kakas F tersebut untuk memindahkan partikel yang dikenai kakas tersebut sebesar ds . Usaha bukanlah sifat suatu sistem. Usaha dilakukan oleh sistem dianggap positif dan usaha dilakukan pada sistem usaha dianggap negatif. Usaha total W untuk mengubah volum dari V_1 ke V_2 adalah $W = \int_1^2 p dV$. Usaha adalah fungsi lintasan yang berarti usaha bergantung pada proses. ^{Kalor} Sedangkan usaha yang dilakukan pada proses pemuaian bebas adalah nol. ^{usaha ada atau}

Energi didefinisikan sebagai besaran yang berubah antara dua keadaan kesetimbangan dan sama dengan usaha adiabatik. Berkurangnya energi antara dua keadaan kesetimbangan ^{merupakan} sebagai usaha yang dilakukan oleh sistem pada sebarang proses adiabatik antara dua keadaan. Jadi energi merupakan sifat sistem karena hanya bergantung pada keadaan awal dan akhir sistem. Energi dalam U adalah bagian dari energi total yang hanya bergantung pada keadaan dalam sistem, yang disebut juga sebagai koordinat termodinamik

Kalor mengalir keluar dari benda yang bersuhu lebih tinggi mengalir masuk ke benda yang bersuhu lebih rendah dengan jumlah kalor yang keluar dan masuk adalah sama. Kalor merupakan fungsi lintasan.

Hukum pertama termodinamika menyatakan pertambahan energi netto dari $E_2 - E_1$ sama dengan energi Q mengalir masuk ke sistem sebagai kalor, dikurangi yang keluar sebagai usaha, $E_2 - E_1 = Q - W$, menyatakan hukum kekekalan energi.

Kapasitas kalor sistem, C , dalam suatu proses yang suhunya berubah sebesar dT , misalkan sebagai perbandingan besaran kalor $d'Q$ yang mengalir masuk sistem tiap perubahan suhu dT . Harga kapasitas kalor pada tekanan konstan, dinyatakan dengan C_p . Jika volume sistem konstan selama proses dengan suhu berubah, kapasitas tersebut disebut kapasitas kalor pada volume konstan dan dinyatakan dengan C_v .

Energi dalam gas ideal pada suhu konstan tidak bergantung pada volumenya, misalkan $\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = 0$, kapasitas kalor jenis pada volume konstan, $c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$ atau

$$u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT$$

PERTANYAAN-PERTANYAAN

1. Sebutkan bentuk-bentuk usaha, jelaskan masing-masing
2. Adakah usaha yang dilakukan oleh mobil yang berjalan dengan kecepatan konstan?
3. Ketika anda menyangga sebuah beban dikatakan anda tidak melakukan usaha tetapi kenapa anda menjadi lelah?
4. Anda sedang menaiki sebuah lift yang sedang meluncur kebawah, sampai dilantai paling energi potensial menjadi nol, kemana hilangnya energi potensial ini?
5. Kenapa kita tidak dapat mengatakan dengan ΔW akan tetapi dengan W ?
6. Jikalau suhu sistem sama dengan suhu lingkungan, mungkinkah ada kalor?
7. Apakah beda kalor dengan suhu
8. Apakah sebabnya ketika cuaca sangat panas anda merasa gerah ketika memakai baju tebal dan sebaliknya anda akan merasa kedinginan dengan memakai baju tipis saat cuaca sangat dingin?
9. Adakah usaha yang dilakukan untuk mengangkat benda dari lantai ke atas meja?

10. Berapa usaha yang dilakukan pada proses muaiian bebas? Jelaskan.
11. Dengan cara bagaimana kalor dipindahkan?
12. Kenapa kita mengatakan kalor dengan Q bukan dengan ΔQ
13. Apakah perpindahan kalor selalu membutuhkan medium?
14. Sebutkan hukum pertama termodinamika
15. Perhatikan ketika anda sedang membakar kayu pada suatu saat kayu akan berubah warna menjadi kehitam-hitaman, jelaskan kenapa
16. Apakah yang dimaksudkan dengan entalpi

SOAL-SOAL

Usaha dan energi mekanis

- 2.1. Danau air segar dengan luas 2500 m^2 dan kedalaman purata 4 m berlokasi diatas sebuah bukit yang berketinggian 300 m dari lembah. Tentukan energi potensial yang dimiliki oleh danau
- 2.2. Danau air segar dengan luas 26900 ft^2 dan kedalaman purata 13 ft berlokasi diatas sebuah bukit yang berketinggian 3200 ft dari lembah.

- Tentukan energi potensial yang dimiliki oleh danau
- 2.3. Sebuah pesawat terbang bermassa 180.000 kg membawa 300 penumpang dengan massa purata 56 kg. Hitung energi total yang dimiliki pesawat bila pesawat bergerak dengan kecepatan 800 km/jam pada ketinggian 9600 m diatas permukaan laut
 - 2.4. Sebuah pesawat terbang bermassa 39×10^4 lbm membawa 300 penumpang dengan massa purata 124 lbm. Hitung energi total yang dimiliki pesawat bila pesawat bergerak dengan kecepatan 2625×10^3 ft/dt pada ketinggian 32500 ft diatas permukaan laut.
 - 2.5. Setelah beberapa saat mengendarai mobil yang bermassa 750 kg, seseorang merubah kcepatannya dari 60 km/jam menjadi 75 km/jam. Hitung perubahan energi kinetiknya dalam kJ.
 - 2.6. Setelah beberapa saat mengendarai mobil yang bermassa 1650 lbm, seseorang merubah kcepatannya dari 37 mil/jam menjadi 47 mil/jam. Hitung perubahan energi kinetiknya dalam ft-lb.
 - 2.7. Berapa usaha yang dilakukan oleh seorang untuk memindahkan sebuah benda sejauh 100 m, bila orang tersebut mendorong dengan arah 60° terhadap lantai dengan kakas sebesar 600 N.
 - 2.8. Berapa usaha yang dilakukan oleh seorang untuk memindahkan sebuah benda sejauh 330 ft, bila orang tersebut mendorong dengan arah 60° terhadap lantai dengan kakas sebesar 135 lb.
 - 2.9. Setelah menempuh jarak 15 km, seseorang mengubah kecepatan mobilnya dari 60 km/jam menjadi 90 km/jam,. Hitung usaha yang dilakukan oleh mobil tersebut dalam kJ, jika massa mobil adalah 750 kg
 - 2.10. Setelah menempuh jarak 9,5 mil, seseorang mengubah kecepatan mobilnya dari 37 mil/jam menjadi 56 mil/jam,. Hitung usaha yang dilakukan oleh mobil tersebut dalam Btu, jika massa mobil adalah 1650 lbm
 - 2.11. Seorang wanita menjatuhkan bola 0,4 kg dari sebuah jembatan 10 m diatas air. Hitung tenaga kinetik bola tepat sebelum menyentuh air.

- 2.12. Seorang wanita menjatuhkan bola 0,9 lbm dari sebuah jembatan 33 ft diatas air. Hitung tenaga kinetik bola tepat sebelum menyentuh air.
- 2.13. Sebuah benda bermassa 50 kg jatuh dari ketinggian 60 m tanpa kecepatan awal. Hitung kecepatan benda tersebut setelah menempuh setengah jaraknya
- 2.14. Sebuah benda bermassa 110 lbm jatuh dari ketinggian 197 ft tanpa kecepatan awal. Hitung kecepatan benda tersebut setelah menempuh setengah jaraknya

Usaha mengubah volum

- 2.15. Sebuah silinder dilengkapi dengan piston tanpa gesekan berisi CO_2 pada 300 kPa, 200°C dan volum $0,2 \text{ m}^3$. Proses berlangsung menurut persamaan $pV^{1,2} = \text{konstan}$ hingga suhu akhir adalah 100°C . Tentukan usaha yang dilakukan selama proses ini.
- 2.16. Sebuah silinder dilengkapi dengan piston tanpa gesekan berisi CO_2 pada 4,5 psi, 420°F dan volum 7 ft^3 . Proses berlangsung menurut persamaan $pV^{1,2} = \text{konstan}$ hingga suhu akhir adalah 120°F . Tentukan

usaha yang dilakukan selama proses ini

- 2.17. Gas methane (dianggap gas ideal) dimasukkan dalam silinder yang dilengkapi piston pada 100°C dan volum 200 m^3 . Gas dikompresi secara perlahan-lahan melalui proses isothermal hingga tekanannya menjadi 600 kPa. Tentukan usaha yang dilakukan selama proses.
- 2.18. Sebuah silinder berisi gas dengan volum $0,3 \text{ m}^3$ dan tekanan 60 kPa. Gas berekspansi secara isobarik hingga volumenya berubah menjadi $0,35 \text{ m}^3$. Hitung usaha yang dilakukan oleh gas.

Kalor dan perpindahan kalor

- 2.19. Sebuah kamar bersuhu 23°C , dan suhu diluar 32°C . Ketika jendela kamar dibuka, berapakah kalor persatuan waktu yang masuk ke kamar melalui jendela kamar yang mempunyai luas $1,1 \text{ m}^2$?
- 2.20. Suhu dari pemukaandinding datar berturut-turut adalah 1000°F dan 800°F . Jika konduktivitas termal dinding adalah $0,30 \text{ Btu/jam ft } ^\circ\text{F}$.

Tentukan laju perpindahan kalor per ft^2 dari permukaan dinding

- 2.21. Sebuah dinding tersusun atas tiga lapis bahan yang masing-masing mempunyai konduktivitas termal 0,5; 0,7, dan 0,72 W/mK. dengan ketebalan masing-masing 2 cm, 5 cm, dan 8 cm Suhu permukaan terluar adalah 300°C dan 200°C . Tentukan laju perpindahan kalor persatuan luas dari dinding tersebut.
- 2.22. Air mengalir dalam pipa yang mempunyai diameter 10 cm dengan laju 12000 kg/jam. Kalor dipindahkan ke air dan suhu aliran purata adalah 100°C . Tentukan arus konveksi kalor.

Hukum pertama termodinamika

- 2.23. Selama proses, 120 Btu dipindahkan sebagai kalor dari setiap lbm zat usaha dan energi dalam turun 85,5 Btu/lbm. Hitung usaha yang dilakukan pada/oleh zat usaha dalam ft-lb/lbm.
- 2.24. 14,5 kg uap jenuh pada 689 kPa memuai dalam proses reversibel dari volum jenis $0,35 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ sampai volum jenis $9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$. Jika tekanan dijaga konstan dan energi

dalam turun menjadi 58000 J/kg selama proses, tentukan

- (a) banyaknya kalor yang diserap/dilepaskan dalam J/kg.
(b) Perubahan energi dalam sistem.
- 2.25. 1 lbm uap terjenuhkan pada 100 psi pemuaian dalam proses reversibel dari volum jenis $0,17736 \text{ ft}^3/\text{lb}$ sampai volum jenis $4,434 \text{ ft}^3/\text{lbm}$. Jika tekanan dijaga konstan dan energi dalam turun 807,5 Btu/lbm selama proses, tentukan berapa banyak panas yang diserap/dilepaskan dalam Btu/lbm.

Entalpi

- 2.26. Oksigen (anggap sebagai gas ideal) dipanaskan dari suhu 50°C menjadi 120°C . Tentukan (a) perubahan energi dalam (b) perubahan entalpi.

Gas ideal

- 2.27. Udara mula-mula bertekanan 10 psia dan suhu 50°F mengalami proses politropik tekanannya menjadi 40 psi dengan suhu 200°F . Hitung (a) eksponen politropik (b) volum jenis pada akhir proses. (c) suhu udara pada saat tekanannya mencapai dua kali lipat dari tekanan awal

2.28. Satu kmol gas nitrogen mula-mula tekanannya 1 atm dan suhunya 300 K, kemudian gas tersebut mengalami proses siklis reversibel sebagai berikut:

- a. Volum gas diperkecil hingga setengahnya secara isothermal.
- b. Kemudian tekanan gas diperkecil secara isokhorik
- c. Setelah itu gas dikembalikan ke keadaan semula melalui proses isobaris.

Gambarkan prosesnya dalam diagram p - V dan kemudian tentukan:

- (a) Usaha netto untuk seluruh proses siklis
- (b) Panas netto yang diserap/dilepaskan oleh sistem

2.29. Selama proses, 120 Btu dipindahkan sebagai kalor dari setiap lbm zat usaha dan energi dalam turun 85,5 Btu/lbm. Hitung usaha yang dilakukan pada/oleh zat usaha dalam ft-lb/lbm.

2.30. Udara mula-mula bertekanan 10 psia dan suhu 50°F mengalami proses politropik tekanannya menjadi 40 psi dengan suhu 200°F . Hitung (a) eksponen politropik (b) volum jenis pada akhir proses. (c) suhu udara

pada saat tekanannya mencapai dua kali lipat dari tekanan awal

2.31. Sebuah silinder yang dilengkapi dengan piston berisi 0,15 kg oksigen dengan tekanan 250 kPa dan suhu 27°C . Kemudian gas diekspansi hingga tekanan 100 kPa dan suhu 40°C . Bila gas melakukan kerja sebesar 30 kJ Tentukan (a) perubahan entalpi gas (b) kalor yang dipindahkan ke gas

BAB III

SIFAT-SIFAT TERMODINAMIK ZAT MURNI

Pada bab I telah dibahas mengenai tiga sifat zat yaitu tekanan, volum jenis, dan suhu. Disini bahasan ditekankan pada sifat-sifat dari zat murni. Sifat-sifat zat murni bergantung pada jumlah fase, keseragaman atau keheterogenan alami zat, dan jenis kuantitas energi yang berkaitan dengan jumlah dan jenis sifat-sifat yang dibutuhkan untuk keperluan analisis. Keadaan termodinamik zat murni ditentukan oleh dua sifat bebas

Tujuan dari bab ini adalah menjelaskan sifat termodinamik dari beberapa karakteristik zat murni. *Tujuan bab*

3.1.SIFAT-SIFAT BEBAS DARI ZAT MURNI

Satu alasan penting untuk memperkenalkan konsep zat murni adalah keadaan zat murni didefinisikan oleh dua sifat bebas. Sebagai contoh, misalkan uap bermassa tetap berada dalam bejana yang dilengkapi peralatan sedemikian rupa sehingga tekanan, volum, dan suhunya dapat diukur dengan mudah. Jika volumnya kita tetapkan pada suatu harga suhu tertentu yang kita pilih, nilai tekanan tidak dapat diubah. Sekali kita sudah menetapkan harga volum dan suhu, harga tekanan dalam kesetimbangan diperoleh secara alami. Jadi diantara tiga koordinat termodinamik p , V dan T hanya dua yang merupakan sifat bebas.

Sifat bebas

Sistem yang keadaannya ditentukan oleh dua sifat bebas disebut *sistem sederhana*. Walaupun tidak ada sistem yang benar-benar sederhana namun banyak sistem yang dapat dimodelkan sebagai sistem sederhana untuk keperluan analisis termodinamika. Contoh sistem sederhana adalah *sistem termampatkan sederhana*. Zat murni merupakan zat yang digunakan dalam sistem termampatkan sederhana oleh karena zat murni seringkali disebut sebagai *zat termampatkan sederhana*.

Sistem sederhana

Sistem termampatkan sederhana

Zat termampatkan sederhana

Untuk lebih memahami istilah sifat bebas, kita tinjau keadaan cairan jenuh dan uap jenuh dari zat murni. Suhu dan tekanan cairan jenuh dan uap jenuh dari zat murni adalah sama, akan tetapi keadaan keduanya benar-benar tidak sama. Oleh karena itu kita katakan bahwa dalam keadaan jenuh, suhu dan

tekanan bukan merupakan dua sifat yang saling bebas . Dua sifat bebas seperti tekanan dan volum jenis, atau tekanan dan kualitas digunakan untuk menentukan keadaan dari zat murni.

3.2.FASE

Fase adalah kuantitas zat yang mempunyai struktur fisika dan komposisi kimia yang seragam. Struktur fisika dikatakan seragam apabila zat terdiri dari gas saja, cair saja , atau padat saja . Sistem dapat terdiri dari dua fase seperti cair dan gas. Komposisi kimia dikatakan seragam apabila suatu zat hanya terdiri dari satu bahan kimia yang dapat berbentuk padat, cair, atau gas, atau campuran dari dua atau tiga bentuk itu. Campuran gas seperti udara atmosfer dianggap senyawa tunggal.

Fase

Zat murni mempunyai komposisi kimia yang seragam dan tidak berubah. Zat murni dapat berada dalam beberapa fase yaitu:

Zat murni

1. Fase padat biasanya dikenal dengan es
2. Fase cair
3. Fase uap
4. Campuran kesetimbangan fase cair dan uap
5. Campuran kesetimbangan fase padat dan cair
6. Campuran kesetimbangan fase padat dan uap

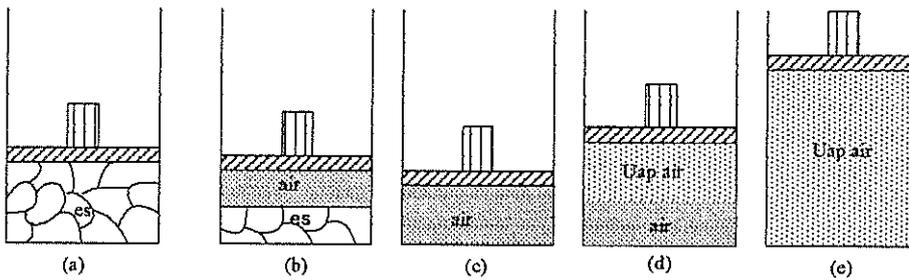
Zat murni kebanyakan mengandung lebih dari satu fase, tetapi komposisi kimianya sama untuk semua fase. Cairan air, campuran dari cairan air dan uap air, atau campuran es dan cairan air adalah zat murni karena setiap fase mempunyai komposisi kimia sama yaitu H_2O . Namun, campuran udara cair dan udara gas bukan merupakan zat murni karena komposisi fase udara cair berbeda dengan fase udara uap.

Kadang-kadang campuran gas seperti udara dianggap sebagai zat murni sepanjang tidak ada perubahan fase karena udara mempunyai beberapa karakteristik zat murni.

3.3. PERUBAHAN FASE

Peristiwa perubahan fase zat murni diilustrasikan pada gambar 3-1. Meskipun perubahan fase cair menjadi uap menjadi perhatian utama dalam termodinamika. Namun tidaka ada salhnya kita mulai membahas perubahan

fase dari fase padat sampai ke fase uap . Sebagai contoh disini digunakan sebuah silinder yang dilengkapi penghisap, silinder mula-mula berisi 1 kg es dengan tekanan 100 kPa kemudian dipanaskan secara perlahan pada tekanan konstan hingga seluruh es berubah menjadi uap.



Gambar 3-1 Perubahan fase untuk air dari fase padat ke fase uap

3.3.1.KEADAAN PADAT

Mula-mula silinder yang dilengkapi dengan piston diisi dengan es 1 kg pada suhu -20°C dengan tekanan 100 kPa ditunjukkan gambar 3-1a. Es dipilih sebagai sistem. Es dipanaskan secara perlahan pada tekanan tetap dan seragam sehingga suhu es bertambah secara teratur, selama es belum mencair seluruhnya suhu akan bertambah terus. Ketika suhunya mencapai 0°C , es mulai *mencair/melebur*. Proses melebur inilah yang disebut perubahan fase, dari fase padat ke fase cair. Es mulai menjadi jenuh.

Mencair/melebur

3.3.2. CAMPURAN DUA FASE PADAT-CAIR

Setelah es mulai melebur tampak bahwa tidak ada kenaikan suhu sekalipun terus menerus dipanaskan karena kalor yang diserap digunakan untuk melakukan perubahan fase. Pada keadaan ini sebagian es berubah menjadi cairan air, ditunjukkan gambar 3-1b. Es pada keadaan ini disebut *padatan jenuh*. Es akan terus mencair sampai pada butiran es yang terakhir melalui proses isothermal-isobarik. Suhu akan naik lagi setelah seluruh massa telah mencair. Untuk kebanyakan zat, volum jenisnya meningkat selama proses peleburan akan tetapi untuk air volum jenis cairan lebih kecil dibandingkan dalam bentuk padatan..

Padatan jenuh

3.3.3. KEADAAN CAIR

Setelah semua padatan es mencair seperti ditunjukkan gambar 3-1c penambahan kalor akan meningkatkan suhu cairan air dan mengakibatkan volum jenisnya meningkat pula secara perlahan dengan tekanan dijaga konstan. Kalor ditambahkan terus hingga suhu mencapai $99,6^{\circ}\text{C}$ dan gelembung-gelembung uap air mulai muncul dari permukaan cairan air. Cairan air dikatakan *mendidih/menguap*. Dengan demikian terjadi lagi perubahan fase, dari fase cair menjadi fase uap. Pada keadaan ini dikatakan cairan air mulai menjadi jenuh. Suhu pada keadaan jenuh disebut suhu jenuh dan tekanannya disebut tekanan jenuh.. Jadi untuk air pada suhu $99,6^{\circ}\text{C}$, tekanan jenuhnya adalah 100 kPa dan untuk air pada tekanan 100 kPa suhu jenuhnya adalah $99,6^{\circ}\text{C}$. Jika cairan berada pada suhu lebih rendah daripada suhu jenuh disebut *cairan subdingin* (subcooled) dan disebut *cairan tekan* (*liquid compressed*) bila tekanannya lebih tinggi dari tekanan jenuh.

Mendidih

Suhu jenuh

Cairan subdingin

Cairan tekan

3.3.4. CAMPURAN DUA FASE CAIR-UAP

Selama proses penguapan berlangsung suhunya konstan karena kalor yang diserap digunakan untuk berubah fase, ditunjukkan gambar 3-2d. Pada suhu jenuh ini sebagian zat berupa cairan dan sebagian berupa uap dan didefinisikan suatu kuantitas yang disebut *kualitas*. Kualitas didefinisikan sebagai perbandingan massa uap dengan massa total zat. Pada gambar 3-2d, misalkan massa zat cair adalah 0,4 kg, kualitas air (diberi simbol x) sama dengan 70%. Kualitas merupakan sifat intensif. Kualitas didefinisikan hanya zat bila berada pada keadaan jenuh yaitu pada suhu dan tekanan jenuh. Suhu akan bertambah setelah tetesan terakhir cairan menguap.

Cairan jenuh

Suhu jenuh

Kualitas

3.3.5. KEADAAN UAP

Setelah semua massa cairan berubah menjadi uap, suhu akan naik lagi dan volum jenis uap ikut bertambah pula, gambar 3-2e. Uap yang berada pada suhu diatas suhu jenuh dikatakan sebagai *uap panas lanjut* atau sering disebut *gas*. Tekanan dan suhu uap panas lanjut adalah sifat

Uap panas lanjut/gas

saling bebas, karena pada keadaan ini suhu terus meningkat akan tetapi tekanan tetap konstan.

3.4.PERMUKAAN TERMODINAMIK

Keadaan kesetimbangan sebarang zat termampatkan sederhana dapat dinyatakan dalam permukaan segiempat, ruang tiga dimensi.

3.4.1.PERMUKAAN $p-v$

Dalam diagram ini, tekanan, volum jenis, dan suhu dirajah pada kordinat saling tegaklurus. Gambar 3-2 dan 3-3 memperlihatkan diagram skematik dari permukaan $p-v-T$. Setiap garis pada permukaan menyatakan proses rebersibel atau keadaan kesetimbangan. Garis-garis dalam gambar 3-2 dan 3-4 menunjukkan proses isothermal. Gambar 3-2 menunjukkan permukaan zat yang menyusut ketika membeku seperti sifat CO_2 dan gambar 3-3 menunjukkan gambar zat yang memuai ketika membeku seperti H_2O . Koordinat dari sebuah titik akan memberikan nilai tekanan, volum jenis, dan suhu pada saat zat dalam kesetimbangan

Dari gambar dapat dilihat terdapat daerah tertentu dimana zat berada pada keadaan *fase tunggal*. Daerah ini diberi nama padatan, cairan, dan uap atau gas. Pada daerah fase tunggal keadaan zat dapat ditentukan oleh pasangan sifat dari tekanan, volum, dan suhu karena ketiga sifat ini saling bebas pada fase tunggal.

Terdapat daerah lain yang berada diantara daerah dua fase tunggal disebut *daerah dua fase*. Daerah ini adalah daerah dimana dua fase berada dalam kesetimbangan sekaligus yaitu fase padat-cair, padat-uap, dan cair-uap. Proses peleburan, penguapan, dan sublimasi terjadi pada daerah ini. Oleh karena itu, pada daerah dua fase tekanan dan suhu bukan merupakan sifat yang saling bebas, perubahan suhu akan diikuti oleh perubahan tekanan atau sebaliknya. Kesetimbangan tiga fase sekaligus berada pada sepanjang garis yang disebut *garis tripel*.

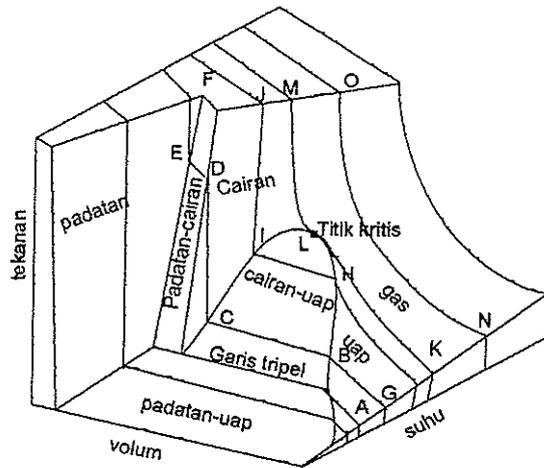
Fase tunggal

Pada fase tunggal, p , v , dan T saling bebas

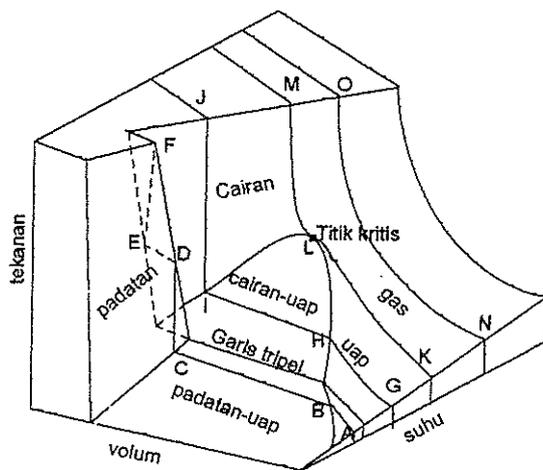
Daerah dua fase

Kesetimbangan tiga fase

Garis tripel



Gambar 3-2. Permukaan $p-v-T$ untuk zat yang menyusut ketika membeku



Gambar 3-3 Permukaan $p-v-T$ untuk zat yang memuai ketika membeku

Daerah berbentuk kubah yang terdiri dari fase cair dan fase uap disebut **kubah uap** yang dibatasi oleh garis cair jenuh disebelah kiri dan garis uap jenuh disebelah kanan. Cairan disebelah kiri-garis cair-jenuh disebut cairan subdingin. Keadaan jenuh adalah keadaan dimana suatu perubahan fase berawal dan berakhir. Puncak kubah dimana garis cair jenuh dan garis uap jenuh bertemu disebut **titik kritis**. Suhu pada titik kritis disebut **suhu kritis**. Pada suhu kritis fase cair dan fase uap terjadi secara bersamaan sehingga volum jenis cairan sama dengan volum jenis uap, volum pada saat ini disebut **volum kritis**. Tekanan pada titik kritis

Kubah uap

Titik kritis
Suhu kritis

Volum kritis
Tekanan kritis

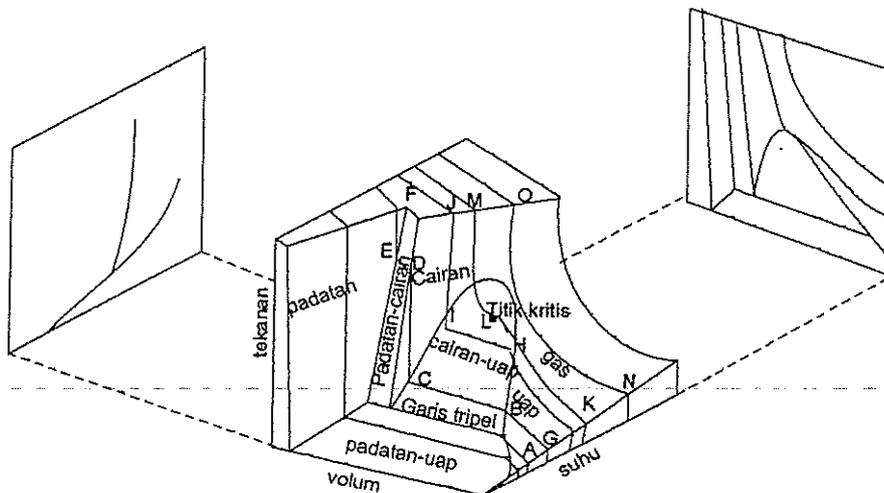
disebut *tekanan kritis*. Tabel 3-1 memperlihatkan data titik kritis dari beberapa zat.

Tabel 3-1. Data titik kritis dari beberapa zat (Wyllen,1985)

| Nama zat | Suhu Kritis °C | Tekanan Kritis MPa | Volum Kritis m ³ /kg |
|-----------------|-------------------|-----------------------|------------------------------------|
| Air | 374,14 | 22,09 | 0,003155 |
| Karbon dioksida | 31,05 | 7,39 | 0,002143 |
| Oksigen | -118,35 | 5,08 | 0,002438 |
| Hidrogen | -239,85 | 1,30 | 0,032192 |

3.4.2. PROYEKSI PERMUKAAN $p-v-T$

Permukaan $p-v-T$ tiga dimensi sangat bermanfaat untuk mengkaji perubahan fase dari suatu zat, namun seringkali lebih mudah mempelajarinya dengan menggunakan proyeksi dua dimensi. Proyeksi permukaan $p-v-T$ terhadap permukaan $p-T$ dan $p-v$ ditunjukkan pada gambar 3-4. Walaupun proyeksi permukaan $p-v-T$ terhadap permukaan $v-T$ jarang digunakan namun akan kita bahas pula dibawah ini.



Gambar 3-4. Proyeksi permukaan $p-v-T$ pada permukaan $p-T$ dan $p-v$

Diagram Fase (Diagram p - T)

Ketika gambar permukaan p - v - T diproyeksikan pada diagram p - T , daerah padatan-cairan menjadi garis peleburan, daerah cairan-uap menjadi garis penguapan, dan daerah padatan-uap menjadi garis sublimasi. Garis tripel diproyeksikan menjadi menjadi titik tripel.

Diagram p - T atau *diagram fase* secara skematik ditunjukkan gambar 3-5. Tekanan uap zat padat diukur pada berbagai suhu hingga titik tripelnya dicapai dan kemudian tekanan zat cairnya diukur hingga mencapai titik kritisnya. Kemudian hasilnya dirajah pada digaram p - T dan diperoleh gambar 3-4. *Garis peleburan* menyatakan kesetimbangan fase padat dan cair, *garis penguapan* menyatakan kesetimbangan fase cair dan uap, dan *garis sublimasi* menyatakan kesetimbangan fase padat dan uap. Dan hanya pada satu titik ketiga fase tersebut berada dalam kesetimbangan yaitu pada *titik tripel*. Pada diagram p - T , titik tripel digambarkan sebagai perpotongan garis peleburan, garis penguapan dan garis sublimasi. Hanya pada diagram p - T , titik tripel digambarkan sebagai titik, pada diagram p - v dan diagram T - v titik tripel digambarkan sebagai garis. Tabel 3-2 memperlihatkan titik tripel dari beberapa zat. Dari data titik tripel pada tabel diperlihatkan bahwa titik tripel untuk zat berbeda-beda nilainya. Misalnya untuk Oksigen, titik tripelnya terjadi pada suhu 54,36 K dan tekanan 152 Pa.

Kemiringan garis sublimasi dan garis penguapan untuk semua zat berharga positif. Namun kemiringan garis peleburan dapat positif atau negatif. Untuk kebanyakan zat, kemiringan garis peleburan adalah positif karena pada umumnya zat memuai ketika melebur, ditunjukkan gambar 3-5a. Air merupakan satu pengecualian yang penting. Setiap zat yang menyusut ketika melebur seperti air, kemiringan garis peleburannya adalah negatif, ditunjukkan gambar 3-5b.

Andaikan padatan ada dalam keadaan A, kemudian suhu diperbesar secara perlahan-lahan dengan tekanan dijaga konstan, zat secara langsung berubah menjadi uap ditunjukkan oleh titik B. Peristiwa berubahnya zat padat menjadi uap disebut *sublimasi*. Proses CD melalui titik tripel dan hanya pada titik tripel ini dicapai kesetimbangan fase padat, cair, dan uap. Proses EF memperlihatkan proses dari fase padat ke fase

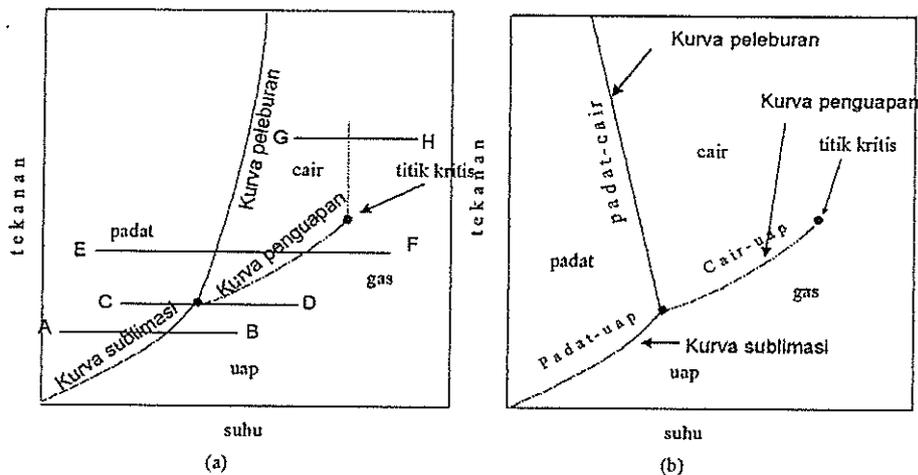
Diagram fase

Garis peleburan
Garis
penguapan
Garis sublimasi

Titik tripel

sublimasi

cair dan kemudian ke fase uap. Perubahan fase padat ke cair terjadi secara isothermal. Setelah semua padatan berubah menjadi cairan, suhu bertambah besar dengan tekanan konstan. Pada akhirnya semua cairan berubah menjadi uap. Pada tekanan diatas tekanan tekanan kritis seperti proses GH tidak ada lagi perbedaan yang tajam antara fase cair dan uap.



Gambar 3-5. Diagram p - T untuk zat murni (a) Menyusut pada saat membeku (b) memuai pada saat membeku

Tabel 3-2 Data titik tripel

| Nama zat | $T(K)$ | p (mmHg) | $p(Pa)$ |
|------------------|--------|------------|---------|
| Helium-4 | 2,177 | 37,77 | 5035 |
| Hidrogen | 13,97 | 52,8 | 7040 |
| Deutrium(normal) | 18,63 | 128 | 17,100 |
| Neon | 24,56 | 324 | 43,200 |
| Oksigen | 54,36 | 1,14 | 152 |
| Nitrogen | 63,15 | 94 | 12500 |
| Amoniak | 195,40 | 45,57 | 6075 |
| Dioksid belerang | 197,68 | 1,256 | 167,5 |
| Dioksid karbon | 216,55 | 3880 | 517,000 |
| Air | 273,16 | 4,58 | 611 |

Tabel 3-3. Titik tripel air

| Fase dalam kesetimbangan | T(K) | p(mmHg) | p(kPa) |
|--------------------------|--------|---------------------|--------|
| Es I, cairan, uap | 273,16 | 4,585 | 0,6112 |
| Es I, cairan, es III | 251,15 | $1,556 \times 10^6$ | 2,075 |
| Es I, es II, es III | 238,45 | $1,597 \times 10^6$ | 2,129 |
| Es II, es III, es V | 248,85 | $2,583 \times 10^6$ | 3,443 |
| Es III, cairan, es V | 256,15 | $2,598 \times 10^6$ | 3,463 |
| Es V, cairan, es VI | 273,31 | $4,694 \times 10^6$ | 6,258 |
| Es VI, cairan, es VII | 354,75 | $1,648 \times 10^6$ | 2,197 |

Semua zat murni mempunyai perilaku umum yang sama seperti air. Oleh karena itu digunakan air sebagai contoh disini. Gambar 3-6 memperlihatkan sejumlah fase padat dari air. Zat murni dapat mempunyai sejumlah titik tripel tetapi hanya satu titik tripel yang mempunyai kesetimbangan fase padat, cair, dan uap. Pada tabel 3-3 yang dibuat oleh Bridgman dan Tamman menunjukkan bahwa air mempunyai tujuh titik tripel. Bridgman dan Tamman menemukan bahwa garis es dari air pada tekanan tinggi mempunyai lima modifikasi dari es yang diberi tanda es II, III, V, VI, dan VII. Es I adalah es biasa. Sedangkan dua modifikasi lain yaitu es IV dan VIII ternyata tak mantap

Lima modifikasi dari es

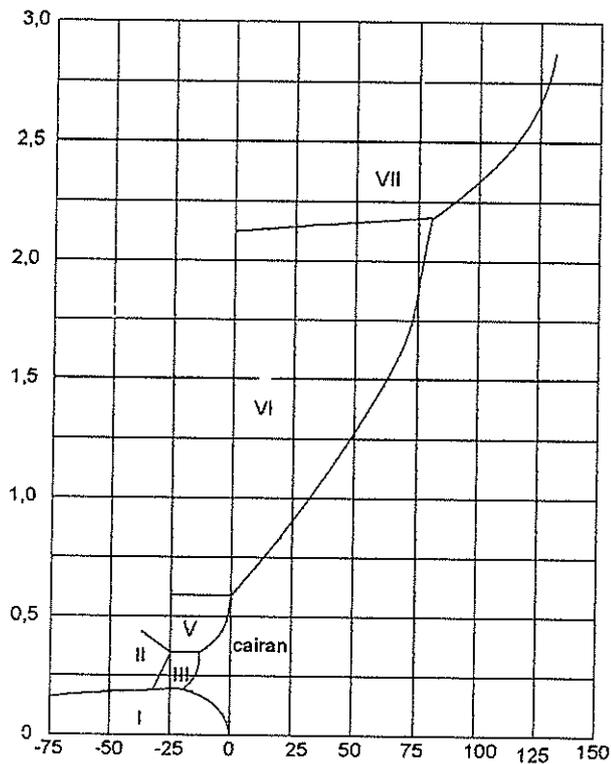
Diagram p-v

Proyeksi gambar 3-2 dan 3-3 ke dalam diagram p-v diperlihatkan pada gambar 3-7(a) dan 3-7(b). Pada diagram p-v nampak garis-garis isothermal. Dibawah isothermal kritis, pada suhu tertentu tekanan akan tetap pada daerah dua fase uap-cair yang dilintasinya. *Isothermal kritis* adalah proses isothermal melalui titik kritis.

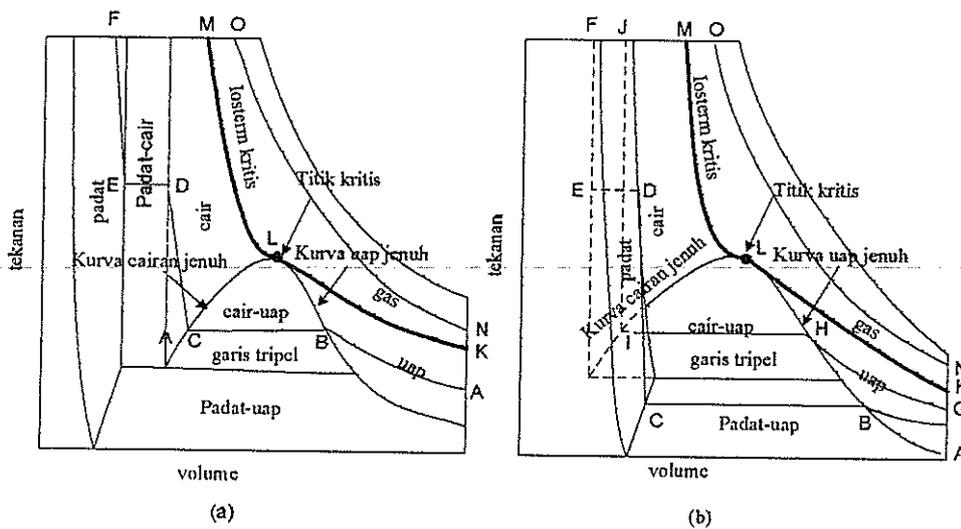
Isothermal kritis

Kita tinjau proses ABCDEF sepanjang garis isothermal pada suhu T. Untuk melakukan proses ini kita bayangkan zat ada dalam silinder yang dilengkapi dengan piston yang dapat bergerak. Zat dapat melakukan pertukaran energi dengan tandon kalor pada suhu T dan piston digandengkan dengan tandon kerja. Misalkan zat mula-mula dalam fase uap tak jenuh berada pada titik A dimampatkan secara perlahan dengan

menggerakkan piston melalui proses isothermal. Volum turun dan kerja dilakukan pada zat dan kalor dilepaskan.



Gambar 3-6.



Gambar 3-7 Diagram p-v (a) menyusut ketika membeku (b) memuai ketika membeku

Ketika keadaan yang ditandai dengan titik B dicapai, uap menjadi jenuh dan tetesan cairan mulai muncul pada silinder, proses pengembunan terjadi. Proses pengembunan terjadi sepanjang garis lurus BC. Zat terbagi menjadi dua fase dengan densitas yang berbeda meskipun keduanya dalam tekanan dan suhu yang sama. Volum berkurang sepanjang garis BC dengan tekanan tetap. Lagi kerja dilakukan pada zat dan lagi kalor dilepaskan. Fraksi zat dalam fase uap berkurang secara malar dan fraksi zat dalam fase cair bertambah secara malar. Setiap titik pada garis BC menyatakan kesetimbangan cairan dan uap, pada keadaan ini uap disebut sebagai *uap jenuh* dan cairan disebut *cairan jenuh*. Pada titik C, zat seluruhnya dalam fase cair. Karena koefisien ketermampatan cairan kecil diperlukan tekanan sangat besar untuk menurunkan volum sampai ke titik D. Sekali lagi kerja dilakukan pada zat dan kalor dibebaskan, jumlah kerja yang dilakukan tidak sama besar dengan jumlah kalor yang dilepaskan karena terjadi perubahan energi dalam. Sepanjang garis CD, zat berada dalam fase cair.

Uap jenuh

Cairan jenuh

Pada titik D zat kembali terbagi menjadi dua fase yaitu fase cair dan padat. Kristal/ butiran zat mulai bermunculan dengan tekanan dijaga konstan, volumenya berkurang. Kerja dilakukan pada zat dan kalor dibebaskan. Kerja yang dilakukan jauh lebih kecil dibandingkan dengan kalor yang dilepaskan karena volum jenis cairan dan padatan tidak jauh berbeda dan disini terdapat perubahan energi dalam yang besar. Proses ABCD merupakan proses isothermal khas suatu zat murni pada diagram $p-v$

Daerah dua fase

Pada titik E seluruh zat dalam fase padat. Volum hanya turun sedikit dengan kenaikan tekanan.

Fase padat

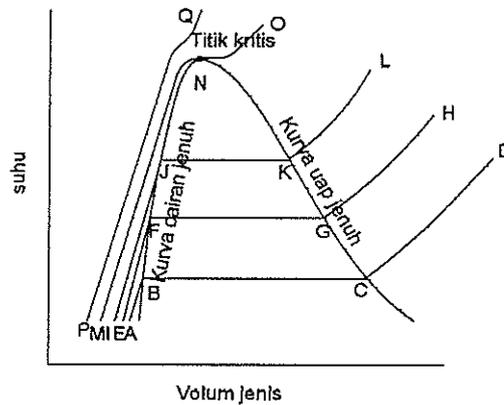
Pada atau diatas isothermal kritis tidak ada fase uap-cair yang dilintasi. Garis isothermal kritis melalui sebuah titik belok pada titik kritis dengan kemiringan sama dengan nol. Diatas isothermal kritis tidak ada pemisahan fase.

Isothermal kritis

Jika sekarang volum dari sistem dinaikkan secara perlahan, semua perubahan terjadi sebaliknya dengan yang dijelaskan diatas. Kalor akan diserap untuk perubahan fase dan kerja dilakukan oleh sistem.

Diagram $T-v$

Gambar 3-8 memperlihatkan proyeksi permukaan $p-v-T$ ke permukaan suhu-volum jenis yang menghasilkan diagram $T-v$.



Gambar 3-8 Diagram $T-v$

Pada tekanan dibawah tekanan kritis, tekanan dan suhu akan konstan pada saat melewati daerah dua fase. Kita tinjau proses ABCD. Pada fase tunggal (fase cair dan fase uap) suhu naik dengan tekanan tetap (proses AB dan proses CD) pada saat volum jenis meningkat. Pada daerah dua fase (proses BC), tekanan dan suhu konstan pada volum jenis meningkat.

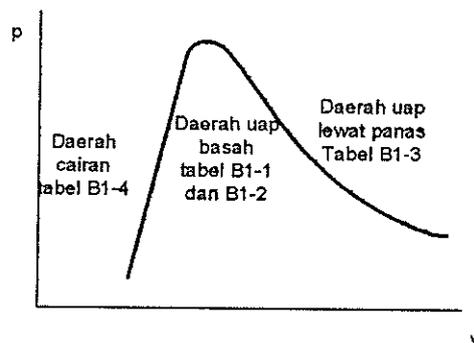
Pada tekanan sama atau diatas tekanan kritis (proses MNO dan PQ), suhu terus meningkat dengan tekanan tetap pada saat volum jenis meningkat dan tidak ada lintasan yang melalui fase cair-uap.

3.5. TABEL TERMODINAMIK

Sifat termodinamika dapat ditampilkan dalam berbagai cara seperti tabel, grafik, persamaan, dan perangkat lunak komputer. Pada subbab ini kita akan mengutamakan penggunaan tabel sifat dari uap karena uap banyak digunakan dalam pembangkit daya (*power plant*) dan proses industri. Gambar 3-9 merupakan diagram $p-v$. Daerah sebelah kiri garis menunjukkan daerah fase cairan. Suhu cairan pada fase ini berada dibawah suhu jenuh. Daerah antara dua garis jenuh adalah daerah uap basah, dimana terjadi kesetimbangan fase cair dan padat. Fase cairan dan

padat berada pada suhu dan tekanan jenuh. Sebelah kanan garis uap jenuh adalah daerah panas lanjut.

Sifat-sifat dari beberapa zat ditabulasikan pada lampiran B. Argumen yang digunakan dalam tabel adalah tekanan, suhu, atau keduanya. Sifat-sifat yang ditabulasikan dalam beberapa tabel adalah volum jenis (v), energi dalam jenis (u), entalpi jenis (h), dan entropi jenis (s). Tabel B1-1 sampai B1-5 disebut tabel uap. Tabel B2-1 sampai B2-2 adalah tabel amoniak, tabel B3-1 sampai B3-2 adalah tabel Refrijeran. Tabel dalam satuan SI diberi tanda huruf SI, misal B1-1SI. Tabel dalam satuan Inggris diberi tanda huruf E, misal B1-1E.



Gambar 3-9. Diagram p - v dari uap

3.5.1. CAIRAN JENUH DAN UAP JENUH

Cairan jenuh ditandai dengan subskrip f dan uap jenuh diberi tanda dengan subskrip g . Selisih antara cairan jenuh dengan uap jenuh diberi tanda dengan subskrip fg , sebagai contoh $v_{fg} = v_g - v_f$ yang menyatakan kenaikan volum jenis bila keadaan berubah dari cairan jenuh ke uap jenuh.

Air dan uapnya merupakan zat yang paling banyak ditabulasikan. Tabel B1-1SI sampai B1-5SI keduanya merupakan tabel jenuh dan memberikan sifat dari air jenuh dan uap jenuh yang dinyatakan dalam satuan SI sedang untuk satuan keteknikan diberikan dalam tabel B1-1E sampai B1-5E. *Sebagai contoh*, pada tabel B1-1SI, uap 100°C , tekanannya adalah $0,10135 \text{ MPa}$, memberikan nilai $v_f = 0,001044 \text{ m}^3/\text{kg}$. Sedangkan tabel B1-1E pada suhu 212°F , tekanannya adalah $14,698 \text{ lb}/\text{in}^2$, memberikan $v_f = 0,016716 \text{ ft}^3/\text{lbm}$.

Perbedaan mendasar pada kedua tabel B1-1 dan B1-2 adalah argumen yang digunakan. Tabel B1-1 menggunakan suhu sebagai argumen dan tabel B1-2 menggunakan tekanan sebagai argumen. *Sebagai contoh*, suhu 200^oF, pada tabel B1-1E menunjukkan tekanannya adalah 11,529 lb/in². Sedangkan tabel B1-2E, tekanan 10 lb/in² memberikan suhu 193,19^oF. Dari tabel-tabel ini sifat untuk keadaan jenuh dapat diperoleh secara langsung. Bila suhu dan tekanan kedua-duanya diketahui, salah satu tabel dapat digunakan, dan pilihan akan ditentukan oleh kriteria umum interpolasi minimum.

Seringkali ketika kita menyelesaikan soal, keadaan yang kita dapati tidak tepat pada titik nilai yang tersedia dalam tabel sifat. Sehingga kita perlu melakukan interpolasi yang teliti terhadap nilai entri yang berdekatan yang pada tabel sifat. Tabel yang tersedia pada lampiran sudah merupakan tabel yang lengkap oleh karena penggunaan interpolasi linier sudah memberikan ketelitian yang memadai. *Sebagai contoh*, berapakah volum jenis uap pada tekanan 6 kPa?. Dari tabel B1-2SI, untuk $p = 5$ kPa, $v_f = 0,001005$ m³/kg dan untuk $p = 7,5$ kPa, $v_f = 0,001008$ m³/kg. Dengan menggunakan interpolasi linier kita akan menghitung suhu pada v_f pada $p = 6$ kPa.

$$v_f = 0,001005 + \frac{6-5}{7,5-5} (0,001008 - 0,001005) \text{ m}^3/\text{kg}$$

Jadi pada $p = 6$ kPa, $v_f = 0,0010062$ m³/kg

Contoh 3-1.

Hitung tekanan, volum jenis, dan energi dalam air jenuh pada suhu 260^oF

Penyelesaian:

Dari tabel A1-2E untuk $T = 260^{\circ}\text{F}$

$$p = 35,42 \text{ psi}$$

$$v_f = 0,017084 \text{ ft}^3/\text{lbm}$$

$$u_f = 228,64 \text{ Btu/lbm}$$

Contoh 3-2.

Hitung suhu, volum jenis, dan energi dalam uap jenuh pada tekanan 59 kPa

Penyelesaian:

Dari tabel A1-2SI untuk $p_f = 50$ kPa, $T_f = 81,33^{\circ}\text{C}$

$$p_2 = 75 \text{ kPa}, T_2 = 91,78^\circ\text{C}$$

Dengan menggunakan interpolasi

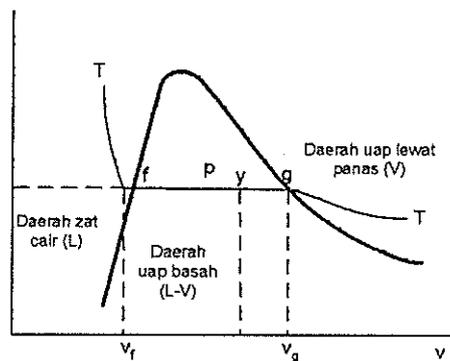
$$T = 81,33 + \frac{59 - 50}{75 - 50} (91,78 - 81,33)^\circ\text{C} = 85,092^\circ\text{C}$$

Interpolasi dilanjutkan dengan cara yang sama dengan menggunakan tabel B1-2SI untuk menghitung kuantitas-kuantitas yang lain dengan entri tekanan karena merupakan nilai yang bulat daripada dengan entri suhu.

3.5.2. UAP BASAH

Penentuan sifat dari uap basah yang berada didalam daerah dua garis jenuh merupakan masalah khusus, ditunjukkan gambar 3-10. Dalam daerah ini, suhu dan tekanan bukan merupakan dua sifat yang saling bebas dan tidak cukup untuk mendefinisikan keadaan.

Titik f menyatakan keadaan cairan jenuh dan titik g menyatakan keadaan uap jenuh. Titik-titik antara f dan g misalnya z menyatakan zat merupakan campuran dari cairan jenuh dan uap jenuh.



Gambar 3-10. Diagram p-v untuk zat murni

Pada fase cair yaitu dititik f, volum jenis zat cair adalah v_f sedang pada fase uap dititik g volum jenis uap adalah v_g . Jika m_f dan m_g menyatakan massa dari fase cair dan uap, massa total m adalah:

$$m = m_f + m_g \quad (3-1)$$

Volum fase cair dan fase uap adalah:

$$V_f = m_f v_f \quad V_g = m_g v_g \quad (3-2)$$

Volum total sistem

$$V = V_f + V_g = m_f v_f + m_g v_g \quad (3-4)$$

Untuk air, perbandingan massa fase uap dan massa total, disebut *kualitas* dinyatakan dengan x . Perbandingan massa fase cair dengan massa total disebut *fraksi kelembaban* y , dituliskan:

$$\boxed{x = \frac{m_g}{m_f + m_g}} \quad \boxed{y = \frac{m_f}{m_f + m_g}} \quad (3-5)$$



Gambar 3-11. Kualitas dan kelembaban

Pers. (3-4) dibagi dengan $m_f + m_g$ dan dengan menyulihkan pers (3-5) diperoleh:

$$\boxed{v = (1 - x)v_f + xv_g} \quad (3-6)$$

Bila volum sistem diubah sebesar dV , karena v_g dan v_f tetap, maka:

$$dV = v_f dm_f + v_g dm_g \quad (3-7)$$

Karena massa total tetap, maka

$$dm_f + dm_g = 0 \quad (3-8)$$

Dengan mengkombinasikan pers. (3-7) dan (3-8), diperoleh:

$$dV = (v_g - v_f) dm_{fg}$$

Subskrip fg menunjukkan besar massa mutlak $|dm_{fg}| = |dm_f| = |dm_g|$ yang telah dipindahkan dari cairan ke fase gas. Jadi kerja yang dilakukan adalah:

$$d'W = p dV = p(v_g - v_f) dm_{fg} \quad (3-9)$$

Jika energi dalam dalam fase uap dan caoiran adalah u_g dan u_f , maka energi dalam sistem:

$$U = m_f u_f + m_g u_g \quad (3-10)$$

$$dU = u_f dm_f + u_g dm_g$$

$$dU = (u_g - u_f) dm_{fg} \quad (3-11)$$

Menurut hukum pertama, kalor yang mengalir masuk sistem,

$$d'Q = dU + d'W$$

$$d'Q = (u_g - u_f)dm_{fg} + p(v_g - v_f)dm_{fg}$$

$$d'Q = [(u_g - u_f) + p(v_g - v_f)]dm_{fg}$$

Jika besaran dalam kurung adalah konstan, maka kalor yang mengalir masuk sistem untuk massa berhingga m_{fg} adalah:

$$Q = [(u_g - u_f) + p(v_g - v_f)]m_{fg} \quad (3-12)$$

Kalor yang mengalir masuk sistem persatuan massa q adalah:

$$q = \frac{Q}{m_{fg}} = [(u_g - u_f) + p(v_g - v_f)]$$

$$q = [(u_g - u_f) + p(v_g - v_f)] \quad (3-13)$$

dari definisi $h = u + pv$, diperoleh:

$$q = h_g - h_f \quad (3-14)$$

Untuk keadaan jenuh, entalpi dapat dihitung dari:

$$h = (1-x)h_f + xh_g \quad (3-15)$$

$$h = h_f - xh_{fg}$$

$$h = h_g - (1-x)h_{fg} \quad (3-16)$$

$h_{fg} = h_g - h_f$ adalah kenaikan entalpi selama penguapan

Serupa dengan diatas dapat kita peroleh persamaan untuk energi dalam:

$$u = (1-x)u_f + xu_g \quad (3-17)$$

$$u = u_f - xu_{fg}$$

$$u = u_g - (1-x)u_{fg} \quad (3-18)$$

$u_{fg} = u_g - u_f$ adalah kenaikan energi dalam selama penguapan.

Contoh 3-3:

Tentukan volum jenis v , entalpi h , dan entropi s dari air pada keadaan

a). Tekanan 7,4 kPa dan suhu 40°C

b). Tekanan 2,5 MPa dan suhu 120°C

Penyelesaian

a) $v = 19,521008 \text{ m}^3/\text{kg}$

$h = 2741,87 \text{ kJ/kg}$

$$s = 8,8295 \text{ kJ/kg K}$$

$$b) v = 1,0590 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h = 505,33 \text{ kJ/kg}$$

$$s = 1,5255 \text{ kJ/kg K}$$

Contoh 3-4:

Tentukan volum jenis, entalpi jenis dan energi dalam jenis dari air pada 2 kPa dengan kualitas 10%

$$p = 2 \text{ kPa}$$

$$x = 10\%$$

Dari tabel diperoleh:

$$v_f = 0,001001 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad v_g = 67,00 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_f = 73,48 \text{ kJ/kg}, \quad u_{fg} = 2326,0 \text{ kJ/kg}, \quad u_g = 2399,5 \text{ kJ/kg}$$

$$h_f = 73,48 \text{ kJ/kg}, \quad h_{fg} = 2460 \text{ kJ/kg}, \quad h_g = 2533,5 \text{ kJ/kg}$$

Penyelesaian:

$$v = (1 - x)v_f + xv_g$$

$$= (1 - 0,1)0,001001 + 0,1(67) = 6,7009009 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h = (1 - x)h_f + xh_g$$

$$= (1 - 0,1) 73,48 + 0,1(2533,5) = 319,482 \text{ kJ/kg}$$

$$u = (1 - x)u_f + xu_g$$

$$= (1 - 0,1) 73,48 + 0,1(2399,5) = 306,082 \text{ kJ/kg}$$

Contoh 3-5.

Tekanan dan suhu uap ditentukan 65 psi dan 298°F., suatu sampel dari sistem ini dilewatkan melalui kalorimeter pemisahan dan 0,5 lbm air terkumpul selama 5 menit. Dari data laju aliran uap kering adalah 0,4 lbm/menit. Cari (a). kualitas (b). volum jenis (c). entalpi (d). energi dalam uap.

Penyelesaian:

$$m_{H_2O} = 0,5 \text{ lbm}$$

$$m_{\text{uap kering}} = 0,4 \text{ lbm/menit} \times 5 \text{ menit} = 2 \text{ lbm}$$

Pada $T = 298^\circ F$ dan $p = 65 \text{ psi}$, dari tabel diperoleh: $v_f = 0,017 \text{ ft}^3/\text{lbm}$ dan

$$v_g = 6,657 \text{ ft}^3/\text{lbm}$$

$$h_{fg} = 911,9 \text{ Btu/lbm}, \quad h_g = 1179,6 \text{ Btu/lbm}$$

$$u_{fg} = 831,1 \text{ Btu/lbm}, u_g = 1099,5 \text{ Btu/lbm},$$

$$(a). \quad x = \frac{m_g}{m_f + m_g} = \frac{2}{2 + 0,5} = 0,8 = 80\%$$

$$(b). \quad v = (1-x)v_f + xv_g = 0,2 \times 0,017 + 0,8 \times 6,657 = 5,329 \text{ ft}^3/\text{lbm}$$

$$(c). \quad h = h_g - (1-x)h_{fg} = 1179,6 - 0,2 \times 911,9 = 997,2 \text{ Btu/lbm}$$

$$(d). \quad u = u_g - (1-x)u_{fg} = 1099,5 - 0,2 \times 832,1 = 933,1 \text{ Btu/lbm}$$

Contoh 3-6

Suatu wadah $3 \times 10^4 \text{ cm}^3$ berisi campuran cairan dan uap air pada tekanan 4 kPa. Massa total adalah 15 kg. Hitung kalor yang harus ditambahkan dan kualitas campuran sesudah penambahan kalor untuk menaikkan tekanan hingga 5 kPa pada volum konstan.

$$V = 3 \times 10^4 \text{ cm}^3 = 30 \text{ m}^3$$

$$p_1 = 4 \text{ kPa}$$

$$m = 15 \text{ kg}$$

$$p_2 = 5 \text{ kPa}$$

Dari tabel untuk tekanan 4 kPa diperoleh:

$$v_f = 0,001004 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad v_g = 34,8 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_f = 121,45 \text{ kJ/kg}, \quad u_{fg} = 2293,7 \text{ kJ/kg}$$

Dari tabel tekanan 5 kPa diperoleh:

$$v_f = 0,001005 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad v_g = 28,19 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_f = 137,81 \text{ kJ/kg}, \quad u_{fg} = 2282,7 \text{ kJ/kg}$$

Penyelesaian

Volum jenis campuran pada tekanan 4 kPa adalah

$$v = \frac{V}{m} = \frac{30}{15} = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Kualitas pada tekanan 4 kPa adalah:

$$v = (1-x_1)v_f + x_1v_g$$

$$0,5 = (1-x_1) 0,001004 + x_1(34,8)$$

Hasilnya adalah

$$x_1 = 0,014 = 1,4 \%$$

Energi dalam jenis pada tekanan 4 kPa

$$u_1 = u_f + x_1u_{fg}$$

$$0,5 = (1-x_1) 0,001004 + x_1(34,8)$$

Hasilnya adalah

$$x_1 = 0,014 = 1,4 \%$$

Energi dalam jenis pada tekanan 4 kPa

$$\begin{aligned} u_1 &= u_f + x_1 u_{fg} \\ &= 121,45 + 0,014 \times 2293,7 = 153,56 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Kualitas pada tekanan 5 kPa

$$\begin{aligned} v &= (1-x_2)v_f + x_2 v_g \\ 0,5 &= (1-x_2) 0,001005 + x_2(28,19) \end{aligned}$$

Hasilnya adalah

$$x_2 = 0,018 = 1,8\%$$

Energi dalam jenis pada tekanan 5 kPa

$$\begin{aligned} u_2 &= u_f + x_2 u_{fg} = 137,81 + 0,018 \times 2282,7 \\ &= 178,9 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Untuk volum konstan, kalor yang dipindahkan adalah

$$\begin{aligned} Q &= U_2 - U_1 = m (u_2 - u_1) \\ &= 15 (178,9 - 153,56) = 380,1 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Karena $Q > 0$ jadi system menyerap kalor sebesar 380,1 kJ

3.5.3 UAP PANAS LANJUT

Uap dikatakan panas lanjut apabila suhunya melebihi suhu jenuh pada tekanan yang diberikan. Perbedaan antara suhu aktual dengan suhu jenuh disebut *panas lanjut* (*superheat, SH*). Tabel B1-3SI dan tabel A1-3E dari tabel uap dimulai dari suhu uap jenuh sampai ke suhu yang lebih tinggi untuk setiap nilai tekanan mutlak yang diberikan. Entri pada tabel ini adalah suhu dan tekanan karena uap panas lanjut berada dalam daerah fase tunggal sehingga tekanan dan suhu merupakan sifat bebas yang menentukan keadaan dalam daerah ini. Nilai yang berada diantara tanda kurung pada setiap nilai tekanan yang diberikan menunjukkan nilai suhu uap jenuh pada tekanan itu.. Tabel ini juga memperlihatkan nilai dari v , u , h , dan s untuk uap superjenuh.

Contoh 3-7

Hitung (a) panas lanjut dan (b) energi dalam uap pada tekanan 0,2 MPa dan suhu 155°C.

Penyelesaian:

Uap panas lanjut pada tekanan 0,2 MPa, suhu jenuh = 120,23°C

Untuk $T = 150^\circ\text{C}$, $u = 2576,9$ kJ/kg

Untuk $T = 200^\circ\text{C}$, $u = 2654,4$ kJ/kg

(a) $SH = T - T_{\text{jenuh}} = 155 - 120,23 = 34,77^\circ\text{C}$

(b) Dengan menggunakan interpolasi, tenaga dalam pada $T = 155^\circ\text{C}$,

$$u = 2576,9 + \frac{155 - 150}{200 - 150} (2654,4 - 2576,9)$$

$$= 2584,65 \text{ k/kg}$$

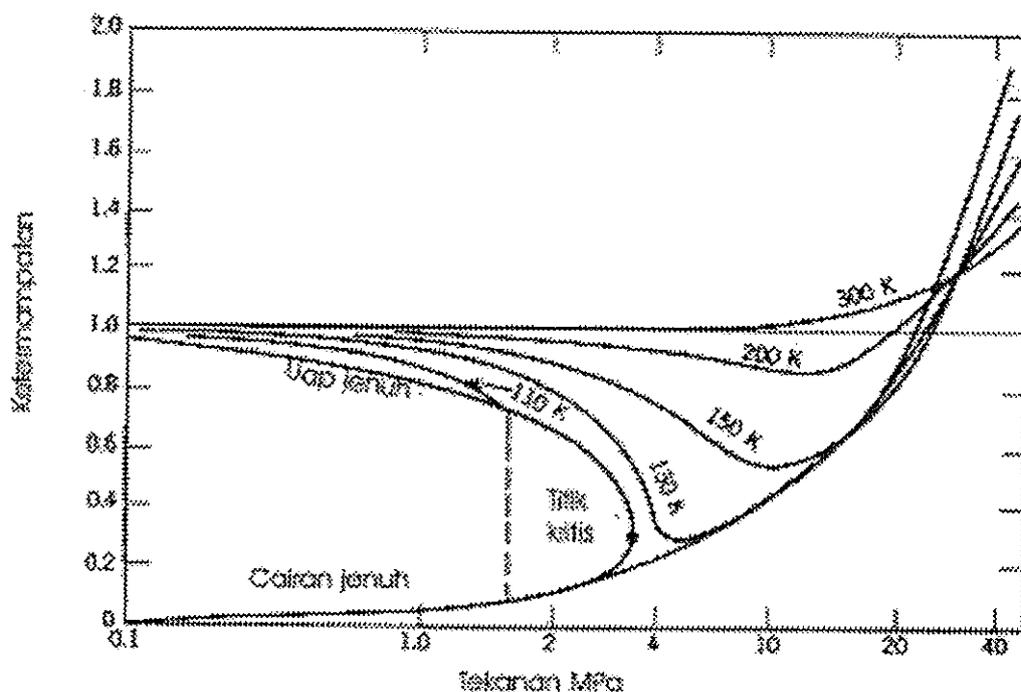
3.5.5. CAIRAN TEKAN

Uap pada suhu jenuh terjadi pada tekanan cairan jenuh, uap basah atau uap jenuh. Jika suhu aktual lebih besar dari suhu jenuh untuk tekanan cairan jenuh yang diberikan, uap berada berada dalam fase uap panas lanjut. Zat yang berada dalam fase cair pada suhu dibawah suhu jenuh dan tekanan jenuh, keadaannya didefinisikan hanya oleh tekanan dan suhunya. Cairan yang tidak jenuh ini dikatakan *cairan tekan*. Misalkan air sungai mempunyai suhu 65°F pada 1 atm. Dari tabel suhu tekanan jenuh untuk 65°F adalah 0,3057 psi dan suhu pada tekanan 14,696 psi adalah 211,99°F. Pada basis tekanan aktual, cairan adalah termampatkan karena berada pada suhu 147° dibawah suhu jenuh. Pada basis suhu aktual, cairan adalah termampatkan karena tekanannya 14,39 psi diatas tekanan jenuh.

Cairan tekan

Karena cairan termampatkan merupakan berada dalam daerah fase tunggal, tabel B1-4SI dan tabel B1-4E disusun untuk memberikan nilai beberapa sifat (v , u , h , dan s) sebagai fungsi tekanan dan suhu untuk cairan termampatkan. Tabel ini *diakhiri* dengan suhu cairan jenuh. Seperti pada tabel panas lanjut, nilai suhu cair jenuh ditempatkan diantara tanda kurung pada setiap tekanan yang diberikan.

3-6. FAKTOR KETERMAMPATAN



Gambar 3-12 Ketermampatan Nitrogen (diadaptasi dari “Introduction to thermodynamics” oleh Sontag/Van Wyken)

Persamaan gas ideal sangat sederhana sehingga mudah sekali untuk menggunakannya dalam melakukan perhitungan termodinamik. Untuk gas pada densitas rendah persamaan gas ideal menghasilkan pendekatan yang baik. Namun sampai daerah tekanan rendah berapa persamaan gas ideal akan menghasilkan perhitungan yang teliti? Berapa tekanan dan suhu yang harus diberikan agar tidak menyimpang dari perilaku gas ideal? Untuk menjawab pertanyaan itu, diberikan suatu teknik dengan menggunakan suatu kuantitas baru yang disebut *faktor ketermampatan*. Faktor ketermampatan didefinisikan sebagai:

$$Z = \frac{pv}{RT} \tag{3-67}$$

Untuk gas ideal jelaslah bahwa $Z = 1$.

Perilaku dari nitrogen, ditunjukkan pada gambar 3-12 dengan Z sebagai ordinat dan p sebagai absis. Perhatikan gambar 3-12, pada tekanan rendah untuk semua suhu, nitrogen berperilaku sebagai gas ideal atau

untuk $p \rightarrow 0$, nilai $Z \rightarrow 1$. Pada suhu 300 K sampai pada tekanan 4 Mpa, zat berperilaku sebagai gas ideal, setelah itu nilai $Z > 1$. Pada tekanan tinggi nitrogen sudah tidak berperilaku lagi sebagai gas ideal. Untuk suhu dibawah 300K, sampai pada tekanan tertentu, $Z < 1$. Secara kualitatif, semua zat murni mempunyai perilaku hampir sama.

RANGKUMAN

Sistem yang keadaannya ditentukan oleh dua sifat bebas disebut sistem sederhana. Walaupun tidak ada sistem yang benar-benar sederhana namun banyak sistem yang dapat dimodelkan sebagai sistem sederhana untuk keperluan analisis termodinamika. Contoh sistem sederhana adalah sistem termampatkan sederhana. Zat murni merupakan zat termampatkan sederhana

Zat murni adalah zat yang mempunyai komposisi kimia yang seragam dan tidak berubah. Zat murni dapat berada dalam beberapa fase yaitu fase padat biasanya dikenal dengan es, fase cair, fase uap, campuran kesetimbangan fase cair dan uap, campuran kesetimbangan fase padat dan cair, dan campuran kesetimbangan fase padat dan uap. Uap yang berada pada suhu diatas suhu jenuh dikatakan sebagai uap panas lanjut atau sering disebut gas. Pada suhu jenuh sebagian zat berupa cairan dan sebagian berupa uap dan nisbah massa uap terhadap massa campuran disebut kualitas

Keadaan kesetimbangan sebarang zat termampatkan sederhana dapat dinyatakan dalam permukaan segiempat, ruang tiga dimensi. Titik dimana terjadi kesetimbangan tiga fase sekaligus disebut titik tripel.

Daerah berbentuk-kubah yang terdiri dari fase cair dan fase uap disebut kubah uap yang dibatasi oleh garis cair jenuh disebelah kiri dan garis uap jenuh disebelah kanan. Keadaan jenuh adalah keadaan dimana suatu perubahan fase berawal dan berakhir. Puncak kubah dimana garis cair jenuh dan garis uap jenuh bertemu disebut titik kritis. Suhu pada titik kritis disebut suhu kritis. Pada suhu kritis fase cair dan fase uap terjadi secara bersamaan sehingga volum jenis cairan sama dengan volum jenis

uap, volum pada saat ini disebut volum kritis. Tekanan pada titik kritis disebut tekanan kritis

Diagram fase digambarkan oleh diagram p-T. Garis peleburan menyatakan kesetimbangan fase padat dan cair, garis penguapan menyatakan kesetimbangan fase cair dan uap, dan garis sublimasi menyatakan kesetimbangan fase padat dan uap

Sifat termodinamika dapat ditampilkan dalam tabel. Sifat-sifat yang ditabulasikan dalam beberapa tabel adalah volum jenis (v), energi dalam jenis (u), entalpi jenis (h), dan entropi jenis (s)

PERTANYAAN-PERTANYAAN

1. Apakah perbedaan antara uap dan gas?
2. Berapakah sifat termodinamik intensif yang bebas yang dimiliki oleh suatu zat sederhana?
3. Jelaskan proses yang terjadi ketika es pada suhu -12°C dan tekanan 1 atm dipanaskan secara isobarik hingga mencapai suhu 110°C
4. Apakah yang dimaksud dengan fase? Apakah kubah uap itu? Apakah uap superpanas itu?
5. Kantung plastik diisi air hingga penuh kemudian diikat dan dimasukkan ke dalam freezer, kenapa kantong plastik cenderung pecah ketika air membeku?
6. Apakah tingkat keadaan superkritis itu? Apakah cairan jenuh?
7. Apa yang terjadi apabila suatu cairan jenuh dipanaskan pada tekanan konstan? Apakah yang terjadi apabila cairan itu didinginkan pada tekanan konstan?
8. Kantung plastik diisi udara hingga penuh kemudian dipecahkan dengan tiba-tiba dan terdengar bunyi keras, kenapa?
9. Berapakah sifat yang dibutuhkan untuk menggambarkan keadaan dari zat murni?
10. Air jenuh dikatakan mempunyai kualitas 15%, apakah artinya?
11. Apakah yang terjadi apabila suatu cairan jenuh dipanaskan pada volume konstan?
12. Apakah yang dimaksudkan dengan garis peleburan, penguapan, dan sublimasi?
13. Anda mengisi gelas dengan es sampai penuh kemudian es seluruhnya mencair, akan tumpahkah air itu? Jelaskan

14. Saat anda memasak air pada tekanan 1 atm, pada suhu 100°C air mulai mendidih, setelah berapa saat mendidih amatilah apakah terjadi kenaikan suhu? Jelaskan apa yang terjadi.
15. Apa yang terjadi pada titik kritis?

SOAL-SOAL

- 3.1. Hitung volum jenis dari:
- Air pada tekanan 7,5 MPa , kualitas 60%
 - Air pada suhu 45°C, kualitas 15%
 - amoniak pada suhu 30°C, kualitas 85%
- 3.2. Hitung massa dari H₂O dalam wadah 50 m³ pada keadaan dibawah ini:
- 10 kPa, kualitas 50%
 - suhu 200°C, kualitas 85%
 - 20 kPa, kualitas 75%
- 3.3. Hitung kualitas dari campuran fase cair dan uap pada volum jenis 0,25 m³
- H₂O pada suhu 62°C
 - H₂O pada tekanan 56 kPa
 - Amoniak pada suhu 53°F
 - Refrijeran 12 pada suhu 48°C
- 3.4. Berapakah besarnya entalpi dan energi dalam dari suatu campuran air dan uap air yang mempunyai kualitas 0,40 pada 120°C? Berapakah besarnya perbandingan volume dari cairan dan uap di dalam campuran
- 3.5. Berapakah besarnya volume jenis , entalpi dan energi-dalam dari suatu campuran cairan uap H₂O yang mempunyai kualitas 0,5 pada suhu 320°C
- 3.6. Hitung harga-harga p , u , dan h bagi campuran cairan uap H₂ O yang mempunyai kualitas 0,25 pada 0,2 MPa
- 3.7. Hitung harga-harga u , u , dan h untuk suatu campuran cairan uap H₂O, yang mempunyai kualitas 0,25 pada 180°C
- 3.8. Berapakah besarnya harga kalor jenis pada volume konstan dan kalor jenis pada tekanan konstan bagi H₂O yang kualitasnya 0,45 pada 90 psia?
- 3.9. Setengah kg H₂O dipanaskan pada tekanan konstan dari keadaan uap jenuh pada 80 psia sampai 180°F. Tentukan besarnya perpindahan energi sebagai panas dan kerja yang terlibat dalam proses ini.
- 3.10. Uap pada 1450 kPa mempunyai entalpi 2500 kJ/kg. Tentukan Tentukan (a). kualitas (b). volum jenis uap.
- 3.11. Uap jenuh pada tekanan 3445 kPa diubah ke uap lewat panas pada tekanan sama dan suhu 850°F (a). Berapa joule yang harus diberikan per kg air (b). Berapa kenaikan energi-dalam jenis
- 3.12. Uap pada 210 *psi* mempunyai energi dalam 650 *Btu/lbm*. Tentukan (a). kualitas (b). volum jenis uap.
- 3.13. Campuran air dan uap air mula-mula bertekanan 40 kPa dengan kualitas 75% kemudian tekanan diturunkan hingga setengahnya melalui proses volum konstan. Tentukan (a)

kualitas akhir (b) kalor yang dipindahkan

- 3.14. Uap jenuh pada tekanan 500 lb/in^2 diubah ke uap lewat panas pada tekanan sama pada suhu 1500°F (a). Berapa *Btu* yang harus diberikan per *lbm* air (b). Berapa kenaikan energi dalam jenis
- 3.15. Berapakah tekanan yang dibutuhkan untuk menurunkan volum jenis 2 % dari nilai cairan jenuhnya untuk air cairan tekan pada suhu 50°C
- 3.16. Dua kilogram campuran air-uap air pada tekanan 500 kPa dengan kualitas 30% dipanaskan pada tekanan konstan hingga menjadi uap panas lanjut pada suhu 1200°C . Tentukan (a) volum awal (b) volum akhir.
- 3.18. Air jenuh pada tekanan $0,45 \text{ MPa}$ dipanaskan pada tekanan konstan hingga menjadi uap jenuh. Tentukan (a) perubahan entalpi (b) perubahan energi dalam (c) kerja yang dilakukan (d) kalor yang dipindahkan

BAB IV

TERMODINAMIKA PROSES ALIRAN TUNAK

Pada bab sebelumnya kita telah mempelajari hukum pertama untuk menganalisis sistem daya. Sekarang kita akan menggunakan hukum pertama untuk menganalisis aliran tunak untuk pemakaian rekayasa. Prinsip-prinsip yang digunakan untuk memecahkan proses aliran tunak adalah:

1. Kekekalan massa
2. Kekekalan energi atau hukum pertama termodinamika

Tujuan dari bab ini adalah mengembangkan bentuk volum atur dari prinsip kekekalan massa dan hukum pertama termodinamika

Tujuan bab

4.1. PRINSIP KEKALKAN MASSA UNTUK VOLUM ATUR

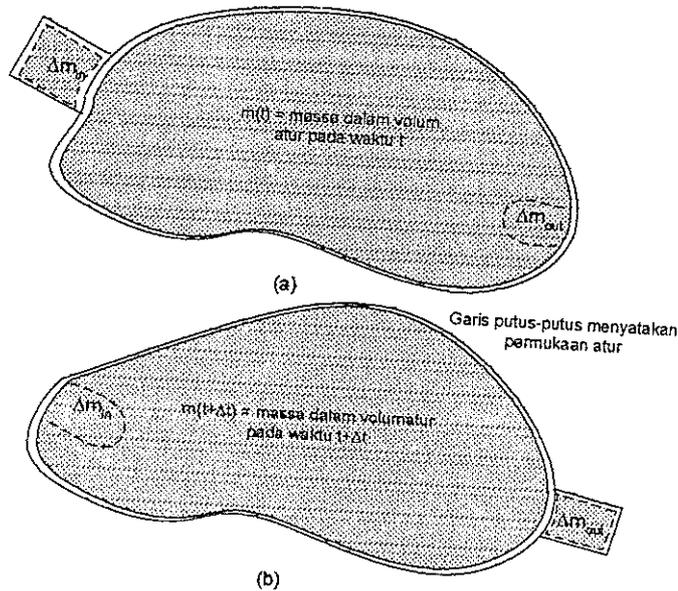
Volum atur adalah volum dalam ruang (daerah) yang diselidiki yang dibatasi oleh permukaan atur. Ukuran dan bentuk volum atur benar-benar sembarang, dan didefinisikan berdasarkan pada kebutuhan analisis. Tetapi yang lazim ditemui adalah volum atur yang bentuk dan ukurannya tetap dan kedudukannya tetap terhadap suatu sumbu acuan. Pada ujung-ujung terbuka permukaan batasnya imajiner sehingga massa, kalor, dan usaha dapat mengalir melalui permukaan atur

Volum atur

Dengan menggunakan gambar 4-1 kita akan mengenalkan prinsip kekekalan massa dalam volum atur. Gambar 4-1 memperlihatkan bahwa terdapat aliran massa masuk dan keluar dari volum atur sehingga meningkatkan massa neto dalam volum atur. Selama selang waktu Δt , massa Δm_i masuk ke volum atur dan massa Δm_o meninggalkan volum atur. Jika massa dalam volum atur pada waktu t adalah $m(t)$ dan massa dalam volum atur setelah selang waktu $t + \Delta t$ adalah $m(t + \Delta t)$, menurut hukum kekekalan massa

Prinsip kekekalan massa dalam volum atur

$$m(t) + \Delta m_i = m(t + \Delta t) + \Delta m_o$$



Gambar 4-1. Diagram skematik dari volum atur (a). volum atur pada waktu t (b) volum atur pada waktu $t + \Delta t$

atau

$$\Delta m_i - \Delta m_o = m(t + \Delta t) - m(t) \quad (4-1)$$

Pers. (4-1) menyatakan bahwa aliran massa neto masuk volum atur selama selang waktu Δt sama dengan kenaikan massa dalam volum atur selama selang waktu Δt ,

atau

$$[m(t + \Delta t) - m(t)] - (\Delta m_i - \Delta m_o) = 0 \quad (4-2)$$

Untuk menyatakan laju purata perubahan massa dalam volum atur dalam selang waktu Δt , kita bagi pers (4-2) dengan Δt dan laju massa purata dari aliran melintasi permukaan atur selama selang waktu Δt ,

Laju purata perubahan massa

$$\frac{m(t + \Delta t) - m(t)}{\Delta t} + \frac{\Delta m_o}{\Delta t} - \frac{\Delta m_i}{\Delta t} = 0 \quad (4-3)$$

Persamaan laju aliran massa sesaat untuk volum atur dapat diperoleh dengan mengambil limit Δt mendekati nol,

Laju aliran massa sesaat

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{m(t + \Delta t) - m(t)}{\Delta t} \right) = \frac{dm_{CV}}{dt}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta m_o}{\Delta t} \right) = \dot{m}_o$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta m_i}{\Delta t} \right) = \dot{m}_i$$

dm_{CV}/dt adalah laju perubahan massa yang berada dalam volum atur pada waktu t . \dot{m}_i dan \dot{m}_o menyatakan **laju aliran massa** sesaat pada sisi masuk dan sisi keluar. Ketika Δt mendekati nol, pers. (4-3) menjadi :

Laju aliran massa

$$\boxed{\frac{dm_{CV}}{dt} = \dot{m}_i - \dot{m}_o} \quad (4-4)$$

Apabila terdapat beberapa sisi aliran massa masuk dan sisi aliran massa keluar, secara umum pers (4-4) dituliskan sebagai:

$$\boxed{\frac{dm_{CV}}{dt} = \sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_o} \quad (4-5)$$

Pers. (4-5) disebut sebagai **neraca laju massa** untuk volum atur dengan beberapa sisi masuk dan sisi keluar. Secara lisan dikatakan;

Neraca laju massa

| | | | | |
|---|---|--|---|---|
| Laju waktu perubahan massa yang terdapat didalam volum atur pada saat t | + | Laju aliran massa total yang melintasi semua sisi masuk pada sat t | = | Laju aliran massa keluar total yang melintasi semua sisi keluar |
|---|---|--|---|---|

Kita tinjau aliran massa yang melintasi permukaan atur satu dimensi. Untuk penyederhaan kita andaikan (a) zat alir mengalir secara seagam sepanjang pipa, (b) aliran tegak lurus permukaan atur dimana aliran tersebut masuk dan keluar ke dan dari volum atur, seperti ditunjukkan gambar 4-2.

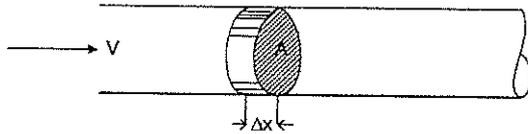
Aliran massa satu dimensi

Jika sejumlah massa Δm melintasi permukaan A selama selang waktu Δt dan zat alir berpindah sejauh Δx , volum zat alir yang melintasi permukaan A adalah $A\Delta x$. Jumlah massa yang melintasi permukaan A adalah

$$\Delta m = \rho A \Delta x$$

Laju massa purata dari aliran melintasi permukaan atur selama selang waktu Δt ,

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho A \frac{\Delta x}{\Delta t}$$



Gambar 4-2. Aliran zat alir satu dimensi

Persamaan laju aliran massa sesaat untuk volum atur dapat diperoleh dengan mengambil limit Δt mendekati nol,

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho A \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Atau dituliskan dengan,

$$\dot{m} = \rho A V$$

Atau dituliskan dalam bentuk volum jenis,

$$\dot{m} = \frac{A V}{\nu} \quad (4-6)$$

Persamaan laju aliran massa satu dimensi

V menyatakan kecepatan aliran massa masuk dan keluar volum atur. Perkalian AV disebut sebagai *laju aliran volumetris*.

laju aliran volumetris

Dengan menyulihkan pers. (4-6) ke pers. (4-5) kita akan mendapatkan,

$$\frac{dm_{CV}}{dt} = \sum \frac{A_i V_i}{\nu_i} - \sum \frac{A_o V_o}{\nu_o} \quad (4-7)$$

Prinsip kekekalan massa satu dimensi pada volum atur

Persamaan ini menyatakan prinsip kekekalan massa pada volum atur aliran satu dimensi

4.2. KEKEKALAN ENERGI UNTUK VOLUM ATUR

Kita tulis kembali hukum pertama,

$$E_2 - E_1 = Q - W$$

Laju perpindahan kalor dalam selang waktu Δt

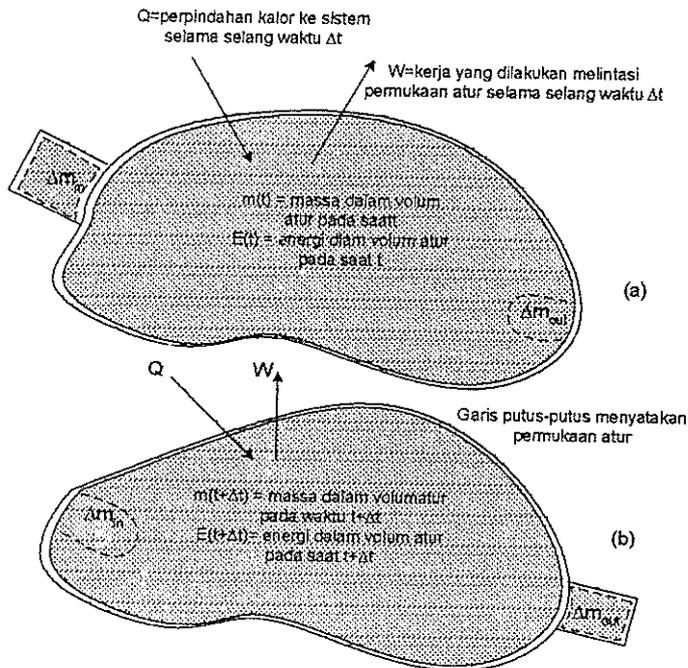
$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{E_2 - E_1}{\Delta t} + \frac{W}{\Delta t} \quad (4-8)$$

$E_2 - E_1$ adalah perubahan energi sistem. Gambar 4-3(a) memperlihatkan volum atur yang mempunyai massa tetap m yang mengisi daerah yang berbeda pada waktu t dan kemudian $t + \Delta t$ ditunjukkan gambar 4-3(b).

Jika

$E(t)$ adalah energi dalam volum atur pada saat t

$E(t + \Delta t)$ adalah energi dalam volum atur pada selang waktu $t + \Delta t$



Gambar 4-3. Diagram skematik dari hukum pertama untuk analisis volum atur.

Maka

$$E_1 = E(t) + e_i \Delta m_i$$

$$E_2 = E(t + \Delta t) + e_o \Delta m_o$$

e menyatakan energi persatuan massa dan sama dengan:

$$e = u + \frac{V^2}{2} + gz \quad (4-9)$$

Sehingga perubahan energi sistem dapat dituliskan sebagai:

$$E_2 - E_1 = E(t + \Delta t) + e_o \Delta m_o - E(t) - e_i \Delta m_i$$

$$= [E(t + \Delta t) - E(t)] + (e_o \Delta m_o - e_i \Delta m_i) \quad (4-10)$$

$e_o \Delta m_o - e_i \Delta m_i$ menyatakan aliran energi neto yang melintasi permukaan atur selama selang waktu Δt sebagai akibat massa sebesar Δm_i dan Δm_o melintasi permukaan atur

Kerja total yang dilakukan selama selang waktu Δt adalah

$$W = W_{CV} + (p_o v_o \Delta m_o - p_i v_i \Delta m_i) \quad (4-11)$$

Kita bagi pers (4-11) dengan Δt kemudian kita sulihkan ke pers. (4-8) dan kita susun kembali, diperoleh :

$$\frac{Q}{\Delta t} + \frac{\Delta m_i}{\Delta t} (e_i + p_i v_i) = \left(\frac{E(t + \Delta t)}{\Delta t} \right) + \frac{\Delta m_o}{\Delta t} (e_o + p_o v_o) + \frac{W_{CV}}{\Delta t} \quad (4-12)$$

Dengan menyulihkan pers (4-9) ke pers. (4-12) diperoleh:

$$\begin{aligned} \frac{Q}{\Delta t} + \frac{\Delta m_i}{\Delta t} \left(u_i + p_i v_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) &= \left(\frac{E(t + \Delta t) - E(t)}{\Delta t} \right) \\ &+ \frac{\Delta m_o}{\Delta t} \left(e_o + p_o v_o + \frac{V_o^2}{2} + gz_o \right) + \frac{W_{CV}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (4-11)$$

Karena $u + pv = h$, maka;

$$\begin{aligned} \left(\frac{E(t + \Delta t) - E(t)}{\Delta t} \right) &= \frac{W_{CV}}{\Delta t} - \frac{Q}{\Delta t} + \frac{\Delta m_i}{\Delta t} \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) \\ &- \left(\frac{\Delta m_o}{\Delta t} \left(h_o + \frac{V_o^2}{2} + gz_o \right) \right) \end{aligned} \quad (4-12)$$

Apabila Δt mendekati nol

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{E(t + \Delta t) - E(t)}{\Delta t} = \frac{dE_{cv}}{dt}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{W}{\Delta t} = \dot{W}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q}{\Delta t} = \dot{Q}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m_i}{\Delta t} = \dot{m}_i$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m_o}{\Delta t} = \dot{m}_o$$

Pers. (4-14) dapat dituliskan dalam bentuk,

$$\boxed{\frac{dE_{CV}}{dt} = \dot{Q}_{CV} - \dot{W} + \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_o \left(h_o + \frac{V_o^2}{2} + gz_o \right)} \quad (4-15)$$

Jika terdapat beberapa tempat aliran massa masuk dan beberapa tempat aliran massa keluar ke/dari volum atur,

$$\frac{dE_{CV}}{dt} = \dot{Q}_{CV} - \dot{W} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_{in}^2}{2} + gz_i \right) - \sum \dot{m}_o \left(h_o + \frac{V_o^2}{2} + gz_o \right)$$

(4-16) *Persamaan kekekalan energi dalam volum atur*

Pers. (4-16) juga disebut persamaan kekekalan energi dalam volum atur. Bila tidak ada aliran massa masuk atau keluar volume atur pers (4-16), menjadi:

$$\dot{Q} = \frac{dE}{dt} + \dot{W}$$

Persamaan laju aliran kalor

Persamaan ini merupakan bentuk persamaan laju aliran kalor dari hukum pertama untuk sistem

4.3. PERSAMAAN ENERGI UNTUK ALIRAN KEADAAN TUNAK

Dalam sistem tertutup laju perubahan energi sama dengan laju alih energi sebagai kalor dan/atau usaha. Untuk keadaan tunak dan aliran tunak sistem terbuka, laju perubahan energi total dalam permukaan batas sistem adalah nol yaitu laju energi total harus tidak bertambah dan/atau berkurang dalam permukaan batas sistem. Dalam sistem terbuka terdapat perpindahan massa melewati permukaan batas

Keadaan tunak dan aliran tunak dapat dicapai apabila:

1. Sifat zat kerja yang dipilih tak berubah terhadap waktu,
2. Laju energi total dalam volum atur adalah konstan

$$\frac{dE}{dt} = 0$$

Hukum pertama sebagai persamaan laju:

$$0 = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum \dot{m}_o \left(h_o + \frac{V_o^2}{2} + gz_o \right)$$

(4-17)

3. Massa zat alir persatuan waktu yang masuk konstan dan sama dengan zat alir yang keluar dari alat agar massa zat alir dalam volum atur konstan, sifat zat alir pada setiap titik dalam volum atur tidak berubah terhadap waktu.

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_o = 0$$

atau

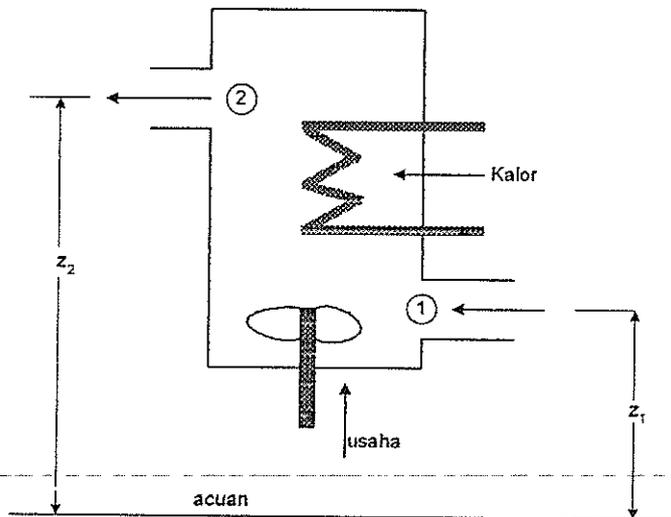
$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o$$

(4-18) *Persamaan kontinuitas*

Pers. (4-18) disebut persamaan kontinuitas

Banyak aplikasi dari model keadaan tunak dan aliran tunak yang hanya mempunyai satu aliran masuk (posisi 1) dan satu aliran keluar (posisi 2), seperti yang ditunjukkan pada gambar 4-4. Zat alir masuk sistem melalui (1) dan keluar sistem melalui (2). Dalam sebuah pembangkit uap, (1) dan (2) dapat berada pada jalan masuk ke penguap (*ketel uap*) dan pada jalan keluar dari turbin, pada jalan masuk ke turbin dan pada jalan keluar dari kondensor, atau pada jalan masuk dan pada jalan keluar dari turbin.

Zat alir masuk pada ketinggian z_1 , kecepatan V_1 , dengan tekanan p_1 dan keluar pada ketinggian z_2 , kecepatan V_2 dan tekanan p_2 . Dengan mengacu gambar 4-4,



Gambar 4-4. Proses aliran tunak

Persamaan kontinuitas

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = \dot{m} \quad (4-19)$$

Hukum pertama

$$\dot{Q} + \dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) = \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) + \dot{W} \quad (4-20)$$

Jika didefinisikan

$$q = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} \quad \text{dan} \quad w = \frac{\dot{W}}{\dot{m}}$$

Persamaan (4-20) menjadi

$$\left(h_1 + \frac{1}{2} V_1^2 + gz_1 \right) - w + q = \left(h_2 + \frac{1}{2} V_2^2 + gz_2 \right) \quad (4-21)$$

*Persamaan energi
untuk aliran
tunak*

Persamaan (4-20) dan (4-21) disebut *persamaan energi untuk aliran tunak*. Persamaan ini merupakan persamaan dasar dan penting yang mempunyai keragaman penerapannya pada alat dan sistem aliran termodinamik.

Contoh 4-1.

Usaha yang dihasilkan oleh turbin adalah 500 Btu/lbm, apabila uap mengalir 25000 lbm/jam.

Hitung:

- (a) usaha persatuan massa dalam ft-lb/lbm
- (b) daya yang dihasilkan dalam hp
- (c) daya yang dihasilkan dalam kW

$$w = 500 \text{ Btu/lbm}$$

$$\dot{m} = 25000 \text{ lbm/jam} = 6,94 \text{ lbm/det}$$

Penyelesaian:

$$(a). w = 500 \text{ Btu/lbm}$$

$$= 500 \times 778 \text{ ft-lb/lbm} = 389 \times 10^3 \text{ ft-lb/lbm}$$

$$(b). P = \dot{m} w = 6,94 \times 389 \times 10^3 \text{ ft-lb/det} = 2701,39 \times 10^3 \text{ ft-lb/det}$$

$$= 4,91 \times 10^3 \text{ hp}$$

$$(c) P = 3661,39 \times 10^3 \text{ kW}$$

4.4. PROSES PENCEKIKAN (THROTTLING)

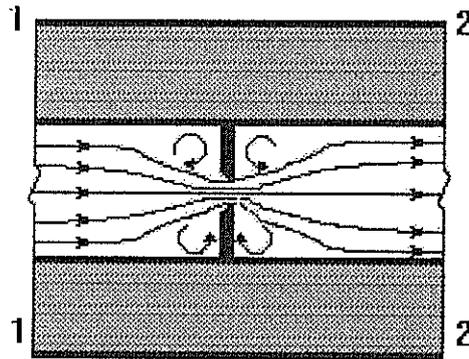
Koefisien Joule Thomson didefinisikan oleh hubungan:

$$\mu_j = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h$$

(4-22)

*Koefisien Joule
Thomson*

Koefisien ini diperoleh melalui percobaan dengan menggunakan alat seperti yang ditunjukkan pada gambar 4-5 dengan anggapan alirannya tunak. Luas penampang tabung adalah A . Alat diisolasi secara termal sehingga pada keadaan tunak tidak ada kalor mengalir dari gas ke dinding dan kapasitas kalor yang tinggi tidak akan mempengaruhi perubahan suhu.



Gambar 4-5. Percobaan Joule – Kelvin

Ruang 1 dan 2 dipisahkan dengan sumbat berlubang . Gas mengalir dari ruang 1 menuju ruang 2, ketika melewati lubang tekanan gas turun. Proses semacam ini disebut proses *pencekikan* . Pada proses ini perubahan energi kinetik dan energi potensial diabaikan, tidak ada perpindahan kalor dengan sekitarnya karena prosesnya adalah adiabatik, dan tidak ada usaha yang dilakukan karena merupakan proses ekspansi bebas, maka persamaan energi aliran tunak pada pers. (4-2) menjadi:

$$\boxed{h_1 = h_2} \quad (4-23)$$

Proses pencekikan

Persamaan energi pada proses pencekikan

Pers. (4-23) menyatakan bahwa entalpi pada awal dan akhir proses adalah sama untuk percobaan Joule-Kelvin. Kemudian percobaan ini diulang-ulang dengan menggunakan gas yang sama akan tetapi dengan suhu dan tekanan berbeda-beda, hasil yang diperoleh digambarkan dalam diagram p - T . Kurva yang dihasilkan disebut kurva *isentalpi* (entalpinya konstan) , ditunjukkan gambar 4-6a.

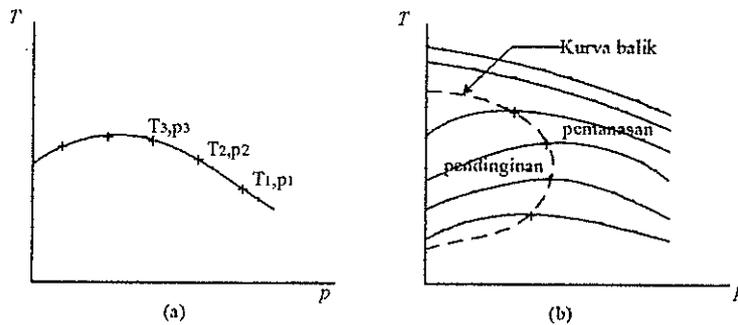
Kurva isentalpi

Jika percobaan diulang dengan tekanan dan suhu awal berbeda maka akan diperoleh kurva isentalpi yang berbeda. Jika T tidak terlalu tinggi, kurva isentalpi akan mempunyai titik maksimum yang disebut *titik balik*. Sedang tempat kedudukan titik balik disebut *kurva balik*,

*Titik balik
Kurva balik*

ditunjukkan gambar 4-6(b). Kemiringan kurva isentalpi dinyatakan dengan koefisien Joule-Thomson. Pada titik maksimum atau pada titik balik,

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = 0$$



Gambar 4-6. (a) Titik-titik yang mempunyai entalpi sama (b) Kurva balik

Contoh 4-2

Simulasi molekuler kurva balik Joule-Thomson (*Joule-Thomson inversion curves, JTICs*) untuk CO₂ diambil dari *Accurate CO₂ Joule-Thomson inversion curve by molecular simulations* dari Colina C,M, Lisal, M, Siperstein F,R, Gubbins, K,E, 2002, , *Fluid Phase Equilibria* 202 (2002) 253-262.

Kriteria balik dinyatakan oleh:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = 0$$

Kriteria balik dapat dituliskan dalam beberapa bentuk pilihan, sebagai contoh menggunakan hubungan $p = p(T, \rho)$, sebagai

$$T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_\rho - \rho\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T = 0$$

atau dengan menggunakan model keadaan $Z = Z(T, \rho)$ sebagai

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p = 0$$

dengan $Z = p/(\rho RT)$ adalah faktor keterampatan

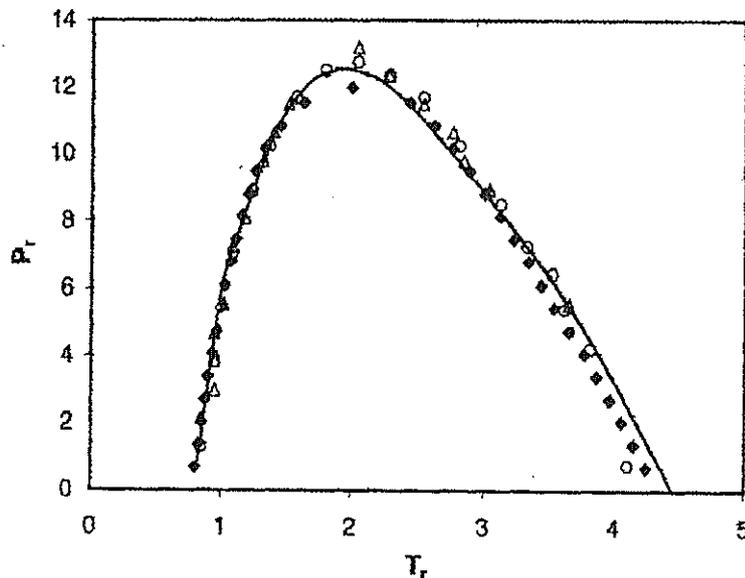
Kriteria balik dapat dinyatakan sebagai fungsi koefisien muai termal β

$$T\beta - 1 = 0$$

dengan

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

Hasil simulasi diunjukkan pada gambar dibawah ini:



Gambar 4-7. JTIC dari CO₂ yang diperkirakan oleh: (-) Span-Wagner EOS; (Δ) dari factor kompresibilitas; (o) from $T\alpha-1$; (\blacklozenge) Dta eksperimen yang dilaporkan dalam Perry's Chemical Engineers' Handbook .

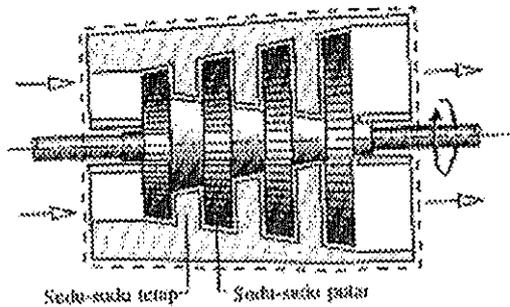
4.5. TURBIN.

Turbin uap adalah suatu divais yang mengubah energi uap menjadi energi mekanis rotasi. Mesin ini digunakan secara luas untuk pembangkit energi listrik.

Semua turbin merupakan mesin aliran tunak dan persamaan energinya dapat diterapkan antara dua luasan melintang. Gambar 4-8 memperlihatkan diagram skematik dari turbin. Suhu dalam turbin uap lebih besar daripada suhu lingkungan sehingga terdapat kemungkinan terjadi pertukaran kalor antara turbin dan lingkungan. Hal ini dapat diminimisasi dengan isolasi sehingga kalor hilang sangat kecil dan besarnya dapat diabaikan. Namun sasaran proses ini bukan alih kalor

Turbin uap

melainkan menghasilkan usaha. Walau pada keadaan sebenarnya kecepatan zat alir masuk turbin relatif kecil dan kecepatan keluar agak besar namun dengan pemilihan stasiun yang tepat, perbedaan kecepatan dapat diabaikan. Apabila perbedaan ketinggian zat alir masuk dan keluar diabaikan, persamaan energi untuk turbin adalah:



Gambar 4-8. Gambar skematik turbin aliran aksial (Shapiro,1997)

$$(u_1 + p_1 v_1 + \frac{1}{2g_c} V_1^2 + \frac{g}{g_c} z_1) - w + q = (u_2 + p_2 v_2 + \frac{1}{2g_c} V_2^2 + \frac{g}{g_c} z_2)$$

Karena

$$q \rightarrow 0; \quad \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \rightarrow 0$$

Maka usaha yang dihasilkan oleh turbin adalah

$$\boxed{w = h_1 - h_2} \quad (4-24)$$

Usaha yang dihasilkan oleh turbin

Persamaan ini memperlihatkan bahwa kerja yang dihasilkan oleh turbin sama dengan berkurangnya entalpi selama proses. Indeks 1 menyatakan titik aliran-masuk dan indeks 2 menyatakan titik aliran-keluar

Contoh 4-3

Turbin menerima uap pada tekanan 6 Mpa atm dan 500°C dengan laju 1.500.000 kg/jam. Uap keluar dari turbin dengan tekanan 400 kPa dengan kelembaban 15% setelah mengalami proses ireversibel. Abaikan perbedaan energi kinetik antara masukan dan keluaran kemudian tentukan (a) Kerja yang dilakukan (b) daya yang dihasilkan.

Diketahui :

Pada aliran masuk : $p_1 = 6 \text{ MPa}$, $T_1 = 500^\circ\text{C}$

Pada aliran keluar : $p_2 = 0,4 \text{ MPa}$, $y_2 = 0,15$

Ditanyakan : (a) Kerja yang dilakukan

(b) daya yang dihasilkan.

Penyelesaian:

(a) Kerja yang dihasilkan oleh turbin

$$w_{12} = h_1 - h_2$$

dari tabel uap diperoleh, $h_1 = 3422,2 \text{ kJ/kg}$

$$h_{fg} = 2133,8 \text{ kJ/kg}, \quad h_g = 2738,6 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned} \text{maka } h_2 &= h_g - y h_{fg} \\ &= 2738,6 - 0,15 \times 2133,8 \\ &= 2418,53 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

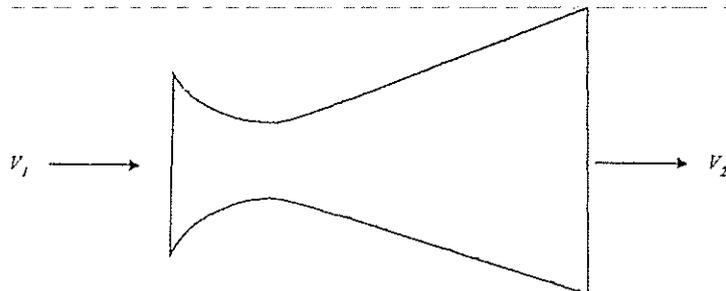
$$w_{12} = 3422,2 - 2418,53 = 1003,67 \text{ kJ/kg}$$

(b) Dari hukum pertama

$$\dot{Q} = \dot{m}w_{12} = \frac{15 \times 10^5}{3600} \times 1003,67 = 428196 \text{ kJ/dt}$$

4.6. ALIRAN MELALUI NOSEL.

Uap yang keluar dari ketel uap masuk ke turbin mempunyai kecepatan kecil. Untuk meningkatkan kecepatannya, uap dilewatkan dulu melalui pipa semprot sebelum mengenai bilah turbin. Uap dengan kecepatan tinggi ini dibuat menimpa bilah turbin sehingga memberikan kakas untuk menggerakkan bilah. Jadi, aliran uap melakukan usaha pada bilah turbin dengan memberikan energi kinetiknya. Ini merupakan prinsip usaha turbin.



Gambar 4-9. Gambar skematik dari nosel

Gambar 4-9 menunjukkan uap masuk pipa semprot dengan dengan kecepatan V_1 dan keluar dengan kecepatan yang lebih tinggi V_2 , usaha yang dilakukan nol, dan aliran kalornya kecil sehingga dapat diabaikan sehingga untuk nosel:

Prinsip kerja dari nosel

$$h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = 0 \quad (4-25)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa nosel secara mendasar merupakan alat untuk mengubah energi dalam bentuk entalpi menjadi energi kinetik.

Kita tulis kembali persamaan energi:

$$Tds = dh - vdp$$

Untuk proses terbalikkan adiabat, $s_2 = s_1$, maka:

$$h_2 - h_1 = \int_1^2 vdp \quad (4-26)$$

Jika diandaikan zat alirnya tak termampatkan,

$$u_2 = u_1 \quad \text{dan} \quad v_2 = v_1 = v$$

sehingga diperoleh:

$$h_2 - h_1 = v(p_2 - p_1)$$

Disubstitusikan ke persamaan (4-26), diperoleh:

$$v(p_2 - p_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = 0 \quad (4-28)$$

Persamaan energi untuk nosel

Dari definisi entalpi
 $h = u + pv$
 $\Delta h = \Delta u + p_2 v_2 - p_1 v_1$
 $\Delta h = v(p_2 - p_1)$

Contoh 4-4.

Udara masuk pipa semprot pada suhu $1200^\circ F$ dan meninggalkannya pada suhu $950^\circ F$. Jika kecepatan masuk pipa semprot diabaikan. Hitung kecepatan udara meninggalkan pipa semprot dalam *ft/detik*.

Penyelesaian:

$$V_1 = 0$$

$$T_1 = 1200^\circ + 460^\circ = 1660^\circ R$$

$$T_2 = 950^\circ + 460^\circ = 1410^\circ R$$

Kecepatan udara meninggalkan pipa semprot adalah

$$v_2^2 = v_1^2 + 2(h_1 - h_2) \text{ dengan } (h_1 - h_2) = c_p(T_2 - T_1)$$

$$h_1 - h_2 = 0,24(1660^0 - 1410^0) = 60 \text{ Btu/lbm}$$

$$v_2 = \sqrt{2 \times 32,2 \times 778 \times 60} = 1734 \text{ ft / dt}$$

4.7.KETEL UAP.

Ketel, kondensor, dan evaporator mempunyai tujuan utama memindahkan massa dari atau ke medium yang mengalir secara tunak. Istilah ketel uap pada awalnya digunakan pada tungku pembakar dan bagian pembangkit untuk menghasilkan uap jenuh atau hampir jenuh. Namun pada perkembangannya ketel uap dilengkapi dengan bagian tambahan yang dipergunakan untuk perpindahan kalor seperti pemanas super, penghemat, dan pemanas awal yang lebih dikenal sebagai pembangkit uap. Namun nama ketel uap tetap bertahan karena kepraktisannya. Jadi ketel uap adalah kombinasi dari tungku pembakar, bagian pembangkit uap jenuh, bagian pemanas super, penghemat dan pemanas awal udara, atau alat lain yang digunakan untuk menghasilkan uap.

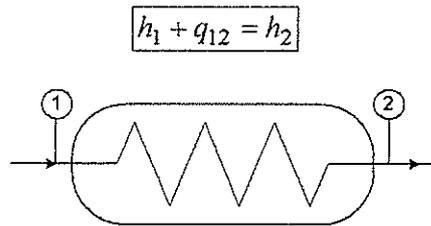
Untuk mengubah zat kerja dari fase cair jenuh ke fase uap jenuh diperlukan kalor. Kalor diambil dari bahan bakar yang dibakar yang disebut dengan tandon kalor. Pembakaran ini akan melepas sejumlah besar kalor dan diserap oleh zat kerja sehingga suhu dan entalpi zat kerja akan meningkat. Diandaikan bahwa perbedaan energi kinetik air masuk dan uap yang meninggalkannya dapat diabaikan. Proses terjadi pada tekanan konstan. Karena pada ketel uap tidak ada bagian yang berpindah, maka tidak ada usaha dilakukan. Persamaan energi aliran tunak,

$$(h_1 + \frac{1}{2}v_1^2 + gz_1) - (h_2 + \frac{1}{2}v_2^2 + gz_2) - w + q = 0$$

akan tetapi

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \rightarrow 0; \quad w = 0$$

Maka



Gambar 4-10. Gambar skematik dari ketel uap

dan

$$q_{12} = h_2 - h_1 \quad (4-29)$$

Karena $h_2 > h_1$, energi akan berharga positif yang menunjukkan bahwa energi masuk ke sistem dari bahan bakar dan diserap oleh zat kerja.

Pers. (4-29) juga dapat dituliskan dalam bentuk persamaan kekekalan energi,

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

Untuk aliran tunak pada keadaan tunak,

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$$

Contoh 4-5.

Sebuah ketel uap menerima masukan air pada tekanan 10 MPa dan suhu 120°C dan mengirimkan uap dari pemanas super pada tekanan 4 MPa dan suhu 500°C . Tentukan kalor yang ditambahkan

Diketahui :

Keadaan pipa masuk : $p_1 = 10 \text{ MPa}$, $T_1 = 120^\circ\text{C}$

Keadaan aliran keluar : $p_2 = 4 \text{ MPa}$, $T_2 = 500^\circ\text{C}$

Ditanyakan: kalor yang ditambahkan

Penyelesaian:

Dari tabel uap diperoleh,

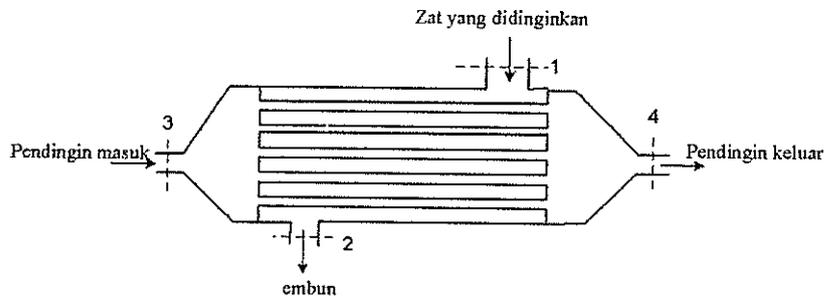
$$h_1 = 510,64$$

$$h_2 = 3445,3$$

Kalor yang ditambahkan

$$q_{12} = h_2 - h_1 = 3445,3 - 510,64 = 2934,66 \text{ kJ/kg}$$

4.8. KONDENSOR



Gambar 4-11. Gambar skematik dari kondensator

Fungsi utama dari kondensator adalah memindahkan kalor. Uap yang mengalir melalui satu susunan pipa-pipa, diembunkan sewaktu bersentuhan dengan permukaan pipa-pipa yang dialiri cairan pendingin. Permukaan pipa-pipa dijaga tetap bersuhu rendah dibawah titik beku dengan mengalirkan cairan pendingin. Apabila Q_{34} adalah kalor yang diambil oleh pipa pendingin dan Q_{12} adalah kalor yang dilepas oleh zat yang didinginkan, kalor yang dilepas sama dengan kalor yang diterima atau dituliskan:

$$-Q_{12} = Q_{34}$$

$$-\dot{m}_A q_{12} = \dot{m}_B q_{34}$$

dengan \dot{m}_A adalah laju aliran massa dari zat yang didinginkan dan \dot{m}_B adalah laju aliran massa zat pendingin. Indeks 1 dan 2 menyatakan titik dimana zat menyatakan zat A masuk dan keluar divais. Indeks 3 dan 4 menyatakan zat B masuk dan keluar divais.

Dengan mengabaikan perbedaan ketinggian dan kecepatan, persamaan energi aliran tunak dapat dituliskan:

Untuk zat A:

$$q_{12} = h_2 - h_1$$

Untuk zat B:

$$q_{34} = h_4 - h_3$$

Maka kita akan peroleh persamaan untuk kondensator,

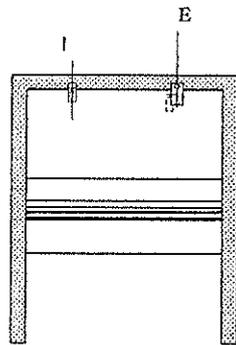
Persamaan untuk kondensator

$$\dot{m}_A(h_1 - h_2) = \dot{m}_B(h_4 - h_3) \quad (4-30)$$

4.9.KOMPRESOR

Prinsip usaha pada kompresor berkebalikan dengan turbin. Kompresor adalah mesin yang digunakan untuk melakukan usaha pada zat kerja guna meningkatkan tekanan zat kerja dan menghasilkan energi potensial tersimpan. Terdapat beberapa jenis kompresor. Jenis kompresor yang paling penting adalah kompresor bolak-balik, sentrifugal, dan aliran aksial. Gambar 6-14 memperlihatkan diagram skematik dari kompresor. I adalah katub masuk dan E adalah katub buang yang berfungsi memasukkan dan mengeluarkan gas ke dan dari dalam silinder

Prinsip kerja kompresor



Gambar 4-12. Kompresor udara

Proses pemampatan dan ireversibel tetapi mendekati adiabatik. Kerja masukan untuk kompresor adalah :

$$W_i = m(h_2 - h_1) \quad (4-31)$$

Pada persamaan ini , indeks 1 dan 2 menyatakan katub masuk dan katub buang.

Contoh soal 4- 6

Kompresor seperti ditunjukkan gambar 4-12 mengambil udara dari atmosfer sekeliling dengan tekanan 1 atm dan suhu 27°C. Pada titik buang , tekanannya adalah 5 atm, suhu 200°C dengan kecepatan aliran buang 90 m/dt. Jika laju aliran udara memasuki kompresor adalah 12 kg/dt, tentukan daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor.

Diketahui : Katub masuk : $p_1 = 1 \text{ atm}$ dan $T_1 = 27^\circ\text{C} = 300 \text{ K}$, $\dot{m} = 12 \text{ kg/dt}$

Katub buang : $p_2 = 5 \text{ atm}$, $T_2 = 200^0\text{C} = 473 \text{ K}$, $V_2 = 90 \text{ m/dt}$

Penyelesaian:

Persamaan energi, perbedaan energi potensial dan energi kinetik diabaikan, tidak ada kalor masuk dan keluar kompresor, jadi

$$h_1 - w = h_2 + \frac{1}{2} V_2^2$$

atau $-w = h_2 - h_1 + \frac{1}{2} V_2^2$

Perubahan entalpi adalah

$$h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1) = 1,0035 (473 - 300)$$

$$= 173,6055 \text{ kJ/kg}$$

$$-w = 173,6055 + \frac{90^2}{2 \times 1000} = 177,6555 \text{ kJ/kg}$$

Daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor adalah

$$\dot{W} = -\dot{m}w = -12 \times 177,6555 = -2131,866 \text{ kW}$$

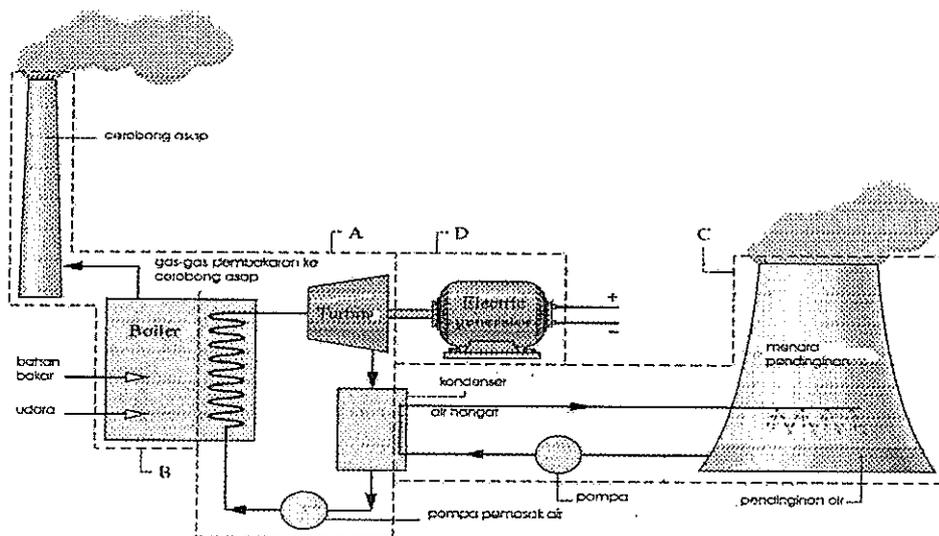
4.10. SISTEM PEMBANGKIT DAYA UAP

Gambar 4-13 memperlihatkan diagram skematik dari sebuah pembangkit daya sederhana. Dalam pembangkit daya uap, zat kerjanya secara bergantian diuapkan dan diembunkan begitu zat kerja bersikulasi dalam siklus tertutup. Air merupakan zat yang lazim digunakan sebagai zat kerja. Air pada tekanan rendah dan suhu rendah dimampatkan secara reversibel dan adiabatik ke tekanan ketel uap oleh pompa pengumpan. Ketel uap mengubah cairan jenuh ini menjadi uap jenuh pada tekanan konstan dengan mengambil kalor dari tandon kalor (bahan bakar). Setelah penguapan, kalor yang diserap akan digunakan untuk memanaskan lanjutkan uap ke suhu yang lebih tinggi. Uap panas lanjut kemudian mengalir masuk ke turbin uap dan mengembang ke tekanan keluar yang lebih rendah dengan menghasilkan kerja. Sebagian uap yang tidak mampu dikonversi menjadi kerja meninggalkan turbin yang merupakan bagian dari siklus. Kemudian campuran cairan jenuh dan uap mengalir ke kondenser. Disini sisa uap dicairkan dan kalor pengembunan dibuang ke tandon dingin. Tandon dingin dapat berupa udara atmosfer, atau sungai, atau lautan.



Cairan hasil pengembunan ini kemudian memasuki pompa pengumpan dan siklusnya berulang.

Uap panas lanjut merupakan medium yang sangat efisien untuk membawa energi. Jadi dalam pembangkit daya terdapat dua ketel, satu sebagai penghasil uap jenuh dan yang lainnya sebagai penghasil panas lanjut.



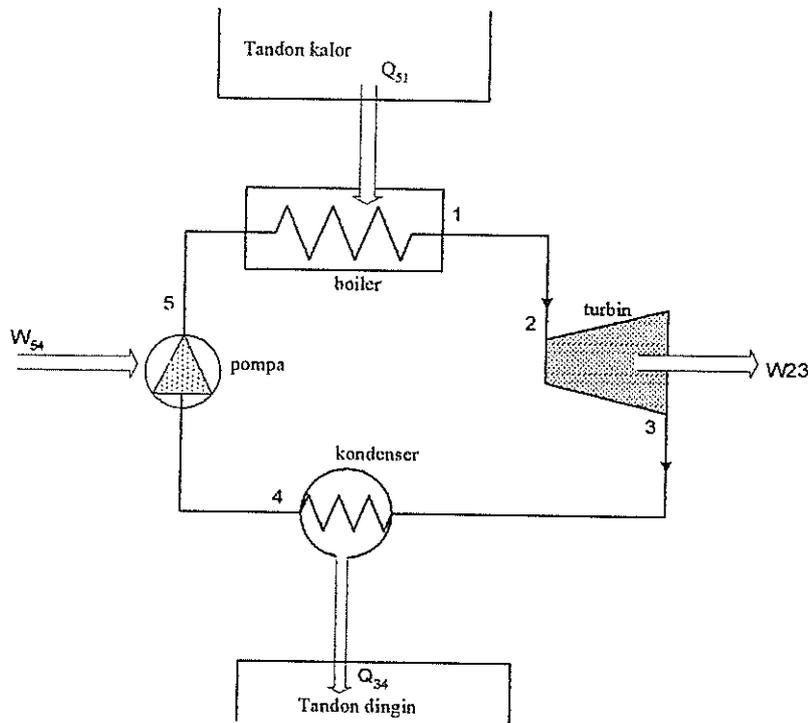
Gambar 4-13. Diagram skematik sebuah pembangkit daya (MAE-320, Lecture Notes)

Poros yang dipasang pada turbin akan berputar karena kerja yang dihasilkan dari turbin uap. Poros ini dihubungkan dengan generator listrik.

Contoh soal 4-7 (Contoh)

Pembangkit daya seperti yang ditunjukkan gambar 4-15. Uap meninggalkan ketel uap pada suhu 350°C dan tekanan 2,5 MPa. Suhu uap ketika memasuki turbin adalah 300°C dengan tekanan 0,2 MPa. Sebagian uap meninggalkan turbin dengan tekanan 20 kPa dengan kualitas 85%. Uap yang telah diembunkan meninggalkan kondensator pada tekanan 10 kPa dengan suhu 40°C . Tentukan (a) kuantitas aliran tenaga persatuan massa (b) kerja yang dilakukan oleh turbin (c) kalor yang dibuang dari kondensator (d)

kalor yang diserap oleh ketel uap dari tandon.



Gambar 4-14. Coantoh soal

Diketahui :

Meninggalkan ketel uap: $h_1 = 3126,3 \text{ kJ/kg}$,

Masuk ke turbin : $h_2 = 3071,8 \text{ kJ/kg}$

Meninggalkan turbin $h_3 = 251,4 + 0,85 (2358,3) = 2255,955 \text{ kJ/kg}$

Meninggalkan kondensor $h_4 = 167,57 \text{ kJ/kg}$

Penyelesaian :

(a) Keluaran dari ketel uap memasuki turbin, maka neraca energi dinyatakan oleh

$$q_{12} + h_1 = h_2 \quad ? \quad q_{12} + h_5 = h_1 \rightarrow \text{bila dianggap adiabat} \\ q_{12} = h_2 - h_1 = 3071,8 - 3126,3 = -54,5 \text{ kJ/kg} \quad h_1 = h_2$$

(b) Kerja yang dihasilkan oleh turbin

$$w_{23} = h_2 - h_3 = 3071,8 - 2255,955 = 815,845 \text{ kJ/kg}$$

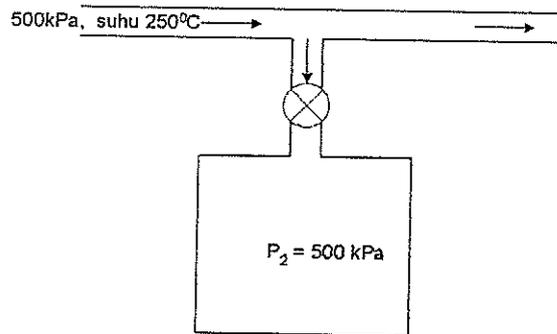
(c) Kalor yang dibuang dari kondensor untuk pengembunan

$$q_{34} = h_4 - h_3 = 167,57 - 2255,955 = -2088,385 \text{ kJ/kg}$$

(d) kalor yang diambil oleh ketel uap untuk penguapan

Contoh soal 4-8

Sebuah bejana yang diampatkan dihubungkan dengan katub pada sebuah pipa, ditunjukkan gambar 4-15. Uap pada tekanan 500kPa dan suhu 250°C mengalir masuk dalam pipa. Katub pada penghubung dibuka sehingga uap mengalir masuk ke bejana hingga tekanannya sama dengan tekanan uap dalam pipa kemudian katub ditutup. Proses berlangsung secara adiabatik. Perbedaan energi potensial dan energi kinetik diabaikan. Tentukan energi dalam jenis dalam akhir.



Gambar 4-15

$$Q_{cv} + \sum m_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i \right) = \sum m_o \left(h_o + \frac{V_o^2}{2} + gZ_o \right) + \left[m_2 \left(u_2 + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 \right) - m_1 \left(u_1 + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 \right) \right] + W_{cv}$$

Pada proses ini, $Q_{cv} = 0$, $W_{cv} = 0$, $m_o = 0$, $(m_i)_{cv} = 0$, perubahan energi potensial dan energi kinetik diabaikan, sehingga

$$m_1 h_1 = m_2 u_2$$

dari persamaan kontinuitas

$$m_1 = m_2$$

sehingga

$$h_1 = u_2$$

dari tabel uap $h_f = 640,23 \text{ kJ/kg}$, $h_{fg} = 2108,45 \text{ kJ/kg}$ $h_g = 2748,7 \text{ kJ/kg}$

RANGKUMAN

Volum atur adalah volum dalam ruang (daerah) yang diselidiki yang dibatasi oleh permukaan atur. Ukuran dan bentuk volum atur benar- benar

sembarang, dan didefinisikan berdasarkan pada kebutuhan analisis. Prinsip-prinsip yang digunakan untuk memecahkan persoalan dalam volum atur adalah prinsip kekekalan massa dan prinsip kekekalan energi atau hukum pertama termodinamika

Salah satu penerapan penting analisis volum atur adalah pada aliran zat alir keadaan tunak, persamaan energi untuk aliran tunak

$$(h_1 + \frac{1}{2}V_1^2 + gz_1) - w + q = (h_2 + \frac{1}{2}V_2^2 + gz_2)$$

Persamaan ini merupakan persamaan dasar dan penting yang mempunyai keragaman penerapannya pada alat dan sistem aliran termodinamik. Aplikasi umum dari persamaan energi adalah pada peralatan teknik seperti nosel, turbin, kondensor, dan kompresor

PERTANYAAN-PERTANYAAN

1. Apakah yang dimaksud dengan tingkat keadaan stasioner ("steady state")? Apakah aliran stasioner itu? Mengapa idealisasi-idealisasi ini sangat mempermudah analisa volume atur? Apakah aliran satu dimensi itu?
2. Apakah yang diartikan dengan balans energi atas basis laju?
3. Apakah perbedaan antara aliran tunak dan aliran seragam

Turbin

- 4.1. Turbin menerima uap jenuh pada tekanan 2 MPa dengan laju 5000 kg/jam. Pada sisi keluar tekanan adalah 8 kPa dan kelembaban 15%. Jika diameter sisi keluar adalah 0,3 m. Tentukan (a) kecepatan aliran keluar (b) entalpi jenis akhir (c) kerja yang dilakukan persatuan massa
- 4.2. Uap mengalir melalui suatu turbin uap kecil dengan laju 10.000 kg/j, masuk pada 600°C dan 2,0 MPa dan ke luar pada 0,01 MPa dengan kualitas 95%. Aliran masuk berkecepatan 50 m/s pada titik 2 m di atas pengeluaran dan keluar dengan kecepatan 80 m/s. Hitung keluaran daya poros, dengan mengandaikan alat sebagai adiabatik, tapi pengaruh energi potensial dan kinetik diperhitungkan. Berapa besarnya penyimpangan yang terjadi bila suku-suku urutan kedua tersebut (energi potensial dan kinetik) diabaikan? Berapa besarnya diameter pipa masuk dan ke luar (Gambar B.2, Tabel 8.1, B.2)?

Nosel

- 4.3. . Uap memasuki nosel pada tekanan 3,7 MPa dan suhu 450°C . Tekanan uap pada saat keluar dari nosel 2 MPa. Jika prosesnya adiabatik. Tentukan : (a) entalpi jenis akhir (b) kecepatan aliran keluar
- 4.4. Bila tingkat keadaan pada stasion ke luar nosel turbin Soal 5.24 kebasahan 6 persen pada tekanan 0,01 MPa, berapa besarnya kecepatan pada stasion itu'l
- 4.5. Udara memasuki suatu nosel adiabatik pada tekanan 3 atm dan 100°F dan ke luar pada tekanan 1 atm dan 30°F . Kecepatan masuk dapat diabaikan, dan nosel adalah adiabatik. Berapakah besarnya kecepatan ke luar (Gambar B.8)?

Ketel uap

- 4.6. Uap meninggalkan ketel uap pada tekanan 4 MPa pada suhu 400°C pada laju 34000 kg/jam melalui pipa aliran yang mempunyai luas tampang $3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$. Tentukan kecepatan aliran dalam m/dt

Kondensor

- 4.7. Uap air keluar dari turbin memasuki kondensor dengan kualitas 0,92 dan tekanan 15 kPa, setelah mengalami pengembunan didalam kondensor suhu cairan yang keluar dari kondensor adalah 45°C . Air sebagai pendingin masuk ke kondensator dengan suhu 22°C kemudian keluar dari kondensor dengan suhu lebih tinggi 15°C pada tekanan konstan. Tentukan perbandingan laju aliran massa pendingin dan uap air yang didinginkan .

Kompresor

- 4.8. Kompresor dari sebuah turbin mengambil udara dari atmosfer sekeliling dengan tekanan 1 atm dan suhu 27°C dan membuangnya pada tekanan 3 atm dan suhu 120°C . kalor yang dipindahkan sebesar 10 kJ/kg. Tentukan kerja yang dibutuhkan.
-
- 4.9. Udara mengalir melalui suatu kompresor adiabatik aliran stasioner dengan laju 1000 kg/j, masuk sebagai uap jenuh pada 2 atm dan ke luar pada 17 atm dan 200 K. Tentukan kerja poros per satuan massa udara dan hitung daya motor yang diperlukan (dalam hp).

Pembangkit daya

- 4.10. Dengan mengacu gambar pemangkit diatas, diketahui :
- Keadaan 4 : air, 25°C , 1 atm
- Keadaan 5 : air jenuh, 4 atm

Keadaan 2 : uap jenuh, 600°C , 4 atm

Keadaan 3 : 1 atm, kualitas 80%

Tentukan :

- (a) Kerja yang dibutuhkan kompresor persatuan massa
 - (b) Suhu T_5
 - (c) Kalor yang dibutuhkan oleh ketel uap untuk memanaskan lanjutkan uap
 - (d) Kerja yang dihasilkan oleh turbin
- Kalor yang dilepas oleh campuran cairan air-uap air untuk mengembun

BAB V

HUKUM KEDUA TERMODINAMIKA DAN ENTROPI

Hukum pertama termodinamika hanya mengatakan bahwa energi yang dihasilkan suatu mesin dalam bentuk energi mekanis sama dengan selisih antara energi yang diserap dan yang terbuang dalam bentuk kalor. Hukum ini tidak memberikan batasan arah aliran kerja dan kalor. Dengan hukum pertama saja kita tidak dapat menentukan berapa besar energi yang diserap diubah menjadi energi mekanis.

Kedua hal tersebut diatas menunjukkan bahwa tinjauan hukum pertama saja tidak mencukupi untuk menyatakan peristiwa dapat terjadi atau tidak sehingga perlu dirumuskan suatu hukum untuk melengkapinya. Hukum ini disebut hukum kedua termodinamika.

Hukum pertama termodinamika mendefinisikan besaran *energi dalam* U . Dengan definisi ini, kita dapat menggunakan hukum pertama secara kuantitatif untuk menganalisis suatu proses. Hukum kedua termodinamika juga mendefinisikan suatu besaran lain yang serupa. Dengan besaran ini kita akan dapat menggunakan hukum kedua secara kuantitatif untuk menganalisis suatu proses. Besaran ini akan kita sebut dengan *entropi* S . Energi dalam dan juga entropi keduanya merupakan konsep dasar untuk memerikan suatu pengamatan tertentu dalam termodinamika.

Tujuan dari bab ini adalah memerikan secara analitik hukum kedua termodinamika yang didasarkan pada argumen makroskopik dan memperkenalkan konsep entropi. *Tujuan bab*

5.1. MESIN KALOR DAN MESIN PENDINGIN

Pada subbab ini akan dibahas siklus mesin kalor dan mesin pendingin. Untuk setiap kasus yang diperikan, pada saat sistem menjalani siklus terjadi interaksi termal antara tandon dingin dan tandon kalor. Kedua tandon ini yang berada di sekitar sistem yang menjalani siklus.

5.1.1. SIKLUS DAN PERSYARATANNYA

Seperti yang kita lihat sehari-hari hampir semua proses yang terjadi dengan spontan berjalan ke suatu arah tertentu dan pasti. Secangkir teh panas mendingin setelah memberikan kalor ke lingkungannya, tetapi tidak mungkin teh menjadi panas kembali dengan sendirinya (spontan) dengan mengambil kalor dari lingkungannya. Semangkok es mencair dengan mengambil kalor dari lingkungan, tetapi air tidak akan membeku kembali dengan sendirinya. Dua buah batu yang digosok-gosokkan lama kelamaan benda akan terasa panas karena kerja yang dilakukan untuk melawan gesekan diubah menjadi energi dalam yang menimbulkan kenaikan suhu dari batu tersebut, berdasarkan pengalaman proses sebaliknya tidak akan terjadi secara spontan yaitu perubahan kalor menjadi kerja kembali. Dalam setiap contoh yang dikemukakan, sistem dapat saja dikembalikan ke keadaan semula tetapi tidak dengan proses spontan. Untuk mempelajari proses kebalikannya yaitu bagaimana kalor dapat mengalir dari benda yang bersuhu lebih rendah ke benda yang bersuhu lebih tinggi atau bagaimana kalor diubah menjadi kerja, kita harus memiliki sebuah *siklus*. Siklus adalah proses atau sederetan proses yang dapat mengembalikan sistem ke keadaan semula.

*Contoh
ireversibilitas
proses alami*

Definisi siklus

Contoh diatas menuntun kita pada pemikiran mesin kalor dan mesin pendingin yang juga diacu sebagai pompa kalor. Dengan mesin kalor kita dapat mempunyai sistem yang bekerja dalam siklus dan menghasilkan kerja positif neto dan perpindahan kalor positif neto. Dengan menggunakan pompa kalor kita dapat mempunyai sistem yang bekerja dalam siklus dan kalor dapat dipindahkan dari suhu rendah ke suhu tinggi meskipun kerja dibutuhkan untuk melakukan ini. Unjuk kerja dari sebuah siklus termodinamik membutuhkan beberapa persyaratan yaitu:

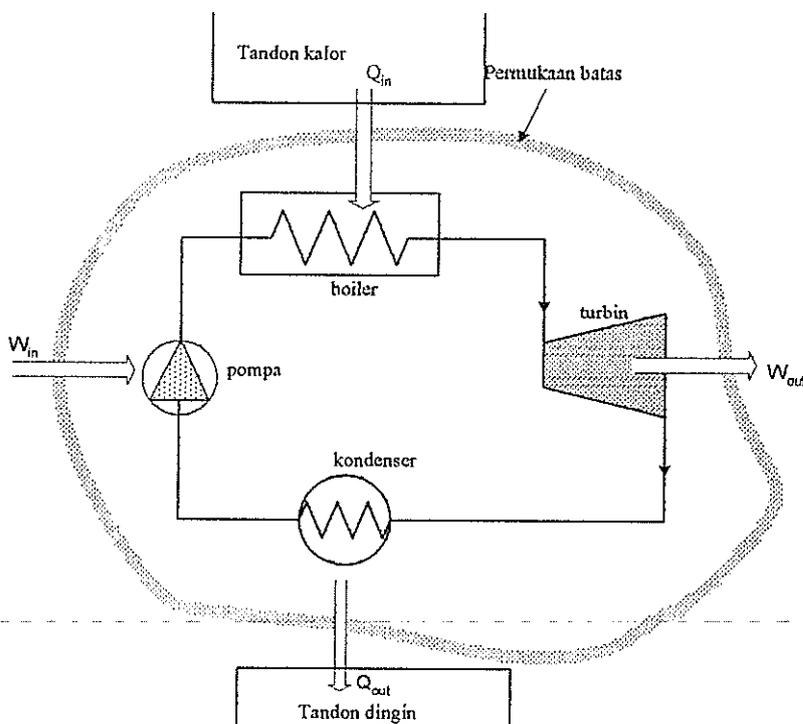
*Persyaratan
siklus*

1. Zat kerja
2. Sebuah mesin
3. Tandon kalor bersuhu tinggi
4. Tandon kalor bersuhu rendah
5. Pompa

Siklus termodinamik digolongkan menjadi dua yaitu siklus terbuka dan siklus tertutup. Siklus *terbuka* adalah siklus yang menggunakan atmosfer untuk melengkapi atau menutup siklus. Sebagai contoh pembakaran siklus mesin yang menggunakan oksigen dari udara atmosfer untuk pembakaran dan hasil buangan dikembalikan ke atmosfer. Siklus dikatakan *tertutup* apabila zat kerja tidak pernah meninggalkan sistem kecuali terjadi kebocoran. Sebagai contoh dari siklus tertutup ditunjukkan gambar 5-1. Dalam siklus ini air dipompa ke dalam boiler untuk diubah menjadi uap. Kemudian uap dialirkan ke turbin dan sebagian kalor akan diubah menjadi kerja (poros) mekanis. Sebagian uap yang tidak mampu dikonversi menjadi kerja meninggalkan turbin melalui kondenser, disini uap diubah menjadi air. Pompa menggunakan sebagian kerja mekanis yang dihasilkan oleh turbin untuk memompa air masuk ke boiler.

Siklus terbuka

Siklus tertutup



Gambar 5-1. Peralatan siklus dasar

Sebuah sistem yang mengalami siklus, perubahan energi netto nya sama dengan nol karena setelah satu siklus sistem akan kembali ke

Perubahan energi dalam netto dari siklus sama dengan nol

keadaan semula. Keseimbangan energi untuk sistem yang mengalami siklus termodinamika

$$\Delta E_{siklus} = Q_{siklus} - W_{siklus} \quad (5-1)$$

Untuk siklus, $\Delta E = 0$ sehingga

$$Q_{siklus} = W_{siklus} \quad (5-2)$$

Prinsip kekekalan energi

Pers. (5-2) memerikan prinsip kekekalan energi yang harus dipenuhi oleh setiap siklus termodinamika.

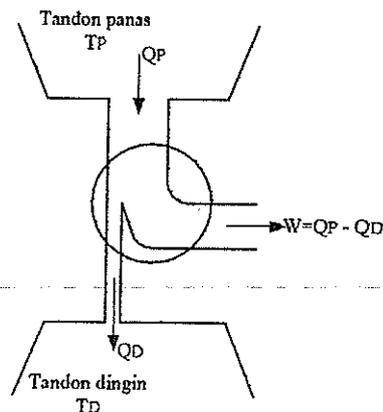
5.1.2. MESIN KALOR

Mesin kalor didefinisikan sebagai alat/divais yang mengubah kalor menjadi energi mekanis atau lebih tepat suatu sistem yang bekerja secara terus menerus dan hanya kalor dan usaha yang dapat melalui permukaan batasnya.

Beberapa contoh dari mesin kalor adalah mesin Carnot, mesin Brayton, mesin Otto (mesin bakar), mesin Rankine, dan mesin disel. Pada mesin kalor selalu terdapat dua buah tandon. Tandon yang memberikan kalor besar disebut tandon kalor. Sedang tandon lainnya disebut tandon dingin. Tandon dingin ini berfungsi menyerap kalor dalam jumlah yang besar tanpa terjadi perubahan panas yang berarti.

Tandon kalor

Tandon dingin



Gambar 5-2. Diagram alir mesin kalor

Perubahan energi dalam mesin kalor secara skematis diberikan pada gambar 5-2. Lingkaran menggambarkan mesinnya sendiri. Kalor Q_P yang diberikan kepada mesin oleh tandon kalor adalah sebanding dengan

luas penampang pipa. Kalor Q_D yang terbuang melalui saluran pembuangan ke tandon dingin berbanding lurus dengan luas penampang pipa keluar. Sebagian kalor diubah menjadi kerja mekanis W yang dilukiskan pada pipa cabang kekanan. Jadi Q_P adalah kalor yang diserap oleh mesin dan Q_D adalah kalor yang dibuang oleh mesin per siklus. Kalor neto yang diserap adalah:

Kalor neto

$$Q = Q_P - Q_D$$

kalor yang diserap dari tandon kalor biasanya diperoleh dari pembakaran bahan bakar.

Dengan menggunakan hukum pertama untuk satu siklus lengkap dan dengan mengingat tidak ada perubahan neto energi dalam, kita peroleh:

Siklus daya

$$W = Q_P - Q_D \quad (\text{siklus daya})$$

Siklus yang menghasilkan kerja neto yang dipindahkan ke lingkungan pada setiap siklus disebut *siklus daya*.

Efisiensi

Mesin kalor secara ideal mempunyai efisiensi η :

$$\eta = \frac{W}{Q_P} = \frac{Q_P - Q_D}{Q_P} = 1 - \frac{Q_D}{Q_P} \quad (5-3)$$

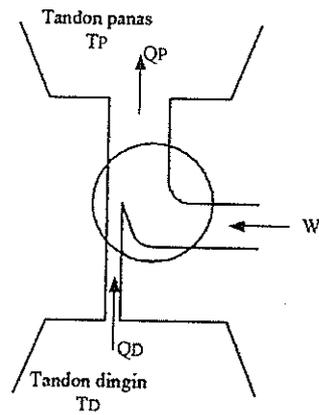
Nilai dari efisiensi tidak pernah lebih besar 1 (100%). Pada mesin aktual, nilai efisiensi selalu kurang dari satu. Hal ini menunjukkan bahwa tidak semua kalor yang diserap diubah menjadi kerja.

5.1.3. MESIN PENDINGIN

Siklus kerja mesin pendingin berkebalikan dengan mesin kalor. Diagram alir mesin pendingin diberikan pada gambar 5-3. Mesin pendingin mengambil kalor dari tandon dingin dan kompresor memberikan kerja mekanis, dan kemudian kalor dibuang ke tandon kalor. Pada lemari es yang biasa digunakan dirumah, makanan dan es batu sebagai tandon dingin dan udara dimana lemari es ditempatkan sebagai tandon kalor dan kerja dilakukan oleh kompresor.

Untuk satu kali siklus, kalor Q_D diambil dari tandon dingin dan kerja dilakukan pada mesin pendingin W dan membuang Q_P ke tandon kalor, W dan Q_P keduanya besaran negatif, berdasar hukum pertama,

$$Q_P = W + Q_D$$



Gambar 5-3. Diagram alir mesin pendingin

Jadi pemakaian kerja mekanis

$$W = Q_P - Q_D.$$

Persamaan ini berlaku untuk siklus refrijerasi maupun siklus pompa kalor namun tujuan kedua siklus berbeda. Refrijerasi digunakan untuk mendinginkan ruangan, atau untuk menjaga suhu dalam rumah lebih rendah dari suhu sekitarnya. Sedangkan pompa kalor digunakan untuk memanaskan ruangan, atau untuk menjaga agar suhu ruangan lebih tinggi dari suhu sekitarnya. Unjuk kerja dari kedua buah siklus ini diberikan oleh besarnya koefisien kinerjanya

Siklus refrijerasi

Siklus pompa kalor

Siklus Refrijerasi

Koefisien kinerja β didefinisikan sebagai nisbah antara jumlah kalor yang diserap oleh sistem dari tandon dingin dengan jumlah kerja yang dilakukan pada sistem dalam satu siklus atau dituliskan sebagai;

Koefisien kinerja β

$$\beta = \frac{\text{kalor yang diserap}}{\text{kerja yang dilakukan}} = \frac{Q_D}{Q_P - Q_D} \quad (5-4)$$

Untuk refrijerasi di rumah, Q_P dilepas di ruangan dimana mesin pendingin itu berada. W digunakan untuk menggerakkan motor listrik refrijerator.

Siklus Pompa kalor

Koefisien kinerja pompa kalor γ didefinisikan sebagai nisbah antara kalor yang dilepaskan dari sistem ke tandon kalor dengan kerja netto yang dilakukan pada sistem dalam satu siklus atau dituliskan sebagai:

Koefisien kinerja pompa kalor γ

$$\gamma = \frac{\text{kalor yang dilepas}}{\text{kerja yang dilakukan}} = \frac{Q_P}{Q_P - Q_D} \quad (5-5)$$

Untuk pompa kalor di rumah, kalor Q_D diambil dari udara, tanah, atau perairan di sekitar. W umumnya menggunakan motor listrik.

Contoh 5-1.

Sebuah mesin berkerja dalam siklus termodinamik tertutup dan menghasilkan kerja 200 kJ/kg dari zat kerja yang melewati mesin. Pompa dalam siklus membutuhkan 6 kJ/kg dari zat kerja untuk dapat bekerja. Berapa kerja netto dalam siklus.

Penyelesaian:

$$W_{\text{netto}} = 200 \text{ kJ/kg} - 6 \text{ kJ/kg} = 194 \text{ kJ/kg}$$

5.2. HUKUM KEDUA TERMODINAMIKA.

Terdapat dua pernyataan klasik dari hukum kedua termodinamika yang dikenal sebagai pernyataan Clausius dan Kelvin-Planck.

5.2.1. PERNYATAAN CLAUSIUS CALYPERON DAN KELVIN-PLANCK

a. Pernyataan Claussius:

Pernyataan Claussius

Tidak mungkin suatu proses dapat terjadi dengan sendirinya sehingga kalor diangkut dari tandon kalor suhu rendah ke tandon kalor suhu tinggi tanpa perubahan lain.

b. Pernyataan Kelvin-Planck

Pernyataan Kelvin-Planck

Tidak mungkin seluruh kalor yang diserap oleh suatu sistem, seluruhnya diubah menjadi usaha/kerja.

Pernyataan Clausius pada dasarnya menyatakan bahwa untuk memindahkan kalor dari tandon dingin ke tandon kalor diperlukan kerja/usaha oleh "sistem perantara". Sedang pernyataan Kelvin-Planck pada dasarnya menyatakan bahwa perubahan kalor menjadi kerja tidak dapat terjadi 100%. Jadi selalu ada kalor yang terbuang. Hukum yang didasarkan pada dua pernyataan ini disebut **Hukum Kedua Termodinamika**

Hukum kedua termodinamika merupakan hukum alam. Bahwa kerja dapat diubah menjadi kerja seluruhnya akan tetapi kalor tidak dapat diubah menjadi kerja secara keseluruhan. Peristiwa ini menunjukkan kesetaraan proses alam. Seandainya hukum kedua ini tidak benar maka orang dapat menggerakkan kapal dengan mengambil kalor dari lautan. Semua proses spontan dari alam dapat dipelajari dari hukum kedua ini. Kalor selalu mengalir dari suhu tinggi ke suhu rendah. Garam dapat larut dengan sendirinya tetapi garam tidak akan memisah dengan sendirinya dari air garam. Dan semuanya menunjukkan contoh proses ireversibel yang terjadi secara alami.

*Contoh
ireversibilitas proses*

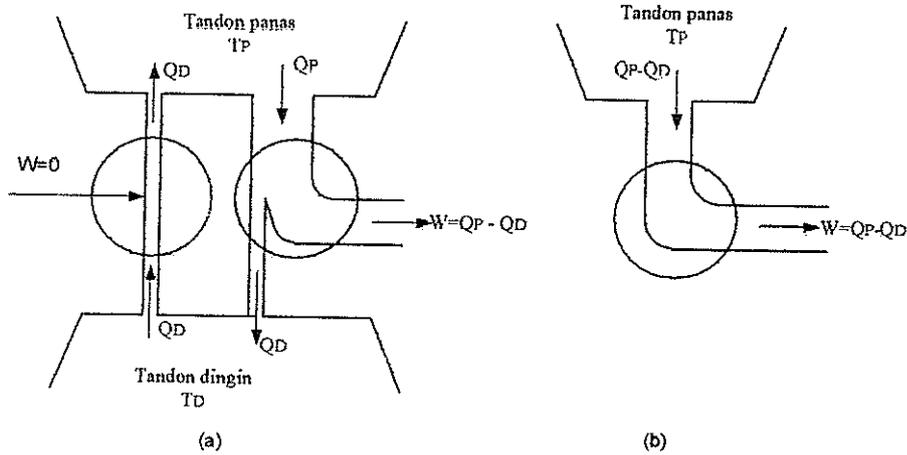
5.2.2. KESETARAAN PERNYATAAN CLAUDIUS CLAYPERON DAN KELVIN-PLANCK

Gambar 5-4(a) menunjukkan mesin pendingin yang menentang pernyataan Clausius dimana kerjanya sama dengan nol ($W=0$) dan mesin kalor biasa. Kita gunakan mesin pendingin “sempurna” ini serempak dengan mesin kalor biasa. Mesin pendingin “sempurna” menerima sejumlah kalor Q_D dari tandon dingin dan membuangnya dengan jumlah yang sama Q_D ke tandon kalor. Mesin kalor mengambil sejumlah kalor Q_P dipindahkan dari tandon kalor ke mesin kalor dan kemudian membuang kalor sebesar Q_D , maka kerja yang dilakukan $W = Q_P - Q_D$, diusahakan agar seluruh kalor yang dibuang oleh mesin kalor diserap seluruhnya oleh mesin pendingin. Jadi tidak ada kalor neto yang dibuang ke tandon dingin, hal ini berarti tandon dingin tidak diperlukan. Maka gabungan mesin pendingin “sempurna” dan mesin kalor biasa membentuk mesin kalor yang menentang pernyataan Kelvin-Planck karena kalor yang diserap seluruhnya diubah menjadi kerja, ditunjukkan gambar 5-4(b).

*Bukti pernyataan
CC setara
pernyataan KP*

Jika argumen dibalik, kita dapat mempunyai mesin kalor yang menentang pernyataan Kelvin Planck yang disebut saja mesin kalor “sempurna”. Mesin ini menyerap kalor sebesar Q_P dari tandon kalor dan mengubah seluruhnya menjadi kerja ($W=Q_P$). Dengan menghubungkan mesin kalor “sempurna” dengan mesin pendingin biasa, maka kerja dapat digunakan untuk menjalankan mesin pendingin, mengambil kalor Q_D dari tandon dingin dan memindahkan kalor Q_D tersebut bersama-sama dengan

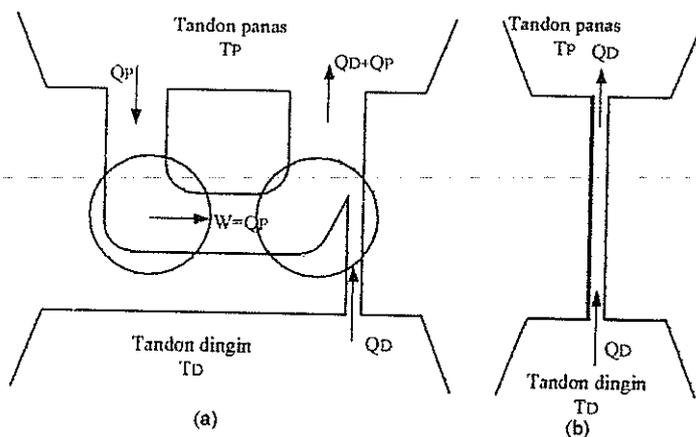
kerja yang telah diubah menjadi kalor oleh mesin pendingin ke tandon kalor. Jadi kalor neto yang diserap oleh tandon kalor sama dengan



Gambar 5-4 (a) Mesin pendingin “sempurna” dan mesin kalor biasa (b)
Hasil akhir gabungan

$Q_D (=Q_P+Q_D-Q_P)$. Maka gabungan mesin kalor “sempurna” dengan mesin pendingin biasa membentuk mesin pendingin yang menentang pernyataan Clausius, karena kalor yang diserap mesin pendingin dari tandon dingin sama dengan kalor yang dbuang ke tandon kalor ($=Q_D$) tanpa kerja dari luar, ditunjukkan gambar 5-5.

*Bukti pernyataan
KK setara
pernyataan CC*



Gambar 5-5 (a) Mesin kalor “sempurna dan mesin pendingin biasa (b)
Hasil akhir gabungan

5-3. PROSES REVERSIBEL DAN IREVERSIBEL

Jika kita tidak mungkin mendapatkan mesin dengan efisiensi 100% dari mesin kalor, berapakah efisiensi maksimum yang dapat kita peroleh? Langkah pertama untuk menjawab pertanyaan ini adalah mendefinisikan suatu proses ideal yang disebut proses reversibel. Dan kemudian membandingkan dengan suatu peralatan riil yang bekerja pada keadaan riil.

Proses reversibel didefinisikan sebagai serangkaian proses yang berlangsung pada suatu sistem yang pada akhirnya mengembalikan keadaan sistem ke keadaan semula tanpa perubahan pada keadaan sistem-sistem yang lain atau sekelilingnya. Proses yang tidak memenuhi syarat tersebut disebut proses *ireversibel*. *Ireversibilitas* proses dapat terjadi didalam sistem, sekitarnya atau keduanya. Ireversibilitas yang terjadi didalam sistem disebut ireversibilitas *internal* dan ireversibilitas yang terjadi disekitar sistem disebut ireversibilitas *eksternal*.

Proses reversibel
Proses ireversibel
Ireversibel internal
Ireversibel eksternal

Proses reversibel adalah murni dan bersifat hipotesis. Proses reversibel harus memenuhi kriteria berikut:

- Tidak ada gesekan internal atau mekanis
- Perbedaan suhu dan tekanan antara zat kerja dan lingkungan harus infinitesimal

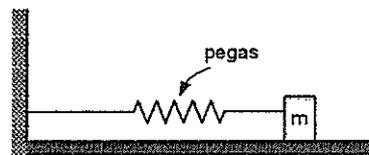
Hampir semua proses aktual adalah ireversibel. Proses reversibel adalah proses yang berlangsung dengan sangat sempurna dan tak pernah terjadi. Meskipun demikian terdapat beberapa proses yang dapat diasumsikan secara internal mendekati reversibel, contohnya adalah proses dalam silinder dengan piston yang dapat bergerak. Zat kerja selalu dalam kesetimbangan dan dikatakan zat kerja mengalami proses reversibel secara internal. Akan tetapi prosesnya ireversibel secara eksternal karena lingkungan mengalami perubahan keadaan yang tidak pernah dapat dikembalikan lagi.

Akan tetapi apabila piston bergerak tanpa gesekan dalam silinder dan gerakannya dilakukan secara perlahan agar rugi-rugi kekentalan dapat diabaikan. Kerja dilakukan pada gas akan sama dengan energi mekanis yang diterima oleh lingkungan. Selain itu energi mekanis yang diterima

oleh lingkungan dapat disimpan dan digunakan untuk mengembalikan sistem dan lingkungan kembali ke keadaan semula secara tepat. Pada kasus ini proses yang terjadi adalah reversibel secara internal maupun eksternal.

Banyak peralatan lain yang dapat dibuat mendekati proses reversibel. Misalnya pada peralatan digunakan pelumas untuk mengurangi gesekan sehingga mengurangi ireversibilitas proses.

Namun tidak semua proses dapat diasumsikan reversibel secara internal seperti proses dalam mesin turbo. Ireversibilitas dari proses ini disebabkan adanya derajat turbulensi yang tinggi dari zat kerja.



Gambar 5-6 Pegas dan massa diatas bidang licin sempurna

Sebagai contoh proses reversibel, *pegas diikat dengan benda bermassa m* . Proses gerakan benda yang mengalami pergerakan pada bidang licin adalah reversibel karena keadaan dapat dicapai tanpa mengubah sistem lain, ditunjukkan gambar 5-6 Pada umumnya semua gerakan pada proses mekanis murni tanpa gesekan adalah proses reversibel.

Proses ekspansi bebas. Kita ingat bahwa pada proses ekspansi bebas tak ada perubahan suhu dan energi dalam, tak ada kerja yang dilakukan, dan tak ada kalor yang diserap. Kemudian keadaan kita kembalikan ke keadaan semula melalui proses isothermal kuasistatik. Untuk ini harus dilakukan kerja W pada gas oleh tandon kerja karena $\Delta U=0$ maka harus dikeluarkan kalor sebesar $Q = W$ ke tandon kalor. Supaya tandon kerja dan tandon kalor tetap dalam keadaan awal, tandon kalor harus mengeluarkan kalor Q dan tandon kerja harus menyerap kerja sebesar W . Menurut hukum kedua, hal ini tidak mungkin terjadi tanpa mengubah syarat-syarat lain. Jadi proses ekspansi bebas adalah proses ireversibel.

5.4. SIKLUS CARNOT

Dari pernyataan Kelvin-Planck dapat disimpulkan bahwa tidak mungkin membuat mesin dengan efisiensi 100%. Berapa efisiensi yang dapat dicapai? Carnot memberi gagasan untuk menjawab pertanyaan ini.

Carnot mengemukakan siklus ideal yang disebut *siklus Carnot*. Siklus Carnot terdiri dari *dua proses isothermal* dan *dua proses adiabatik reversibel*, ditunjukkan gambar 5-7.

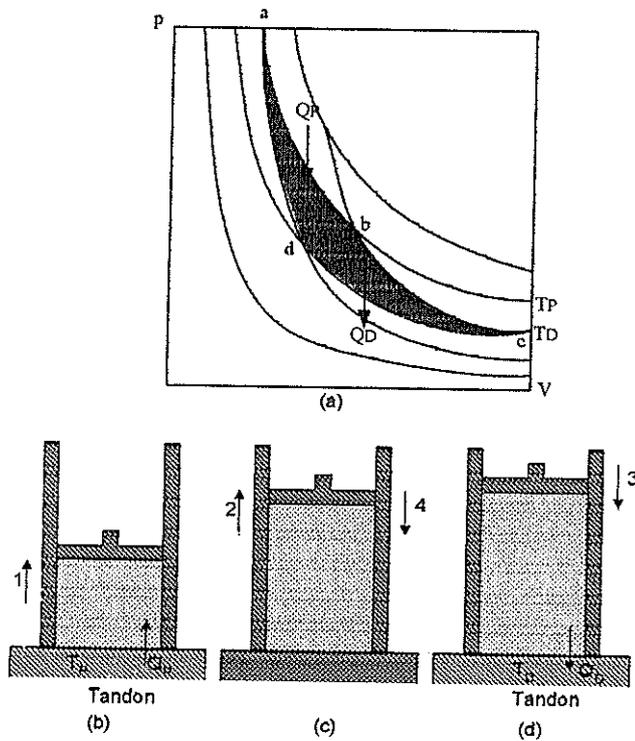
1. Sistem berupa gas ideal pada keadaan kesetimbangan mula-mula dinyatakan oleh T_P kemudian dikontakkan dengan tandon dengan suhu T_P , gas memuai secara perlahan. Selama proses tersebut kalor yang diserap oleh gas sebesar Q_P . Proses terjadi secara isothermal pada suhu T_P dan gas melakukan kerja untuk memuai.
2. Sistem diisolasi secara termis, gas memuai secara lebih perlahan. Proses terjadi secara adiabatik karena tidak ada kalor yang masuk maupun keluar sistem. Sistem melakukan kerja dan suhu turun ke T_D .
3. Sistem dikontakkan dengan tandon yang bersuhu T_D dan gas dimampatkan secara perlahan. Selama proses tersebut kalor Q_D dipindahkan dari gas ke tandon. Pemampatan terjadi secara isothermal pada T_D dan kerja dilakukan pada gas.
4. Sistem diisolasi secara termis dan dimampatkan secara perlahan ke keadaan awal. Pemampatan terjadi secara adiabatik, kerja dilakukan pada gas dan suhu naik ke T_D .

Siklus Carnot

Kerja neto yang dihasilkan dinyatakan oleh luasan abcd dari gambar 5-7(a). Jumlah kalor neto yang diserap oleh sistem pada siklus tersebut $Q_P - Q_D$, Q_P adalah kalor yang diserap dalam proses 1 dan Q_D adalah kalor yang diberikan ke tandon dalam proses 3. Karena keadaan awal dan akhir adalah sama, maka tidak ada perubahan energi dalam. Berdasarkan hukum pertama:

$$W = Q_P - Q_D \quad (5-6)$$

Persamaan diatas menunjukkan bahwa hasil siklus tersebut adalah kalor yang telah diubah menjadi kerja oleh sistem tersebut sehingga sistem ini berlaku sebagai mesin kalor.



Gambar 5-7. Siklus carnot

Efisiensi mesin kalor, η , didefinisikan sebagai perbandingan kerja neto selama satu siklus terhadap kalor yang diserap oleh sistem:

Efisiensi mesin Carnot

$$\eta = \frac{W}{Q_P} = \frac{Q_P - Q_D}{Q_P} = 1 - \frac{Q_D}{Q_P} \quad (5-7)$$

Berdasarkan siklus ini, kita dapat pula merencanakan mesin pendingin dengan membalik arah proses karena prosesnya adalah reversibel. Jika Q_D adalah kalor yang diserap dari tandon dingin, koefisien kerja β mesin pendingin didefinisikan sebagai perbandingan Q_D terhadap

W ;

Koefisien kerja mesin Carnot

$$\beta = -\frac{Q_D}{W} = -\frac{Q_D}{Q_P - Q_D} \quad (5-8)$$

Untuk menghitung efisiensi mesin Carnot, persamaan keadaan dari zat kerja harus diketahui. Andaikan zat kerja adalah gas ideal, maka kerja yang dilakukan pada proses a-b isothermal adalah:

$$W_{a-b} = mRT_P \ln \frac{V_b}{V_a}$$

Kerja yang dilakukan pada proses b-c ekspansi adiabatik:

$$W_{b-c} = mc_v(T_D - T_P)$$

Kerja yang dilakukan pada proses c-d isothermal adalah:

$$W_{c-d} = mRT_P \ln \frac{V_d}{V_c}$$

Kerja yang dilakukan pada proses d-a muai adiabatik:

$$W_{d-a} = mc_v(T_P - T_D)$$

Efisiensi siklus,

$$\eta = \frac{W}{Q_P} = \frac{W_{a-b} + W_{b-c} + W_{c-d} + W_{d-a}}{Q_P}$$

$$\eta = \frac{mR \left(T_P \ln \frac{V_b}{V_a} + T_D \ln \frac{V_d}{V_c} \right)}{mRT_P \ln \frac{V_b}{V_a}} \quad (5-9)$$

Proses b-c dan d-a adiabatik jadi berlaku hubungan:

$$T_P^{1/(\gamma-1)} V_b = T_D^{1/(\gamma-1)} V_c$$

$$T_P^{1/(\gamma-1)} V_a = T_D^{1/(\gamma-1)} V_d$$

Kalau keduanya dibandingkan akan diperoleh:

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d}$$

Pers. (5-9) menjadi:

$$\eta = \frac{T_P - T_D}{T_P} = 1 - \frac{T_D}{T_P} \quad (5-10)$$

Akhirnya diperoleh:

$$\frac{Q_P}{T_P} = \frac{Q_D}{T_D} \quad (5-11)$$

Contoh 4-2.

Sebuah mesin Carnot yang tandon dinginnya berada pada 280K mempunyai daya guna 40%, diinginkan supaya efisiensinya naik menjadi 50%.

(a). Berapa harusnya suhu tandon kalor dinaikkan jika suhu tandon dinginnya konstan?

(b). Berapa harusnya suhu tandon dingin diturunkan jika suhu tandon kalornya konstan?

Diketahui : Sistem : mesin Carnot

Keadaan : $T_D = 280 \text{ K}$, $\eta_1 = 40\%$ dinaikkan menjadi $\eta_2 = 80\%$

Ditanyakan :

(a). Berapa harusnya suhu tandon kalor dinaikkan jika suhu tandon dinginnya konstan?

(b). Berapa harusnya suhu tandon dingin diturunkan jika suhu tandon kalornya konstan?

Penyelesaian:

$$(a). \quad \eta_1 = 1 - \frac{T_D}{T_P}$$

$$40\% = 1 - \frac{280}{T_P}$$

$$T_P = 466,67 \text{ K}$$

T_D dijaga konstan, $\eta_2 = 80\%$, maka

$$\eta_2 = 1 - \frac{T_D}{T_{P2}} \quad 80\% = 1 - \frac{280}{T_{P2}}$$

$$T_{P2} = 1400 \text{ K}$$

Jadi suhu tandon kalor harus dinaikkan sebesar $1400 - 466,67 = 933,33 \text{ K}$

(b). Dengan cara yang sama dengan $T_P = 466,67 \text{ K}$, diperoleh:

$$80\% = 1 - \frac{T_D}{466,67}$$

$$T_{D2} = 373,336 \text{ K}$$

Jadi suhu tandon harus diturunkan sebesar $466,67 - 373,336 = 93,34 \text{ K}$

Contoh 4-3.

Satu kilogram gas ideal digunakan sebagai zat kerja dalam siklus Carnot. Pada permulaan kompresi isentropik, suhu 326 K dan tekanan mutlak 359 kPa . Untuk siklus ini, perbandingan ekspansi isothermal ($v_3/v_2 = 2$). Gambarkan siklus dalam diagram $T-s$ dan $p-v$ dan kemudian hitung

(a). tekanan, suhu dan volume jenis pada setiap siklus pada setiap akhir proses.

(b). kalor yang diberikan, kJ/kg

(c). kalor yang dibuang, kJ/kg

(d). kerja neto dengan metode $T-s$ dan metode $p-v$

(e). efisiensi, %

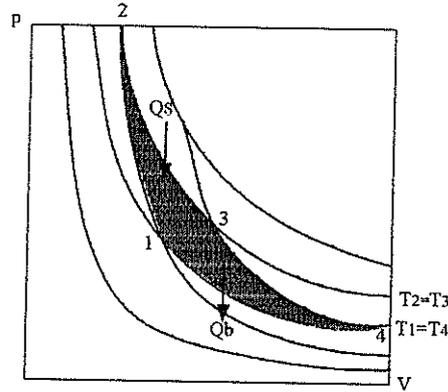
Diketahui: Sistem : gas ideal, $R = 287 \text{ J/kg K}$

Keadaan 1 : $p_1 = 369 \text{ kPa}$, $T_1 = 326 \text{ K}$

Keadaan 2 : $p_2 = 1373 \text{ kPa}$

Keadaan 3 : $v_2/v_3 = 2$

Penyelesaian



Gambar 5-8. Gambar contoh soal 5-2

(a).
$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \times 326}{359000} = 0,2606 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Proses 1-2, proses adiabatik,

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 326 \left(\frac{1373}{359} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 478,3 \text{ K}$$

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{287 \times 478,3}{1373000} = 0,100 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Proses 2-3, proses isothermal

$$p_3 = p_2 \left(\frac{v_2}{v_3} \right) = 1373 \left(\frac{1}{2} \right) = 686,5 \text{ kPa}$$

$$T_3 = T_2 = 478,3 \text{ K}$$

$$v_3 = 2v_2 = 2 \times 0,100 = 0,200 \text{ m}^3$$

$$T_4 = T_1 = 326 \text{ K}$$

Proses 3-4; proses adiabatik

$$p_4 = p_3 \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 686,5 \left(\frac{326}{478,3} \right)^{1,4-1} = 179,5 \text{ kPa}$$

$$v_4 = \frac{RT_4}{p_4} = \frac{287 \times 326}{179500} = 0,5212 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

(b). Kalor yang diberikan pada proses 2-3

$$q_s = p_2 v_2 \ln \left(\frac{v_3}{v_2} \right) = (1373)(0,100) \ln 2 = 95,17 \text{ kJ / kg}$$

(c). Kalor yang dibuang pada proses 4-1

$$q_b = p_4 v_4 \ln \left(\frac{v_4}{v_1} \right) = (179,5)(0,5212) \ln \left(\frac{0,5212}{0,2606} \right) = 64,85 \text{ kJ / kg}$$

(d) $w_{neto} = q_s - q_b = 95,17 - 64,85 = 30,32 \text{ kJ / kg}$

$$w_{neto} = w_{23} + w_{34} + w_{41} + w_{12}$$

$$w_{23} = p_2 v_2 \ln \left(\frac{v_3}{v_2} \right) = (1373)(0,100) \ln 2 = 95,17 \text{ kJ / kg}$$

$$w_{34} = \frac{1}{1-\gamma} (p_4 v_4 - p_3 v_3) = \frac{1}{1-1,4} [(179,5 \times 0,5212) - (686,5 \times 0,200)] = 109,36 \text{ kJ / kg}$$

$$w_{41} = p_4 v_4 \ln \left(\frac{v_1}{v_4} \right) = (179,5)(0,5212) \ln \left(\frac{0,2606}{0,5212} \right) = -64,85 \text{ kJ / kg}$$

$$w_{12} = \frac{1}{1-\gamma} (p_2 v_2 - p_1 v_1) = \frac{1}{1-1,4} [(1373 \times 0,100) - (359 \times 0,2606)] = -109,36 \text{ kJ / kg}$$

$$w_{neto} = 95,17 + 109,36 - 64,85 - 109,36 = 30,32 \text{ kJ / kg}$$

(e). $\eta = \frac{w_{neto}}{q_s} = \frac{30,32}{95,17} = 0,3186 = 31,86\%$

5.5. EFISIENSI MESIN REVERSIBEL.

Andaikan sebuah mesin tak reversibel bekerja diantara 2 buah tandon yang mempunyai efisiensi lebih besar dari mesin reversibel yang bekerja diantara 2 buah tandon yang sama, ditunjukkan gambar 5-9.

Jika kalor yang diserap oleh mesin tak reversibel Q'_p dan kalor yang dibuang Q'_n , kerja yang dilakukan:

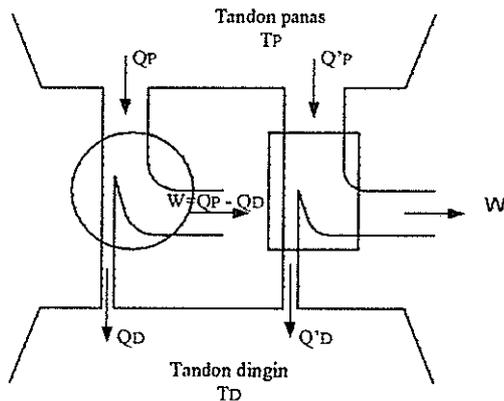
$$W = Q'_P - Q'_D$$

Jika mesin reversibel bekerja, kalor yang diserap oleh mesin sebesar Q_P dan kalor yang dilepas sebesar Q_D , kerja yang dilakukan:

$$W = Q_P - Q_D = Q'_P - Q'_D$$

Karena pengandaian awal kita $\eta_{irr} > \eta_{rev}$, maka:

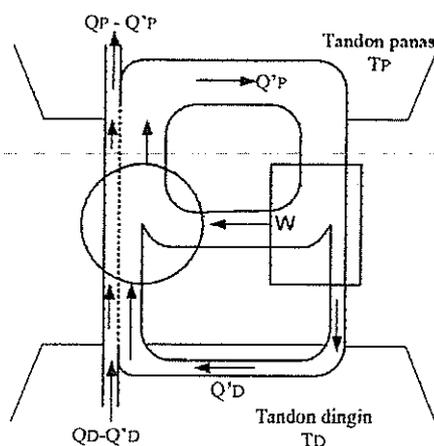
$$Q'_P < Q_P, \quad Q'_D < Q_D$$



Gambar 5-9. Diagram alir mesin reversibel dan mesin ireversibel

Sekarang mesin reversibel yang digunakan adalah mesin pendingin dengan Q_P , Q_D , dan W tetap. Mesin pendingin dijalankan dengan kerja yang dihasilkan oleh mesin tak reversibel. Maka gabungan kedua mesin akan menghasilkan perpindahan sebesar kalor sebesar

$$Q_D - Q'_D = Q_P - Q'_P$$



Gambar 5-10. Tak ada mesin yang mempunyai efisiensi yang lebih besar dari mesin reversibel yang bekerja pada suhu yang sama.

tanpa kerja dari luar. Jadi, mesin dapat bekerja sendiri dan menghasilkan perpindahan kalor dari suhu rendah ke suhu tinggi, seperti ditunjukkan gambar 5-10, hal ini jelas menentang pernyataan *Clausius*. Jadi daya-guna mesin tak reversibel tidak dapat lebih besar dari mesin reversibel yang beroperasi diantara dua buah tandon yang sama.

efisiensi

5.6. SKALA SUHU TERMODINAMIK DAN NOL MUTLAK

Karena efisiensi mesin reversibel tidak tergantung pada zat kerja, hanya bergantung pada suhu tandon dingin dan tandon kalor saja maka *Kelvin* mengusulkan gagasan skala suhu baru yang disebut *skala suhu Kelvin* atau *skala suhu termodinamis* atau *skala gas ideal*. Dituliskan kembali efisiensi mesin *Carnot*:

$$\eta = 1 - \frac{T_D}{T_P} = 1 - \frac{Q_D}{Q_P}$$

Diperoleh hubungan

$$\frac{T_D}{T_P} = \frac{Q_D}{Q_P}$$

Suhu pada skala ini adalah sebagai kalor yang diserap dan kalor yang dibuang oleh mesin *Carnot* yang bekerja diantara dua suhu ini. Untuk melengkapi definisi skala ini, maka ditetapkan nilai sebarang sebesar 273,16 untuk titik tripel air. Untuk mesin *Carnot* yang bekerja pada suhu T dan T_{tp} diperoleh hubungan:

$$\frac{T}{T_{tp}} = \frac{Q}{Q_{tp}} \quad (5-12)$$

atau

$$\boxed{T = 273,16K \frac{Q}{Q_{tp}}} \quad (5-13)$$

Skala suhu termodinamika

Diperjanjikan, penulisan suhu Kelvin ditulis tanpa menggunakan derajat. Kita bandingkan dengan suhu gas ideal:

$$T = 273,16K \lim_{p_i \rightarrow 0} \frac{P}{p_i} \quad (5-14)$$

maka kita melihat Q berlaku sebagai sifat termometrik, akan tetapi Q tidak bergantung pada zat kerja sehingga kita peroleh definisi suhu fundamental.

Kerja yang dilakukan mesin Carnot:

$$W = Q_P - Q_D$$

Dari definisi suhu termodinamik,

$$Q_D = Q_P \frac{T_D}{T_P} \quad (5-15)$$

Maka kita peroleh:

$$W = Q_P - Q_P \frac{T_D}{T_P}$$

dan

$$T_D = T_P \left(1 - \frac{W}{Q_P} \right) \quad (5-16)$$

Jika W membesar, T_D mengecil. Dari hukum kedua kerja harus lebih kecil dari kalor yang diserap ($W < Q_P$). Karena mesin tidak dapat mengubah seluruh kalor yang diserap menjadi kerja maka suhu dalam kurung selalu lebih besar dari nol sehingga suhu terendah yang dapat dicapai lebih besar dari nol. Dengan kata lain, suhu termodinamik nol tidak dapat dicapai. Oleh karena itu suhu nol pada skala termodinamik disebut *nol mutlak*.

Suhu nol mutlak

5.7. KETIDAKSAMAAN CLAUSIUS

Ketidaksamaan Clausius dinyatakan oleh:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (5-17)$$

Ketidaksamaan Clausius merupakan akibat dari hukum kedua termodinamika. Kita akan membuktikan bahwa ketidaksamaan ini berlaku untuk semua siklus termasuk proses reversibel dan tak reversibel untuk mesin kalor maupun mesin pendingin.

5.7.1. MESIN KALOR REVERSIBEL

Pertama, kita tinjau mesin kalor reversibel. Kita gunakan mesin yang bekerja menggunakan siklus Carnot karena siklus Carnot merupakan siklus reversibel. Siklus mesin kalor reversibel yang beroperasi diantara

dua tandon kalor bersuhu T_P dan T_D diperlihatkan pada gambar 5-11. Untuk siklus mesin kalor, integral siklus dari perpindahan kalor $\oint \delta Q$ lebih besar dari nol atau dituliskan dengan

$$\oint \delta Q = Q_P - Q_D > 0$$

Karena mesin kalor adalah mesin Carnot, maka $\oint \frac{\delta Q}{T}$ akan sama dengan:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_P}{T_P} - \frac{Q_D}{T_D} = 0$$

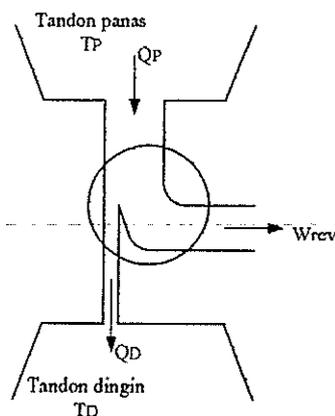
Jika $\oint \frac{\delta Q}{T}$ mendekati nol (dengan membuat T_P mendekati T_D) dan prosesnya reversibel, $\oint \frac{\delta Q}{T}$ akan tetap berharga nol. Jadi dapat disimpulkan bahwa untuk semua siklus mesin kalor reversibel,

$$\oint \delta Q \geq 0 \quad (5-18)$$

dan

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad (5-19)$$

Persamaan (5-19) merupakan pernyataan ketidaksamaan Clausius untuk proses reversibel



Gambar 5-11. daur mesin kalor reversibel untuk membuktikan ketidaksamaan Clausius

5.7.2. MESIN KALOR IREVERSIBEL

Sekarang tinjau mesin kalor siklus tak reversibel yang beroperasi pada suhu T_P dan T_D yang sama seperti gambar 5-11. Mesin menerima sejumlah kalor yang sama sebesar Q_P . Menurut hukum kedua:

$$W_{\text{irr}} < W_{\text{rev}}$$

Karena $Q_P - Q_D = W$ untuk kedua siklus tak reversibel dan reversibel, maka:

$$Q_P - Q_{D\text{ irr}} < Q_P - Q_{D\text{ rev}}$$

Oleh karena itu:

$$Q_{D\text{ irr}} > Q_{D\text{ rev}}$$

Akibatnya untuk mesin kalor untuk siklus tak reversibel:

$$\oint \delta Q = Q_P - Q_{D\text{ irr}} > 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_P}{T_P} - \frac{Q_{D\text{ irr}}}{T_D} < 0$$

Kita andaikan mesin makin lama makin tak reversibel tetapi Q_D , T_P dan T_D dijaga tetap konstan, maka $\oint \delta Q$ mendekati nol dan $\delta Q/T$ menjadi lebih negatif dan akhirnya usaha menjadi nol atau dituliskan:

$$\oint \delta Q = 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0$$

Dan akhirnya dapat disimpulkan:

$$\oint \delta Q \geq 0 \quad (5-20)$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0 \quad (5-21)$$

Pers. (5-21) merupakan pernyataan ketidak samaan Clausius

5.7.3. MESIN PENDINGIN.

Sekarang kita buktikan ketidaksamaan Clausius juga berlaku untuk mesin pendingin. Kita tinjau untuk siklus mesin pendingin seperti diberikan pada gambar 5-12

$$\oint \delta Q = -Q_P + Q_D < 0$$

Oleh karena itu,

$$Q_{P\text{ irr}} > Q_{P\text{ rev}}$$

Artinya kalor yang dilepas oleh mesin pendingin tak reversibel ke tandon kalor lebih besar daripada kalor yang dilepas oleh mesin pendingin reversibel. Untuk mesin pendingin tak reversibel:

$$\oint \delta Q = -Q_{P\text{ irr}} + Q_D < 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = -\frac{Q_{P\text{ irr}}}{T_P} + \frac{Q_D}{T_D} < 0$$

Andaikan mesin makin lama makin tak reversibel tetapi Q_D , T_P dan T_D dijaga konstan, maka $\oint \delta Q$ mendekati nol dan $\delta Q/T$, menjadi lebih negatif, untuk mesin pendingin tak reversibel tidak mungkin $\oint \delta Q$ mendekati nol.

Jadi untuk siklus mesin pendingin tak reversibel,

$$\oint \delta Q < 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0$$

Jadi dapat disimpulkan untuk siklus mesin reversibel baik mesin kalor maupun mesin pendingin berlaku

$$\boxed{\oint \frac{\delta Q}{T} = 0} \quad (5-24)$$

Dan untuk semua siklus ireversibel

$$\boxed{\oint \frac{\delta Q}{T} < 0} \quad (5-25)$$

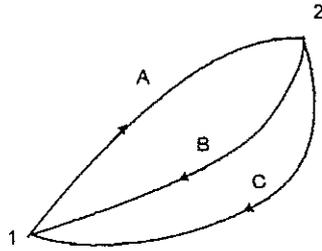
Jadi untuk semua siklus dapat kita tulis

$$\boxed{\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0} \quad (5-26)$$

Pers. (5-26) merupakan pernyataan ketidaksamaan Clausius yang berlaku untuk siklus reversibel maupun tak reversibel baik untuk mesin kalor juga mesin pendingin.

5.8. ENTROPI

Kita tinjau sistem yang mengalami proses reversibel dari keadaan 1 ke keadaan 2 melalui lintasan A, dan kembali ke keadaan semula melalui lintasan B yang juga reversibel, ditunjukkan gambar 5-13.



Gambar 5-13. Dua proses reversibel untuk membuktikan bahwa entropi adalah sifat dari zat

Karena siklus reversibel, maka dapat dituliskan:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B \quad (5-27)$$

Sekarang kita pandang siklus reversibel yang lain, dengan keadaan awal yang sama, tetapi kembali melalui lintasan C. Untuk siklus ini dapat kita tulis:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C \quad (5-28)$$

Dengan mengurangkan pers. (5-27) dengan pers. (5-28), diperoleh:

$$\int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B = \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C \quad (5-29)$$

Karena $\oint \frac{\delta Q}{T}$ sama untuk semua lintasan antara 2 dan 1, besaran ini hanya bergantung pada keadaan awal dan akhir saja. Besaran ini dapat digolongkan sebagai *sifat* sistem dan disebut sebagai *entropi* yang dinyatakan dengan S . Entropi didefinisikan sebagai:

Entropi adalah sifat sistem

$$dS \equiv \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} \quad (5-30)$$

Perubahan entropi sistem yang mengalami perubahan keadaan 1 ke 2 reversibel adalah:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} \quad (5-31)$$

Entropi adalah besaran *ekstensif* sistem dan dalam sistem yang homogen sebanding dengan massa atau jumlah mol sistem. *Entropi jenis s* adalah

$$s = \frac{S}{m} \quad (5-32) \quad \text{Entropi jenis}$$

Dan *entropi jenis molal s** adalah:

$$s^* = \frac{S}{n} \quad (5-33) \quad \text{Entropi molal}$$

Satuan. Satuan entropi adalah ft-lb/°R, Btu/°R, J/K entropi jenis adalah ft-lb/slug°R, Btu/lbm°R, J/kgK. Satuan entropi jenis molal ft-lb/slug-mole°R, Btu/lbm-mole°R, J/kg-mol K *Satuan entropi*

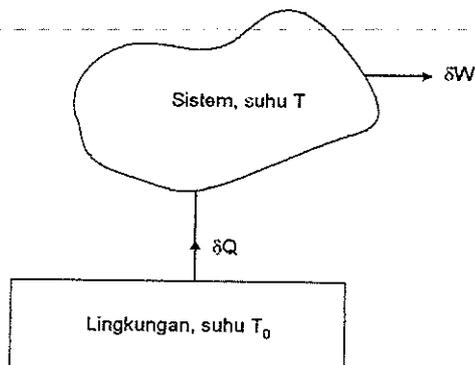
5.9. PRINSIP PERTAMBAHAN ENTROPI

Pandang sistem yang ditunjukkan gambar 5-14 sejumlah kalor δQ dipindahkan dari lingkungan yang bersuhu T_0 ke sistem yang bersuhu T . Jika kerja yang dilakukan oleh sistem selama proses adalah δW , dengan menggunakan pers. (5-31) pada sistem, diperoleh:

$$dS_{sist} \geq \frac{\delta Q}{T}$$

Untuk lingkungan, δQ negatif dan diperoleh:

$$dS_{lingk} = \frac{-\delta Q}{T_0} \quad \text{Entropi lingkungan}$$



Gambar 5-14 Perubahan entropi sistem plus lingkungan

Perubahan entropi netto total,

$$dS_{netto} = dS_{sist} + dS_{lingk} \geq \frac{\delta Q}{T} - \frac{\delta Q}{T_0}$$

$$\geq \delta Q \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

Karena $T_0 > T$, maka $\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$ positif dan dapat disimpulkan bahwa:

Entropi sistem+lingkungan

$$\boxed{dS_{netto} = dS_{sist} + dS_{lingk} \geq 0} \quad (5-34)$$

Artinya dalam sebarang proses antara dua keadaan kesetimbangan sistem, pertambahan entropi sistem plus pertambahan entropi lingkungan sama dengan atau lebih besar nol.

Jika $T_0 < T$, kalor akan mengalir dari sistem ke lingkungan, δQ_{sist} negatif dan δQ_{lingk} positif dan $\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$ akan negatif, maka pers. (5-34)

tetap berlaku.

Bila prosesnya reversibel,

$$dS_{netto} = dS_{sist} + dS_{lingk} = 0 \quad (5-35)$$

Pada proses reversibel, entropinya konstan.

Jika prosesnya ireversibel, entropi total dari sistem plus lingkungan bertambah. Dalam kasus ini entropi sistem dan lingkungan keduanya dapat bertambah atau salah satu bertambah dan yang lain berkurang. Akan tetapi pertambahan selalu lebih besar dari penurunan. Jadi entropi pada proses tak reversibel tidak konstan.

Andaikan prosesnya adiabatik, sistem berinteraksi dengan tandon kerja tetapi tidak dengan tandon kalor, maka tidak ada perubahan entropi dari lingkungan, dari pers. (5-34) diperoleh:

$$dS_{sist} \geq 0 \quad (5-36)$$

atau

$$\boxed{S_2 \geq S_1} \quad (5-37)$$

Prinsip pertambahan entropi

Dalam sebarang proses yang terjadi dalam sistem yang terisolasi, entropi sistem akan konstan atau bertambah disebut prinsip pertambahan entropi.

Contoh 5-3.

Satu kg air jenuh pada 100°C diembunkan sampai menjadi cairan jenuh pada 100°C pada tekanan konstan karena perpindahan kalor ke lingkungan yang bersuhu 30°C . Berapakah pertambahan entropi netto dari sistem plus lingkungan?

Penyelesaian:

$$T_{sist} = 100 + 273 = 323 \text{ K}$$

$$m_{sist} = 1 \text{ kg}$$

$$T_{lingk} = 30 + 273 = 303 \text{ K}$$

$$\text{Dari tabel uap diperoleh : } s_{fg} = 6,0480 \text{ kJ/kgK}$$

$$h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta S_{sist} = -m s_{fg} = -1 \times 6,0480 = -6,0480 \text{ kJ/K}$$

Kalor yang diberikan ke lingkungan Q :

$$Q = m h_{fg} = 1 \times 2257 = 2257 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{lingk} = \frac{Q}{T_{lingk}} = \frac{2257}{298} = 7,5700 \text{ kJ / K}$$

$$\Delta S_{netto} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{lingk} = -6,0480 + 7,5700 = 1,5220 \text{ kJ / K}$$

RANGKUMAN

Mesin adalah alat untuk mengubah energi kalor dari zat kerja menjadi energi mekanis yang bermanfaat. Terdapat dua jenis mesin yaitu mesin kalor dan mesin pendingin, unjuk kerja dari kedua mesin ini masing-masing ditunjukkan oleh efisiensi dan koefisien kerjanya.

Dibedakan dua jenis proses yaitu proses reversibel dan proses tak reversibel. Proses reversibel didefinisikan sebagai serangkaian proses yang berlangsung pada suatu sistem yang akhirnya mengembalikan keadaan sistem ke keadaan semula tanpa perubahan pada keadaan sistem-sistem yang lain atau sekelilingnya. Proses yang tidak memenuhi syarat tersebut disebut proses tak reversibel.

Siklus Carnot merupakan siklus yang terdiri dari dua proses isothermal dan dua proses adiabatik reversibel. Mesin yang bekerja berdasar siklus Carnot disebut mesin Carnot.

Pernyataan Clausius pada dasarnya menyatakan bahwa untuk memindahkan kalor dari tandon dingin ke tandon kalor diperlukan kerja/usaha oleh "sistem perantara". Sedang pernyataan Kelvin Planck pada dasarnya menyatakan bahwa perubahan kalor menjadi kerja tidak dapat terjadi 100%. Jadi selalu ada kalor yang terbuang. Pernyataan Clausius dan Kelvin Planck tentang hukum kedua termodinamik adalah setara, jika pernyataan Clausius tidak benar maka pernyataan Kelvin Planck tidak benar atau sebaliknya.

Efisiensi mesin tak reversibel tidak dapat lebih besar dari mesin reversibel yang beroperasi diantara dua tandon yang sama.

Suhu termodinamik adalah suhu yang tidak bergantung pada sifat zat kerja. Karena suhu termodinamik nol tidak dapat dicapai maka suhu nol pada skala termodinamik disebut nol mutlak.

Pada proses reversibel, entropi total dari sistem plus lingkungan adalah konstan. Sedangkan pada prosesnya ireversibel, entropi total dari sistem plus lingkungan selalu bertambah. Dalam kasus ini entropi sistem dan lingkungan keduanya dapat bertambah atau salah satu bertambah dan yang lain berkurang. Akan tetapi pertambahan selalu lebih besar dari penurunan. Jadi entropi pada proses ireversibel tidak konstan. Dalam sebarang proses yang terjadi dalam sistem yang terisolasi, entropi sistem akan konstan atau bertambah disebut prinsip pertambahan entropi.

PERTANYAAN-PERTANYAAN

1. Bedakan antara
 - a) proses termodinamik dan siklus termodinamik
 - b) siklus tertutup dan siklus terbuka
 - c) proses reversibel dan proses ireversibel
 - d) reversibel internal dan reversibel eksternal
 - e) pompa kalor dan refrijerasi
2. Tunjukkan bahwa jika pernyataan Clausius tidak benar maka pernyataan Kelvin Planck tidak benar pula.
3. Buktikan bahwa tidak ada mesin pendingin yang beroperasi dalam siklus antara dua tandon pada suhu konstan dapat mempunyai kerja

lebih besar dari mesin pendingin reversibel yang beroperasi antara dua tandon yang sama.

SOAL-SOAL

- 5.1 Jika mesin pendingin Carnot dioperasikan antara tandon 0°F dan 90°F (a) Jika 90° Btu diserap dari tandon dingin, berapa Btu yang dibuang ke tandon kalor. (b) Berapa koefisien kerjanya.
- 5.2 Satu mol gas ideal monoatomik mula-mula volumenya 2 ft^3 kemudian dimampatkan secara isochorik hingga tekanannya menjadi 10 atm , setelah itu gas diekspansi secara isovolumis hingga tekanannya 10 atm , setelah itu gas diekspansi adiabatik hingga volumenya menjadi duakalinya. Sistem dikembalikan ke keadaan semula secara isobarik (a). Gambarkan prosesnya dalam diagram p-V (b). Berapa kalor yang mengalir ke sistem, kalor yang keluar dan efisiensi siklus (c). Berapa efisiensi maksimum dari mesin yang beroperasi antara suhu ekstrem dari siklus?

BAB VI BEBERAPA AKIBAT HUKUM KEDUA TERMODINAMIKA

Pada bab sebelumnya telah dibahas tentang hukum kedua termodinamika dan sifat intrinsik termodinamik yaitu entropi. Pada bab ini kita akan membahas aplikasi dari kedua konsep ini. Aplikasi umum dari hukum kedua adalah untuk menganalisis volumatur dengan sejumlah kasus khusus yang relevan. Metode perhitungan perubahan entropi, fungsi Gibbs serta fungsi Helmholtz juga akan dibahas disini.

Tujuan bab

Tujuan dari bab ini adalah memperkenalkan peran hukum kedua termodinamika dan entropi untuk menganalisis sistem yang mengalami berbagai proses.

6.1. DIAGRAM T - s

Kerja mekanis dapat dinyatakan secara grafis oleh suatu luasan dalam diagram p - v . Secara analogi kita akan menyatakan kalor secara grafis dengan suatu luasan dengan menggunakan diagram lain. Untuk proses reversibel internal, perubahan entropi dinyatakan oleh:

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev}$$

Persamaan ini dapat juga dituliskan dalam bentuk,

$$(\delta Q)_{rev} = TdS$$

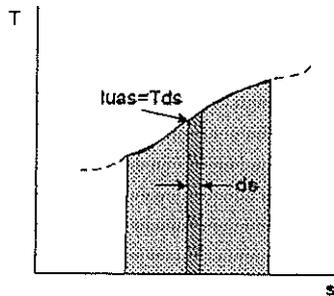
Untuk perubahan keadaan dari 1 ke 2,

$$Q_{rev} = \int_1^2 TdS \quad (6-1)$$

Pers (6-1) menyatakan bahwa perpindahan kalor pada sistem tertutup selama proses reversibel internal dapat digambarkan dalam diagram suhu-entropi. Suhu merupakan besaran yang tidak bergantung pada massa dan menyebabkan perpindahan kalor, karena itu suhu kita pilih sebagai ordinat pada diagram. Besaran entropi kita pilih sebagai absis karena sebanding dengan massa dan merupakan besaran ekstensif. Diagram dengan T sebagai ordinat dan s sebagai absis, disebut *diagram T -*

Diagram T - s

s, ditunjukkan gambar 6-1. Luasan yang diarsir menyatakan sejumlah kecil kalor yang dipindahkan dan sama dengan Tds .



Gambar 6-1. Penyajian perpindahan kalor dalam diagram $T-s$

Diagram $T-s$ mempunyai aplikasi yang paling luas dibandingkan dengan beberapa diagram yang digunakan dalam termodinamika karena daerah dibawah sebarang garis proses reversibel menyatakan jumlah kalor. Diagram ini dapat diterapkan untuk problem aliran maupun non aliran, dan kalor selalu memegang peranan penting.

Gambar 6-2 memperlihatkan diagram $T-s$ untuk uap. Daerah berbentuk kubah yang terdiri dari dua fase yaitu fase cair-uap disebut **kubah uap**. Kubah uap dibatasi pada sebelah kiri oleh garis cairan jenuh dan disebelah kanan oleh garis uap jenuh. Puncak kubah merupakan titik kritis. Disebelah kiri garis cairan jenuh merupakan daerah cair. Daerah tepat dibawah kubah merupakan daerah uap basah yang berupa campuran cairan air dan uap dan di sebelah kanan garis uap jenuh merupakan daerah uap. Pada suhu diatas titik kritis sudah tidak ada perbedaan antara cairan dan uap. Untuk penyederhanaan gambar, garis-garis horisontal dan garis-garis vertikal yang menyatakan garis isothermal dan garis isentropik tidak digambarkan.

Kubah uap

Garis cairan jenuh

Titik kritis

Garis uap jenuh

Garis panas lanjut (SH, *superheat*) menyerupai bentuk garis uap jenuh. Dengan meningkatnya nilai panas lanjut, garis ini bergerak menjauh dalam daerah panas lanjut.

Garis panas lanjut

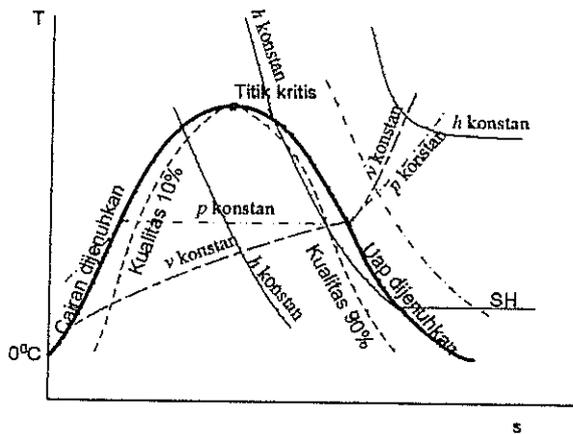
Garis isochorik terlihat khas pada gambar dengan karakteristik tajam pada perubahan kemiringan setelah memotong garis uap jenuh.

Garis isochorik

Pada gambar terdapat tiga jenis garis isentalpi. Jenis pertama, pada daerah panas lanjut, garis isentalpi seluruhnya terletak pada daerah ini.

Garis isentalpi

Jenis kedua, garis isentalpi datang dari daerah panas lanjut masuk daerah basah pada suhu tinggi dan terakhir masuk lagi kedaerah panas lanjut pada suhu yang sedikit lebih rendah. Jenis ketiga, garis isentalpi memotong garis kubah jenuh dan masuk daerah basah dan tidak meninggalkan daerah basah pada suhu lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa entalpi nyaris hanya merupakan fungsi suhu dalam daerah ini.



Gambar 6-3. Diagram $T-s$ untuk uap

6.2. DIAGRAM $h-s$

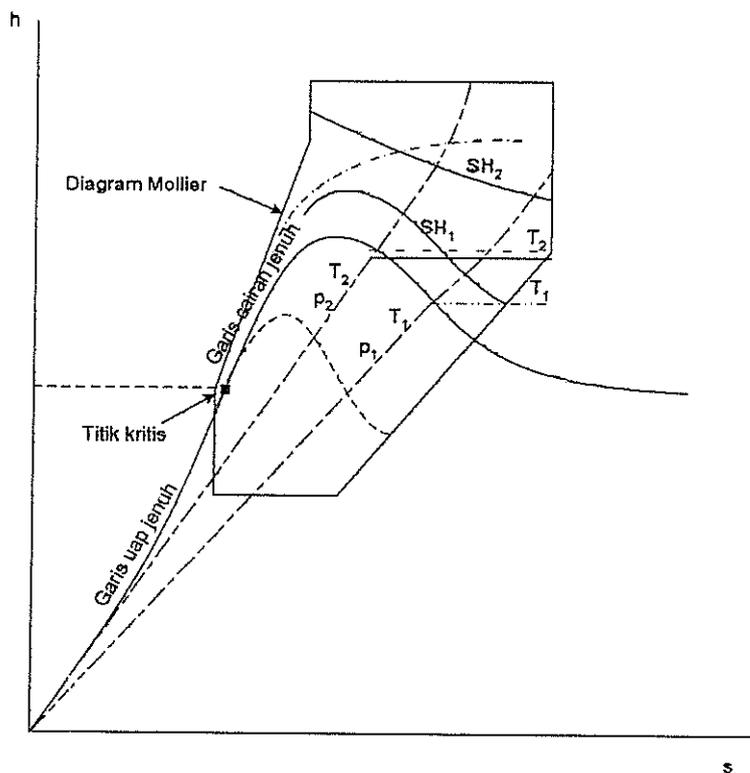
Sifat-sifat termodinamik seringkali diperlihatkan pada diagram $h-s$. Diagram Molier merupakan bagian yang penting dari diagram $h-s$. Untuk gas ideal, diagram $h-s$ mirip dengan diagram $T-s$ karena entalpi hanya merupakan fungsi suhu saja, untuk merajah dalam diagram $h-s$ cukup dengan mengalikan skala suhu dari diagram $T-s$ dengan c_p . Namun untuk kasus uap harga kalor jenisnya mempunyai perbedaan besar. Gambar 6-2 memperlihatkan diagram $h-s$ untuk uap. Karena entalpi dan entropi sama dengan nol untuk cairan jenuh pada 0°C , garis cairan jenuh akan mulai dari titik asal koordinat. Titik kritis menandai titik temu dari garis cairan jenuh dan garis uap jenuh yang terletak tidak jauh dari puncak kubah uap. Area yang berada dalam kubah menunjukkan daerah basah, meskipun orientasinya adalah serong/miring.

Garis isobarik dan isothermal muncul sebagai garis lurus dalam daerah basah. Dua garis isobar dan isothermal pada tekanan dan suhu jenuh ditunjukkan pada gambar. Tampak pada gambar garis isobar setelah

Titik kritis

Garis isobarik dan isothermal

memotong garis uap jenuh, kemiringannya secara perlahan meningkat dan garis isothermal patah kekanan. Garis ketiga suhu konstan nilainya lebih besar dari nilai kritis muncul dalam daerah panas lanjut. Garis isothermal pada panas lanjut tinggi mendekati garis horisontal dan hampir bertepatan dengan garis isentalpi. Hal ini menunjukkan bahwa uap dalam daerah ini mendekati fase gas.



Gambar 6-3. Diagram $h-s$

Garis-garis kualitas konstan dapat dibuat dengan pembagian garis isothermal (atau isobar) dalam daerah basah yang sebanding dengan jumlah relatif cairan dan uap kering tergantung nilai kualitas yang dipilih. Pada gambar ini ditunjukkan hanya satu garis kualitas konstan.

Garis-garis kualitas konstan

Dua garis panas lanjut juga diperlihatkan pada gambar. Bentuk garis-garis ini menyerupai garis uap jenuh, terutama untuk nilai panas lanjut yang lebih rendah.

Garis panas lanjut

Diagram Mollier merupakan bagian dari diagram $h-s$ lengkap. Diagram Mollier digunakan untuk menghitung entalpi dari keadaan tertentu. Diagram ini merupakan sebuah grafik tambahan untuk sifat-sifat termodinamik yang ditabelkan dan keduanya dapat digunakan bersama-sama. Walaupun penggunaan tabel memberikan hasil yang lebih akurat namun penggunaan diagram seringkali dapat menghindari kerumitan dalam melakukan interpolasi.

Diagram Mollier

6.3. PERUBAHAN ENTROPI DARI ZAT MURNI DAN KEADAAN JENUH

Untuk zat murni harga entropi jenis telah ditabelkan bersama-sama dengan volume jenis, entalpi jenis, dan energi dalam jenis. Tabel B1-1 sampai B1-5 disebut tabel uap. Tabel B2-1 sampai B2-2 adalah tabel amoniak, tabel B3-1 sampai B4-2 adalah tabel Refrijeran.

Pada daerah jenuh cair-uap, entropi jenis dapat dihitung dengan menggunakan kualitas x . Serupa dengan perhitungan untuk entalpi dan energi dalam jenis, entropi jenis dalam daerah jenuh dapat dituliskan sebagai:

Entropi jenis dalam daerah jenuh

$$s = (1 - x)s_f + xs_g \tag{6-2}$$

$$s = s_f + xs_{fg} \tag{6-3}$$

dengan $s_{fg} = s_g - s_f$

Contoh 6-1.

Silinder yang dilengkapi dengan piston berisi uap basah 0,3 kg pada suhu 100°C dengan kualitas 70%. Tentukan entropi sistem

Diketahui:

Sistem : uap basah

Keadaan : $T = 100^{\circ}\text{C}$, $x = 70\%$

Ditanyakan : Entropi sistem (S)

Penyelesaian :

Dari tabel, untuk $T = 100^{\circ}\text{C}$

$$s_f = 1,3069 \text{ kJ/kgK}, s_{fg} = 6,0480 \text{ kJ/kgK}$$

Entropi jenis dihitung dari

$$s = s_f + x s_{fg} = 1,3069 + 0,7(6,0408) \text{ kJ/kgK} \\ = 5,5355 \text{ kJ/kgK}$$

Entropi sistem adalah

$$S = ms = 0,3(5,5355) \text{ kJ/K} = 1,66065 \text{ kJ/K}$$

6.4. PERUBAHAN ENTROPI SELAMA PROSES REVER-SIBEL

Kita tinjau sistem yang mengalami proses reversibel dan bekerja menurut siklus Carnot. Gambar 6-4 memperlihatkan diagram T - S dari siklus Carnot

Siklus Carnot

Perubahan entropi untuk sistem yang mengalami proses reversibel adalah:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev}$$

6.4.1. PROSES ISOTERMAL REVERSIBEL

Pada siklus Carnot terdapat dua proses isotermal. Proses isotermal pertama, pada gambar 6-4 diunjukkan oleh perubahan keadaan 1 ke 2 yang terjadi pada suhu tetap T_p . Perubahan entropi yang terjadi untuk T tetap adalah :

Proses isotermal

$$S_2 - S_1 = \frac{1}{T_p} \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} = \frac{Q_{1-2}}{T_p} \quad (6-4)$$

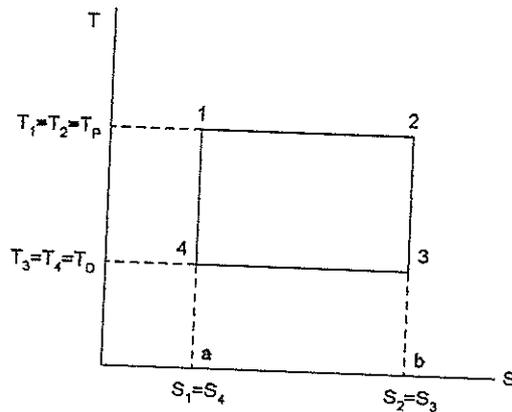
Luasan 1-2-b-a-1 menyatakan kalor yang dipindahkan ke zat kerja selama proses isotermal

Proses isotermal yang kedua ditunjukkan oleh perubahan keadaan 3 ke keadaan 4, kalor dipindahkan dari zat kerja ke tandon bersuhu rendah.

Untuk proses ini dapat kita tulis,

$$S_4 - S_3 = \frac{1}{T_D} \int_3^4 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} = \frac{Q_{3-4}}{T_D}$$

Luasan 3-4-a-b-3 menyatakan kalor yang dipindahkan dari zat kerja selama proses isotermal



Gambar 6-4. Siklus Carnot dalam diagram T - S

6.4.2. PROSES ADIABATIK REVERSIBEL

Terdapat dua proses adiabatik reversibel pada siklus Carnot yaitu proses 2-3 dan proses 4-1. mengalami proses *adiabatik*. Pada proses adiabatik tidak ada kalor masuk maupun keluar sistem atau $\delta Q_{rev} = 0$, maka perubahan entropinya adalah:

$$S_3 - S_2 = S_4 - S_1 = 0 \quad (6-5)$$

Perubahan entropi pada proses adiabatik sama dengan nol atau entropi pada proses adiabatik reversibel tetap konstan. Suatu proses dimana entropinya konstan disebut *proses isentropik*.

Proses adiabatik

Proses isentropik

6.4.3. EFISIENSI MESIN CARNOT

Luasan 3-4-a-b-3 menyatakan kalor yang dipindahkan dari sistem ke tandon. Karena dalam siklus kerja neto sama dengan kalor neto yang dipindahkan, jelaslah bahwa luasan 1-2-3-4-1 menyatakan kerja neto dari siklus. Efisiensi termal siklus apabila dinyatakan dengan luasan adalah:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_P} = \frac{\text{luasan } 1-2-3-4-1}{\text{luasan } 1-2-b-a-1} \quad (6-6)$$

Atau dapat dituliskan dalam bentuk

$$\eta = \frac{(T_2 - T_3)(s_2 - s_3)}{T_2(s_2 - s_3)} = \frac{(T_2 - T_3)}{T_2} = \frac{T_P - T_D}{T_P}$$

Dengan menaikkan suhu T_P dengan menjaga T_D tetap konstan atau menurunkan T_D dengan menjaga T_P tetap konstan, Efisiensi mesin yang bekerja menurut siklus Carnot pada pers. (6-6) dengan mengacu pada

Efisiensi mesin Carnot

perubahan fase dari zat cair jenuh ke uap jenuh yang terjadi secara isoterm dan isobar adalah,

$$q_P = h_2 - h_1 = h_g - h_f = h_{fg}$$

h_{fg} adalah kenaikan entalpi selama penguapan atau disebut *kalor laten*.

Kalor laten

Perubahan entropi selama perubahan fase adalah:

$$s_2 - s_1 = \frac{1}{m} \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} = \frac{1}{mT} \int_1^2 \delta Q = \frac{q_{1-2}}{T} = \frac{h_{fg}}{T} \quad (6-7)$$

Untuk proses 3-4, Kalor yang dilepas persatuan massa untuk melakukan perubahan fase dari zat uap jenuh ke cairan jenuh yang terjadi secara isoterm dan isobar adalah,

$$q_D = h_4 - h_3 = h_f - h_g = h_{gf}$$

Perubahan entropi selama perubahan fase

$$s_4 - s_3 = \frac{1}{m} \int_3^4 \left(\frac{\delta Q}{T_D} \right)_{rev} = \frac{1}{mT_D} \int_3^4 \delta Q = \frac{q_{3-4}}{T_D} = \frac{h_f - h_g}{T_D} \quad (6-8)$$

Efisiensi mesin Carnot diberikan oleh,

$$\eta = \frac{w}{q_P} = \frac{h_2 - h_1 - h_3 + h_4}{h_2 - h_1} \quad (6-9)$$

Keuntungan menggunakan diagram Mollier adalah kerja, kalor, dan efisiensi dapat ditentukan dari titik ordinat dalam siklus

Contoh 6-2.

Silinder yang dilengkapi dengan piston mula-mula berisi 2 kg campuran cairan air-uap pada tekanan 25 kPa kemudian dimampatkan menjadi uap jenuh pada tekanan 100 kPa secara adiabatik. Tentukan (a) kualitas mula-mula (b) Kerja yang dilakukan

Diketahui

Sistem : campuran cairan - uap

Kadaan awal : $m = 2 \text{ kg}$, $p_1 = 25 \text{ kPa}$

Kadaan akhir : $p_2 = 0,1 \text{ MPa}$, $s_2 = s_1$

Ditanyakan: (a) kualitas akhir (b) Kerja massa yang dilakukan

Penyelesaian:

$$\text{Hukum pertama } q_{12} = u_2 - u_1 + w_{12} = 0$$

$$u_1 - u_2 = w_{12}$$

Dari tabel B1-2SI, untuk $p_1 = 25 \text{ kPa}$, $s_f = 0,8931 \text{ kJ/kg}$, $s_{fg} = 6,9383 \text{ kJ/kg}$

$$s_1 = s_2 = 7,3594 \text{ kJ/kgK}$$

$$u_f = 271,9 \text{ kJ/kg}, u_{fg} = 2191,2 \text{ kJ/kg}$$

Dari tabel B1-2SI, $p_2 = 0,1 \text{ MPa}$, $s_2 = 7,3594 \text{ kJ/kg}$, $u_2 = 2506,1 \text{ kJ/kg}$

$$(a) \quad x_1 = \frac{s_2 - s_f}{s_{fg}} = \frac{7,3594 - 0,8931}{6,9383} = 0,93 = 93\%$$

$$u_1 = u_f + x_1 u_{fg} = 271,9 + 0,93 \times 2191,2 = 2309,72 \text{ kJ/kg}$$

(b) Hukum pertama termo : $q = w + \Delta u$

proses isentropik, $q = 0$ sehingga

$$w_{12} = u_1 - u_2 = 2309,72 - 2506,1 = -196,38 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Kerja yang dilakukan} = W = mw = 2 \times -196,38 = -392,76 \text{ kJ}$$

Tanda (-) menyatakan pada sistem dilakukan untuk pemampatan campuran cairan air – uap menjadi uap jenuh

6.5. DUA HUBUNGAN PENTING

Dengan menggunakan hukum pertama dan hukum kedua kita dapat memperoleh dua hubungan penting untuk zat termampatkan sederhana.

Dari hukum pertama termodinamika

$$\delta Q = dU + \delta W$$

dengan menggunakan definisi entropi dan kita gabungkan dengan termodinamika yang pertama

$$TdS = dU + pdV \quad (6-10) \quad \text{Hubungan penting pertama}$$

Pers. (6-10) menyatakan **hubungan penting pertama**

Entalpi didefinisikan sebagai:

$$H = U + pV$$

Atau

$$dH = dU + pdV + VdP$$

Dengan menggunakan hubungan pertama diperoleh

$$TdS = dH - VdP \quad (6-11) \quad \text{Hubungan penting kedua}$$

Pers. (6-11) menyatakan **hubungan penting kedua**

Dalam bentuk harga jenis dituliskan

$$Tds = du + pdv \quad (6-12)$$

$$Tds = dh - vdp \quad (6-13)$$

dalam bentuk harga jenis molal

$$Tds^* = du^* + pdv^* \quad (6-14)$$

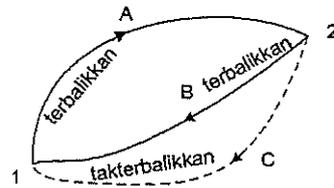
$$Tds^* = dh^* - v^* dp \quad (6-15)$$

Kedua hubungan ini akan digunakan secara luas pada pembahasan berikutnya.

6.6. PERUBAHAN ENTROPI DAN PRODUKSI ENTROPI DALAM SISTEM TERTUTUP.

Proses reversibel tidak memproduksi entropi, entropi diproduksi oleh proses ireversibel. Jadi produksi entropi merupakan ukuran irreversibilitas proses.

6.6.1 PERUBAHAN ENTROPI SELAMA PROSES IREVERSIBEL



Gambar 6-6. Perubahan entropi selama proses tak reversibel

Kita tinjau proses siklus yang seperti yang ditunjukkan gambar 6-6, proses A dan B reversibel.

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B \quad (6-16)$$

Proses C tak reversibel, untuk siklus ini ketidaksamaan Clausius digunakan,

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C < 0 \quad (6-17)$$

Dengan menyulihkan pers. (6-16) ke pers. (6-17), diperoleh:

$$\int_2^1 \left(\frac{d'Q}{T} \right)_B > \int_2^1 \left(\frac{d'Q}{T} \right)_C$$

Karena lintasan B merupakan proses reversibel dan entropi hanya bergantung pada keadaan awal dan akhir proses (S merupakan sifat sistem). Jadi untuk perubahan keadaan 1 ke 2 dituliskan:

$$\int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B = \int_2^1 dS_B = \int_2^1 dS_C$$

Sehingga,

$$\int_2^1 dS_C > \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C$$

Secara umum dituliskan,

$$\boxed{dS \geq \frac{\delta Q}{T}} \quad (6-18)$$

atau

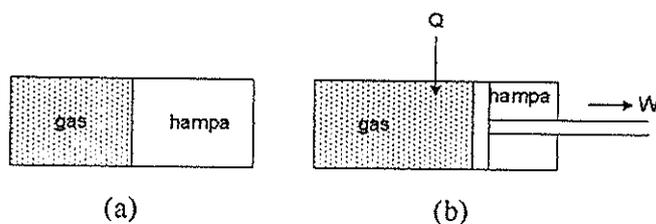
$$\boxed{S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}} \quad (6-19)$$

Tanda kesamaan berlaku bagi proses reversibel, sedangkan tanda ketidaksamaan berlaku bagi proses ireversibel. Karena proses dalam lingkungan yang ideal adalah reversibel, ireversibilitas haruslah disebabkan oleh proses dalam sistem tertutup atau sering dikatakan sebagai ireversibilitas internal.

6.6.2. PRODUKSI ENTROPI

Keberadaan ireversibilitas selama proses dalam suatu sistem menurunkan unjuk kerja sistem tersebut. Keluaran kerja maksimum dan masukan kerja minimum akan diperoleh melalui proses reversibel. Dengan kata lain kerja reversibel adalah keluaran kerja maksimum (atau masukan kerja minimum) yang dapat dihasilkan oleh suatu sistem untuk mencapai keadaan akhir yang diinginkan.

*Kerja reversibel
Kerja maksimum
Kerja minimum*



Gambar 6-7. Sistem yang dapat berinteraksi dengan lingkungan

Kita tinjau proses ekspansi bebas ireversibel seperti ditunjukkan gambar 6-7(a). Sebuah bejana dipisahkan oleh membran, sisi sebelah kiri diisi gas dan sisi lainnya dihampakan. Kemudian membran dilubangi sehingga gas berekspansi bebas ke daerah hampa dan sejumlah kalor diperlukan agar suhu akhir sama dengan suhu awal. Pada proses ekspansi bebas kerja sama dengan nol. Menurut hukum pertama

$$\delta Q = dU$$

Sekarang akan kita bandingkan kerja yang dilakukan oleh proses reversibel dengan kerja yang dilakukan oleh proses ireversibel yang bermula dan berakhir diantara dua keadaan yang sama. Gambar 6-7(b) memperlihatkan proses reversibel dimana gas berekspansi melawan piston tanpa gesekan. Untuk menjaga agar suhunya konstan, kalor dipindahkan ke gas. Dengan menggunakan hukum pertama

$$dU = \delta Q - \delta W$$

Kita lihat dari contoh diatas bahwa perbedaan utama antara kedua proses tersebut adalah ada pada kerja yang dilakukan. Untuk proses ireversibel, kerja yang dilakukan sama dengan nol, sedangkan pada proses reversibel kerja maksimum dilakukan. Hal ini mengandung arti bahwa pada proses ireversibel terdapat kerja yang hilang. Proses yang ditunjukkan pada gambar 6-6 merupakan contoh kasus yang ekstrem, yang satu proses reversibel dan proses lainnya kerja sama dengan nol. Diantara dua keadaan eksterm ini terdapat berbagai proses dengan berbagai derajat irreversibilitas. Untuk zat termampatkan sederhana dapat dituliskan,

$$pdV = \delta W + \delta LW$$

LW (*lost work*) merupakan notasi kerja yang hilang

Dengan menggunakan hubungan penting yang pertama diperoleh,

$$TdS = dU + \delta W + \delta LW$$

Dari hukum pertama $dU + \delta W = \delta Q$ sehingga

$$TdS = \delta Q + \delta LW$$

dan,

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \frac{\delta LW}{T}$$

Ekspansi bebas

Kerja yang hilang

Proes reversibel dan ireversibel

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v} \quad (6-21)$$

Entalpi untuk gas ideal juga hanya merupakan fungsi suhu atau

$$dh = c_p dT \quad \text{dan} \quad \frac{v}{T} = \frac{R}{p}$$

Dari hubungan termodinamika

$$Tds = dh - vdp$$

Sehingga

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} \quad (6-22)$$

6.7.1. Menggunakan Data kalor jenis purata konstan.

Jika range suhu kecil, kalor jenis purata dapat digunakan dengan kesalahan diabaikan. Untuk perubahan keadaan dari keadaan 1 ke keadaan 2, perubahan entropi sama dengan

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 c_v \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (6-23)$$

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 c_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Untuk c_v dan c_p konstan, diperoleh

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (6-24)$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (6-25)$$

Harga c_p dan c_v dapat dilihat pada data kalor jenis pada tabel

6.7.2. Menggunakan Data Kalor jenis terintegrasi

Perhitungan perubahan entropi untuk gas ideal dipermudah dengan menggunakan tabel seperti halnya perubahan entalpi dan perubahan energi internal. Dituliskan kembali perubahan entropi untuk c_p konstan

$$\Delta s = \int_1^2 c_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Sekarang kita definsikan sebuah fungsi s^0 sedemikian hingga nilai relatif terhadap keadaan acuan dapat dicari dari,

$$s_1^0 - s_{ref}^0 = \int_{ref}^1 c_p \frac{dT}{T}$$

Sebagai acuan nilai entropi jenis ditentukan sama dengan nol pada suhu 0K dan tekanan 1 atm, sehingga

$$s_1^0 = \int_{ref}^1 c_p \frac{dT}{T}$$

s_1^0 menyatakan entropi jenis pada suhu T_1 dan tekanan 1 atm. Dengan cara serupa untuk suhu T_2 ,

$$s_2^0 = \int_{ref}^2 c_p \frac{dT}{T}$$

Perubahan entropi jenis dari keadaan 1 ke keadaan 2 menjadi,

$$s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (6-26)$$

Dalam entropi jenis molal dituliskan,

$$s_2^* - s_1^* = s_2^0 - s_1^0 - R^* \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (6-27)$$

Contoh 6-3

Mula-mula sebuah wadah berisi $0,3 \text{ m}^3$ gas nitrogen (anggap sebagai gas ideal) bertekanan 10 kPa dan suhu 25°C dimampatkan sampai tekanan menjadi dua kalinya dan volumenya menjadi $0,2 \text{ m}^3$. Tentukan (a) massa nitrogen (b) perubahan entropi jenisnya

Diketahui:

Keadaan awal : $V_1 = 0,3 \text{ m}^3$, $p_1 = 10 \text{ kPa} = 10^4 \text{ Pa}$, $T_1 = 25^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$

Keadaan akhir : $p_2 = 20 \text{ kPa} = 2 \times 10^4 \text{ Pa}$, $V_2 = 0,2 \text{ m}^3$

$c_p = 1,0416 \text{ kJ/kg K}$

$c_v = 0,7448 \text{ kJ/kg K}$

$$R = \frac{\mathfrak{R}}{M} = \frac{8314}{28} = 296,93 \text{ joule/kgm-mol K}$$

Penyelesaian:

(a) Dengan menggunakan persamaan keadaan gas ideal, massa nitrogen dapat dihitung

$$p_1 V_1 = mRT_1$$

$$m = \frac{10^4 \times 0,3}{296,93 \times 298} \text{ kg}$$

(b) Untuk menghitung perubahan entropi, pertama-tama harus dihitung suhu pada keadaan akhir

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

$$T_2 = \frac{298 \times 2 \times 10^4 \times 0,2}{10^4 \times 0,3} = 397,33 \text{ K}$$

Perubahan entropi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= c_p \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{p_2}{p_1} \\ &= 1,0416 \ln \frac{397,33}{298} + 296,93 \ln \frac{2 \times 10^4}{10^4} \\ &= 206,12 \text{ J/kg K} \end{aligned}$$

Contoh 6-4.

2 kg mol gas (anggap sebagai gas ideal) mula-mula volume 1 m^3 yang bertekanan 250 kPa volume diperbesar hingga dua kalinya melalui proses isobar. Setelah itu gas dimampatkan secara isoterm hingga tekanannya menjadi 400 kPa kemudian gas dikembalikan ke keadaan semula melalui proses adiabatik. Gambarkan prosesnya dalam diagram T - S dan kemudian hitung perubahan entropi total sistem

Diketahui : sistem bekerja dalam siklus

Keadaan mula-mula : $V_1 = 1 \text{ m}^3, p_1 = 250 \text{ kPa}$

Keadaan kedua : $V_2 = 2 V_1 = 2 \text{ m}^3, p_2 = p_1 = 250 \text{ kPa}$

Keadaan akhir : $p_3 = 400 \text{ kPa}, T_3 = T_1$

$$R = 8,31 \times 10^3 \text{ J.m}^3 / \text{kg} \cdot \text{mol.K}$$

$$C_p = 18,6 \text{ J/K}$$

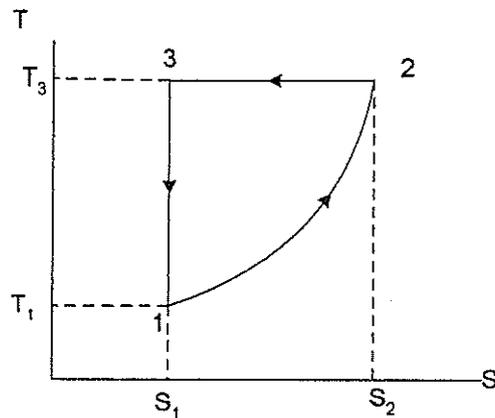
Penyelesaian

Pada keadaan awal dan keadaan kedua suhu belum diketahui sehingga perlu dihitung terlebih dahulu. Pada keadaan akhir, volum belum diketahui

Pada keadaan 1, dengan menggunakan persamaan gas ideal suhunya dapat dihitung

$$p_1 V_1 = nRT$$

$$T_1 = \frac{p_1 V_1}{nR} = \frac{250 \times 10^3 \times 1}{2 \times 8,31 \times 10^3} = 15,04 \text{ K}$$



Gambar 6-8

Proses 1 ke 2, isobar,

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{T_1 V_2}{V_1} \\ &= \frac{15,04 \times 2 V_1}{V_1} = 30,08 \text{ K} \end{aligned}$$

Proses 2-3, isothermal

$$V_3 = \frac{p_2 V_2}{p_3} = \frac{250 \times 2}{400} = 1,25 \text{ m}^3$$

Sekarang kita hitung perubahan entropi dari ketiga proses

Proses pertama, isobar

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

karena $p_1 = p_2$, maka

$$\Delta S_{12} = C_p \ln \frac{T_2}{T_1}$$

$$= 18,6 \ln(30,08 / 15,04) = 12,89 \text{ J/K}$$

Proses kedua, isothermal

$$Q = W$$

$$= nR T_2 \ln \frac{V_2}{V_3} = 2 \times 8,31 \times 10^3 \ln \frac{2}{1,25} = 7,81 \times 10^3 \text{ J}$$

$$\Delta S_{23} = \frac{Q}{T_2} = \frac{7,81 \times 10^3}{30,08} = 259,69 \text{ J/K}$$

Proses ketiga, adiabat

$$\Delta S_{31} = 0$$

Perubahan entropi total

$$\begin{aligned} \Delta S &= \Delta S_{12} + \Delta S_{23} + \Delta S_{31} \\ &= 12,89 + 259,69 + 0 = 272,58 \text{ J/K} \end{aligned}$$

6.8. PERUBAHAN ENTROPI UNTUK ZAT TAKTERMAMPATKAN.

Zat dengan densitas atau volum jenis konstan sebagai zat taktermampatkan. Oleh karena itu perubahan energi internal zat dituliskan sebagai:

$$du = c_v dT$$

Kalor jenis pada volum konstan sama dengan kalor jenis pada tekanan konstan, atau

$$c_v = c_p = c$$

Untuk zat termampatkan sederhana, kita tahu bahwa $Tds = du + pdv$. Untuk zat tak termampatkan volum jenisnya konstan ($dv=0$) sehingga $Tds = du$. Perubahan entropi untuk zat taktermampatkan diberikan oleh:

Zat termmpatkan sederhana

$$\boxed{ds = \frac{du}{T} = \frac{c_v dT}{T} = \frac{cdT}{T}} \quad (6-28)$$

untuk perubahan yang terbatas dari keadaan 1 ke keadaan 2, kita peroleh:

$$\boxed{s_2 - s_1 = c \ln \frac{T_2}{T_1}} \quad (6-29)$$

6.9. HUKUM KEDUA TERMODINAMIKA UNTUK VOLUM ATUR

Hukum kedua juga dapat diaplikasikan terhadap volum atur dengan pendekatan yang sama seperti pada subbab 4.1 dan 4.2 tentang penulisan hukum pertama untuk volum atur. Bentuk neraca laju entropi untuk volum atur

Volum atur

$$\boxed{\frac{dS_{cv}}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} - \sum \dot{m}_o s_o + \sum \dot{m}_i s_i + \dot{\sigma}_{CV}} \quad (6-30)$$

dalam bentuk lisan dituliskan,

$$\left| \begin{array}{l} \text{Laju perubahan entropi} \\ \text{dalam volum atur} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{Laju perpindahan} \\ \text{entropi} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} \text{Laju produksi entropi} \end{array} \right|$$

Secara umum kita tuliskan dalam bentuk,

$$\boxed{\frac{dS_{cv}}{dt} + \sum \dot{m}_o s_o - \sum \dot{m}_i s_i \geq \sum_{cv} \frac{\dot{Q}_{cv}}{T}} \quad (6-31)$$

Tanda kesamaan dan ketidaksamaan masing-masing berlaku untuk proses reversibel internal dan untuk proses ireversibel internal

Jika tidak ada aliran massa masuk atau keluar volum atur dan jika suhu dianggap seragam pada sebarang waktu, pers. (6-31) menjadi persamaan laju entropi sistem.

6.9.1. ALIRAN ZAT ALIR

Proses Aliran Tunak, Keadaan Tunak (proses ATKKT)

Pada proses aliran tunak keadaan tunak, tidak terdapat perubahan entropi terhadap waktu perasatuan massa pada sebarang titik pada volum atur, oleh karena itu suku pertama pada pers. (6-31) menjadi,

Proses aliran tunak keadaan tunak

$$\frac{dS_{cv}}{dt} = 0$$

dengan demikian untuk proses aliran tunak keadaan tunak,

$$\boxed{\sum \dot{m}_o s_o - \sum \dot{m}_i s_i \geq \sum_{cv} \frac{\dot{Q}_{cv}}{T}} \quad (6-32)$$

Jika dalam keadaan tunak, aliran tunak hanya terdapat satu sisi masuk dan satu sisi keluar dengan laju aliran massa yang seragam, kita dapat menuliskan,

$$\dot{m}(s_o - s_i) \geq \sum_{cv} \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} \quad (6-33)$$

Untuk proses adiabatik,

$$s_o \geq s_i \quad (6-34)$$

Tanda kesamaan menyatakan proses adiabatik reversibel

Proses Aliran Seragam, Keadaan Seragam

Persamaan untuk proses ASKS dapat diperoleh dengan mengintegrasikan pers. (6-31) pada interval waktu t

$$\int_0^t \frac{dS_{cv}}{dt} + \int_0^t (\sum \dot{m}_o s_o - \sum \dot{m}_i s_i) dt \geq \int_0^t \frac{\dot{Q}_{cv}}{T}$$

untuk proses ireversibel dituliskan dalam bentuk

$$\int_0^t \frac{d}{dt} (ms)_{cv} dt + \int_0^t (\sum \dot{m}_o s_o - \sum \dot{m}_i s_i) dt = \int_0^t \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} + \int_0^t \dot{\sigma}_{cv} dt \quad (6-35)$$

Dari hasil integrasi persamaan diatas diperoleh,

$$(m_2 s_2 - m_1 s_1)_{cv} + \sum m_o s_o - \sum m_i s_i = \int_0^t \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} dt + \sigma_{CV} \quad (6-36)$$

Persamaan untuk proses ASKS dalam selang waktu t adalah,

Proses Aliran Tunak, keadaan Tunak reversibel.

Hukum pertama,

$$Q = W + \Delta E$$

Proses aliran tunak keadaan tunak satu sisi masuk dan satu sisi keluar dari volum atur dengan menggunakan hukum pertama,

$$q = w + \left[\left(h_o + \frac{V_o^2}{2} + gZ_o \right) - \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i \right) \right] \quad (6-37)$$

Hukum kedua, untuk proses reversibel

$$\dot{m}(s_o - s_i) = \sum \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} \quad (6-38)$$

Hubungan penting kedua

$$Tds = dh - vdp \quad (6-39)$$

Untuk proses adiabatik reversibel,

$$h_o - h_i = \int_i^o v dp \quad (6-40)$$

Dari pers. (6-37), kerja yang dilakukan pada proses adiabatik reversibel, $q = 0$

Proses aliran seragam keadaan seragam

Proses aliran tunak keadaan tunak reversibel

Proses adiabatik reversibel

$$w = h_i - h_o + \frac{V_i^2 - V_o^2}{2} + g(Z_i - Z_o)$$

dengan menyulihkan pers. (6-40) diperoleh,

$$w = \int v dp + \frac{V_i^2 - V_o^2}{2} + g(Z_i - Z_o) \quad (6-41)$$

Untuk proses isothermal reversibel, hukum kedua menjadi

Proses isothermal reversibel

$$\dot{m}(s_o - s_i) = \frac{\dot{Q}_{cv}}{T}$$

atau dituliskan dalam bentuk

$$T(s_o - s_i) = \frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{m}} = q \quad (6-42)$$

dari hubungan penting kedua

$$T(s_o - s_i) = q = (h_o - h_i) - \int_i^o v dp \quad (6-43)$$

Dengan menyulihkan ke pers. () diperoleh

$$v(p_o - p_i) + \frac{V_o^2 - V_i^2}{2} + g(Z_o - Z_i) = 0 \quad (6-44) \quad \text{Hukum Bernoulli}$$

Dikenal sebagai hukum Bernoulli yang merupakan hukum penting dalam mekanika fluida

6.9.2. EFISIENSI ISENTROPIK

Kita tulis kembali persamaan efisiensi termal untuk mesin kalor

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_P} \quad \text{Efisiensi termal}$$

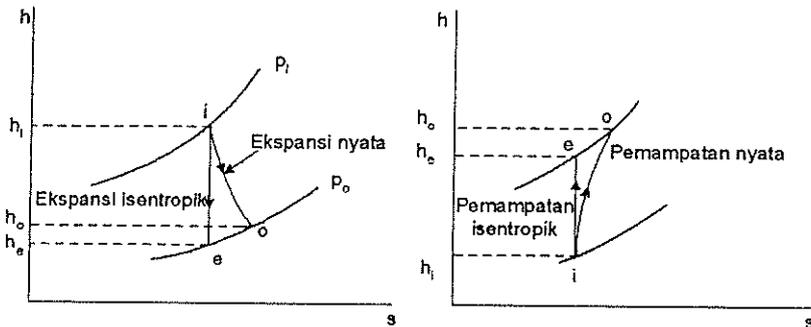
dengan W_{neto} adalah kerja neto dalam satu siklus dan Q_P adalah kalor yang diserap dari tandon kalor. Kita akan mengembangkan hukum kedua pada volum atur untuk mendapatkan efisiensi dari sebuah mesin Sebagai contoh adalah efisiensi dari turbin dalam pembangkit daya uap atau efisiensi kompresor dalam sebuah turbin.

Untuk menentukan efisiensi dari sebuah mesin dimana proses berlangsung, kita akan membandingkan unjuk kerja aktual dan unjuk kerja yang dicapai melalui proses ideal dari mesin tersebut dengan idealisasi sebagai berikut: aliran tunak keadaan tunak, keadaan zalir memasuki

Unjuk kerja aktual

mesin dan tekanan keluar ditetapkan, perubahan energi kinetik dan potensial diabaikan.

Turbin



Tubin

Gambar 6-9.(a) Ekspansi isentropik (b) pemampatan isentropik dari sebuah turbin

Gambar 6-9(a) memperlihatkan ekspansi nyata dan isentropik dari sebuah turbin dalam diagram $h-s$ pada keadaan tunak. Ekspansi isentropik dan pemampatan isentropik merupakan proses ideal. Ekspansi berlangsung sepanjang garis $i - s$, tekanan pada sisi masuk dan sisi keluar adalah sama. Pada titik o terjadi peningkatan entropi sesuai dengan hukum kedua termodinamika bahwa dalam proses nyata adiabatik perubahan entropi tidak pernah negatif.

Ekspansi isentropik

$$s_o - s_i \geq 0$$

artinya harus entropi meningkat sewaktu zat alir memasuki turbin. Entalpi pada titik o lebih besar dari entalpi pada titik s . Jadi entropi dan entalpi pada proses nyata lebih besar dari entropi dan entalpi pada proses ideal. Peningkatan entropi maupun entalpi ini disebabkan adanya irreversibilitas proses. Kerja maksimum akan dibangkitkan dalam turbin jika proses ekspansi berlangsung secara adiabatik. Karena kerja yang dibangkitkan dalam turbin keadaan tunak sama dengan perubahan entalpi (dengan mengabaikan perubahan energi kinetik dan energi potensial) pada proses adiabatik, jelaslah bahwa kerja yang dihasilkan dalam proses nyata lebih kecil daripada kerja isentropik. Jika kerja nyata yang dilakukan oleh aliran uap melalui turbin persatuan massa adalah w_a dan kerja yang

dilakukan pada proses adiabatik reversibel adalah w_s antara keadaan masuk yang sama dan tekanan keluar yang sama, efisiensi turbin didefinisikan sebagai,

$$\eta_T = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_i - h_o}{h_i - h_s} \quad (6-46)$$

Efisiensi turbin

Nosel

Contoh lainnya adalah nosel, nosel adalah divais yang digunakan untuk mendapatkan energi kinetik maksimum saat meninggalkan nosel pada suatu keadaan tertentu. Nosel juga merupakan divais adiabatik, oleh karena itu proses idealnya adalah adiabatik reversibel atau isentropik. Efisiensi nosel perbandingan energi kinetik yang meninggalkan nosel $V_a^2 / 2$ dengan energi kinetik pada proses isentropik antara keadaan masuk yang sama dan tekanan keluar yang sama - $V_s^2 / 2$,

Nosel

$$\eta_N = \frac{V_a^2 / 2}{V_s^2 / 2} \quad (6-47)$$

Efisien nosel

Kompresor

Untuk pemampatan zat alir (udara atau gas lain) terdapat dua proses yang dapat dibandingkan yaitu unjuk kerja pada proses nyata dan proses ideal, ditunjukkan gambar 6-8(b). Dalam kompresor, kerja minimum dibutuhkan jika pemampatan berlangsung secara isentropik. Proses pemampatan nyata ditunjukkan sepanjang garis i - o mengakibatkan kenaikan entropi maupun entalpi. Dengan mengabaikan perubahan energi kinetik dan energi potensial, kerja yang dilakukan pada keadaan tunak adalah sama dengan perubahan entalpi. Jadi jelaslah bahwa kerja yang diperlukan oleh kompresor pada proses nyata lebih besar kerja yang diperlukan oleh kompresor pada proses ideal. Efisiensi kompresor didefinisikan sebagai,

Kompresor

$$\eta_C = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_s - h_i}{h_o - h_i} \quad (6-48)$$

Efisiensi kompresor

Jika zat alir dianggap sebagai gas ideal dengan kalor jenis konstan, efisiensi isentropik sama dengan:

$$\eta_T = \frac{c_p(T_i - T_o)}{c_p(T_i - T_s)} = \frac{T_i \left(1 - \frac{T_o}{T_i}\right)}{T_i \left(1 - \frac{T_s}{T_i}\right)}$$

atau dapat dituliskan sebagai,

$$\eta_T \left(1 - \frac{T_s}{T_i}\right) = 1 - \frac{T_o}{T_i}$$

atau

$$\frac{T_i}{T_o} = \frac{1}{1 - \eta_T \left[1 - \frac{1}{(p_i/p_o)^{(\gamma-1/\gamma)}}\right]} \quad (6-49)$$

dengan cara yang sama diperoleh,

$$\frac{T_o}{T_i} = 1 + \frac{[(p_o/p_i)^{\gamma-1/\gamma} - 1]}{\eta_C}$$

6.10. PROSES ISENTROPIK GAS IDEAL

Proses isentropik adalah proses yang berlangsung dengan entropi konstan. Pertama ditinjau proses isentropi dengan kalor jenis konstan dan kedua menggunakan tabel gas ideal

Proses isentropik gas ideal

6.10.1. Kalor jenis konstan

Proses isentropi adalah proses dengan entropi konstan ($ds = 0$)

$$0 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$0 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Jika kita definisikan,

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad \text{dan} \quad c_p - c_v = R$$

Akan diperoleh,

$$c_p = \frac{kR}{k-1} \quad \text{dan} \quad c_v = \frac{R}{k-1}$$

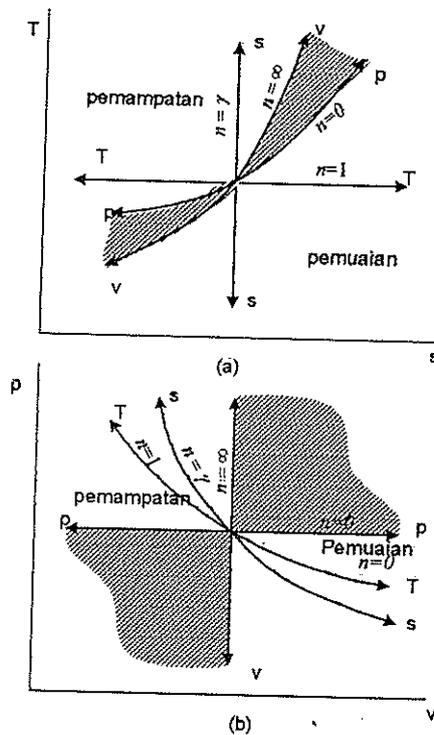
Kita dapatkan,

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (6-50)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} \quad (6-51)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k \quad (6-52)$$

Pers. (6-52) merupakan proses politropik dengan $pv^k = \text{konstan}$



Gambar 6-10 Proses politropik (a) diagram $p-v$ (b) diagram $T-s$

Gambar 6-10(a) memperlihatkan diagram $T-s$ untuk proses politropik, proses isoterm dan isentropik (adiabat) muncul dalam bentuk garis lurus. Daerah yang diarsir merupakan daerah n negatif dan tidak akan dibahas dalam buku ini. Kemiringan kurva volume dan tekanan konstan dapat dideduksi bila keduanya bermula dari keadaan awal yang sama, lebih banyak kalor yang dibutuhkan untuk mengubah suhu pada tekanan konstan daripada volume konstan. Karena $c_p > c_v$, garis volume konstan lebih curam daripada kurva tekanan konstan. Tanda anak kepala panah menunjukkan kemana arah proses terjadi. Gambar 6-10(b)

Proses politropik

memperlihatkan diagram $p-v$ digunakan untuk membandingkan dengan diagram $T-s$ untuk proses politropik

6.10.2. Menggunakan tabel gas ideal

Diantara dua keadaan yang memiliki entropi yang sama, pers. (6-26) menjadi,

$$0 = s_2^0 - s_1^0 - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (6-53)$$

s_1^0 dan s_2^0 dan masing menyatakan entropi menyatakan entropi jenis pada suhu T_1 dan T_2 pada tekanan 1 atm. Pers. (6-53) dapat dituliskan sebagai

$$s_2^0 - s_1^0 = R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (6-54)$$

Sebagai contoh, suhu T_1 dan perbandingan tekanan p_2/p_1 diketahui. s_1^0 pada suhu T_1 dapat dicari dari tabel yang sesuai. Dengan demikian s_2^0 dapat dihitung dan suhu T_2 dihitung dengan interpolasi. Misalkan tekanan pada keadaan I diketahui, tekanan p_2 dapat dihitung dari

$$p_2 = p_1 \ln \left(\frac{s_2^0 - s_1^0}{R} \right)$$

Apabila zat alir yang digunakan sebagai gas ideal adalah udara, persamaan dapat diubah menjadi,

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\exp(s_2^0 / R)}{\exp(s_1^0 / R)} \quad (6-55)$$

Tekanan relatif didefinisikan sebagai

$$\ln p_r \equiv \frac{s^0}{R} \quad (6-56)$$

Harga p_r ditabulasikan pada tabel A sebagai fungsi suhu. Pers (6-55) dapat dituliskan sebagai

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{p_{r2}}{p_{r1}} \right)_s \text{ hanya udara} \quad (6-57)$$

Persamaan ini menyatakan bahwa nisbah tekanan relatif antara dua keadaan yang mempunyai entropi yang sama, sama dengan nisbah tekanan mutlak.

Dengan cara yang sama, nisbah volum jenis relatif v_r dalam proses isentropik sama dengan nisbah volum jenis yaitu,

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{v_{r2}}{v_{r1}} \right)_s \text{ hanya udara} \quad (6-58)$$

dengan $v = \frac{RT}{p}$. Harga v_r ditabulasikan dalam tabel A sebagai fungsi suhu

6.11. DAYAGUNA

Optimisasi pemakaian energi didasarkan pada konsep bahwa energi mempunyai kuantitas dan kualitas. Kualitas sejumlah energi yang diberikan adalah ukuran potensial untuk menghasilkan kerja yang berguna. Jika potensial untuk melakukan kerja yang berguna berkurang selama proses, kita katakan bahwa energi telah terdegradasi (terhambur). Pengalaman menunjukkan bahwa hal ini selalu terjadi selama proses ireversibel. Jadi hukum kedua termodinamika adalah hukum mengenai degradasi energi. Setiap saat energi ditransformasi atau dipindahkan dalam proses nyata, potensialnya untuk menghasilkan kerja yang berguna berkurang selalu.

Degradasi energi

6.11.1 DAYAGUNA (EKSERGI)

Apabila interaksi kalor terjadi antara sistem dan lingkungannya, kerja maksimum berguna yang dapat dilakukan oleh sistem menunjukkan dayaguna energi sistemnya. Dayaguna, juga diacu sebagai *eksergi*, dapat dipandang sebagai potensi kerja berguna dari sejumlah energi pada keadaan yang diketahui. Dalam melakukan kerja maksimum ini, sistem hanya mengalami proses reversibel sebelum sistem akhirnya mencapai kesetimbangan dengan lingkungannya. Setelah kesetimbangan tercapai, sistem tidak dapat lagi membangkitkan kerja lebih lanjut, dan nilai dayagunanya menjadi nol.

Dayaguna(eksergi)

Keadaan Mati

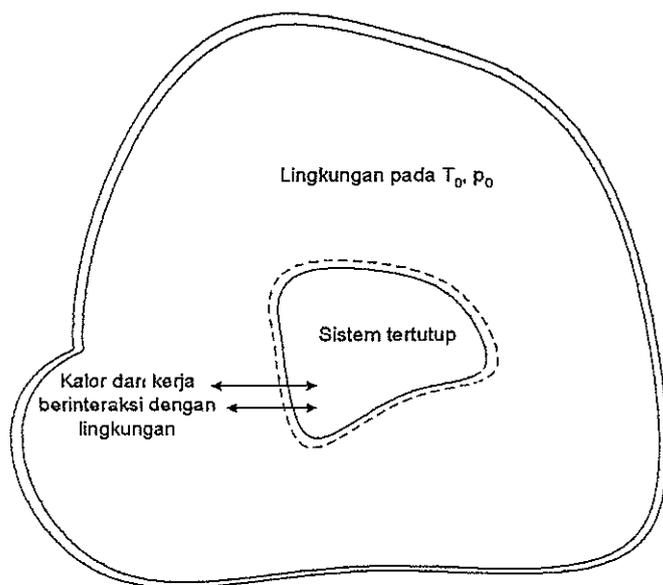
Jika keadaan materi dalam sistem tertutup yang berjumlah tertentu dan terpisah dari lingkungan, muncul suatu kesempatan terjadinya kerja.

Tetapi ketika sistem berubah menuju lingkungan, kesempatan terjadinya kerja menurun dan akhirnya hilang ketika sistem dan lingkungan mencapai kesetimbangan.

Sekali sistem dan lingkungan berada dalam kesetimbangan, tidak ada perubahan keadaan lebih lanjut dari sistem yang dapat terjadi secara spontan. Pada keadaan ini, sistem tidak dapat lagi membangkitkan kerja.. Bila sebuah sistem dan lingkungannya ada dalam kesetimbangan satu sama lain, sistem dikatakan dalam *keadaan mati*.

Keadaan mati

6.11.2. DAYAGUNA (EKSERGI) UNTUK SISTEM TERTUTUP.



Gambar 6-11. Sistem dan lingkungan

Gambar 6-11 memperlihatkan sistem non aliran yang dapat melakukan pertukaran kalor dengan dengan lingkungan yang mempunyai tekanan p_0 dan suhu T_0 . Misalkan keadaan berubah dari keadaan awal 1 ke keadaan akhir 0. Pada keadaan ini sistem berada dalam kesetimbangan termal dan mekanis dengan lingkungan. Kerja reversible maksimum yang dilakukan

Kerja reversibel maksimum

$$W_{rev} = (E - T_0 S) - (E_0 - T_0 S_0) \quad (6-59)$$

Perpindahan kerja berguna didefinisikan sebagai perpindahan kerja reversibel maksimum dikurangi kerja dilakukan oleh atmosfer, dapat dituliskan sebagai

Perpindahan kerja berguna

$$W_u = W_{rev} - p_0 \Delta V \quad (6-60)$$

atau

$$\dot{W}_u = \dot{W} - p_0 \frac{dV}{dt}$$

Jika tekanan lingkungan adalah p_0 , kerja yang dilakukan oleh atmosfer adalah

$$W_{lingk} = p_0(V_0 - V)$$

Kerja berguna

$$W_{rev,u} = (E - T_0 S) - (E_0 - T_0 S_0) - p_0(V_0 - V) \quad (6-61)$$

Kerja berguna

Energi E mencakup energi kinetik, energi potensial, dan energi dalam dari sistem. Mengingat energi kinetik dan energi potensial relatif terhadap lingkungan, maka energi dalam sistem tertutup ketika berada dalam keadaan mati hanya terdiri dari energi dalam U_0 saja.

$$W_{rev,u} = (E - T_0 S) - (U_0 - T_0 S_0) - p_0(V_0 - V)$$

Atau

$$W_{rev,u} = E - U_0 + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (6-62)$$

Hasil ini hanya berlaku untuk keadaan mati terbatas. Persamaan ini juga mengukur dayaguna dari sistem tertutup. Dayaguna dari suatu sistem tertutup diberi lambang Φ dan dihitung dari hubungan:

$$\begin{aligned} \Phi &= E - U_0 + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \\ &= (E + p_0V - T_0S) - (U_0 + p_0V_0 - T_0S_0) \end{aligned} \quad (6-63)$$

Daya guna

Dengan $E = U + KE + PE$ adalah energi total dalam sistem tertutup..

Dayaguna jenis ϕ dapat dituliskan sebagai:

$$\phi = \frac{\Phi}{m} = e - u_0 + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) \quad (6-64)$$

Jika $e = u + \frac{V^2}{2} + gz$

$$\phi = (u - u_0) + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (6-65)$$

Dimensi dan satuan dari dayaguna dan dayaguna jenis adalah sama dengan energi dan energi jenis. Apabila proses berubah dari keadaan 1 yang memiliki dayaguna sebesar $(\Phi_1 - \Phi_0)$ ke keadaan 2 yang memiliki

Kerja reversibel

dayaguna sebesar $(\Phi_2 - \Phi_0)$ dalam sistem tertutup, kerja reversible yang dilakukan adalah ,

$$(W_{1-2})_{rev,u} = (\Phi_2 - \Phi_0) - (\Phi_1 - \Phi_0) = \Phi_2 - \Phi_1 \quad (6-66)$$

Karena

$$\Phi_2 - \Phi_1 = (E_2 - E_1) + p_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1)$$

Atau

$$\Delta\Phi = \Delta E + p_0\Delta V - T_0\Delta S = m(\Delta u + p_0\Delta v - T_0\Delta s) \quad (6-67)$$

dengan p_0 dan T_0 ditentukan oleh lingkungan

Secara umum dituliskan

$$W_{1-2} \geq \Phi_2 - \Phi_1 \quad (6-68)$$

Untuk perubahan infinitesimal dituliskan,

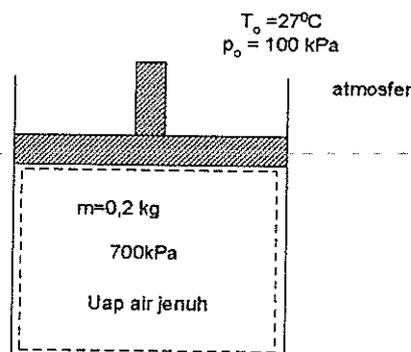
$$\delta W \geq d\Phi \quad (6-69)$$

Tanda kesamaan berlaku untuk proses reversible dan tanda ketidaksamaan berlaku untuk proses ireversibel.

Contoh soal 6-5

Silinder yang dilengkapi dengan piston yang dapat bergerak tanpa gesekan berisi 0,2 kg uap air jenuh pada tekanan dijaga 700 kPa. Perpindahan kalor terjadi antara zat kerja dengan atmosfer pada suhu 27°C tekanan 100 kPa hingga air berubah menjadi cairan jenuh. Tentukan (a) usaha yang dilakukan (b) kerja berguna aktual (c) perpindahan kalor

Diketahui:



Gambar 6-12.

Ditanyakan : (a) W (b) W_{ac} (c) Q

Penyelesaian:

- (a) Proses terjadi pada tekanan konstan, kerja yang dilakukan

$$W = \int p dV = p(V_2 - V_1) = mp(v_2 - v_1)$$

Dari tabel B1-2SI diperoleh pada $p = 700 \text{ kPa}$

Uap jenuh, $v_1 = v_g = 0,2729 \text{ m}^3/\text{kg}$

Cairan jenuh, $v_2 = v_f = 0,001108 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$W = 0,2 \times 700 \times (0,001108 - 0,2729) = -38,05 \text{ kJ}$$

- (b) Kerja berguna yang dilakukan

$$W_a = W + p_o \Delta V$$

$$= -38,05 + 100 \times 0,2 \times (0,001108 - 0,2729) = -43,49 \text{ kJ}$$

- (b) Kalor yang dipindahkan,

Dari hukum pertama,

$$Q = W + \Delta U = W + m(u_f - u_g)$$

dari tabel $u_f = 696,44 \text{ kJ/kg}$, $u_g = 2572,5 \text{ kJ/kg}$

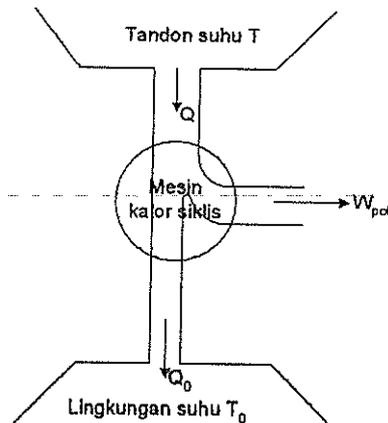
$$Q = -38,05 + 0,2 \times (696,44 - 2572,5) = -413,26 \text{ kJ}$$

Tanda minus menyatakan kalor berpindah dari sistem ke lingkungan

6.11.3. Perpindahan dayaguna

Perpindahan dayaguna mendampingi kalor. Gambar 6-13 memperlihatkan mesin kalor reversible yang beroperasi dalam siklus diantara suhu T_R dan suhu lingkungan T_0 . Perpindahan kalor dari sistem memiliki penggunaan potensial untuk melakukan kerja

Perpindahan dayaguna mendampingi kalor



Gambar 6-13. Mesin kalor reversibel

Kerja yang dihasilkan oleh siklus daya reversibel yang menerima kalor Q pada suhu T dan mengeluarkan kalor sebesar Q_0 ke lingkungan pada suhu T_0 sama dengan

$$W_{rev} = Q - Q_0$$

$$\frac{Q}{T} = \frac{Q_0}{T_0}$$

Sehingga

$$W_{rev} = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (6-70)$$

Potensial kerja

Potensial kerja dari relatif energi pada keadaan mati sama dengan perpindahan dayaguna dayaguna yang diberi simbol Φ maka,

$$\Phi_Q = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (6-71) \quad \text{Potensial kerja}$$

Φ_Q adalah perpindahan dayaguna yang menyertai kalor Q , Sebagian kalor dari total Q yang berada dibawah suhu lingkungan T_0 tidak dapat dikonversi menjadi kerja oleh mesin kalor, oleh karena itu disebut energi tak berdayaguna.

Energi tak berdayaguna

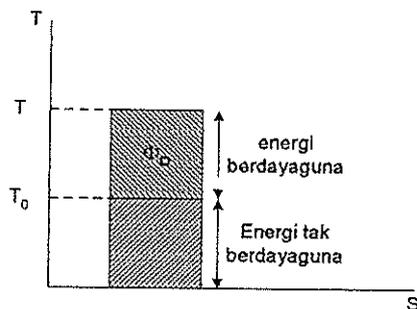
$$\Phi_Q = Q - T_0 \frac{Q}{T} = Q - T_0 \Delta S \quad (6-72)$$

Menyulihkan ke dalam hukum pertama, kita peroleh,

$$W_{pot} = Q - T_0 \Delta S \quad (6-73)$$

Dengan ΔS adalah perubahan entropi selama proses reversibel internal sistem tertutup pada suhu konstan T seperti diperlihatkan gambar 6-13

$$\delta W_{rev} = \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \delta Q$$



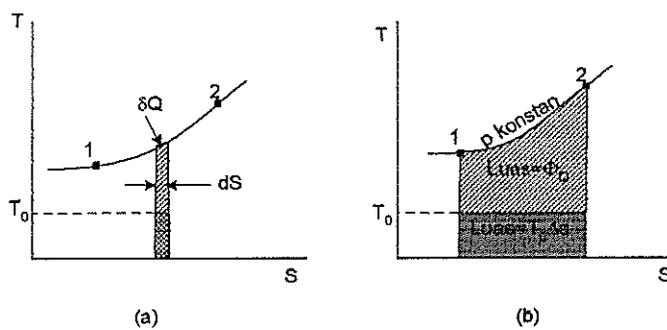
Gambar 6-14. Diagram T - S sumber energi suhu konstan

Untuk perubahan infinitesimal, kerja reversible yang digunakan untuk menaikkan perpindahan kalor sebesar δQ adalah:

Untuk perubahan dari keadaan 1 ke keadaan 2, kerja reversibel yang dilakukan,

$$W_{rev} = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q$$

Kerja reversibel sama dengan perpindahan dayaguna yang mendampingi perpindahan kalor Q ke atau dari sistem tertutup yang mempunyai suhu seragam T .



Gambar 6-15. Diagram T - S yang memeprilihatkan luasan yang menyatakan perpindahan dayaguna

$$\Phi_Q = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q$$

Perpindahan dayaguna persatuan massa ϕ_Q sama dengan

$$\phi_Q = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta q$$

Satu hal pokok harus dicatat, mengacu pada kedua persamaan diatas, jika suhu sistem T_A lebih besar dari suhu lingkungan T_0 , sistem memperkuat dayaguna ketika perpindahan kalor masuk ke sistem dan sebaliknya? Ketika suhu sistem T_A **lebih rendah** dari suhu lingkungan T_0 , sistem kehilangan keberdayagunaan perpindahan kalor dan perpindahan daya guna yang menyertainya **terjadi pada arah berlawanan**, ditunjukkan

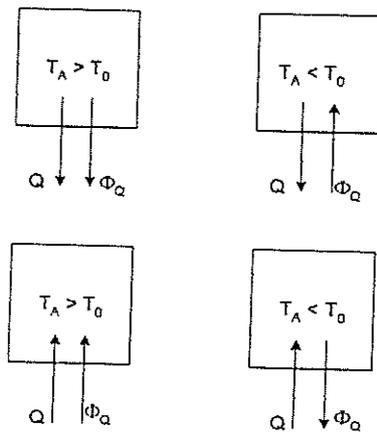
Arah perpindahan dari dayaguna

gambit 8-5 . Perpindahan kalor dan perpindahan dayaguna, keduanya dapat bernilai positif atau negatif.

Perpindahan dayaguna mendampingi kerja. Apabila interaksi kerja terjadi diantara sistem dan lingkungannya, perpindahan dayaguna sama dengan kerja yang dilakukan oleh sistem dikurangi dengan sebarang kerja ekspansi atau pemampatan yang ada. Atau dengan kata lain, perpindahan dayaguna sama dengan perpindahan kerja neto sehingga

Perpindahan dayaguna mendampingi kerja

$$\left(\begin{array}{l} \text{perpindahan dayaguna} \\ \text{mendampingi kerja} \end{array} \right) = [W - p_0(V_2 - V_1)] \quad (6-74)$$



Gambar 6-16. Arah skematik dari perpindahan kalor Q dan perpindahan dayaguna Φ_D yang menyertai

Neraca dayaguna dalam sistem tertutup

Kita tuliskan kembali bentuk neraca energi dan neraca entropi yaitu,

$$E_2 - E_1 = \int_1^2 \delta Q - W$$

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right) + \sigma$$

Neraca energi
Neraca entropi

Q dan W pada persamaan neraca energi masing-masing menyatakan perpindahan kalor dan kerja antara sistem dan sekelilingnya. Dalam neraca

entropi, T menyatakan suhu permukaan batas dimana kalor sebesar δQ diterima dan σ menyatakan entropi yang dihasilkan oleh proses ireversibel internal.

Kita kalikan neraca entropi dengan T_0 kemudian kita kurangkan ke persamaan neraca energi diperoleh

$$(E_2 - E_1) - T_0(S_2 - S_1) = \int_1^2 \delta Q - T_0 \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right) - W - T_0 \sigma \quad (6-75)$$

Dengan menyusun kembali pers. (6-75) diperoleh

$$(\Phi_2 - \Phi_1) - p_0(V_2 - V_1) = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \delta Q - W - T_0 \sigma \quad (6-76)$$

Atau

$$\boxed{(\Phi_2 - \Phi_1) = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \delta Q - [W - p_0(V_2 - V_1)] - T_0 \sigma} \quad (6-77)$$

Neraca dayaguna sistem tertutup

Pers. (6-77) dinamakan *neraca dayaguna sistem tertutup*. Persamaan ini dapat dituliskan dalam bentuk yang lebih sederhana

$$\Delta \Phi = \Phi_D + W_u - I \quad (6-78)$$

Pemusnahan dayaguna

dengan $I = T_0 \sigma$, I adalah ukuran pemusnahan dayaguna dalam sistem tertutup. Dalam bentuk kata-kata persamaan dapat dinyatakan sebagai,

$$\left(\begin{array}{l} \text{Perubahan} \\ \text{dayaguna} \\ \text{dalam sistem} \\ \text{tertutup} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{perpindahan} \\ \text{dayaguna} \\ \text{mendampingi kalor} \\ \text{masuk ke sistem} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Perpindahan} \\ \text{dayaguna mendampingi} \\ \text{kerja berguna} \\ \text{masuk ke sistem} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{pemusnahan} \\ \text{dayaguna dalam} \\ \text{sistem tertutup} \end{array} \right)$$

Sebarang ireversibilitas selalu memusnahkan dayaguna dan dapat dievaluasi secara langsung dari neraca dayaguna dengan menulis kembali pers. (6-78) dalam bentuk

$$\boxed{I = W_u - (\Delta \Phi - \Phi_Q)}$$

Pemusnahan dayaguna

$$I: \begin{cases} > 0 & \text{ireversibilitas dalam sistem} \\ = 0 & \text{tk terjadi ireversibilitas dalam sistem} \end{cases}$$

I tidak mungkin berharga negatif. Pemusnahan dayaguna bukanlah sifat sistem akan tetapi dayaguna adalah sifat sistem. Perubahan dayaguna suatu sistem dapat berharga positif, negatif, atau nol.

Untuk proses reversibel $I = 0$

$$W_{rev,u} = (\Delta\Phi - \Phi_Q) \quad (6-80)$$

Jika pers. (6-79) kita sulihkan kembali ke pers. (6-80)

$$I = W_u - W_{rev,u}$$

$$I_Q = \Phi_{Q,in} - \Phi_{Q,out}$$

$$\Delta S_{isol} = \sigma_{isol} \geq 0$$

Karena Q dan W masing-masing berharga nol untuk sistem terisolasi, neraca keberdayagunaan menjadi

$$\boxed{\Delta\Phi_{isol} = -I_{isol}} \quad (6-81)$$

Untuk proses nyata T_{isol} harus selalu positif, maka perubahan dayaguna untuk sistem terisolasi harus selalu negatif atau dituliskan dengan

$$\Delta\Phi_{isol} \leq 0$$

Bentuk neraca dayaguna juga dapat dituliskan dalam bentuk *neraca laju dayaguna sistem tertutup*.

$$\boxed{\frac{d\Phi}{dt} = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta\dot{Q} - [\dot{W} - p_0(V_2 - V_1)] - \dot{I}} \quad (6-82)$$

dengan $d\Phi/dt$ menyatakan laju perubahan dayaguna

6.11.4. ANALISIS DAYAGUNA UNTUK VOLUM ATUR.

Dalam sistem terbuka aliran massa dapat mengalir melewati permukaan atur yang disertai dengan perpindahan dayaguna

Kerja reversibel

$$W_{ref} = \left(H_i - T_o S_i + m \frac{V_i^2}{2} + mgz_i \right) - \left(H_o - T_o S_o + \frac{V_o^2}{2} + gz_o \right) \quad \text{Kerja reversibel}$$

$$= (H - H_o) - T_o (S - S_o) + m \left(\frac{V_o^2 - V_i^2}{2} \right) + mg(z_o - z_i)$$

Kerja persatuan massa

$$w_{rev} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) + m \left(\frac{V_o^2 - V_i^2}{2} \right) + mg(z_o - z_i) \quad (6-83)$$

Kerja reversible ini akan maksimum bila massa yang meninggalkan volum austr berada dalam kesetimbangan dengan lingkungan

Fungsi Dayaguna

Keadaan mati untuk aliran melalui volum austr menyatakan secara tidak langsung bahwa selain terjadi kesetimbangan termal dan mekanis dari zat alir dengan atmosfer pada T_o dan p_o tetapi juga bahwa energi kinetik pada keadaan mati adalah nol relatif terhadap lingkungan (zat alir dalam keadaan diam). Selain itu energi potensialnya harus minimum.

Keadaan mati untuk aliran

Dayaguna aliran zat alir dalam aliran tunak didefinisikan sebagai keluaran kerja maksimum yang dapat diperoleh ketika zat alir diubah secara reversibel dari suatu keadaan ke keadaan mati dalam suatu proses dimana sebarang perpindahan kalor yang terjadi hanya dengan atmosfer.

Dayaguna aliran

Dayaguna aliran diberi lambang ψ untuk persatuan massa Ψ untuk massa total. Dayaguna aliran diukur oleh besaran $(h + ke + pe - T_o s)$ pada keadaan tertentu relatif terhadap keadaan mati. z diukur relatif terhadap $z_o = 0$ sehingga $pe_o = 0$. Dayaguna aliran adalah

$$\Psi = \left(H - T_o S + \frac{V^2}{2} + gz \right) - (H_o - T_o S_o) \quad (6-84)$$

$$= H - H_o - T_o(S - S_o) + gz + \frac{V^2}{2}$$

Fungsi dayaguna persatuan massa

$$\psi = h - h_o - T_o(s - s_o) + gz + \frac{V^2}{2} \quad (6-85)$$

Dalam bentuk diferensial

$$d\Psi = dH - T_o dS + d(KE) + d(PE)$$

Kerja reversible sama dengan perubahan fungsi dayaguna

$$W_{ref} = \Psi_o - \Psi_i \quad (6-86)$$

Neraca dayaguna

$$\dot{W}_{act,u} = \sum_{out} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 s \right) \dot{m}_o - \sum_{in} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz - T_0 s \right) \dot{m}_i - \sum_{j=1}^n \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) + T_0 \dot{\sigma}_{CV} \quad (6-87)$$

Neraca dayaguna

Suku pertama dan kedua dalam kurung pada ruas kanan masing-masing adalah fungsi dayaguna pada aliran masuk dan fungsi dayaguna pada aliran keluar. Suku ketiga menyatakan perpindahan dayaguna yang menyertai kalor Φ_Q dan suku terakhir merupakan ukuran irreversibilitas dalam volum atur I . Pers. (6-87) dapat dituliskan sebagai

$$\dot{W}_{act,u} = \sum_{out} \dot{m}_o \psi_o - \sum_{in} \dot{m}_i \psi_i - \dot{\Phi}_D + \dot{I}_{CV} \quad (6-88)$$

atau

$$\boxed{\sum_{out} \dot{m}_o \psi_o - \sum_{in} \dot{m}_i \psi_i = -\dot{\Phi}_D + \dot{W}_{act} - \dot{I}_{CV}} \quad (6-89)$$

Dalam katakata, persamaan diatas menyatakan:

$$\begin{pmatrix} \text{laju neto} \\ \text{perpindahan} \\ \text{dayaguna keluar} \\ \text{CV menyertai} \\ \text{aliran massa} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{laju perpindahan} \\ \text{dayaguna} \\ \text{menyertai kalor} \\ \text{masuk CV} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \text{laju perpindahan} \\ \text{dayaguna} \\ \text{menyertai kerja} \\ \text{masuk CV} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \text{laju pemusnahan} \\ \text{dayaguna dalam} \\ \text{CV} \end{pmatrix}$$

6.12. ENERGI BEBAS HELMHOTZ DAN GIBBS

Seringkali sistem-sistem mengalami reaksi fisis dan reaksi kimiawi terjadi dalam lingkungan bersuhu konstan. Terjadi perpindahan kalor antara sistem dan lingkungan selama terjadinya reaksi tersebut yang akhirnya terjadi kesetimbangan termal antara keduanya.

Fungsi Helmholtz

Sistem yang mengalami proses tak berhingga kecil, reversibel atau ireversibel antara dua keadaan keseimbangan, menurut hukum pertama kerja yang dilakukan adalah:

$$\delta W = -dU + \delta Q$$

Berapakah jumlah kerja maksimum yang dapat diperoleh jika sistem mengalami proses antara dua keadaan kesetimbangan dengan pengandaian bahwa sistem bersuhu T hanya mengadakan pertukaran energi dengan lingkungan pada suhu T_0 ? Dari prinsip pertambahan entropi, jika kenaikan entropi sistem dS dan entropi lingkungan dS_0 , kenaikan entropi neto adalah:

$$dS + dS_0 \geq 0$$

Karena δQ menyatakan kalor yang keluar dari tandon ($T_0 > T$), perubahan entropi lingkungan :

$$dS_0 = \frac{-\delta Q}{T_0}$$

Jadi

$$dS_0 + \frac{-\delta Q}{T_0} \geq 0$$

dan

$$T_0 dS \geq \delta Q$$

dari hukum pertama

$$T_0 dS \geq \delta W + dU$$

atau

$$\delta W \leq -(dU - T_0 dS) \quad (6-90)$$

Untuk perubahan berhingga dari keadaan keseimbangan 1 ke 2,

$$W \leq (U_1 - U_2) - T_0 (S_1 - S_2) \quad (6-91)$$

Jika suhu lingkungan konstan dan sama dengan suhu sistem T ($T_0 = T$), diperoleh:

$$W \leq (U_1 - U_2) - T (S_1 - S_2) \quad (6-92)$$

Didefinisikan sifat sistem yang disebut *fungsi Helmholtz* atau *energi bebas Helmholtz* F ;

Fungsi Helmholtz

$$F = U - TS \quad (6-93)$$

Energi bebas adalah energi maksimum yang dapat dibebaskan untuk melakukan kerja

Energi bebas

Untuk proses isothermal, perubahan keadan keseimbangan 1 ke 2,

$$(F_1 - F_2)_T = (U_1 - U_2)_T - T(S_1 - S_2)_T \quad (6-94)$$

Dari pers. (6-93)

$$W \leq (F_1 - F_2)_T \quad (6-95)$$

Artinya, jika sistem melakukan pertukaran kalor secara isothermal dengan menggunakan satu tandon, berkurangnya fungsi Helmholtz dari sistem merupakan batas tertinggi dari kerja yang dilakukan. Pada proses reversibel, kerja yang dilakukan akan maksimum, jika $W = (F_1 - F_2)_T$

Kerja maksimum

Fungsi Gibbs

Didefinisikan *fungsi energi bebas Gibbs* G untuk sistem pada tekanan konstan sebagai:

Fungsi Gibbs

$$G = U - TS + Pv \quad (6-96)$$

Atau

$$G = H - TS \quad (6-97)$$

Fungsi Gibbs jenis:

$$g = u - Ts + pv \quad (6-98)$$

atau

$$g = h - Ts \quad (6-99)$$

Pada keadaan keseimbangan pada suhu dan tekanan sama, T dan p

$$(G_1 - G_2)_{T,p} = (U_1 - U_2)_{T,p} - T_0(S_1 - S_2)_{T,p} + p(V_1 - V_2)_{T,p} \quad (6-100)$$

Fungsi Gibbs dan fungsi Helmholtz keduanya merupakan sifat sistem. Kedua fungsi ini dapat digunakan untuk menciptakan kriteria untuk kesetimbangan termodinamik. Pada kesetimbangan fungsi-fungsi ini berada pada harga maksimumnya.

RANGKUMAN

Aplikasi yang terutama dari hukum kedua dan entropi adalah untuk menganalisis volum dan sejumlah kasus khusus yang berkaitan dengannya.

Seperti pada hukum pertama, hukum kedua juga dapat digambarkan secara grafis dengan menggunakan diagram $T-s$ dan diagram $h-s$. Dengan diagram $T-s$, jumlah kalor yang diserap atau dilepaskan oleh sistem termodinamis dapat digambarkan. Seringkali sebuah proses juga digambarkan dalam diagram $h-s$ (atau diagram Mollier). Keuntungan

LAMPIRAN A

KONSTANTA FISIKA YANG PENTING DAN BERBAGAI EKVIVALEN BERDIMENSI

TABEL A1. TETAPAN FISIKA YANG PENTING

| | |
|------------------------------|---|
| Angka Avogadro | $N_A = 6.022\ 045 \times 10^{26}$ molekul/kg mol |
| Tetapan gas universal | $\mathcal{R} = 1545.35$ ft-lbf/lbm-mol-°R $= 8314.41$ J/kgmol-K $= 1.986$ Btu/lbm-mol-°R $= 1.986$ kkal/kg mol-K |
| Tetapan Planck | $h = 6.626\ 176 \times 10^{-34}$ J |
| Tetapan Boltzmann | $k = 1.380662 \times 10^{-23}$ J/molekul-K $= 8.6173 \times 10^{-5}$ eV/molekul-K |
| Kecepatan cahaya dalam hampa | $c = 2.997\ 925 \times 10^8$ m/det |
| Percepatan gravitasi standar | $g = 32.174$ ft/det ² $= 9.80665$ m/det ² |
| Massa elektron | $m_e = 9.1095 \times 10^{-31}$ kg |
| Muatan elektron | $e = 1.602\ 189 \times 10^{-19}$ C |
| Tetapan Stefan-boltzman | $\sigma = 0.1714 \times 10^{-8}$ Btu/h-ft ² -R ⁴ $= 5.670\ 32 \times 10^{-8}$ W/m ² -K ⁴ |

Tabel A2. Berbagai ekuivalen berdimensi

| | |
|-----------------------------|--|
| Panjang | $1 \text{ m} = 3,2808 \text{ ft} = 39,37 \text{ in}$ $1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m} = 0,394 \text{ in} = 0,0328 \text{ ft}$ $1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$ $1 \text{ pm} = 10^{-6} \text{ m}$ $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ $1 \text{ km} = 0,621 \text{ mil}$ $1 \text{ mi} = 5280 \text{ ft}$ |
| Luas | $1 \text{ m}^2 = 10,76 \text{ ft}^2$ $1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2 = 0,155 \text{ in}^2$ |
| Volum | $1 \text{ gal} = 0,13368 \text{ ft}^3 = 3,785 \text{ liter}$ $1 \text{ liter} = 10^{-3} \text{ m}^3$ |
| Waktu | $1 \text{ h} = 3600 \text{ s} = 60 \text{ min}$ $1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$ $1 \text{ Ps} = 10^{-6} \text{ s}$ $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ |
| Massa | $1 \text{ kg} = 1000 \text{ g} = 2,2046 \text{ lbm} = 6,8521 \times 10^{-2} \text{ slug}$ $1 \text{ slug} = 1 \text{ lbf} \cdot \text{s}^2 / \text{ft} = 32,174 \text{ lbm}$ |
| Kakas | $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$ $1 \text{ dyn} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm} / \text{s}^2$ $1 \text{ lbf} = 4,448 \times 10^5 \text{ dyn} = 4,448 \text{ N}$ |
| Energi | $1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{M}^2 / \text{S}^2$ $1 \text{ Btu} = 778,16 \text{ ft} \cdot \text{lbf} = 1,055 \times 10^{10} \text{ ergs} = 252 \text{ kal} = 1055,0 \text{ J}$ $1 \text{ kal} = 4,186 \text{ J}$ $1 \text{ kkal} = 4186 \text{ J} = 1000 \text{ kal}$ $1 \text{ erg} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^2 / \text{s}^2 = 10^{-7} \text{ J}$ $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ $1 \text{ Q} = 10^{18} \text{ Btu} = 1,055 \times 10^{21} \text{ J}$ $1 \text{ Quad} = 10^{15} \text{ Btu}$ $1 \text{ kJ} = 0,947813 \text{ Btu} = 0,23884 \text{ kkal}$ |
| Daya | $1 \text{ W} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3 = 1 \text{ Js}$ $1 \text{ hp} = 550 \text{ ft} \cdot \text{lbf} / \text{s}$ $1 \text{ hp} = 2545 \text{ Btu} / \text{h} = 746 \text{ W}$ $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W} = 3412 \text{ Btu} / \text{h}$ |
| Tekanan | $1 \text{ atm} = 14,696 \text{ lbf} / \text{in}^2 = 760 \text{ torr} = 101325 \text{ N} / \text{m}^2$ $1 \text{ mm Hg} = 0,01934 \text{ lbf} / \text{in}^2 = 1 \text{ torr}$ $1 \text{ dyn} / \text{cm}^2 = 145, (T \times 10^{-1} \text{ lbf} / \text{in}^2)$ $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N} / \text{m}^2 = 14,504 \text{ lbf} / \text{in}^2 = 10^6 \text{ dyn} / \text{cm}^2$ $1 \mu = 10^{-6} \text{ m Hg} = 10^{-3} \text{ mm Hg}$ $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / \text{m}^2 = 1,4504 \times 10^{-4} \text{ lbf} / \text{in}^2$ $1 \text{ in Hg} = 3376,8 \text{ N} / \text{m}^2$ $1 \text{ in H}_2\text{O} = 248,8 \text{ N} / \text{m}^2$ |
| Daya persatuan luas | $1 \text{ W} / \text{m}^2 = 0,3170 \text{ Btu} / (\text{jam} \cdot \text{ft}^2) = 0,85984 \text{ kkal} / (\text{jam} \cdot \text{m}^2)$ |
| Koefisien perpindahan kalor | $1 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) = 0,1761 \text{ Btu} / (\text{jam} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}) = 0,85984 \text{ kkal} / (\text{jam} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ |
| Energi persatuan massa | $1 \text{ kJ} / \text{kg} = 0,4299 \text{ Btu} / \text{lbm} = 0,23884 \text{ kkal} / \text{kg}$ |
| Kalor jenis | $1 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) = 0,23884 \text{ Btu} / (\text{lbm} \cdot ^\circ\text{F}) = 0,23884 \text{ kkal} / (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ |
| Konduktivitas termal | $1 \text{ W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) = 0,5778 \text{ Btu} / \text{jam} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F} = 0,85984 \text{ kkal} / (\text{jam} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ |

LAMPIRAN B

BERBAGAI SIFAT TERMODINAMIK

Tabel B1-SI. Sifat-sifat Termodinamis Uap (satuan SI)

Tabel B1-1SI. Uap terjenuhkan : tabel suhu (satuan SI)

| Temp. °C | Tek. kPa | Volume jenis m ³ /kg | | Tenaga dalam kJ/kg | | | Entalpi kJ/kg | | | Entropi kJ/kg | | |
|-------------|-------------|------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| | | cairan jenuh v _f | uap jenuh v _g | cairan jenuh u _f | peng uapan u _{fg} | uap jenuh u _g | cairan jenuh h _f | peng uapan h _{fg} | uap jenuh h _g | cairan jenuh s _f | peng uapan s _{fg} | uap jenuh s _g |
| T | p | | | | | | | | | | | |
| 0.01 | 0.6113 | 0.001 000 | 206.14 | .00 | 2375.3 | 2375.3 | .01 | 2501.3 | 2501.4 | .0000 | 9.1562 | 9.1562 |
| 5 | 0.8721 | 0.001 000 | 147.12 | 20.97 | 2361.3 | 2382.3 | 20.98 | 2489.6 | 2510.6 | .0761 | 8.9496 | 9.0257 |
| 10 | 1.2276 | 0.001 000 | 106.38 | 42.00 | 2347.2 | 2389.2 | 42.01 | 2477.7 | 2519.8 | .1510 | 8.7498 | 8.9008 |
| 15 | 1.7051 | 0.001 001 | 77.93 | 62.99 | 2333.1 | 2396.1 | 62.99 | 2465.9 | 2528.9 | .2245 | 8.5569 | 8.7814 |
| 20 | 2.339 | 0.001 002 | 57.79 | 83.95 | 2319.0 | 2402.9 | 83.96 | 2454.1 | 2538.1 | .2966 | 8.3706 | 8.6672 |
| 25 | 3.169 | 0.001 003 | 43.36 | 104.88 | 2304.9 | 2409.8 | 104.89 | 2442.3 | 2547.2 | .3674 | 8.1905 | 8.5580 |
| 30 | 4.246 | 0.001 004 | 32.89 | 125.78 | 2290.8 | 2416.6 | 125.79 | 2430.5 | 2556.3 | .4369 | 8.0164 | 8.4533 |
| 35 | 5.628 | 0.001 006 | 25.22 | 146.67 | 2276.7 | 2423.4 | 146.68 | 2418.6 | 2565.3 | .5053 | 7.8478 | 8.3531 |
| 40 | 7.384 | 0.001 008 | 19.52 | 167.56 | 2262.6 | 2430.1 | 167.57 | 2406.7 | 2574.3 | .5725 | 7.6845 | 8.2570 |
| 45 | 9.593 | 0.001 010 | 15.26 | 188.44 | 2248.4 | 2436.8 | 188.45 | 2394.8 | 2583.2 | .6387 | 7.5261 | 8.1648 |
| 50 | 12.349 | 0.001 012 | 12.03 | 209.32 | 2234.2 | 2443.5 | 209.33 | 2382.7 | 2592.1 | .7038 | 7.3725 | 8.0763 |
| 55 | 15.758 | 0.001 015 | 9.568 | 230.21 | 2219.9 | 2450.1 | 230.23 | 2370.7 | 2600.9 | .7679 | 7.2234 | 7.9913 |
| 60 | 19.940 | 0.001 017 | 7.671 | 251.11 | 2205.5 | 2456.6 | 251.13 | 2358.5 | 2609.6 | .8312 | 7.0784 | 7.9096 |
| 65 | 25.03 | 0.001 020 | 6.197 | 272.02 | 2191.1 | 2463.1 | 272.06 | 2346.2 | 2618.3 | .8935 | 6.9375 | 7.8310 |
| 70 | 31.19 | 0.001 023 | 5.042 | 292.95 | 2176.6 | 2469.6 | 292.98 | 2333.8 | 2626.8 | .9549 | 6.8004 | 7.7553 |
| 75 | 38.58 | 0.001 026 | 4.131 | 313.90 | 2162.0 | 2475.9 | 313.93 | 2321.4 | 2635.3 | 1.0155 | 6.6669 | 7.6824 |
| 80 | 47.39 | 0.001 029 | 3.407 | 334.86 | 2147.4 | 2482.2 | 334.91 | 2308.8 | 2643.7 | 1.0753 | 6.5369 | 7.6122 |
| 85 | 57.83 | 0.001 033 | 2.828 | 355.84 | 2132.6 | 2488.4 | 355.90 | 2296.0 | 2651.9 | 1.1343 | 6.4102 | 7.5445 |
| 90 | 70.14 | 0.001 036 | 2.361 | 376.85 | 2117.7 | 2494.5 | 376.92 | 2283.2 | 2660.1 | 1.1925 | 6.2866 | 7.4791 |
| 95 | 84.55 | 0.001 040 | 1.982 | 397.88 | 2102.7 | 2500.6 | 397.96 | 2270.2 | 2668.1 | 1.2500 | 6.1659 | 7.4159 |
| 100 | 0.101 35 | 0.001 044 | 1.6729 | 418.94 | 2087.6 | 2506.5 | 419.04 | 2257.0 | 2676.1 | 1.3069 | 6.0480 | 7.3549 |
| 105 | 0.120 82 | 0.001 048 | 1.4194 | 440.02 | 2072.3 | 2512.4 | 440.15 | 2243.7 | 2683.8 | 1.3630 | 5.9328 | 7.2958 |
| 110 | 0.143 27 | 0.001 052 | 1.2102 | 461.14 | 2057.0 | 2518.1 | 461.30 | 2230.2 | 2691.5 | 1.4185 | 5.8202 | 7.2387 |
| 115 | 0.169 06 | 0.001 056 | 1.0366 | 482.30 | 2041.4 | 2523.7 | 482.48 | 2216.5 | 2699.0 | 1.4734 | 5.7100 | 7.1833 |
| 120 | 0.198 53 | 0.001 060 | 0.8919 | 503.50 | 2025.8 | 2529.3 | 503.71 | 2202.6 | 2706.3 | 1.5276 | 5.6020 | 7.1296 |
| 125 | 0.2321 | 0.001 065 | 0.7706 | 524.74 | 2009.9 | 2534.6 | 524.99 | 2188.5 | 2713.5 | 1.5813 | 5.4962 | 7.0775 |
| 130 | 0.2701 | 0.001 070 | 0.6685 | 546.02 | 1993.9 | 2539.9 | 546.31 | 2174.2 | 2720.5 | 1.6344 | 5.3925 | 7.0269 |
| 135 | 0.3130 | 0.001 075 | 0.5822 | 567.35 | 1977.7 | 2545.0 | 567.69 | 2159.6 | 2727.3 | 1.6870 | 5.2907 | 6.9777 |
| 140 | 0.3613 | 0.001 080 | 0.5089 | 588.74 | 1961.3 | 2550.0 | 589.13 | 2144.7 | 2733.9 | 1.7391 | 5.1908 | 6.9299 |
| 145 | 0.4154 | 0.001 085 | 0.4463 | 610.18 | 1944.7 | 2554.9 | 610.63 | 2129.6 | 2740.3 | 1.7907 | 5.0926 | 6.8833 |
| 150 | 0.4758 | 0.001 091 | 0.3928 | 631.68 | 1927.9 | 2559.5 | 632.20 | 2114.3 | 2746.5 | 1.8418 | 4.9960 | 6.8379 |
| 155 | 0.5431 | 0.001 096 | 0.3468 | 653.24 | 1910.8 | 2564.1 | 653.84 | 2098.6 | 2752.4 | 1.8925 | 4.9010 | 6.7935 |
| 160 | 0.6178 | 0.001 102 | 0.3071 | 674.87 | 1893.5 | 2568.4 | 675.55 | 2082.6 | 2758.1 | 1.9427 | 4.8075 | 6.7502 |
| 165 | 0.7005 | 0.001 108 | 0.2727 | 696.56 | 1876.0 | 2572.5 | 697.34 | 2066.2 | 2763.5 | 1.9925 | 4.7153 | 6.7078 |
| 170 | 0.7917 | 0.001 114 | 0.2428 | 718.33 | 1858.1 | 2576.5 | 719.21 | 2049.5 | 2768.7 | 2.0419 | 4.6244 | 6.6663 |
| 175 | 0.8920 | 0.001 121 | 0.2168 | 740.17 | 1840.0 | 2580.2 | 741.17 | 2032.4 | 2773.6 | 2.0909 | 4.5347 | 6.6256 |
| 180 | 1.0021 | 0.001 127 | 0.194 05 | 762.09 | 1821.6 | 2583.7 | 763.22 | 2015.0 | 2778.2 | 2.1396 | 4.4461 | 6.5857 |
| 185 | 1.1227 | 0.001 134 | 0.174 09 | 784.10 | 1802.9 | 2587.0 | 785.37 | 1997.1 | 2782.4 | 2.1879 | 4.3586 | 6.5465 |
| 190 | 1.2544 | 0.001 141 | 0.156 54 | 806.19 | 1783.8 | 2590.0 | 807.62 | 1978.8 | 2786.4 | 2.2359 | 4.2720 | 6.5079 |
| 195 | 1.3978 | 0.001 149 | 0.141 05 | 828.37 | 1764.4 | 2592.8 | 829.98 | 1960.0 | 2790.0 | 2.2835 | 4.1863 | 6.4698 |
| 200 | 1.5538 | 0.001 157 | 0.127 36 | 850.65 | 1744.7 | 2595.3 | 852.45 | 1940.7 | 2793.2 | 2.3309 | 4.1014 | 6.4323 |

Tabel B1-1SI. Uap terjenuhkan : tabel suhu (satuan SI)

| Temp. OC | Tek. kPa | Volume jenis m ³ /kg | | Tenaga dalam kJ/kg | | | Entalpi kJ/kg | | | Entropi kJ/kg | | |
|-------------|-------------|------------------------------------|----------------|-----------------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|----------------|
| | | cairan jenuh | uap jenuh | cairan jenuh | peng uapan | uap jenuh | cairan jenuh | peng uapan | uap jenuh | cairan jenuh | peng uapan | uap jenuh |
| | | v _f | v _g | u _f | u _{fg} | u _g | h _f | h _{fg} | h _g | s _f | s _{fg} | s _g |
| T | p | | | | | | | | | | | |
| 205 | 1.7230 | 0.001 164 | 0.115 21 | 873.04 | 1724.5 | 2597.5 | 875.04 | 1921.0 | 2796.0 | 2.3780 | 4.0172 | 6.3952 |
| 210 | 1.9062 | 0.001 173 | 0.104 41 | 895.53 | 1703.9 | 2599.5 | 897.76 | 1900.7 | 2798.5 | 2.4248 | 3.9337 | 6.3585 |
| 215 | 2.104 | 0.001 181 | 0.094 79 | 918.14 | 1682.9 | 2601.1 | 920.62 | 1879.9 | 2800.5 | 2.4714 | 3.8507 | 6.3221 |
| 220 | 2.318 | 0.001 190 | 0.086 19 | 940.87 | 1661.5 | 2602.4 | 943.62 | 1858.5 | 2802.1 | 2.5178 | 3.7683 | 6.2861 |
| 225 | 2.548 | 0.001 199 | 0.078 49 | 963.73 | 1639.6 | 2603.3 | 966.78 | 1836.5 | 2803.3 | 2.5639 | 3.6863 | 6.2503 |
| 230 | 2.795 | 0.001 209 | 0.071 58 | 986.74 | 1617.2 | 2603.9 | 990.12 | 1813.8 | 2804.0 | 2.6099 | 3.6047 | 6.2146 |
| 235 | 3.060 | 0.001 219 | 0.065 37 | 1009.89 | 1594.2 | 2604.1 | 1013.62 | 1790.5 | 2804.2 | 2.6558 | 3.5233 | 6.1791 |
| 240 | 3.344 | 0.001 229 | 0.059 76 | 1033.21 | 1570.8 | 2604.0 | 1037.32 | 1766.5 | 2803.8 | 2.7015 | 3.4422 | 6.1437 |
| 245 | 3.648 | 0.001 240 | 0.054 71 | 1056.71 | 1546.7 | 2603.4 | 1061.23 | 1741.7 | 2803.0 | 2.7472 | 3.3612 | 6.1083 |
| 250 | 3.973 | 0.001 251 | 0.050 13 | 1080.39 | 1522.0 | 2602.4 | 1085.36 | 1716.2 | 2801.5 | 2.7927 | 3.2802 | 6.0730 |
| 255 | 4.319 | 0.001 263 | 0.045 98 | 1104.28 | 1496.7 | 2600.9 | 1109.73 | 1689.8 | 2799.5 | 2.8383 | 3.1992 | 6.0375 |
| 260 | 4.688 | 0.001 276 | 0.042 21 | 1128.39 | 1470.6 | 2599.0 | 1134.37 | 1662.5 | 2796.9 | 2.8838 | 3.1181 | 6.0019 |
| 265 | 5.081 | 0.001 289 | 0.038 77 | 1152.74 | 1443.9 | 2596.6 | 1159.28 | 1634.4 | 2793.6 | 2.9294 | 3.0368 | 5.9662 |
| 270 | 5.499 | 0.001 302 | 0.035 64 | 1177.36 | 1416.3 | 2593.7 | 1184.51 | 1605.2 | 2789.7 | 2.9751 | 2.9551 | 5.9301 |
| 275 | 5.942 | 0.001 317 | 0.032 79 | 1202.25 | 1387.9 | 2590.2 | 1210.07 | 1574.9 | 2785.0 | 3.0208 | 2.8730 | 5.8938 |
| 280 | 6.412 | 0.001 332 | 0.030 17 | 1227.46 | 1358.7 | 2586.1 | 1235.99 | 1543.6 | 2779.6 | 3.0668 | 2.7903 | 5.8571 |
| 285 | 6.909 | 0.001 348 | 0.027 77 | 1253.00 | 1328.4 | 2581.4 | 1262.31 | 1511.0 | 2773.3 | 3.1130 | 2.7070 | 5.8199 |
| 290 | 7.436 | 0.001 366 | 0.025 57 | 1278.92 | 1297.1 | 2576.0 | 1289.07 | 1477.1 | 2766.2 | 3.1594 | 2.6227 | 5.7821 |
| 295 | 7.993 | 0.001 384 | 0.023 54 | 1305.2 | 1264.7 | 2569.9 | 1316.3 | 1441.8 | 2758.1 | 3.2062 | 2.5375 | 5.7437 |
| 300 | 8.581 | 0.001 404 | 0.021 67 | 1332.0 | 1231.0 | 2563.0 | 1344.0 | 1404.9 | 2749.0 | 3.2534 | 2.4511 | 5.7045 |
| 305 | 9.202 | 0.001 425 | 0.019 948 | 1359.3 | 1195.9 | 2555.2 | 1372.4 | 1366.4 | 2738.7 | 3.3010 | 2.3633 | 5.6643 |
| 310 | 9.856 | 0.001 447 | 0.018 350 | 1387.1 | 1159.4 | 2546.4 | 1401.3 | 1326.0 | 2727.3 | 3.3493 | 2.2737 | 5.6230 |
| 315 | 10.547 | 0.001 472 | 0.016 867 | 1415.5 | 1121.1 | 2536.6 | 1431.0 | 1283.5 | 2714.5 | 3.3982 | 2.1821 | 5.5804 |
| 320 | 11.274 | 0.001 499 | 0.015 488 | 1444.6 | 1080.9 | 2525.5 | 1461.5 | 1238.6 | 2700.1 | 3.4480 | 2.0882 | 5.5362 |
| 330 | 12.845 | 0.001 561 | 0.012 996 | 1505.3 | 993.7 | 2498.9 | 1525.3 | 1140.6 | 2665.9 | 3.5507 | 1.8909 | 5.4417 |
| 340 | 14.586 | 0.001 638 | 0.010 797 | 1570.3 | 894.3 | 2464.6 | 1594.2 | 1027.9 | 2622.0 | 3.6594 | 1.6763 | 5.3357 |
| 350 | 16.513 | 0.001 740 | 0.008 813 | 1641.9 | 776.6 | 2418.4 | 1670.6 | 893.4 | 2563.9 | 3.777 | 1.4335 | 5.2112 |
| 360 | 18.651 | 0.001 893 | 0.006 945 | 1725.2 | 626.3 | 2351.5 | 1760.5 | 720.5 | 2481.0 | 3.9147 | 1.1379 | 5.0526 |
| 370 | 21.03 | 0.002 213 | 0.004 925 | 1844.0 | 384.5 | 2228.5 | 1890.5 | 441.6 | 2332.1 | 4.1106 | .6865 | 4.7971 |
| 374.14 | 22.09 | 0.003 155 | 0.003 155 | 2029.6 | 0 | 2029.6 | 2099.3 | 0 | 2099.3 | 4.4298 | 0 | 4.4298 |

Tabel B1-.2SI Uap Jenuh : Tabel Tekanan (satuan SI)

| Tek kPa <i>p</i> | Temp °C <i>T</i> | Volume jenis m ³ /kg | | Tenaga dalam kJ/kg | | | Entalpi kJ/kg | | | Entropi kJ/kg | | |
|------------------------|------------------------|---|--------------------------------------|---|--|--------------------------------------|---|--|--------------------------------------|---|--|--------------------------------------|
| | | Cairan jenuh <i>v_f</i> | Uap jenuh <i>v_g</i> | Cairan jenuh <i>u_f</i> | pengu apan <i>u_{fg}</i> | Uap jenuh <i>u_g</i> | Cairan jenuh <i>h_f</i> | pengu apan <i>h_{fg}</i> | Uap jenuh <i>h_g</i> | Cairan jenuh <i>s_f</i> | pengu apan <i>s_{fg}</i> | Uap jenuh <i>s_g</i> |
| 0.6113 | 0.01 | 0.001 000 | 206.14 | .00 | 2375.3 | 2375.3 | .01 | 2501.3 | 2501.4 | .0000 | 9.1562 | 9.1562 |
| 1.0 | 6.98 | 0.001 000 | 129.21 | 29.30 | 2355.7 | 2385.0 | 29.30 | 2484.9 | 2514.2 | .1059 | 8.8697 | 8.9756 |
| 1.5 | 13.03 | 0.001 001 | 87.98 | 54.71 | 2338.6 | 2393.3 | 54.71 | 2470.6 | 2525.3 | .1957 | 8.6322 | 8.8279 |
| 2.0 | 17.50 | 0.001 001 | 67.00 | 73.48 | 2326.0 | 2399.5 | 73.48 | 2460.0 | 2533.5 | .2607 | 8.4629 | 8.7237 |
| 2.5 | 21.08 | 0.001 002 | 54.25 | 88.48 | 2315.9 | 2404.4 | 88.49 | 2451.6 | 2540.0 | .3120 | 8.3311 | 8.6432 |
| 3.0 | 24.08 | 0.001 003 | 45.67 | 101.04 | 2307.5 | 2408.5 | 101.05 | 2444.5 | 2545.5 | .3545 | 8.2231 | 8.5776 |
| 4.0 | 28.96 | 0.001 004 | 34.80 | 121.45 | 2293.7 | 2415.2 | 121.46 | 2432.9 | 2554.4 | .4226 | 8.0520 | 8.4746 |
| 5.0 | 32.88 | 0.001 005 | 28.19 | 137.81 | 2282.7 | 2420.5 | 137.82 | 2423.7 | 2561.5 | .4764 | 7.9187 | 8.3951 |
| 7.5 | 40.29 | 0.001 008 | 19.24 | 168.78 | 2261.7 | 2430.5 | 168.79 | 2406.0 | 2574.8 | .5764 | 7.6750 | 8.2515 |
| 10 | 45.81 | 0.001 010 | 14.67 | 191.82 | 2246.1 | 2437.9 | 191.83 | 2392.8 | 2584.7 | .6493 | 7.5009 | 8.1502 |
| 15 | 53.97 | 0.001 014 | 10.02 | 225.92 | 2222.8 | 2448.7 | 225.94 | 2373.1 | 2599.1 | .7549 | 7.2536 | 8.0085 |
| 20 | 60.06 | 0.001 017 | 7.649 | 251.38 | 2205.4 | 2456.7 | 251.40 | 2358.3 | 2609.7 | .8320 | 7.0766 | 7.9085 |
| 25 | 64.97 | 0.001 020 | 6.204 | 271.90 | 2191.2 | 2463.1 | 271.93 | 2346.3 | 2618.2 | .8931 | 6.9383 | 7.8314 |
| 30 | 69.10 | 0.001 022 | 5.229 | 289.20 | 2179.2 | 2468.4 | 289.23 | 2336.1 | 2625.3 | .9439 | 6.8247 | 7.7686 |
| 40 | 73.87 | 0.001 027 | 3.993 | 317.53 | 2159.5 | 2477.0 | 317.58 | 2319.2 | 2636.8 | 1.0259 | 6.6441 | 7.6700 |
| 50 | 81.33 | 0.001 030 | 3.240 | 340.44 | 2143.4 | 2483.9 | 340.49 | 2305.4 | 2645.9 | 1.0910 | 6.5029 | 7.5939 |
| 75 | 91.78 | 0.001 037 | 2.217 | 384.31 | 2112.4 | 2496.7 | 384.39 | 2278.6 | 2663.0 | 1.2130 | 6.2434 | 7.4564 |
| MPa | | | | | | | | | | | | |
| 0.100 | 99.63 | 0.001 043 | 1.6940 | 417.36 | 2088.7 | 2506.1 | 417.46 | 2258.0 | 2675.5 | 1.3026 | 6.0568 | 7.3594 |
| 0.125 | 105.99 | 0.001 048 | 1.3749 | 444.19 | 2069.3 | 2513.5 | 444.32 | 2241.0 | 2685.4 | 1.3740 | 5.9104 | 7.2844 |
| 0.150 | 111.37 | 0.001 053 | 1.1593 | 466.94 | 2052.7 | 2519.7 | 467.11 | 2226.5 | 2693.6 | 1.4336 | 5.7897 | 7.2233 |
| 0.175 | 116.06 | 0.001 057 | 1.0036 | 486.80 | 2038.1 | 2524.9 | 486.99 | 2213.6 | 2700.6 | 1.4849 | 5.6868 | 7.1717 |
| 0.200 | 120.23 | 0.001 061 | 0.8857 | 504.49 | 2025.0 | 2529.5 | 504.70 | 2201.9 | 2706.7 | 1.5301 | 5.5970 | 7.1271 |
| 0.225 | 124.00 | 0.001 064 | 0.7933 | 520.47 | 2013.1 | 2533.6 | 520.72 | 2191.3 | 2712.1 | 1.5706 | 5.5173 | 7.0878 |
| 0.250 | 127.44 | 0.001 067 | 0.7187 | 535.10 | 2002.1 | 2537.2 | 535.37 | 2181.5 | 2716.9 | 1.6072 | 5.4455 | 7.0527 |
| 0.275 | 130.60 | 0.001 070 | 0.6573 | 548.59 | 1991.9 | 2540.5 | 548.89 | 2172.4 | 2721.3 | 1.6408 | 5.3801 | 7.0209 |
| 0.300 | 133.55 | 0.001 073 | 0.6058 | 561.15 | 1982.4 | 2543.6 | 561.47 | 2163.8 | 2725.3 | 1.6718 | 5.3201 | 6.9919 |
| 0.325 | 136.30 | 0.001 076 | 0.5620 | 572.90 | 1973.5 | 2546.4 | 573.25 | 2155.8 | 2729.0 | 1.7006 | 5.2646 | 6.9652 |
| 0.350 | 138.88 | 0.001 079 | 0.5243 | 583.95 | 1965.0 | 2548.9 | 584.33 | 2148.1 | 2732.4 | 1.7275 | 5.2130 | 6.9405 |
| 0.375 | 141.32 | 0.001 081 | 0.4914 | 594.40 | 1956.9 | 2551.3 | 594.81 | 2140.8 | 2735.6 | 1.7528 | 5.1647 | 6.9175 |
| 0.40 | 143.63 | 0.001 084 | 0.4625 | 604.31 | 1949.3 | 2553.6 | 604.74 | 2133.8 | 2738.6 | 1.7766 | 5.1193 | 6.8959 |
| 0.45 | 147.93 | 0.001 088 | 0.4140 | 622.77 | 1934.9 | 2557.6 | 623.25 | 2120.7 | 2743.9 | 1.8207 | 5.0359 | 6.8565 |
| 0.50 | 151.86 | 0.001 093 | 0.3749 | 639.68 | 1921.6 | 2561.2 | 640.23 | 2108.5 | 2748.7 | 1.8607 | 4.9606 | 6.8213 |
| 0.55 | 155.48 | 0.001 097 | 0.3427 | 655.32 | 1909.2 | 2564.5 | 655.93 | 2097.0 | 2753.0 | 1.8973 | 4.8920 | 6.7893 |
| 0.60 | 158.85 | 0.001 101 | 0.3157 | 669.90 | 1897.5 | 2567.4 | 670.56 | 2086.3 | 2756.8 | 1.9312 | 4.8288 | 6.7600 |
| 0.65 | 162.01 | 0.001 104 | 0.2927 | 683.56 | 1886.5 | 2570.1 | 684.28 | 2076.0 | 2760.3 | 1.9627 | 4.7703 | 6.7331 |
| 0.70 | 164.97 | 0.001 108 | 0.2729 | 696.44 | 1876.1 | 2572.5 | 697.22 | 2066.3 | 2763.5 | 1.9922 | 4.7158 | 6.7080 |
| 0.75 | 167.78 | 0.001 112 | 0.2556 | 708.64 | 1866.1 | 2574.7 | 709.47 | 2057.0 | 2766.4 | 2.0200 | 4.6647 | 6.6847 |
| 0.80 | 170.43 | 0.001 115 | 0.2404 | 720.22 | 1856.6 | 2576.8 | 721.11 | 2048.0 | 2769.1 | 2.0462 | 4.6166 | 6. |
| 0.85 | 172.96 | 0.001 118 | 0.2270 | 731.27 | 1847.4 | 2578.7 | 732.22 | 2039.4 | 2771.6 | 2.0710 | 4.5711 | 6.6421 |
| 0.90 | 175.38 | 0.001 121 | 0.2150 | 741.83 | 1838.6 | 2580.5 | 742.83 | 2031.1 | 2773.9 | 2.0946 | 4.5280 | 6.6226 |

| Tek MPa <i>p</i> | Temp °C <i>T</i> | Volume jenis m ³ /kg | | Tenaga dalam kJ/kg | | | Entalpi kJ/kg | | | Entropi kJ/kg | | |
|------------------------|------------------------|---|--------------------------------------|---|--|--------------------------------------|---|--|--------------------------------------|---|--|--------------------------------------|
| | | Cairan jenuh <i>v_f</i> | Uap jenuh <i>v_g</i> | Cairan jenuh <i>u_f</i> | pengu apan <i>u_{fg}</i> | Uap jenuh <i>u_g</i> | Cairan jenuh <i>h_f</i> | pengu apan <i>h_{fg}</i> | Uap jenuh <i>h_g</i> | Cairan jenuh <i>s_f</i> | pengu apan <i>s_{fg}</i> | Uap jenuh <i>s_g</i> |
| 0.95 | 177.69 | 0.001 124 | 0.2042 | 751.95 | 1830.2 | 2582.1 | 753.02 | 2023.1 | 2776.1 | 2.1172 | 4.4869 | 6.6041 |
| 1.00 | 179.91 | 0.001 127 | 0.194 44 | 761.68 | 1822.0 | 2583.6 | 762.81 | 2015.3 | 2778.1 | 2.1387 | 4.4478 | 6.5865 |
| 1.10 | 184.09 | 0.001 133 | 0.177 53 | 780.09 | 1806.3 | 2586.4 | 781.34 | 2000.4 | 2781.7 | 2.1792 | 4.3744 | 6.5536 |
| 1.20 | 187.99 | 0.001 139 | 0.163 33 | 797.29 | 1791.5 | 2588.8 | 798.65 | 1986.2 | 2784.8 | 2.2166 | 4.3067 | 6.5233 |
| 1.30 | 191.64 | 0.001 144 | 0.151 25 | 813.44 | 1777.5 | 2591.0 | 814.93 | 1972.7 | 2787.6 | 2.2515 | 4.2438 | 6.4953 |
| 1.40 | 195.07 | 0.001 149 | 0.140 84 | 828.70 | 1764.1 | 2592.8 | 830.30 | 1959.7 | 2790.0 | 2.2842 | 4.1850 | 6.4693 |
| 1.50 | 198.32 | 0.001 154 | 0.131 77 | 843.16 | 1751.3 | 2594.5 | 844.89 | 1947.3 | 2792.2 | 2.3150 | 4.1298 | 6.4448 |
| 1.75 | 205.76 | 0.001 166 | 0.113 49 | 876.46 | 1721.4 | 2597.8 | 878.50 | 1917.9 | 2796.4 | 2.3851 | 4.0044 | 6.3896 |
| 2.00 | 212.42 | 0.001 177 | 0.099 63 | 906.44 | 1693.8 | 2600.3 | 908.79 | 1890.7 | 2799.5 | 2.4474 | 3.8935 | 6.3409 |
| 2.25 | 218.45 | 0.001 187 | 0.088 75 | 933.83 | 1668.2 | 2602.0 | 936.49 | 1865.2 | 2801.7 | 2.5035 | 3.7937 | 6.2972 |
| 2.5 | 223.99 | 0.001 197 | 0.079 98 | 959.11 | 1644.0 | 2603.1 | 962.11 | 1841.0 | 2803.1 | 2.5547 | 3.7028 | 6.2575 |
| 3.0 | 233.90 | 0.001 217 | 0.066 68 | 1004.78 | 1599.3 | 2604.1 | 1008.42 | 1795.7 | 2804.2 | 2.6457 | 3.5412 | 6.1869 |
| 3.5 | 242.60 | 0.001 235 | 0.057 07 | 1045.43 | 1558.3 | 2603.7 | 1049.75 | 1753.7 | 2803.4 | 2.7253 | 3.4000 | 6.1253 |
| 4 | 250.40 | 0.001 252 | 0.049 78 | 1082.31 | 1520.0 | 2602.3 | 1087.31 | 1741.1 | 2801.4 | 2.7964 | 3.2737 | 6.0701 |
| 5 | 263.99 | 0.001 286 | 0.039 44 | 1147.81 | 1449.3 | 2597.1 | 1154.23 | 1640.1 | 2794.3 | 2.9202 | 3.0532 | 5.9734 |
| 6 | 275.64 | 0.001 319 | 0.032 44 | 1205.44 | 1384.2 | 2589.7 | 1213.35 | 1571.0 | 2784.3 | 3.0267 | 2.8625 | 5.8892 |
| 7 | 285.88 | 0.001 351 | 0.027 37 | 1257.55 | 1323.0 | 2580.5 | 1267.00 | 1505.1 | 2772.1 | 3.1211 | 2.6922 | 5.8133 |
| 8 | 295.06 | 0.001 384 | 0.023 52 | 1305.57 | 1264.2 | 2569.8 | 1316.64 | 1441.3 | 2758.0 | 3.2068 | 2.5364 | 5.7432 |
| 9 | 303.40 | 0.001 418 | 0.020 48 | 1350.51 | 1207.3 | 2557.8 | 1363.26 | 1378.9 | 2742.1 | 3.2858 | 2.3915 | 5.6772 |
| 10 | 311.06 | 0.001 452 | 0.018 026 | 1393.04 | 1151.4 | 2544.4 | 1407.56 | 1317.1 | 2724.7 | 3.3596 | 2.2544 | 5.6141 |
| 11 | 318.15 | 0.001 489 | 0.015 987 | 1433.7 | 1096.0 | 2529.8 | 1450.1 | 1255.5 | 2705.6 | 3.4295 | 2.1233 | 5.5527 |
| 12 | 324.75 | 0.001 527 | 0.014 263 | 1473.0 | 1040.7 | 2513.7 | 1491.3 | 1193.6 | 2684.9 | 3.4962 | 1.9962 | 5.4924 |
| 13 | 330.93 | 0.001 567 | 0.012 780 | 1511.1 | 985.0 | 2496.1 | 1531.5 | 1130.7 | 2662.2 | 3.5606 | 1.8718 | 5.4323 |
| 14 | 336.75 | 0.001 611 | 0.011 485 | 1548.6 | 928.2 | 2476.8 | 1571.1 | 1066.5 | 2637.6 | 3.6232 | 1.7485 | 5.3717 |
| 15 | 342.24 | 0.001 658 | 0.010 337 | 1585.6 | 869.8 | 2455.5 | 1610.5 | 1000.0 | 2610.5 | 3.6848 | 1.6249 | 5.3098 |
| 16 | 347.44 | 0.001 711 | 0.009 306 | 1622.7 | 809.0 | 2431.7 | 1650.1 | 930.6 | 2580.6 | 3.7461 | 1.4994 | 5.2455 |
| 17 | 352.37 | 0.001 770 | 0.008 364 | 1660.2 | 744.8 | 2405.0 | 1690.3 | 856.9 | 2547.2 | 3.8079 | 1.3698 | 5.1777 |
| 18 | 357.06 | 0.001 840 | 0.007 489 | 1698.9 | 675.4 | 2374.3 | 1732.0 | 777.1 | 2509.1 | 3.8715 | 1.2329 | 5.1044 |
| 19 | 361.54 | 0.001 924 | 0.006 657 | 1739.9 | 598.1 | 2338.1 | 1776.5 | 688.0 | 2464.5 | 3.9388 | 1.0839 | 5.0228 |
| 20 | 365.81 | 0.002 036 | 0.005 834 | 1785.6 | 507.5 | 2293.0 | 1826.3 | 583.4 | 2409.7 | 4.0139 | .9130 | 4.9269 |
| 21 | 369.89 | 0.002 207 | 0.004 952 | 1842.1 | 388.5 | 2230.6 | 1888.4 | 446.2 | 2334.6 | 4.1075 | .6938 | 4.8013 |
| 22 | 373.80 | 0.002 742 | 0.003 568 | 1961.9 | 125.2 | 2087.1 | 2022.2 | 143.4 | 2165.6 | 4.3110 | .2216 | 4.5327 |
| 22.09 | 374.14 | 0.003 155 | 0.003 155 | 2029.6 | 0 | 2029.6 | 2099.3 | 0 | 2099.3 | 4.4298 | 0 | 4.4298 |

d B1-3SI Uap Lewat Panas (satuan SI)

| P = .010 MPa (45.81) | | | | P = .050 MPa (81.33) | | | | P = .10 MPa (99.63) | | | |
|----------------------|--------|--------|---------|----------------------|--------|--------|---------|----------------------|--------|--------|---------|
| v | u | h | s | v | u | h | s | v | u | h | s |
| 14.674 | 2437.9 | 2584.7 | 8.1502 | 3.240 | 2483.9 | 2645.9 | 7.5939 | 1.6940 | 2560.1 | 2675.5 | 7.3594 |
| 14.869 | 2443.9 | 2592.6 | 8.1749 | | | | | | | | |
| 17.196 | 2515.5 | 2687.5 | 8.4479 | 3.418 | 2511.6 | 2682.5 | 7.6947 | 1.6958 | 2506.7 | 2676.2 | 7.3614 |
| 19.512 | 2587.9 | 2783.0 | 8.6882 | 3.889 | 2585.6 | 2780.1 | 7.9401 | 1.9364 | 2582.8 | 2776.4 | 7.6134 |
| 21.825 | 2661.3 | 2879.5 | 8.9038 | 4.356 | 2659.9 | 2877.7 | 8.1580 | 2.172 | 2658.1 | 2875.3 | 7.8343 |
| 24.136 | 2736.0 | 2977.3 | 9.1002 | 4.820 | 2735.0 | 2976.0 | 8.3556 | 2.406 | 2733.7 | 2974.3 | 8.0333 |
| 26.445 | 2812.1 | 3076.5 | 9.2813 | 5.284 | 2811.3 | 3075.5 | 8.5373 | 2.639 | 2810.4 | 3074.3 | 8.2158 |
| 31.063 | 2958.9 | 3279.6 | 9.6077 | 6.209 | 2968.5 | 3278.9 | 8.8642 | 3.103 | 2967.9 | 3278.2 | 8.5435 |
| 35.679 | 3132.3 | 3489.1 | 9.8978 | 7.134 | 3132.0 | 3488.7 | 9.1546 | 3.565 | 3131.6 | 3488.1 | 8.8342 |
| 40.295 | 3302.5 | 3705.4 | 10.1608 | 8.057 | 3302.2 | 3705.1 | 9.4178 | 4.028 | 3301.9 | 3704.7 | 9.0976 |
| 44.911 | 3479.6 | 3928.7 | 10.4028 | 8.981 | 3479.4 | 3928.5 | 9.6599 | 4.490 | 3479.2 | 3928.2 | 9.3398 |
| 49.526 | 3663.8 | 4159.0 | 10.6281 | 9.904 | 3663.6 | 4158.9 | 9.8852 | 4.952 | 3663.5 | 4158.6 | 9.5652 |
| 54.141 | 3855.0 | 4396.4 | 10.8396 | 10.828 | 3854.9 | 4396.3 | 10.0967 | 5.414 | 3854.8 | 4396.1 | 9.7767 |
| 58.757 | 4053.0 | 4640.6 | 11.0393 | 11.751 | 4052.9 | 4640.5 | 10.2964 | 5.875 | 4052.8 | 4640.3 | 9.9764 |
| 63.372 | 4257.5 | 4891.2 | 11.2287 | 12.674 | 4257.4 | 4891.1 | 10.4859 | 6.337 | 4257.3 | 4891.0 | 10.1659 |
| 67.987 | 4467.9 | 5147.8 | 11.4091 | 13.597 | 4467.8 | 5147.7 | 10.6662 | 6.799 | 4467.7 | 5147.6 | 10.3463 |
| 72.602 | 4683.7 | 5409.7 | 11.5811 | 14.521 | 4683.6 | 5409.6 | 10.8382 | 7.260 | 4683.5 | 5409.5 | 10.5183 |
| P = .20 MPa (120.23) | | | | P = .30 MPa (133.55) | | | | P = .40 MPa (143.63) | | | |
| .8857 | 2529.5 | 2706.7 | 7.1272 | .6058 | 2543.6 | 2725.3 | 6.9919 | .4625 | 2553.6 | 2738.6 | 6.8959 |
| .9596 | 2576.9 | 2768.8 | 7.2795 | .6339 | 2570.8 | 2761.0 | 7.0778 | .4708 | 2564.5 | 2752.8 | 6.9299 |
| 1.0803 | 2654.4 | 2870.5 | 7.5066 | .7163 | 2650.7 | 2865.6 | 7.3115 | .5342 | 2646.8 | 2860.5 | 7.1706 |
| 1.1988 | 2731.2 | 2971.0 | 7.7086 | .7964 | 2728.7 | 2967.6 | 7.5166 | .5951 | 2726.1 | 2964.2 | 7.3789 |
| 1.3162 | 2808.6 | 3071.8 | 7.8926 | .8753 | 2806.7 | 3069.3 | 7.7022 | .6548 | 2804.8 | 3066.8 | 7.5662 |
| 1.5493 | 2966.7 | 3276.6 | 8.2218 | 1.0315 | 2965.6 | 3275.0 | 8.0330 | .7726 | 2964.4 | 3273.4 | 7.8985 |
| P = .20 MPa (120.23) | | | | P = .30 MPa (133.55) | | | | P = .40 MPa (143.63) | | | |
| 1.7814 | 3130.8 | 3487.1 | 8.5133 | 1.1867 | 3130.0 | 3486.0 | 8.3251 | .8893 | 3129.2 | 3484.9 | 8.1913 |
| 2.013 | 3301.4 | 3704.1 | 8.7770 | 1.3414 | 3300.8 | 3703.2 | 8.5892 | 1.0055 | 3300.2 | 3702.4 | 8.4558 |
| 2.244 | 3478.8 | 3927.6 | 9.0194 | 1.4957 | 3478.4 | 3927.1 | 8.8319 | 1.1215 | 3477.9 | 3926.5 | 8.6987 |
| 2.475 | 3663.1 | 4158.2 | 9.2449 | 1.6499 | 3662.9 | 4157.8 | 9.0576 | 1.2372 | 3662.4 | 4157.3 | 8.9244 |
| 2.706 | 3854.5 | 4395.8 | 9.4566 | 1.8041 | 3854.2 | 4395.4 | 9.2692 | 1.3529 | 3853.9 | 4395.1 | 9.1362 |
| 2.937 | 4052.5 | 4640.0 | 9.6563 | 1.9581 | 4052.3 | 4639.7 | 9.4690 | 1.4685 | 4052.0 | 4639.4 | 9.3360 |
| 3.168 | 4257.0 | 4890.7 | 9.8458 | 2.1121 | 4256.8 | 4890.4 | 9.6585 | 1.5840 | 4256.5 | 4890.2 | 9.5256 |
| 3.399 | 4467.5 | 5147.3 | 10.0262 | 2.2661 | 4467.2 | 5147.1 | 9.8389 | 1.6996 | 4467.0 | 5146.8 | 9.7060 |
| 3.630 | 4683.2 | 5409.3 | 10.1982 | 2.4201 | 4683.0 | 5409.0 | 10.0110 | 1.8151 | 4682.8 | 5408.8 | 9.8780 |

P = .50 MPa (151.86)

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| .3749 | 2561.2 | 2748.7 | 6.8213 |
| .4249 | 2646.9 | 2855.4 | 7.0592 |
| .4744 | 2723.5 | 2960.7 | 7.2709 |
| .5226 | 2802.9 | 3064.2 | 7.4599 |
| .5701 | 2882.6 | 3167.7 | 7.6329 |
| .6173 | 2963.2 | 3271.9 | 7.7938 |
| .7109 | 3128.4 | 3483.9 | 8.0873 |
| .8041 | 3299.6 | 3701.7 | 8.3522 |
| .8969 | 3477.5 | 3925.9 | 8.5952 |
| .9896 | 3662.1 | 4156.9 | 8.8211 |
| 1.0822 | 3853.6 | 4394.7 | 9.0329 |
| 1.1747 | 4051.8 | 4639.1 | 9.2328 |
| 1.2672 | 4256.3 | 4889.9 | 9.4224 |
| 1.3596 | 4466.8 | 5146.6 | 9.6029 |
| 1.4521 | 4682.5 | 5408.6 | 9.7749 |

P = .60 MPa (158.85)

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| .3157 | 2567.4 | 2756.8 | 6.7600 |
| .3520 | 2638.9 | 2850.1 | 6.9665 |
| .3938 | 2720.9 | 2957.2 | 7.1816 |
| .4344 | 2801.0 | 3061.6 | 7.3724 |
| .4742 | 2881.2 | 3165.7 | 7.5464 |
| .5137 | 2962.1 | 3270.3 | 7.7079 |
| .5920 | 3127.6 | 3482.8 | 8.0021 |
| .6697 | 3299.1 | 3700.9 | 8.2674 |
| .7472 | 3477.0 | 3925.3 | 8.5107 |
| .8245 | 3661.8 | 4156.5 | 8.7367 |
| .9017 | 3853.4 | 4394.4 | 8.9486 |
| .9788 | 4051.5 | 4638.8 | 9.1485 |
| 1.0559 | 4256.1 | 4889.6 | 9.3381 |
| 1.1330 | 4466.5 | 5146.3 | 9.5185 |
| 1.2101 | 4682.3 | 5408.3 | 9.6906 |

P = .80 MPa (170.43)

| | | | |
|-------|--------|--------|--------|
| .2404 | 2576.8 | 2769.1 | 6.6628 |
| .2608 | 2630.6 | 2839.3 | 6.8158 |
| .2931 | 2715.5 | 2950.0 | 7.0384 |
| .3241 | 2797.2 | 3056.5 | 7.2328 |
| .3544 | 2878.2 | 3161.7 | 7.4089 |
| .3843 | 2959.7 | 3267.1 | 7.5716 |
| .4433 | 3126.0 | 3780.6 | 7.8673 |
| .5018 | 3297.9 | 3699.4 | 8.1333 |
| .5601 | 3476.2 | 3924.2 | 8.3770 |
| .6181 | 3661.1 | 4155.6 | 8.6033 |
| .6761 | 3852.8 | 4393.7 | 8.8153 |
| .7340 | 4051.0 | 4638.2 | 9.0153 |
| .7919 | 4255.6 | 4889.1 | 9.2050 |
| .8497 | 4466.1 | 5145.9 | 9.3855 |
| .9076 | 4681.8 | 5407.9 | 9.5575 |

P = 1.00 MPa (179.91)

| | | | |
|---------|--------|--------|--------|
| .194 44 | 2583.6 | 2778.1 | 6.5865 |
| .2060 | 2621.9 | 2827.9 | 6.6940 |
| .2327 | 2709.9 | 2942.6 | 6.9247 |
| .2579 | 2793.2 | 3051.2 | 7.1229 |
| .2825 | 2875.2 | 3157.7 | 7.3011 |
| .3066 | 2957.3 | 3263.9 | 7.4651 |
| .3541 | 3124.4 | 3478.5 | 7.7622 |
| .4011 | 3296.8 | 3697.9 | 8.0290 |
| .4478 | 3475.3 | 3923.1 | 8.2731 |
| .4943 | 3660.4 | 4154.7 | 8.4996 |
| .5407 | 3852.2 | 4392.9 | 8.7118 |
| .5871 | 4050.5 | 4637.6 | 8.9119 |
| .6335 | 4255.1 | 4888.6 | 9.1017 |
| .6798 | 4465.6 | 5145.4 | 9.2822 |
| .7261 | 4681.3 | 5407.4 | 9.4543 |

P = 1.20 MPa (187.99)

| | | | |
|---------|--------|--------|--------|
| .163 33 | 2588.8 | 2784.8 | 6.5233 |
| .169 30 | 2612.8 | 2815.9 | 6.5898 |
| .192 34 | 2704.2 | 2935.0 | 6.8294 |
| .2138 | 2789.2 | 3045.8 | 7.0317 |
| .2345 | 2872.2 | 3153.6 | 7.2121 |
| .2548 | 2954.9 | 3260.7 | 7.3774 |
| .2946 | 3122.8 | 3476.3 | 7.6759 |
| .3339 | 3295.6 | 3696.3 | 7.9435 |
| .3729 | 3474.4 | 3922.0 | 8.1881 |
| .4118 | 3659.7 | 4153.8 | 8.4148 |
| .4505 | 3851.6 | 4392.2 | 8.6272 |
| .4892 | 4050.0 | 4637.0 | 8.8274 |
| .5278 | 4254.6 | 4888.0 | 9.0172 |
| .5665 | 4465.1 | 5144.9 | 9.1977 |
| .6051 | 4680.9 | 5407.0 | 9.3698 |

P = 1.40 MPa (195.07)

| | | | |
|---------|--------|--------|--------|
| .140 84 | 2592.8 | 2790.0 | 6.4693 |
| .143 02 | 2603.1 | 2803.3 | 6.4975 |
| .163 50 | 2698.3 | 2927.2 | 6.7467 |
| .182 28 | 2785.2 | 3040.4 | 6.9534 |
| .2003 | 2869.2 | 3149.5 | 7.1360 |
| .2178 | 2952.5 | 3257.5 | 7.3026 |
| .2521 | 3121.1 | 3474.1 | 7.6027 |
| .2860 | 3294.4 | 3694.8 | 7.8710 |
| .3195 | 3473.6 | 3920.8 | 8.1160 |
| .3528 | 3659.0 | 4153.0 | 8.3431 |
| .3861 | 3851.1 | 4391.5 | 8.5556 |
| .4192 | 4049.5 | 4636.4 | 8.7559 |
| .4524 | 4254.1 | 4887.5 | 8.9457 |
| .4855 | 4464.7 | 5144.4 | 9.1262 |
| .5186 | 4680.4 | 5406.5 | 9.2984 |

P = 1.60 MPa (201.41)

| | | | |
|---------|--------|--------|--------|
| .123 80 | 2596.0 | 2794.0 | 6.4218 |
| .132 87 | 2644.7 | 2857.3 | 6.5518 |
| .141 84 | 2692.3 | 2919.2 | 6.6732 |

P = 1.80 MPa (207.15)

| | | | |
|---------|--------|--------|--------|
| .110 42 | 2598.4 | 2797.1 | 6.3794 |
| .116 73 | 2636.6 | 2846.7 | 6.4808 |
| .124 97 | 2686.0 | 2911.0 | 6.6066 |

P = 2.00 MPa (212.42)

| | | | |
|---------|--------|--------|--------|
| .099 63 | 2600.3 | 2799.5 | 6.3409 |
| .103 77 | 2628.3 | 2835.8 | 6.4147 |
| .111 44 | 2679.6 | 2902.5 | 6.5453 |

P = 1.60 MPa (201.41)

| | | | |
|---------|--------|--------|--------|
| .158 62 | 2781.1 | 3034.8 | 6.8844 |
| .174 56 | 2866.1 | 3145.4 | 7.0694 |
| .190 05 | 2950.1 | 3254.2 | 7.2374 |
| .2203 | 3119.5 | 3472.0 | 7.5390 |
| .2500 | 3293.3 | 3693.2 | 7.8080 |

P = 1.80 MPa (207.15)

| | | | |
|---------|--------|--------|--------|
| .140 21 | 2776.9 | 3029.2 | 6.8226 |
| .154 57 | 2863.0 | 3141.2 | 7.0100 |
| .168 47 | 2947.7 | 3250.9 | 7.1794 |
| .195 50 | 3117.9 | 3469.8 | 7.4825 |
| .2220 | 3292.1 | 3691.7 | 7.7523 |

P = 2.00 MPa (212.42)

| | | | |
|---------|--------|--------|--------|
| .125 47 | 2772.6 | 3023.5 | 6.7664 |
| .138 57 | 2859.8 | 3137.0 | 6.9563 |
| .151 20 | 2945.2 | 3247.6 | 7.1271 |
| .175 68 | 3116.2 | 3467.6 | 7.4317 |
| .199 60 | 3290.9 | 3690.1 | 7.7024 |

| | | | | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| .2794 | 3472.7 | 3919.7 | 8.0535 | .2482 | 3471.8 | 3918.5 | 7.9983 | .2232 | 3470.9 | 3917.4 | 7.9487 |
| .3086 | 3658.3 | 4152.1 | 8.2808 | .2742 | 3657.6 | 4151.2 | 8.2258 | .2467 | 3657.0 | 4150.3 | 8.1765 |
| .3377 | 3850.5 | 4390.8 | 8.4935 | .3001 | 3849.9 | 4390.1 | 8.4386 | .2700 | 3849.3 | 4389.4 | 8.3895 |
| .3668 | 4049.0 | 4635.8 | 8.6938 | .3260 | 4048.5 | 4635.2 | 8.6391 | .2933 | 4048.0 | 4634.6 | 8.5901 |
| .3958 | 4253.7 | 4887.0 | 8.8837 | .3518 | 4253.2 | 4886.4 | 8.8290 | .3166 | 4252.7 | 4885.9 | 8.7800 |
| .4248 | 4464.2 | 5143.9 | 9.0643 | .3776 | 4463.7 | 5143.4 | 9.0096 | .3398 | 4463.3 | 5142.9 | 8.9607 |
| .4538 | 4679.9 | 5406.0 | 9.2364 | .4034 | 4679.5 | 5405.6 | 9.1818 | .3631 | 4679.0 | 5405.1 | 9.1329 |

P = 2.50 MPa (223.99)

P = 3.00 MPa (233.90)

P = 3.50 MPa (242.60)

| | | | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| .079 98 | 2603.1 | 2803.1 | 6.2575 | .066 68 | 2604.1 | 2804.2 | 6.1869 | .057 07 | 2603.7 | 2803.4 | 6.1253 |
| .080 27 | 2605.6 | 2806.3 | 6.2639 | | | | | | | | |
| .087 00 | 2662.6 | 2880.1 | 6.4085 | .070 58 | 2644.0 | 2855.8 | 6.2872 | .058 72 | 2623.7 | 2829.2 | 6.1749 |
| .098 90 | 2761.6 | 3008.8 | 6.6438 | .081 14 | 2750.1 | 2993.5 | 6.5390 | .068 42 | 2738.0 | 2977.5 | 6.4461 |
| .109 76 | 2851.9 | 3126.3 | 6.8403 | .090 53 | 2843.7 | 3115.3 | 6.7428 | .076 78 | 2835.3 | 3104.0 | 6.6579 |
| .120 10 | 2939.1 | 3239.3 | 7.0148 | .099 36 | 2932.8 | 3230.9 | 6.9212 | .084 53 | 2926.4 | 3222.3 | 6.8405 |
| .130 14 | 3025.5 | 3350.8 | 7.1746 | .107 87 | 3020.4 | 3344.0 | 7.0834 | .091 96 | 3015.3 | 3337.2 | 7.0052 |
| .139 98 | 3112.1 | 3462.1 | 7.3234 | .116 19 | 3108.0 | 3456.5 | 7.2338 | .099 18 | 3103.0 | 3450.9 | 7.1572 |
| .159 30 | 3288.0 | 3686.3 | 7.5960 | .132 43 | 3285.0 | 3682.3 | 7.5085 | .133 24 | 3282.1 | 3678.4 | 7.4339 |
| .178 32 | 3468.7 | 3914.5 | 7.8435 | .148 38 | 3466.5 | 3911.7 | 7.7571 | .126 99 | 3464.3 | 3908.8 | 7.6837 |
| .197 16 | 3655.3 | 4148.2 | 8.0720 | .164 14 | 3653.5 | 4145.9 | 7.9862 | .140 56 | 3651.8 | 4143.7 | 7.9134 |
| .215 90 | 3847.9 | 4387.6 | 8.2853 | .179 80 | 3846.5 | 4385.9 | 8.1999 | .154 02 | 3845.0 | 4384.1 | 8.1276 |
| .2346 | 4046.7 | 4633.1 | 8.4861 | .195 41 | 4045.4 | 4631.6 | 8.4009 | .167 43 | 4044.1 | 4630.1 | 8.3288 |
| .2532 | 4251.5 | 4884.6 | 8.6762 | .210 98 | 4250.3 | 4883.3 | 8.5912 | .180 80 | 4249.2 | 4881.9 | 8.5192 |
| .2718 | 4462.1 | 5141.7 | 8.8569 | .226 52 | 4460.9 | 5140.5 | 8.7720 | .194 15 | 4459.8 | 5139.3 | 8.7000 |
| .2905 | 4677.8 | 5404.0 | 9.0291 | .242 06 | 4676.6 | 5402.8 | 8.9442 | .207 49 | 4675.5 | 5401.7 | 8.8723 |

P = 4.0 MPa (250.40)

P = 4.5 MPa (257.49)

P = 5.0 MPa (263.99)

| | | | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| .049 78 | 2602.3 | 2801.4 | 6.0701 | .044 06 | 2600.1 | 2798.3 | 6.0198 | .039 44 | 2597.1 | 2794.3 | 5.9734 |
| .054 57 | 2667.9 | 2886.2 | 6.2285 | .047 30 | 2650.3 | 2863.2 | 6.1401 | .041 41 | 2631.3 | 2838.3 | 6.0544 |
| .058 84 | 2725.3 | 2960.7 | 6.3615 | .051 35 | 2712.0 | 2943.1 | 6.2828 | .045 32 | 2698.0 | 2924.5 | 6.2084 |
| .066 45 | 2826.7 | 3092.5 | 6.5821 | .058 40 | 2817.8 | 3080.6 | 6.5131 | .051 94 | 2808.7 | 3068.4 | 6.4493 |
| .073 41 | 2919.9 | 3213.6 | 6.7690 | .064 75 | 2913.3 | 3204.7 | 6.7047 | .057 81 | 2906.6 | 3195.7 | 6.6459 |
| .080 02 | 3010.2 | 3330.3 | 6.9363 | .070 74 | 3005.0 | 3323.3 | 6.8746 | .063 30 | 2999.7 | 3316.2 | 6.8186 |
| .086 43 | 3099.5 | 3445.3 | 7.0901 | .076 51 | 3095.3 | 3439.6 | 7.0301 | .068 57 | 3091.0 | 3433.8 | 6.9759 |
| .098 85 | 3279.1 | 3674.4 | 7.3688 | .087 65 | 3276.0 | 3670.5 | 7.3110 | .078 69 | 3273.0 | 3666.5 | 7.2589 |
| .110 95 | 3462.1 | 3905.9 | 7.6198 | .098 47 | 3459.9 | 3903.0 | 7.5631 | .088 49 | 3457.6 | 3900.1 | 7.5122 |
| .122 87 | 3650.0 | 4141.5 | 7.8502 | .109 11 | 3648.3 | 4139.3 | 7.7942 | .098 11 | 3646.6 | 4137.1 | 7.7440 |
| .134 69 | 3843.6 | 4382.3 | 8.0647 | .119 65 | 3842.2 | 4380.6 | 8.0091 | .107 62 | 3840.7 | 4378.8 | 7.9593 |
| .146 45 | 4042.9 | 4628.7 | 8.2662 | .130 13 | 4041.6 | 4627.2 | 8.2108 | .117 07 | 4040.4 | 4625.7 | 8.1612 |
| .158 17 | 4248.0 | 4880.6 | 8.4567 | .140 56 | 4246.8 | 4879.3 | 8.4015 | .126 48 | 4245.6 | 4878.0 | 8.3520 |
| .169 87 | 4458.6 | 5138.1 | 8.6376 | .150 98 | 4457.5 | 5136.9 | 8.5825 | .135 87 | 4456.3 | 5135.7 | 8.5331 |
| .181 56 | 4674.3 | 5400.5 | 8.8100 | .161 39 | 4673.1 | 5399.4 | 8.7549 | .145 26 | 4672.0 | 5398.2 | 8.7055 |

P = 6.0 MPa (275.64)

P = 7.0 MPa (285.88)

P = 8.0 MPa (295.06)

| | | | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| .032 44 | 2589.7 | 2784.3 | 5.8892 | .027 37 | 2580.5 | 2772.1 | 5.8133 | .023 52 | 2569.8 | 2758.0 | 5.7432 |
| .036 16 | 2667.2 | 2884.2 | 6.0674 | .029 47 | 2632.2 | 2838.4 | 5.9305 | .024 26 | 2590.9 | 2785.0 | 5.7906 |

P = 6.0 MPa (275.64)

| | | | |
|---------|--------|--------|--------|
| .042 23 | 2789.6 | 3043.0 | 6.3335 |
| .047 39 | 2892.9 | 3177.2 | 6.5408 |
| .052 14 | 2988.9 | 3301.8 | 6.7193 |
| .056 65 | 3082.2 | 3422.2 | 6.8803 |
| .061 01 | 3174.6 | 3540.6 | 7.0288 |
| .065 25 | 3266.9 | 3658.4 | 7.1677 |
| .073 52 | 3453.1 | 3894.2 | 7.4234 |
| .081 60 | 3643.1 | 4132.7 | 7.6566 |
| .089 58 | 3837.8 | 4375.3 | 7.8727 |
| .097 49 | 4037.8 | 4622.7 | 8.0751 |
| .105 36 | 4243.3 | 4875.4 | 8.2661 |
| .113 21 | 4454.0 | 5133.3 | 8.4474 |
| .121 06 | 4669.6 | 5396.0 | 8.6199 |

P = 7.0 MPa (285.88)

| | | | |
|---------|--------|--------|--------|
| .035 24 | 2769.4 | 3016.0 | 6.2283 |
| .039 93 | 2878.6 | 3158.1 | 6.4478 |
| .044 16 | 2978.0 | 3287.1 | 6.6327 |
| .048 14 | 3073.4 | 3410.3 | 6.7975 |
| .051 95 | 3167.2 | 3530.9 | 6.9486 |
| .055 65 | 3260.7 | 3650.3 | 7.0894 |
| .062 83 | 3448.5 | 3888.3 | 7.3476 |
| .069 81 | 3639.5 | 4128.2 | 7.5822 |
| .076 69 | 3835.0 | 4371.8 | 7.7991 |
| .083 50 | 4035.3 | 4619.8 | 8.0020 |
| .090 27 | 4240.9 | 4872.8 | 8.1933 |
| .097 03 | 4451.7 | 5130.9 | 8.3747 |
| .103 77 | 4667.3 | 5393.7 | 8.5473 |

P = 8.0 MPa (295.06)

| | | | |
|---------|--------|--------|--------|
| .029 95 | 2747.7 | 2987.3 | 6.1301 |
| .034 32 | 2863.8 | 3138.3 | 6.3634 |
| .038 17 | 2966.7 | 3272.0 | 6.5551 |
| .041 75 | 3064.3 | 3398.3 | 6.7240 |
| .045 16 | 3159.8 | 3521.0 | 6.8778 |
| .048 45 | 3254.4 | 3642.0 | 7.0206 |
| .054 81 | 3443.9 | 3882.4 | 7.2812 |
| .060 97 | 3636.0 | 4123.8 | 7.5173 |
| .067 02 | 3832.1 | 4368.3 | 7.7351 |
| .073 01 | 4032.8 | 4616.9 | 7.9384 |
| .078 96 | 4238.6 | 4870.3 | 8.1300 |
| .084 89 | 4449.5 | 5128.5 | 8.3115 |
| .090 80 | 4665.0 | 5391.5 | 8.4842 |

P = 9.0 MPa (303.40)

| | | | |
|---------|--------|--------|--------|
| .020 48 | 2557.8 | 2742.1 | 5.6772 |
| .023 27 | 2646.6 | 2856.0 | 5.8712 |
| .025 80 | 2724.4 | 2956.6 | 6.0361 |
| .029 93 | 2848.4 | 3117.8 | 6.2854 |
| .033 50 | 2955.2 | 3256.6 | 6.4844 |
| .036 77 | 3055.2 | 3386.1 | 6.6576 |
| .039 87 | 3152.2 | 3511.0 | 6.8142 |
| .042 85 | 3248.1 | 3633.7 | 6.9589 |
| .045 74 | 3343.6 | 3755.3 | 7.0943 |
| .048 57 | 3439.3 | 3876.5 | 7.2221 |
| .054 09 | 3632.5 | 4119.3 | 7.4596 |
| .059 50 | 3829.2 | 4364.8 | 7.6783 |
| .064 85 | 4030.3 | 4614.0 | 7.8821 |
| .070 16 | 4236.3 | 4867.7 | 8.0740 |
| .075 44 | 4447.2 | 5126.2 | 8.2556 |
| .080 72 | 4662.7 | 5389.2 | 8.4284 |

P = 10.0 MPa (311.06)

| | | | |
|----------|--------|--------|--------|
| .018 026 | 2544.4 | 2724.7 | 5.6141 |
| .019 861 | 2610.4 | 2809.1 | 5.7568 |
| .022 42 | 2699.2 | 2923.4 | 5.9443 |
| .026 41 | 2832.4 | 3096.5 | 6.2120 |
| .029 75 | 2943.4 | 3240.9 | 6.4190 |
| .032 79 | 3045.8 | 3373.7 | 6.5966 |
| .035 64 | 3144.6 | 3500.9 | 6.7561 |
| .038 37 | 3241.7 | 3625.3 | 6.9029 |
| .041 01 | 3338.2 | 3748.2 | 7.0398 |
| .043 58 | 3434.7 | 3870.5 | 7.1687 |
| .048 59 | 3628.9 | 4114.8 | 7.4077 |
| .053 49 | 3826.3 | 4361.2 | 7.6272 |
| .058 32 | 4027.8 | 4611.0 | 7.8315 |
| .063 12 | 4234.0 | 4865.1 | 8.0237 |
| .067 89 | 4444.9 | 5123.8 | 8.2055 |
| .072 65 | 4660.5 | 5387.0 | 8.3783 |

P = 12.5 MPa (327.89)

| | | | |
|----------|--------|--------|--------|
| .013 495 | 2505.1 | 2673.8 | 5.4624 |
| .016 126 | 2624.6 | 2826.2 | 5.7118 |
| .020 00 | 2789.3 | 3039.3 | 6.0417 |
| .022 99 | 2912.5 | 3199.8 | 6.2719 |
| .025 60 | 3021.7 | 3341.8 | 6.4618 |
| .028 01 | 3125.0 | 3475.2 | 6.6290 |
| .030 29 | 3225.4 | 3604.0 | 6.7810 |
| .032 48 | 3324.4 | 3730.4 | 6.9218 |
| .034 60 | 3422.9 | 3855.3 | 7.0536 |
| .038 69 | 3620.0 | 4103.6 | 7.2965 |
| .042 67 | 3819.1 | 4352.5 | 7.5182 |
| .046 58 | 4021.6 | 4603.8 | 7.7237 |
| .050 45 | 4228.2 | 4858.8 | 7.9165 |
| .054 30 | 4439.3 | 5118.0 | 8.0987 |
| .058 13 | 4654.8 | 5381.4 | 8.2717 |

P = 15.0 MPa (342.24)

| | | | |
|----------|--------|--------|--------|
| .010 337 | 2455.5 | 2610.5 | 5.3098 |
| .011 470 | 2520.4 | 2692.4 | 5.4421 |
| .015 649 | 2740.7 | 2975.5 | 5.8811 |
| .018 445 | 2879.5 | 3156.2 | 6.1404 |
| .020 80 | 2996.6 | 3308.6 | 6.3443 |
| .022 93 | 3104.7 | 3448.6 | 6.5199 |
| .024 91 | 3208.6 | 3582.3 | 6.6776 |
| .026 80 | 3310.3 | 3712.3 | 6.8224 |
| .028 61 | 3410.9 | 3840.1 | 6.9572 |
| .032 10 | 3610.9 | 4092.4 | 7.2040 |
| .035 46 | 3811.9 | 4343.8 | 7.4279 |
| .038 75 | 4015.4 | 4596.6 | 7.6348 |

P = 17.5 MPa (354.75)

| | | | |
|----------|--------|--------|--------|
| .007 920 | 2390.2 | 2528.8 | 5.1419 |
| .012 447 | 2685.0 | 2902.9 | 5.7213 |
| .015 174 | 2844.2 | 3109.7 | 6.0184 |
| .017 358 | 2970.3 | 3274.1 | 6.2383 |
| .019 288 | 3083.9 | 3421.4 | 6.4230 |
| .021 06 | 3191.5 | 3560.1 | 6.5866 |
| .022 74 | 3296.0 | 3693.9 | 6.7357 |
| .024 34 | 3398.7 | 3824.6 | 6.8736 |
| .027 38 | 3601.8 | 4081.1 | 7.1244 |
| .030 31 | 3804.7 | 4335.1 | 7.3507 |
| .033 16 | 4009.3 | 4589.5 | 7.5589 |

P = 20.0 MPa (365.81)

| | | | |
|----------|--------|--------|--------|
| .005 834 | 2293.0 | 2409.7 | 4.9269 |
| .009 942 | 2619.3 | 2818.1 | 5.5540 |
| .012 695 | 2806.2 | 3060.1 | 5.9017 |
| .014 768 | 2942.9 | 3238.2 | 6.1401 |
| .016 555 | 3062.4 | 3393.5 | 6.3348 |
| .018 178 | 3174.0 | 3537.6 | 6.5048 |
| .019 693 | 3281.4 | 3675.3 | 6.6582 |
| .021 13 | 3386.4 | 3809.0 | 6.7993 |
| .023 85 | 3592.7 | 4069.7 | 7.0544 |
| .026 45 | 3797.5 | 4326.4 | 7.2830 |
| .028 97 | 4003.1 | 4582.5 | 7.4925 |

| | | | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| .042 00 | 4222.6 | 4852.6 | 7.8283 | .035 97 | 4216.9 | 4846.4 | 7.7531 | .031 45 | 4211.3 | 4840.2 | 7.6874 |
| .045 23 | 4433.8 | 5112.3 | 8.0108 | .038 76 | 4428.3 | 5106.6 | 7.9360 | .033 91 | 4422.8 | 5101.0 | 7.8707 |
| .048 45 | 4649.1 | 5376.0 | 8.1840 | .041 54 | 4643.5 | 5370.5 | 8.1093 | .036 36 | 4638.0 | 5365.1 | 8.0442 |

P = 25.0 MPa

P = 30.0 MPa

P = 35.0 MPa

| | | | | | | | | | | | |
|------------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|--------|
| .001 973 1 | 1798.7 | 1848.0 | 4.0320 | .001 789 2 | 1737.8 | 1791.5 | 3.9305 | .001 700 3 | 1702.9 | 1762.4 | 3.8722 |
| .006 004 | 2430.1 | 2580.2 | 5.1418 | .002 790 | 2067.4 | 2151.1 | 4.4728 | .002 100 | 1914.1 | 1987.6 | 4.2126 |

P = 25.0 MPa

P = 30.0 MPa

P = 35.0 MPa

| | | | | | | | | | | | |
|----------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|
| .007 881 | 2609.2 | 2806.3 | 5.4723 | .005 303 | 2455.1 | 2614.2 | 5.1504 | .003 428 | 2253.4 | 2373.4 | 4.7747 |
| .009 162 | 2720.7 | 2949.7 | 5.6744 | .006 735 | 2619.3 | 2821.4 | 5.4424 | .004 961 | 2498.7 | 2672.4 | 5.1962 |
| .011 123 | 2884.3 | 3162.4 | 5.9592 | .008 678 | 2820.7 | 3081.1 | 5.7905 | .006 927 | 2751.9 | 2994.4 | 5.6282 |
| .012 724 | 3017.5 | 3335.6 | 6.1765 | .010 168 | 2970.3 | 3275.4 | 6.0342 | .008 345 | 2921.0 | 3213.0 | 5.9026 |
| .014 137 | 3137.9 | 3491.4 | 6.3602 | .011 446 | 3100.5 | 3443.9 | 6.2331 | .009 527 | 3062.0 | 3395.5 | 6.1179 |
| .015 433 | 3251.6 | 3637.4 | 6.5229 | .012 596 | 3221.0 | 3598.9 | 6.4058 | .010 575 | 3189.8 | 3559.9 | 6.3010 |
| .016 646 | 3361.3 | 3777.5 | 6.6707 | .013 661 | 3335.8 | 3745.6 | 6.5606 | .011 533 | 3309.8 | 3713.5 | 6.4631 |
| .018 912 | 3574.3 | 4047.1 | 6.9345 | .015 623 | 3555.5 | 4024.2 | 6.8332 | .013 278 | 3536.7 | 4001.5 | 6.7450 |
| .021 045 | 3783.0 | 4309.1 | 7.1680 | .017 448 | 3768.5 | 4291.9 | 7.0718 | .014 883 | 3754.0 | 4274.9 | 6.9886 |
| .023 10 | 3990.9 | 4568.5 | 7.3802 | .019 196 | 3978.8 | 4554.7 | 7.2867 | .016 410 | 3966.7 | 4541.1 | 7.2064 |
| .025 12 | 4200.2 | 4828.2 | 7.5765 | .020 903 | 4189.2 | 4816.3 | 7.4845 | .017 895 | 4178.3 | 4804.6 | 7.4057 |
| .027 11 | 4412.0 | 5089.9 | 7.7605 | .022 589 | 4401.3 | 5079.0 | 7.6692 | .019 360 | 4390.7 | 5068.3 | 7.5910 |
| .029 10 | 4626.9 | 5354.4 | 7.9342 | .024 266 | 4616.0 | 5344.0 | 7.8432 | .020 815 | 4605.1 | 5333.6 | 7.7653 |

P = 40.0 MPa

P = 50.0 MPa

P = 60.0 MPa

| | | | | | | | | | | | |
|------------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|--------|
| .001 640 7 | 1677.1 | 1742.8 | 3.8290 | .001 559 4 | 1638.6 | 1716.6 | 3.7639 | .001 502 8 | 1609.4 | 1699.5 | 3.7141 |
| .001 907 7 | 1854.6 | 1930.9 | 4.1135 | .001 730 9 | 1788.1 | 1874.6 | 4.0031 | .001 633 5 | 1745.4 | 1843.4 | 3.9318 |
| .002 532 | 2096.9 | 2198.1 | 4.5029 | .002 007 | 1959.7 | 2060.0 | 4.2734 | .001 816 5 | 1892.7 | 2001.7 | 4.1626 |
| .003 693 | 2365.1 | 2512.8 | 4.9459 | .002 486 | 2159.6 | 2284.0 | 4.5884 | .002 085 | 2053.9 | 2179.0 | 4.4121 |
| .005 622 | 2678.4 | 2903.3 | 5.4700 | .003 892 | 2525.5 | 2720.1 | 5.1726 | .002 956 | 2390.6 | 2567.9 | 4.9321 |
| .006 984 | 2869.7 | 3149.1 | 5.7785 | .005 118 | 2763.6 | 3019.5 | 5.5485 | .003 956 | 2658.8 | 2896.2 | 5.3441 |
| .008 094 | 3022.6 | 3346.4 | 6.0114 | .006 112 | 2942.0 | 3247.6 | 5.8178 | .004 834 | 2861.1 | 3151.2 | 5.6452 |
| .009 063 | 3158.0 | 3520.6 | 6.2054 | .006 966 | 3093.5 | 3441.8 | 6.0342 | .005 595 | 3028.8 | 3364.5 | 5.8829 |
| .009 941 | 3283.6 | 3681.2 | 6.3750 | .007 727 | 3230.5 | 3616.8 | 6.2189 | .006 272 | 3177.2 | 3553.5 | 6.0824 |
| .011 523 | 3517.8 | 3978.7 | 6.6662 | .009 076 | 3479.8 | 3933.6 | 6.5290 | .007 459 | 3441.5 | 3889.1 | 6.4109 |
| .012 962 | 3739.4 | 4257.9 | 6.9150 | .010 283 | 3710.3 | 4224.4 | 6.7882 | .008 508 | 3681.0 | 4191.5 | 6.6805 |
| .014 324 | 3954.6 | 4527.6 | 7.1356 | .011 411 | 3930.5 | 4501.1 | 7.0146 | .009 480 | 3906.4 | 4475.2 | 6.9127 |
| .015 642 | 4167.4 | 4793.1 | 7.3364 | .012 496 | 4145.7 | 4770.5 | 7.2184 | .010 409 | 4124.1 | 4748.6 | 7.1195 |
| .016 940 | 4380.1 | 5057.7 | 7.5224 | .013 561 | 4359.1 | 5037.2 | 7.4058 | .011 317 | 4338.2 | 5017.2 | 7.3083 |
| .018 229 | 4594.3 | 5323.5 | 7.6969 | .014 616 | 4572.8 | 5303.6 | 7.5808 | .012 215 | 4551.4 | 5284.3 | 7.4837 |

Table BI-4SI. Cairan terkompresi (satuan SI)

| P = 5 MPa (263.99) | | | | P = 10 MPa (311.06) | | | | P = 15 MPa (342.24) | | | |
|--------------------|----------|----------|----------|---------------------|----------|----------|----------|---------------------|----------|----------|----------|
| <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> |
| .001 285 9 | 1147.8 | 1154.2 | 2.9202 | .001 452 4 | 1393.0 | 1407.6 | 3.3596 | .001 658 1 | 1585.6 | 1610.5 | 3.6848 |
| .000 997 7 | .04 | 5.04 | .0001 | .000 995 2 | .09 | 10.04 | .0002 | .000 992 8 | .15 | 15.05 | .0004 |
| .000 999 5 | 83.65 | 88.65 | .2956 | .000 997 2 | 83.36 | 93.33 | .2945 | .000 995 0 | 83.06 | 97.99 | .2934 |
| .001 005 6 | 166.95 | 171.97 | .5705 | .001 003 4 | 166.35 | 176.38 | .5686 | .001 001 3 | 165.76 | 180.78 | .5666 |
| .001 014 9 | 250.23 | 255.30 | .8285 | .001 012 7 | 249.36 | 259.49 | .8258 | .001 010 5 | 248.51 | 263.67 | .8232 |
| .001 026 8 | 333.72 | 338.85 | 1.0720 | .001 024 5 | 332.59 | 342.83 | 1.0688 | .001 022 2 | 331.48 | 346.81 | 1.0656 |
| .001 041 0 | 417.52 | 422.72 | 1.3030 | .001 038 5 | 416.12 | 426.50 | 1.2992 | .001 036 1 | 414.74 | 430.28 | 1.2955 |
| .001 057 6 | 501.80 | 507.09 | 1.5233 | .001 054 9 | 500.08 | 510.64 | 1.5189 | .001 052 2 | 498.40 | 514.19 | 1.5145 |
| .001 076 8 | 586.76 | 592.15 | 1.7343 | .001 073 7 | 584.68 | 595.42 | 1.7292 | .001 070 7 | 582.66 | 598.72 | 1.7242 |
| .001 098 8 | 672.62 | 678.12 | 1.9375 | .001 095 3 | 670.13 | 681.08 | 1.9317 | .001 091 8 | 667.71 | 684.09 | 1.9260 |
| .001 124 0 | 759.63 | 765.25 | 2.1341 | .001 119 9 | 756.65 | 767.84 | 2.1275 | .001 115 9 | 753.76 | 770.50 | 2.1210 |
| .001 153 0 | 848.1 | 853.9 | 2.3255 | .001 148 0 | 844.5 | 856.0 | 2.3178 | .001 143 3 | 841.0 | 858.2 | 2.3104 |
| .001 186 6 | 938.4 | 944.4 | 2.5128 | .001 180 5 | 934.1 | 945.9 | 2.5039 | .001 174 8 | 929.9 | 947.5 | 2.4953 |
| .001 226 4 | 1031.4 | 1037.5 | 2.6979 | .001 218 7 | 1026.0 | 1038.1 | 2.6872 | .001 211 4 | 1020.8 | 1039.0 | 2.6771 |

| P = 5 MPa (263.99) | | | | P = 10 MPa (311.06) | | | | P = 15 MPa (342.24) | | | |
|--------------------|----------|----------|----------|---------------------|----------|----------|----------|---------------------|----------|----------|----------|
| <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> |
| .001 274 9 | 1127.9 | 1134.3 | 2.8830 | .001 264 5 | 1121.1 | 1133.7 | 2.8699 | .001 255 0 | 1114.6 | 1133.4 | 2.8576 |
| | | | | .001 321 6 | 1220.9 | 1234.1 | 3.0548 | .001 308 4 | 1212.5 | 1232.1 | 3.0393 |
| | | | | .001 397 2 | 1328.4 | 1342.3 | 3.2469 | .001 377 0 | 1316.6 | 1337.3 | 3.2260 |
| | | | | | | | | .001 472 4 | 1431.1 | 1453.2 | 3.4247 |
| | | | | | | | | .001 631 1 | 1567.5 | 1591.9 | 3.6546 |

| P = 20 MPa (365.81) | | | | P = 30 MPa | | | | P = 50 MPa | | | |
|---------------------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|----------|
| <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> |
| .002 036 | 1785.6 | 1826.3 | 4.0139 | .000 985 6 | .25 | 29.82 | .0001 | .000 976 6 | .20 | 49.03 | -.0014 |
| .000 990 4 | .19 | 20.01 | .0004 | .000 988 6 | 82.17 | 111.84 | .2899 | .000 980 4 | 81.00 | 130.02 | .2848 |
| .000 992 8 | 82.77 | 102.62 | .2923 | .000 995 1 | 164.04 | 193.89 | .5607 | .000 987 2 | 161.86 | 211.21 | .5527 |
| .000 999 2 | 165.17 | 185.16 | .5646 | .001 004 2 | 246.06 | 276.19 | .8154 | .000 996 2 | 242.98 | 292.79 | .8052 |
| .001 008 4 | 247.68 | 267.85 | .8206 | .001 015 6 | 328.30 | 358.77 | 1.0561 | .001 007 3 | 324.34 | 374.70 | 1.0440 |
| .001 019 9 | 330.40 | 350.80 | 1.0624 | .001 029 0 | 410.78 | 441.66 | 1.2844 | .001 020 1 | 405.88 | 456.89 | 1.2703 |
| .001 033 7 | 413.39 | 434.06 | 1.2917 | .001 044 5 | 493.59 | 524.93 | 1.5018 | .001 034 8 | 487.65 | 539.39 | 1.4857 |
| .001 049 6 | 496.76 | 517.76 | 1.5102 | .001 062 1 | 576.88 | 608.75 | 1.7098 | .001 051 5 | 569.77 | 622.35 | 1.6915 |
| .001 067 8 | 580.69 | 602.04 | 1.7193 | .001 082 1 | 660.82 | 693.28 | 1.9096 | .001 070 3 | 652.41 | 705.92 | 1.8891 |
| .001 088 5 | 665.35 | 687.12 | 1.9204 | .001 104 7 | 754.59 | 778.73 | 2.1024 | .001 091 2 | 735.69 | 790.25 | 2.0794 |
| .001 112 0 | 750.95 | 773.20 | 2.1147 | .001 130 2 | 831.4 | 865.3 | 2.2893 | .001 114 6 | 819.7 | 875.5 | 2.2634 |
| .001 138 8 | 837.7 | 860.5 | 2.3031 | .001 159 0 | 918.3 | 953.1 | 2.4711 | .001 140 8 | 904.7 | 961.7 | 2.4419 |
| .001 169 3 | 925.9 | 949.3 | 2.4870 | .001 192 0 | 1006.9 | 1042.6 | 2.6490 | .001 170 2 | 990.7 | 1049.2 | 2.6158 |
| .001 204 6 | 1016.0 | 1040.0 | 2.6674 | .001 230 3 | 1097.4 | 1134.3 | 2.8243 | .001 203 4 | 1078.1 | 1138.2 | 2.7860 |
| .001 246 2 | 1108.6 | 1133.5 | 2.8459 | .001 275 5 | 1190.7 | 1229.0 | 2.9986 | .001 241 5 | 1167.2 | 1229.3 | 2.9537 |
| .001 296 5 | 1204.7 | 1230.6 | 3.0248 | .001 330 4 | 1287.9 | 1327.8 | 3.1741 | .001 286 0 | 1258.7 | 1323.0 | 3.1200 |
| .001 359 6 | 1306.1 | 1333.3 | 3.2071 | .001 399 7 | 1390.7 | 1432.7 | 3.3539 | .001 338 8 | 1353.3 | 1420.2 | 3.2868 |
| .001 443 7 | 1415.7 | 1444.6 | 3.3979 | .001 492 0 | 1501.7 | 1546.5 | 3.5426 | .001 403 2 | 1452.0 | 1522.1 | 3.4557 |
| .001 568 4 | 1539.7 | 1571.0 | 3.6075 | .001 626 5 | 1626.6 | 1675.4 | 3.7494 | .001 483 8 | 1556.0 | 1630.2 | 3.6291 |
| .001 822 6 | 1702.8 | 1739.3 | 3.8772 | .001 869 1 | 1781.4 | 1837.5 | 4.0012 | .001 588 4 | 1667.2 | 1746.6 | 3.8101 |

Table B1-5SI. Padat jenuh - uap jenuh (satuannya SI)

| p | Specific Volume | | | Internal Energy | | | Enthalpy | | | Entropy | | |
|-------|--------------------|------------------------------------|--------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-----------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-------------------|------------------------|
| | Press. kPa P | Sat. Solid $v_f \times 10^3$ | Sat. Vapor v | Sat. Solid u_f | Subl. u_{fg} | Sat. Vapor u_g | Sat Solid h_f | Subl. h_{fg} | Sat. Vapor h_g | Sat. Solid s_f | Subl. s_{fg} | Sat. Vapor s_g |
| .6113 | 1.0908 | 206.1 | -333.40 | 2708.7 | 2375.3 | -330.40 | 2834.8 | 2501.4 | -1.221 | 10.378 | 9.156 | |
| .6108 | 1.0908 | 206.3 | -333.43 | 2708.8 | 2375.3 | -333.43 | 2834.8 | 2501.3 | -1.221 | 10.378 | 9.157 | |
| .5176 | 1.0904 | 241.7 | -337.62 | 2710.2 | 2372.6 | -337.62 | 2835.3 | 2497.7 | -1.237 | 10.456 | 9.219 | |
| .4375 | 1.0901 | 283.8 | -341.78 | 2711.6 | 2369.8 | -341.78 | 2835.7 | 2494.0 | -1.253 | 10.536 | 9.283 | |
| .3689 | 1.0898 | 334.2 | -345.91 | 2712.9 | 2367.0 | -345.91 | 2836.2 | 2490.3 | -1.268 | 10.616 | 9.348 | |
| .3102 | 1.0894 | 394.4 | -350.02 | 2714.2 | 2364.2 | -350.02 | 2836.6 | 2486.6 | -1.284 | 10.698 | 9.414 | |
| .2602 | 1.0891 | 466.7 | -354.09 | 2715.5 | 2361.4 | -354.09 | 2837.0 | 2482.9 | -1.299 | 10.781 | 9.481 | |
| .2176 | 1.0888 | 553.7 | -358.14 | 2716.8 | 2358.7 | -358.14 | 2837.3 | 2479.2 | -1.315 | 10.865 | 9.550 | |
| .1815 | 1.0884 | 658.8 | -362.15 | 2718.0 | 2355.9 | -362.15 | 2837.6 | 2475.5 | -1.331 | 10.950 | 9.619 | |
| .1510 | 1.0881 | 786.0 | -366.14 | 2719.2 | 2353.1 | -366.14 | 2837.9 | 2471.8 | -1.346 | 11.036 | 9.690 | |
| .1252 | 1.0878 | 940.5 | -370.10 | 2720.4 | 2350.3 | -370.10 | 2838.2 | 2468.1 | -1.362 | 11.123 | 9.762 | |
| .1035 | 1.0874 | 1128.6 | -374.03 | 2721.6 | 2347.5 | -374.03 | 2838.4 | 2464.3 | -1.377 | 11.212 | 9.835 | |
| .0853 | 1.0871 | 1358.4 | -377.93 | 2722.7 | 2344.7 | -377.93 | 2838.6 | 2460.6 | -1.393 | 11.302 | 9.909 | |
| .0701 | 1.0868 | 1640.1 | -381.80 | 2723.7 | 2342.0 | -381.80 | 2838.7 | 2456.9 | -1.408 | 11.394 | 9.965 | |
| .0574 | 1.0864 | 1986.4 | -385.64 | 2724.8 | 2339.2 | -385.64 | 2838.9 | 2453.2 | -1.424 | 11.486 | 10.0 | |
| .0469 | 1.0861 | 2413.7 | -389.45 | 2725.8 | 2336.4 | -389.45 | 2839.0 | 2449.5 | -1.439 | 11.580 | 10.141 | |
| .0381 | 1.0858 | 2943 | -393.23 | 2726.8 | 2333.6 | -393.23 | 2839.0 | 2445.8 | -1.455 | 11.676 | 10.221 | |
| .0309 | 1.0854 | 3600 | -396.98 | 2727.8 | 2330.8 | -396.98 | 2839.1 | 2442.1 | -1.471 | 11.773 | 10.303 | |
| .0250 | 1.0851 | 4419 | -400.71 | 2728.7 | 2328.0 | -400.71 | 2839.1 | 2438.4 | -1.486 | 11.872 | 10.386 | |
| .0201 | 1.0848 | 5444 | -404.40 | 2729.6 | 2325.2 | -404.40 | 2839.1 | 2434.7 | -1.501 | 11.972 | 10.470 | |
| .0161 | 1.0844 | 6731 | -408.06 | 2730.5 | 2322.4 | -408.06 | 2839.0 | 2430.9 | -1.517 | 12.073 | 10.556 | |
| .0129 | 1.0841 | 8354 | -411.70 | 2731.3 | 2319.6 | -411.70 | 2838.9 | 2427.2 | -1.532 | 12.176 | 10.644 | |

Tabel B1-E. Sifat-sifat Termodinamis Uap (satuan keteknikan)

Tabel B1-IE Uap terjenuhkan : tabel Suhu (satuan keteknikan)

| p. | Tek. psi p | Volume jenis ft ³ /lbm | | Tenaga dalam Btu/lbm | | | Entalpi Btu/lbm | | | Entropi Btu/lbm | | |
|----------|------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| | | cairan jenuh v _f | uap jenuh v _g | cairan jenuh u _f | peng uapan u _{fg} | uap jenuh u _g | cairan jenuh h _f | peng uapan h _{fg} | uap jenuh h _g | cairan jenuh s _f | peng uapan s _{fg} | uap jenuh s _g |
| | | 0.088 66 | 0.016 022 | 3302 | 0.00 | 1021.2 | 1021.2 | 0.01 | 1075.4 | 1075.4 | 0.000 00 | 2.1869 |
| 0.099 92 | 0.016 021 | 2948 | 2.99 | 1019.2 | 1022.2 | 3.00 | 1073.7 | 1076.7 | 0.006 07 | 2.1704 | 2.1764 | |
| 0.121 66 | 0.016 020 | 2445 | 8.02 | 1015.8 | 1023.9 | 8.02 | 1070.9 | 1078.9 | 0.016 17 | 2.1430 | 2.1592 | |
| 0.147 48 | 0.016 021 | 2037 | 13.04 | 1012.5 | 1025.5 | 13.04 | 1068.1 | 1081.1 | 0.026 18 | 2.1162 | 2.1423 | |
| 0.178 03 | 0.016 024 | 1704.2 | 18.06 | 1009.1 | 1027.2 | 18.06 | 1065.2 | 1083.3 | 0.036 07 | 2.0899 | 2.1259 | |
| 0.2563 | 0.016 035 | 1206.9 | 28.08 | 1002.4 | 1030.4 | 28.08 | 1059.6 | 1087.7 | 0.055 55 | 2.0388 | 2.0943 | |
| 0.3632 | 0.016 051 | 867.7 | 38.09 | 995.6 | 1033.7 | 38.09 | 1054.0 | 1092.0 | 0.074 63 | 1.9896 | 2.0642 | |
| 0.5073 | 0.016 073 | 632.8 | 48.08 | 988.9 | 1037.0 | 48.09 | 1048.3 | 1096.4 | 0.093 32 | 1.9423 | 2.0356 | |
| 0.6988 | 0.016 099 | 467.7 | 58.07 | 982.2 | 1040.2 | 58.07 | 1042.7 | 1100.7 | 0.111 65 | 1.8966 | 2.0083 | |
| 0.9503 | 0.016 130 | 350.0 | 68.04 | 975.4 | 1043.5 | 68.05 | 1037.0 | 1105.0 | 0.129 63 | 1.8526 | 1.9822 | |
| 1.2763 | 0.016 166 | 265.1 | 78.02 | 968.7 | 1046.7 | 78.02 | 1031.3 | 1109.3 | 0.147 30 | 1.8101 | 1.9574 | |
| 1.6945 | 0.016 205 | 203.0 | 87.99 | 961.9 | 1049.9 | 88.00 | 1025.5 | 1113.5 | 0.164 65 | 1.7690 | 1.9336 | |
| 2.225 | 0.016 247 | 157.17 | 97.97 | 955.1 | 1053.0 | 97.98 | 1019.8 | 1117.8 | 0.181 72 | 1.7292 | 1.9109 | |
| 2.892 | 0.016 293 | 122.88 | 107.95 | 948.2 | 1056.2 | 107.96 | 1014.0 | 1121.9 | 0.198 51 | 1.6907 | 1.8892 | |
| 3.722 | 0.016 343 | 96.99 | 117.95 | 941.3 | 1059.3 | 117.96 | 1008.1 | 1126.1 | 0.215 03 | 1.6533 | 1.8684 | |
| 4.745 | 0.016 395 | 77.23 | 127.94 | 934.4 | 1062.3 | 127.96 | 1002.2 | 1130.1 | 0.231 30 | 1.6171 | 1.8484 | |
| 5.996 | 0.016 450 | 62.02 | 137.95 | 927.4 | 1065.4 | 137.97 | 996.2 | 1134.2 | 0.247 32 | 1.5819 | 1.8293 | |
| 7.515 | 0.016 509 | 50.20 | 147.97 | 920.4 | 1068.3 | 147.99 | 990.2 | 1138.2 | 0.263 11 | 1.5478 | 1.8109 | |
| 9.343 | 0.016 570 | 40.95 | 158.00 | 913.3 | 1071.3 | 158.03 | 984.1 | 1142.1 | 0.278 66 | 1.5146 | 1.7932 | |
| 11.529 | 0.016 634 | 33.63 | 168.04 | 906.2 | 1074.2 | 168.07 | 977.9 | 1145.9 | 0.294 00 | 1.4822 | 1.7762 | |
| 14.125 | 0.016 702 | 27.82 | 178.10 | 898.9 | 1077.0 | 178.14 | 971.6 | 1149.7 | 0.309 13 | 1.4508 | 1.7599 | |
| 14.698 | 0.016 716 | 26.80 | 180.11 | 897.5 | 1077.6 | 180.16 | 970.3 | 1150.5 | 0.312 13 | 1.4446 | 1.7567 | |
| 17.188 | 0.016 772 | 23.15 | 188.17 | 891.7 | 1079.8 | 188.22 | 965.3 | 1153.5 | 0.324 06 | 1.4201 | 1.7441 | |
| 20.78 | 0.016 845 | 19.386 | 198.26 | 884.3 | 1082.6 | 198.32 | 958.8 | 1157.1 | 0.338 80 | 1.3901 | 1.7289 | |
| 24.97 | 0.016 922 | 16.327 | 208.36 | 876.9 | 1085.3 | 208.44 | 952.3 | 1160.7 | 0.353 35 | 1.3609 | 1.7143 | |
| 29.82 | 0.017 001 | 13.826 | 218.49 | 869.4 | 1087.9 | 218.59 | 945.6 | 1164.2 | 0.367 72 | 1.3324 | 1.7001 | |
| 35.42 | 0.017 084 | 11.768 | 228.64 | 861.8 | 1090.5 | 228.76 | 938.8 | 1167.6 | 0.381 93 | 1.3044 | 1.6864 | |
| 41.85 | 0.017 170 | 10.066 | 238.82 | 854.1 | 1093.0 | 238.95 | 932.0 | 1170.9 | 0.395 97 | 1.2771 | 1.6731 | |
| 49.18 | 0.017 259 | 8.650 | 249.02 | 846.3 | 1095.4 | 249.18 | 924.9 | 1174.1 | 0.409 86 | 1.2504 | 1.6602 | |
| 57.53 | 0.017 352 | 7.467 | 259.25 | 838.5 | 1097.7 | 259.44 | 917.8 | 1177.2 | 0.423 60 | 1.2241 | 1.6477 | |
| 66.98 | 0.017 448 | 6.472 | 269.52 | 830.5 | 1100.0 | 269.73 | 910.4 | 1180.2 | 0.437 20 | 1.1984 | 1.6356 | |
| 77.64 | 0.017 548 | 5.632 | 279.81 | 822.3 | 1102.1 | 280.06 | 903.0 | 1183.0 | 0.450 67 | 1.1731 | 1.6238 | |
| 89.60 | 0.017 652 | 4.919 | 290.14 | 814.1 | 1104.2 | 290.43 | 895.3 | 1185.8 | 0.464 00 | 1.1483 | 1.6123 | |
| 103.00 | 0.017 760 | 4.312 | 300.51 | 805.7 | 1106.2 | 300.84 | 887.5 | 1188.4 | 0.477 22 | 1.1238 | 1.6010 | |

Table B1-1E Uap terjenuhkan : tabel Suhu (satuan keteknikian)

| Tek. psi | Volume jenis ft ³ /lbm | | Tenaga dalam Btu/lbm | | | Entalpi Btu/lbm | | | Entropi Btu/lbm | | |
|-------------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| | cairan jenuh v _f | uap jenuh v _g | cairan jenuh u _f | peng uapan u _{fg} | uap jenuh u _g | cairan jenuh h _f | peng uapan h _{fg} | uap jenuh h _g | cairan jenuh s _f | peng uapan s _{fg} | uap jenuh s _g |
| 117.93 | 0.017 872 | 3.792 | 310.91 | 797.1 | 1108.0 | 311.30 | 879.5 | 1190.8 | 0.490 31 | 1.0997 | 1.5901 |
| 134.53 | 0.017 988 | 3.346 | 321.35 | 788.4 | 1109.8 | 321.80 | 871.3 | 1193.1 | 0.503 29 | 1.0760 | 1.5793 |
| 152.92 | 0.018 108 | 2.961 | 331.84 | 779.6 | 1111.4 | 332.35 | 862.9 | 1195.2 | 0.516 17 | 1.0526 | 1.5688 |
| 173.23 | 0.018 233 | 2.628 | 342.37 | 770.6 | 1112.9 | 342.96 | 854.2 | 1197.2 | 0.528 94 | 1.0295 | 1.5585 |
| 195.60 | 0.018 363 | 2.339 | 352.95 | 761.4 | 1114.3 | 353.62 | 845.4 | 1199.0 | 0.541 63 | 1.0067 | 1.5483 |
| 220.2 | 0.018 498 | 2.087 | 363.58 | 752.0 | 1115.6 | 364.34 | 836.2 | 1200.6 | 0.554 22 | 0.9841 | 1.5383 |
| 247.1 | 0.018 638 | 1.8661 | 374.27 | 742.4 | 1116.6 | 375.12 | 826.8 | 1202.0 | 0.566 72 | 0.9617 | 1.5284 |
| 276.5 | 0.018 784 | 1.6726 | 385.01 | 732.6 | 1117.6 | 385.97 | 817.2 | 1203.1 | 0.579 16 | 0.9395 | 1.5187 |
| 308.5 | 0.018 936 | 1.5024 | 395.81 | 722.5 | 1118.3 | 396.89 | 807.2 | 1204.1 | 0.591 52 | 0.9175 | 1.5091 |
| 343.3 | 0.019 094 | 1.3521 | 406.68 | 712.2 | 1118.9 | 407.89 | 796.9 | 1204.8 | 0.603 81 | 0.8957 | 1.4995 |
| 381.2 | 0.019 260 | 1.2192 | 417.62 | 701.7 | 1119.3 | 418.98 | 786.3 | 1205.3 | 0.616 05 | 0.8740 | 1.4900 |
| 422.1 | 0.019 433 | 1.1011 | 428.6 | 690.9 | 1119.5 | 430.2 | 775.4 | 1205.6 | 0.6282 | 0.8523 | 1.4806 |
| 466.3 | 0.019 614 | 0.9961 | 439.7 | 679.8 | 1119.6 | 441.4 | 764.1 | 1205.5 | 0.6404 | 0.8308 | 1.4712 |
| 514.1 | 0.019 803 | 0.9025 | 450.9 | 668.4 | 1119.4 | 452.8 | 752.4 | 1205.2 | 0.6525 | 0.8093 | 1.4618 |
| 565.5 | 0.020 002 | 0.8187 | 462.2 | 656.7 | 1118.9 | 464.3 | 740.3 | 1204.6 | 0.6646 | 0.7878 | 1.4524 |
| 620.7 | 0.020 211 | 0.7436 | 473.6 | 644.7 | 1118.3 | 475.9 | 727.8 | 1203.7 | 0.6767 | 0.7663 | 1.4430 |
| 680.0 | 0.020 43 | 0.6761 | 485.1 | 632.3 | 1117.4 | 487.7 | 714.8 | 1202.5 | 0.6888 | 0.7448 | 1.4335 |
| 811.4 | 0.020 91 | 0.5605 | 508.5 | 606.2 | 1114.8 | 511.7 | 687.3 | 1198.9 | 0.7130 | 0.7015 | 1.4145 |
| 961.5 | 0.021 45 | 0.4658 | 532.6 | 578.4 | 1111.0 | 536.4 | 657.5 | 1193.8 | 0.7374 | 0.6576 | 1.3950 |
| 1131.8 | 0.022 07 | 0.3877 | 557.4 | 548.4 | 1105.8 | 562.0 | 625.0 | 1187.0 | 0.7620 | 0.6129 | 1.3749 |
| 1324.3 | 0.022 78 | 0.3225 | 583.1 | 515.9 | 1098.9 | 588.6 | 589.3 | 1178.0 | 0.7872 | 0.5668 | 1.3540 |
| 1541.0 | 0.023 63 | 0.2677 | 609.9 | 480.1 | 1090.0 | 616.7 | 549.7 | 1166.4 | 0.8130 | 0.5187 | 1.3317 |
| 1784.4 | 0.024 65 | 0.2209 | 638.3 | 440.2 | 1078.5 | 646.4 | 505.0 | 1151.4 | 0.8398 | 0.4677 | 1.3075 |
| 2057.1 | 0.025 93 | 0.1805 | 668.7 | 394.5 | 1063.2 | 678.6 | 453.4 | 1131.9 | 0.8681 | 0.4122 | 1.2803 |
| 2362 | 0.027 67 | 0.144 59 | 702.3 | 340.0 | 1042.3 | 714.4 | 391.1 | 1105.5 | 0.8990 | 0.3493 | 1.2483 |
| 2705 | 0.030 32 | 0.111 27 | 741.7 | 269.3 | 1011.0 | 756.9 | 309.8 | 1066.7 | 0.9350 | 0.2718 | 1.2068 |
| 3090 | 0.036 66 | 0.074 38 | 801.7 | 145.9 | 947.7 | 822.7 | 167.5 | 990.2 | 0.9902 | 0.1444 | 1.1346 |
| 3204 | 0.050 53 | 0.050 53 | 872.6 | 0 | 872.6 | 902.5 | 0 | 902.5 | 1.0580 | 0 | 1.0580 |

Tabel B1-2E. Uap terjenuhkan : tabel tekanan (satuan keteknikian)

| Temp. °F | Volume jenis ft ³ /lbm | | Tenaga dalam Btu/lbm | | | Entalpi Btu/lbm | | | Entropi Btu/lbm | | |
|-------------|--------------------------------------|--------------|-------------------------|---------------|--------------|--------------------|---------------|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| | cairan jenuh | uap jenuh | cairan jenuh | peng uapan | uap jenuh | cairan jenuh | peng uapan | uap jenuh | cairan jenuh | peng uapan | uap jenuh |
| | v_f | v_g | u_f | u_{fg} | u_g | h_f | h_{fg} | h_g | s_f | s_{fg} | s_g |
| 101.70 | 0.016 136 | 333.6 | 69.74 | 974.3 | 1044.0 | 69.74 | 1036.0 | 1105.8 | 0.132 66 | 1.8453 | 1.9779 |
| 126.04 | 0.016 230 | 173.75 | 94.02 | 957.8 | 1051.8 | 94.02 | 1022.1 | 1116.1 | 0.174 99 | 1.7448 | 1.9198 |
| 141.43 | 0.016 300 | 118.72 | 109.38 | 947.2 | 1056.6 | 109.39 | 1013.1 | 1122.5 | 0.200 89 | 1.6852 | 1.8861 |
| 152.93 | 0.016 358 | 90.64 | 120.88 | 939.3 | 1060.2 | 120.89 | 1006.4 | 1127.3 | 0.219 83 | 1.6426 | 1.8624 |
| 162.21 | 0.016 407 | 73.53 | 130.15 | 932.9 | 1063.0 | 130.17 | 1000.9 | 1131.0 | 0.234 86 | 1.6093 | 1.8441 |
| 170.03 | 0.016 451 | 61.98 | 137.98 | 927.4 | 1065.4 | 138.00 | 996.2 | 1134.2 | 0.247 36 | 1.5819 | 1.8292 |
| 182.84 | 0.016 526 | 47.35 | 150.81 | 918.4 | 1069.2 | 150.84 | 988.4 | 1139.3 | 0.267 54 | 1.5383 | 1.8058 |
| 193.19 | 0.016 590 | 38.42 | 161.20 | 911.0 | 1072.2 | 161.23 | 982.1 | 1143.3 | 0.283 58 | 1.5041 | 1.7877 |
| 211.99 | 0.016 715 | 26.80 | 180.10 | 897.5 | 1077.6 | 180.15 | 970.4 | 1150.5 | 0.312 12 | 1.4446 | 1.7567 |
| 213.03 | 0.016 723 | 26.29 | 181.14 | 896.8 | 1077.9 | 181.19 | 969.7 | 1150.9 | 0.313 67 | 1.4414 | 1.7551 |
| 227.96 | 0.016 830 | 20.09 | 196.19 | 885.8 | 1082.0 | 196.26 | 960.1 | 1156.4 | 0.335 80 | 1.3962 | 1.7320 |
| 240.08 | 0.016 922 | 16.306 | 208.44 | 876.9 | 1085.3 | 208.52 | 952.2 | 1160.7 | 0.353 45 | 1.3607 | 1.7142 |
| 250.34 | 0.017 004 | 13.748 | 218.84 | 869.2 | 1088.0 | 218.93 | 945.4 | 1164.3 | 0.368 21 | 1.3314 | 1.6996 |
| 259.30 | 0.017 073 | 11.900 | 227.93 | 862.4 | 1090.3 | 228.04 | 939.3 | 1167.4 | 0.380 93 | 1.3064 | 1.6873 |
| 267.26 | 0.017 146 | 10.501 | 236.03 | 856.2 | 1092.3 | 236.16 | 933.8 | 1170.0 | 0.392 14 | 1.2845 | 1.6767 |
| 274.46 | 0.017 209 | 9.403 | 243.37 | 850.7 | 1094.0 | 243.51 | 928.8 | 1172.3 | 0.402 18 | 1.2651 | 1.6673 |
| 281.03 | 0.017 269 | 8.518 | 250.08 | 845.5 | 1095.6 | 250.24 | 924.2 | 1174.4 | 0.411 29 | 1.2476 | 1.6589 |
| 287.10 | 0.017 325 | 7.789 | 256.28 | 840.8 | 1097.0 | 256.46 | 919.9 | 1176.3 | 0.419 63 | 1.2317 | 1.6513 |
| 292.73 | 0.017 378 | 7.177 | 262.06 | 836.3 | 1098.3 | 262.25 | 915.8 | 1178.0 | 0.427 33 | 1.2170 | 1.6444 |
| 298.00 | 0.017 429 | 6.657 | 267.46 | 832.1 | 1099.5 | 267.67 | 911.9 | 1179.6 | 0.434 50 | 1.2035 | 1.6380 |
| 302.96 | 0.017 478 | 6.209 | 272.56 | 828.1 | 1100.6 | 272.79 | 908.3 | 1181.0 | 0.441 20 | 1.1909 | 1.6321 |
| 307.63 | 0.017 524 | 5.818 | 277.37 | 824.3 | 1101.6 | 277.61 | 904.8 | 1182.4 | 0.447 49 | 1.1790 | 1.6265 |
| 312.07 | 0.017 570 | 5.474 | 281.95 | 820.6 | 1102.6 | 282.21 | 901.4 | 1183.6 | 0.453 44 | 1.1679 | 1.6214 |
| 316.29 | 0.017 613 | 5.170 | 286.30 | 817.1 | 1103.5 | 286.58 | 898.2 | 1184.8 | 0.459 07 | 1.1574 | 1.6165 |
| 320.31 | 0.017 655 | 4.898 | 290.46 | 813.8 | 1104.3 | 290.76 | 895.1 | 1185.9 | 0.464 42 | 1.1475 | 1.6119 |
| 324.16 | 0.017 696 | 4.654 | 294.45 | 810.6 | 1105.0 | 294.76 | 892.1 | 1186.9 | 0.469 52 | 1.1380 | 1.6076 |
| 327.86 | 0.017 736 | 4.434 | 298.28 | 807.5 | 1105.8 | 298.61 | 889.2 | 1187.8 | 0.474 39 | 1.1290 | 1.6034 |
| 334.82 | 0.017 813 | 4.051 | 305.52 | 801.6 | 1107.1 | 305.88 | 883.7 | 1189.6 | 0.483 55 | 1.1122 | 1.5957 |
| 341.30 | 0.017 886 | 3.730 | 312.27 | 796.0 | 1108.3 | 312.67 | 878.5 | 1191.1 | 0.492 01 | 1.0966 | 1.5886 |
| 347.37 | 0.017 957 | 3.457 | 318.61 | 790.7 | 1109.4 | 319.04 | 873.5 | 1192.5 | 0.499 89 | 1.0822 | 1.5821 |
| 353.08 | 0.018 024 | 3.221 | 324.58 | 785.7 | 1110.3 | 325.05 | 868.7 | 1193.8 | 0.507 27 | 1.0688 | 1.5761 |
| 358.48 | 0.018 089 | 3.016 | 330.24 | 781.0 | 1111.2 | 330.75 | 864.2 | 1194.9 | 0.514 22 | 1.0562 | 1.5704 |
| 363.60 | 0.018 152 | 2.836 | 335.63 | 776.4 | 1112.0 | 336.16 | 859.8 | 1196.0 | 0.520 78 | 1.0443 | 1.5651 |
| 368.47 | 0.018 214 | 2.676 | 340.76 | 772.0 | 1112.7 | 341.33 | 855.6 | 1196.9 | 0.527 00 | 1.0330 | 1.5600 |
| 373.13 | 0.018 273 | 2.533 | 345.68 | 767.7 | 1113.4 | 346.29 | 851.5 | 1197.8 | 0.532 92 | 1.0223 | 1.5553 |
| 377.59 | 0.018 331 | 2.405 | 350.39 | 763.6 | 1114.0 | 351.04 | 847.5 | 1198.6 | 0.538 57 | 1.0122 | 1.5507 |
| 381.86 | 0.018 387 | 2.289 | 354.9 | 759.6 | 1114.6 | 355.6 | 843.7 | 1199.3 | 0.5440 | 1.0025 | 1.5464 |

| Temp. °F | Volume jenis ft ³ /lbm | | Tenaga dalam Btu/lbm | | | Entalpi Btu/lbm | | | Entropi Btu/lbm | | |
|-------------|--------------------------------------|----------------|-------------------------|-----------------|----------------|--------------------|-----------------|----------------|--------------------|-----------------|----------------|
| | cairan jenuh | uap jenuh | cairan jenuh | peng uapan | uap jenuh | cairan jenuh | peng uapan | uap jenuh | cairan jenuh | peng uapan | uap jenuh |
| | v _f | v _g | u _f | u _{fg} | u _g | h _f | h _{fg} | h _g | s _f | s _{fg} | s _g |
| 401.04 | 0.018 653 | 1.8448 | 375.4 | 741.4 | 1116.7 | 376.2 | 825.8 | 1202.1 | 0.5680 | 0.9594 | 1.5274 |
| 417.43 | 0.018 896 | 1.5442 | 393.0 | 725.1 | 1118.2 | 394.1 | 809.8 | 1203.9 | 0.5883 | 0.9232 | 1.5115 |
| 431.82 | 0.019 124 | 1.3267 | 408.7 | 710.3 | 1119.0 | 409.9 | 795.0 | 1204.9 | 0.6060 | 0.8917 | 1.4978 |
| 444.70 | 0.019 340 | 1.1620 | 422.8 | 696.7 | 1119.5 | 424.2 | 781.2 | 1205.5 | 0.6218 | 0.8638 | 1.4856 |
| 456.39 | 0.019 547 | 1.0326 | 435.7 | 683.9 | 1119.6 | 437.4 | 768.2 | 1205.6 | 0.6360 | 0.8385 | 1.4746 |
| 467.13 | 0.019 748 | 0.9283 | 447.7 | 671.7 | 1119.4 | 449.5 | 755.8 | 1205.3 | 0.6490 | 0.8154 | 1.4645 |
| 477.07 | 0.019 943 | 0.8423 | 458.9 | 660.2 | 1119.1 | 460.9 | 743.9 | 1204.8 | 0.6611 | 0.7941 | 1.4551 |
| 486.33 | 0.020 13 | 0.7702 | 469.4 | 649.1 | 1118.6 | 471.7 | 732.4 | 1204.1 | 0.6723 | 0.7742 | 1.4464 |
| 503.23 | 0.020 51 | 0.6558 | 488.9 | 628.2 | 1117.0 | 491.5 | 710.5 | 1202.0 | 0.6927 | 0.7378 | 1.4305 |
| 518.36 | 0.020 87 | 0.5691 | 506.6 | 608.4 | 1115.0 | 509.7 | 689.6 | 1199.3 | 0.7110 | 0.7050 | 1.4160 |
| 532.12 | 0.021 23 | 0.5009 | 523.0 | 589.6 | 1112.6 | 526.6 | 669.5 | 1196.0 | 0.7277 | 0.6750 | 1.4207 |
| 544.75 | 0.021 59 | 0.4459 | 538.4 | 571.5 | 1109.9 | 542.4 | 650.0 | 1192.4 | 0.7432 | 0.6471 | 1.3903 |
| 567.37 | 0.022 32 | 0.3623 | 566.7 | 536.8 | 1103.5 | 571.7 | 612.3 | 1183.9 | 0.7712 | 0.5961 | 1.367 |
| 587.25 | 0.023 07 | 0.3016 | 592.7 | 503.3 | 1096.0 | 598.6 | 575.5 | 1174.1 | 0.7964 | 0.5497 | 1.3461 |
| 605.06 | 0.023 86 | 0.2552 | 616.9 | 470.5 | 1087.4 | 624.0 | 538.9 | 1162.9 | 0.8196 | 0.5062 | 1.3258 |
| 621.21 | 0.024 72 | 0.2183 | 640.0 | 437.6 | 1077.7 | 648.3 | 502.1 | 1150.4 | 0.8414 | 0.4645 | 1.3060 |
| 636.00 | 0.025 65 | 0.18813 | 662.4 | 404.2 | 1066.6 | 671.9 | 464.4 | 1136.3 | 0.8623 | 0.4238 | 1.2861 |
| 668.31 | 0.028 60 | 0.13059 | 717.7 | 313.4 | 1031.0 | 730.9 | 360.5 | 1091.4 | 0.9131 | 0.3196 | 1.2327 |
| 695.52 | 0.034 31 | 0.08404 | 783.4 | 185.4 | 968.8 | 802.5 | 213.0 | 1015.5 | 0.9732 | 0.1843 | 1.1575 |
| 705.44 | 0.050 53 | 0.05053 | 872.6 | 0 | 872.6 | 902.5 | 0 | 902.5 | 1.0580 | 0 | 1.0580 |

kel B1-3E. Uap lewat panas (Satuan keteknikan)

| <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> |
|----------------------------|----------|----------|----------|-------------------------|----------|----------|----------|--------------------------|----------|----------|----------|
| P = 1.0 (101.70) | | | | P = 5.0 (162.21) | | | | P = 10.0 (193.19) | | | |
| 333.6 | 1044.0 | 1105.8 | 1.9779 | 73.53 | 1063.0 | 1131.0 | 1.8441 | 38.42 | 1072.2 | 1143.3 | 1.7877 |
| 392.5 | 1077.5 | 1150.1 | 2.0508 | 78.15 | 1076.3 | 1148.6 | 1.8715 | 38.85 | 1074.7 | 1146.6 | 1.7927 |
| 416.4 | 1091.2 | 1168.3 | 2.0775 | 83.00 | 1090.3 | 1167.1 | 1.8987 | 41.32 | 1089.0 | 1165.5 | 1.8205 |
| 440.3 | 1105.0 | 1186.5 | 2.1028 | 87.83 | 1104.3 | 1185.5 | 1.9144 | 43.77 | 1103.3 | 1184.3 | 1.8467 |
| 464.2 | 1118.9 | 1204.8 | 2.1269 | 92.64 | 1118.3 | 1204.0 | 1.9487 | 46.20 | 1117.6 | 1203.1 | 1.8714 |
| 488.1 | 1132.9 | 1223.2 | 2.1500 | 97.45 | 1132.4 | 1222.6 | 1.9719 | 48.62 | 1131.8 | 1221.8 | 1.8948 |
| 511.9 | 1147.0 | 1241.8 | 2.1720 | 102.24 | 1146.6 | 1241.2 | 1.9941 | 51.03 | 1146.1 | 1240.5 | 1.9171 |
| 535.8 | 1161.2 | 1260.4 | 2.1932 | 107.03 | 1160.9 | 1259.9 | 2.0154 | 53.44 | 1160.5 | 1259.3 | 1.9385 |
| 571.5 | 1182.8 | 1288.5 | 2.2235 | 114.20 | 1182.5 | 1288.2 | 2.0458 | 57.04 | 1182.2 | 1287.7 | 1.9690 |
| 631.1 | 1219.3 | 1336.1 | 2.2706 | 126.15 | 1219.1 | 1335.8 | 2.0930 | 63.03 | 1218.9 | 1335.5 | 2.0164 |
| 690.7 | 1256.7 | 1384.5 | 2.3142 | 138.08 | 1256.5 | 1384.3 | 2.1367 | 69.01 | 1256.3 | 1384.0 | 2.0601 |
| 750.3 | 1294.9 | 1433.7 | 2.3550 | 150.01 | 1294.7 | 1433.5 | 2.1775 | 74.98 | 1294.6 | 1433.3 | 2.1009 |
| 869.5 | 1373.9 | 1534.8 | 2.4294 | 173.86 | 1373.9 | 1534.7 | 2.2520 | 86.91 | 1373.8 | 1534.6 | 2.1755 |
| 988.6 | 1456.7 | 1639.6 | 2.4967 | 197.70 | 1456.6 | 1639.5 | 2.3192 | 98.84 | 1456.5 | 1539.4 | 2.2428 |
| 1107.7 | 1543.1 | 1748.1 | 2.5584 | 221.54 | 1543.1 | 1748.1 | 2.3810 | 110.76 | 1543.0 | 1748.0 | 2.3045 |
| P = 14.696 (211.99) | | | | P = 20 (227.96) | | | | P = 40 (267.26) | | | |
| 26.80 | 1077.6 | 1150.5 | 1.7567 | 20.09 | 1082.0 | 1156.4 | 1.7320 | 10.501 | 1092.3 | 1170.0 | 1.6767 |
| 28.00 | 1087.9 | 1164.0 | 1.7764 | 20.47 | 1086.5 | 1162.3 | 1.7405 | | | | |
| 29.69 | 1102.4 | 1183.1 | 1.8030 | 21.73 | 1101.4 | 1181.8 | 1.7676 | 10.711 | 1097.3 | 1176.6 | 1.1657 |
| 31.36 | 1116.8 | 1202.1 | 1.8280 | 22.98 | 1116.0 | 1201.0 | 1.7930 | 11.360 | 1112.8 | 1196.9 | 1.7124 |
| 33.02 | 1131.2 | 1221.0 | 1.8030 | 24.21 | 1130.6 | 1220.1 | 1.8168 | 11.996 | 1128.0 | 1216.8 | 1.7373 |
| 34.67 | 1145.6 | 1239.9 | 1.8741 | 25.43 | 1145.1 | 1239.2 | 1.8395 | 12.623 | 1143.0 | 1236.4 | 1.7606 |
| 36.31 | 1160.1 | 1258.8 | 1.8956 | 26.64 | 1159.6 | 1258.2 | 1.8611 | 13.243 | 1157.8 | 1255.8 | 1.7828 |
| 38.77 | 1181.8 | 1287.3 | 1.9263 | 28.46 | 1181.5 | 1286.8 | 1.8919 | 14.164 | 1180.1 | 1284.9 | 1.8140 |
| 42.86 | 1218.6 | 1335.2 | 1.9737 | 31.47 | 1218.4 | 1334.8 | 1.9395 | 15.685 | 1217.3 | 1333.4 | 1.8621 |
| 46.93 | 1256.1 | 1383.8 | 2.0175 | 34.47 | 1255.9 | 1383.5 | 1.9834 | 17.196 | 1255.1 | 1382.4 | 1.9063 |
| 51.00 | 1294.4 | 1433.1 | 2.0584 | 37.46 | 1294.3 | 1432.9 | 2.0243 | 18.701 | 1293.7 | 1432.1 | 1.9474 |
| 59.13 | 1373.7 | 1534.5 | 2.1330 | 43.44 | 1373.5 | 1534.3 | 2.0989 | 21.70 | 1373.1 | 1533.8 | 2.0223 |
| 67.25 | 1456.5 | 1639.3 | 2.2003 | 49.41 | 1456.4 | 1639.2 | 2.1663 | 24.69 | 1456.1 | 1638.9 | 2.0897 |
| 75.36 | 1543.0 | 1747.9 | 2.2621 | 55.37 | 1542.9 | 1747.9 | 2.2281 | 27.68 | 1542.7 | 1747.6 | 2.1515 |
| 83.47 | 1633.2 | 1860.2 | 2.3194 | 61.33 | 1633.2 | 1860.1 | 2.2854 | 30.66 | 1633.0 | 1859.9 | 2.2089 |

| P = 60 (292.73) | | | | P = 80 (312.07) | | | | P = 100 (327.86) | | | |
|------------------|--------|--------|--------|------------------|--------|--------|--------|------------------|--------|--------|--------|
| 7.177 | 1098.3 | 1178.0 | 1.6444 | 5.474 | 1102.6 | 1183.6 | 1.6214 | 4.434 | 1105.8 | 1187.8 | 1.6259 |
| 7.485 | 1109.5 | 1192.6 | 1.6634 | 5.544 | 1106.0 | 1188.0 | 1.6271 | | | | |
| 7.924 | 1125.3 | 1213.3 | 1.6893 | 5.886 | 1122.5 | 1209.7 | 1.6541 | 4.662 | 1119.7 | 1205.9 | 1.6259 |
| 8.353 | 1140.8 | 1233.5 | 1.7134 | 6.217 | 1138.5 | 1230.6 | 1.6790 | 4.934 | 1136.2 | 1227.5 | 1.6517 |
| 8.775 | 1156.0 | 1253.4 | 1.7360 | 6.541 | 1154.2 | 1251.0 | 1.7022 | 5.199 | 1152.3 | 1248.5 | 1.6755 |
| 9.399 | 1178.6 | 1283.0 | 1.7678 | 7.017 | 1177.2 | 1281.1 | 1.7346 | 5.587 | 1175.7 | 1279.1 | 1.7085 |
| 10.425 | 1216.3 | 1332.1 | 1.8165 | 7.794 | 1215.3 | 1330.7 | 1.7838 | 6.216 | 1214.2 | 1329.3 | 1.7582 |
| 11.440 | 1254.4 | 1381.4 | 1.8609 | 8.561 | 1253.6 | 1330.7 | 1.7838 | 6.834 | 1252.8 | 1379.2 | 1.8033 |
| 12.448 | 1293.0 | 1431.2 | 1.9022 | 9.321 | 1292.4 | 1430.4 | 1.8700 | 7.445 | 1291.8 | 1429.6 | 1.8449 |
| 14.454 | 1372.7 | 1533.2 | 1.9773 | 10.831 | 1372.3 | 1532.6 | 1.9453 | 8.657 | 1371.9 | 1532.1 | 1.9204 |
| 16.452 | 1455.8 | 1638.5 | 2.0448 | 12.333 | 1455.5 | 1638.1 | 2.0130 | 9.861 | 1455.2 | 1637.7 | 1.9882 |
| 18.445 | 1542.5 | 1747.3 | 2.1067 | 13.830 | 1542.3 | 1747.0 | 2.0749 | 11.060 | 1542.0 | 1746.7 | 2.0502 |
| 20.44 | 1632.8 | 1859.7 | 2.1641 | 15.324 | 1632.6 | 1859.5 | 2.1323 | 12.257 | 1632.4 | 1859.3 | 2.1076 |
| 22.43 | 1726.7 | 1975.7 | 2.2179 | 16.818 | 1726.5 | 1975.5 | 2.1861 | 13.452 | 1726.4 | 1975.3 | 2.1614 |
| 24.41 | 1824.0 | 2095.1 | 2.2685 | 18.310 | 1823.9 | 2094.9 | 2.2367 | 14.647 | 1823.7 | 2094.8 | 2.2121 |
| P = 120 (341.30) | | | | P = 140 (353.08) | | | | P = 160 (363.60) | | | |
| 3.730 | 1108.3 | 1191.1 | 5.5886 | 3.22.1 | 1110.3 | 1193.8 | 1.5761 | 2.836 | 1112.0 | 1196.0 | 1.5651 |
| 3.844 | 1116.7 | 1202.0 | 1.6021 | 3.259 | 1113.5 | 1198.0 | 1.5812 | | | | |
| 4.079 | 1133.8 | 1224.4 | 1.6288 | 3.466 | 1131.4 | 1221.2 | 1.6088 | 3.007 | 1128.8 | 1217.8 | 1.5911 |
| 4.360 | 1154.3 | 1251.2 | 1.6590 | 3.713 | 1152.4 | 1248.6 | 1.6399 | 3.228 | 1150.5 | 1246.1 | 1.6230 |
| 4.633 | 1174.2 | 1277.1 | 1.6868 | 3.952 | 1172.7 | 1275.1 | 1.6682 | 3.440 | 1171.2 | 1273.0 | 1.6518 |
| 4.900 | 1193.8 | 1302.6 | 1.7127 | 4.184 | 1192.6 | 1300.9 | 1.6944 | 3.646 | 1191.3 | 1299.2 | 1.6784 |
| 5.164 | 1213.2 | 1327.8 | 1.7371 | 4.412 | 1212.1 | 1326.4 | 1.7191 | 3.848 | 1211.1 | 1325.0 | 1.7034 |
| 5.682 | 1252.0 | 1378.2 | 1.7825 | 4.860 | 1251.2 | 1377.1 | 1.7648 | 4.243 | 1250.4 | 1376.0 | 1.7494 |
| 6.195 | 1291.2 | 1428.7 | 1.8243 | 5.301 | 1290.5 | 1427.9 | 1.8068 | 4.631 | 1289.9 | 1427.0 | 1.7916 |
| 7.208 | 1371.5 | 1531.5 | 1.9000 | 6.173 | 1371.0 | 1531.0 | 1.8827 | 5.397 | 1370.6 | 1530.4 | 1.8677 |
| 8.213 | 1454.9 | 1637.3 | 1.9679 | 7.036 | 1454.6 | 1636.9 | 1.9057 | 6.154 | 1454.3 | 1636.5 | 1.9358 |
| 9.214 | 1541.8 | 1746.4 | 2.0300 | 7.895 | 1541.6 | 1746.1 | 2.0129 | 6.906 | 1541.4 | 1745.9 | 1.9980 |
| 10.212 | 1632.3 | 1859.0 | 2.0875 | 8.752 | 1632.1 | 1858.8 | 2.0704 | 7.656 | 1631.9 | 1858.6 | 2.0556 |
| 11.209 | 1726.2 | 1975.1 | 2.1413 | 9.607 | 1726.1 | 1975.0 | 2.1242 | 8.405 | 1725.9 | 1979.8 | 2.1094 |
| 12.205 | 1823.6 | 2094.6 | 2.1919 | 10.461 | 1823.5 | 2094.5 | 2.1749 | 9.153 | 1823.3 | 2094.3 | 2.1601 |

P = 180 (373.13)

| | | | |
|-------|--------|--------|--------|
| 2.533 | 1113.4 | 1197.8 | 1.5553 |
| 2.648 | 1126.2 | 1214.4 | 1.5749 |
| 2.850 | 1148.5 | 1243.4 | 1.6078 |
| 3.042 | 1169.6 | 1270.9 | 1.6372 |
| 3.228 | 1190.0 | 1297.5 | 1.6642 |
| 3.409 | 1210.0 | 1323.5 | 1.6893 |
| 3.763 | 1249.6 | 1374.9 | 1.7357 |
| 4.110 | 1289.3 | 1426.2 | 1.7781 |
| 4.453 | 1329.4 | 1477.7 | 1.8175 |
| 4.793 | 1370.2 | 1529.8 | 1.8545 |
| 5.467 | 1454.0 | 1636.1 | 1.9227 |
| 6.137 | 1541.2 | 1745.6 | 1.9849 |
| 6.804 | 1631.7 | 1858.4 | 2.0425 |
| 7.470 | 1725.8 | 1974.6 | 2.0964 |
| 8.135 | 1823.2 | 2094.2 | 2.1470 |

P = 200 (381.86)

| | | | |
|-------|--------|--------|--------|
| 2.289 | 1114.6 | 1199.3 | 1.5464 |
| 2.361 | 1123.5 | 1210.8 | 1.5600 |
| 2.548 | 1146.4 | 1240.7 | 1.5938 |
| 2.724 | 1168.0 | 1268.8 | 1.6239 |
| 2.893 | 1188.7 | 1295.7 | 1.6512 |
| 3.058 | 1208.9 | 1322.1 | 1.6767 |
| 3.379 | 1248.8 | 1373.8 | 1.7234 |
| 3.693 | 1288.6 | 1425.3 | 1.7660 |
| 4.003 | 1328.9 | 1477.1 | 1.8055 |
| 4.310 | 1369.8 | 1529.3 | 1.8425 |
| 4.918 | 1453.7 | 1635.7 | 1.9105 |
| 5.521 | 1540.9 | 1745.3 | 1.9732 |
| 6.123 | 1631.6 | 1858.2 | 2.0308 |
| 6.722 | 1725.6 | 1974.4 | 2.0847 |
| 7.321 | 1823.0 | 2094.0 | 2.1354 |

P = 225 (391.87)

| | | | |
|-------|--------|--------|--------|
| 2.043 | 1115.8 | 1200.8 | 1.5365 |
| 2.073 | 1119.9 | 1206.2 | 1.5427 |
| 2.245 | 1143.8 | 1237.3 | 1.5779 |
| 2.405 | 1165.9 | 1266.1 | 1.6087 |
| 2.558 | 1187.0 | 1293.5 | 1.6366 |
| 2.707 | 1207.5 | 1320.2 | 1.6624 |
| 2.995 | 1247.7 | 1372.4 | 1.7095 |
| 3.276 | 1287.8 | 1424.2 | 1.7523 |
| 3.553 | 1328.3 | 1476.2 | 1.7920 |
| 3.827 | 1369.3 | 1528.6 | 1.8292 |
| 4.369 | 1453.4 | 1635.3 | 1.8977 |
| 4.906 | 1540.7 | 1744.9 | 1.9600 |
| 5.441 | 1631.3 | 1857.9 | 2.0177 |
| 5.975 | 1725.4 | 1974.2 | 2.0716 |
| 6.507 | 1822.9 | 2093.8 | 2.1223 |

P = 250 (401.04)

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 1.8448 | 1116.7 | 1202.1 | 1.5274 |
| 2.002 | 1141.1 | 1233.7 | 1.5632 |
| 2.150 | 1163.8 | 1263.3 | 1.5948 |
| 2.290 | 1185.3 | 1291.3 | 1.6233 |
| 2.426 | 1206.1 | 1318.3 | 1.6494 |
| 2.558 | 1226.5 | 1344.9 | 1.6739 |
| 2.688 | 1246.7 | 1371.1 | 1.6970 |
| 2.943 | 1287.0 | 1423.2 | 1.7401 |
| 3.193 | 1327.6 | 1475.3 | 1.7799 |
| 3.440 | 1368.7 | 1527.9 | 1.8172 |
| 3.929 | 1453.0 | 1634.8 | 1.8858 |
| 4.414 | 1540.4 | 1744.6 | 1.9483 |
| 4.896 | 1631.1 | 1857.6 | 2.0060 |
| 5.376 | 1725.2 | 1974.0 | 2.0599 |
| 5.856 | 1822.7 | 2093.6 | 2.1106 |

P = 275 (409.52)

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 1.6813 | 1117.5 | 1203.1 | 1.5192 |
| 1.8026 | 1138.3 | 1230.0 | 1.5495 |
| 1.9407 | 1161.7 | 1260.4 | 1.5820 |
| 2.071 | 1183.6 | 1289.0 | 1.6110 |
| 2.196 | 1204.7 | 1316.4 | 1.6376 |
| 2.317 | 1225.3 | 1343.2 | 1.6623 |
| 2.436 | 1245.7 | 1369.7 | 1.6856 |
| 2.670 | 1286.2 | 1422.1 | 1.7289 |
| 2.898 | 1327.0 | 1474.5 | 1.7689 |
| 3.124 | 1368.2 | 1527.2 | 1.8064 |
| 3.570 | 1452.6 | 1634.3 | 1.8751 |
| 4.011 | 1540.1 | 1744.2 | 1.9376 |
| 4.450 | 1630.9 | 1857.3 | 1.9954 |
| 4.887 | 1725.0 | 1973.7 | 2.0493 |
| 5.323 | 1822.5 | 2093.4 | 2.1000 |

P = 300 (417.43)

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 1.5442 | 1118.2 | 1203.9 | 1.5115 |
| 1.6361 | 1135.4 | 1226.2 | 1.5365 |
| 1.7662 | 1159.5 | 1257.5 | 1.5701 |
| 1.8878 | 1181.9 | 1286.7 | 1.5997 |
| 2.004 | 1203.2 | 1314.5 | 1.6266 |
| 2.117 | 1224.1 | 1341.6 | 1.6516 |
| 2.227 | 1244.6 | 1368.3 | 1.6751 |
| 2.442 | 1285.4 | 1421.0 | 1.7187 |
| 2.653 | 1326.3 | 1473.6 | 1.7589 |
| 2.860 | 1367.7 | 1526.5 | 1.7964 |
| 3.270 | 1452.2 | 1633.8 | 1.8653 |
| 3.675 | 1539.8 | 1743.8 | 1.9279 |
| 4.078 | 1630.7 | 1857.0 | 1.9857 |
| 4.479 | 1724.9 | 1973.5 | 2.0396 |
| 4.879 | 1822.3 | 2093.2 | 2.0904 |

P = 350 (431.82)

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 1.3267 | 1119.0 | 1204.9 | 1.4978 |
| 1.3733 | 1129.2 | 1218.2 | 1.5125 |
| 1.4913 | 1154.9 | 1251.5 | 1.5482 |
| 1.5998 | 1178.3 | 1281.9 | 1.5790 |
| 1.7025 | 1200.3 | 1310.6 | 1.6068 |
| 1.8013 | 1221.6 | 1338.3 | 1.6323 |
| 1.8975 | 1242.5 | 1365.4 | 1.6562 |
| 2.085 | 1283.8 | 1418.8 | 1.7004 |
| 2.267 | 1325.0 | 1471.8 | 1.7409 |
| 2.446 | 1366.6 | 1525.0 | 1.7787 |
| 2.799 | 1451.5 | 1632.8 | 1.8478 |
| 3.148 | 1539.3 | 1743.1 | 1.9106 |
| 3.494 | 1630.2 | 1856.5 | 1.9685 |
| 3.838 | 1724.5 | 1973.1 | 2.0225 |
| 4.182 | 1822.0 | 2092.8 | 2.0733 |

P = 400 (444.70)

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 1.1620 | 1119.5 | 1205.5 | 1.4856 |
| 1.1745 | 1122.6 | 1209.6 | 1.4901 |
| 1.2843 | 1150.1 | 1245.2 | 1.5282 |
| 1.3833 | 1174.6 | 1277.0 | 1.5605 |
| 1.4760 | 1197.3 | 1306.6 | 1.5892 |
| 1.5645 | 1219.1 | 1334.9 | 1.6153 |
| 1.6503 | 1240.4 | 1362.5 | 1.6397 |
| 1.8163 | 1282.1 | 1416.6 | 1.6844 |
| 1.9776 | 1323.7 | 1470.1 | 1.7252 |
| 2.136 | 1365.5 | 1523.6 | 1.7632 |
| 2.446 | 1450.7 | 1631.8 | 1.8327 |
| 2.752 | 1538.7 | 1742.4 | 1.8956 |
| 3.055 | 1629.8 | 1855.9 | 1.9535 |
| 3.357 | 1724.1 | 1972.6 | 2.0076 |
| 3.658 | 1821.6 | 2092.4 | 2.0584 |

P = 450 (456.39)

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 1.0326 | 1119.6 | 1205.6 | 1.4746 |
| 1.1226 | 1145.1 | 1238.5 | 1.5097 |
| 1.2146 | 1170.7 | 1271.9 | 1.5436 |
| 1.2996 | 1194.3 | 1302.5 | 1.5732 |
| 1.3803 | 1216.6 | 1331.5 | 1.6000 |
| 1.4580 | 1238.2 | 1359.6 | 1.6248 |
| 1.6077 | 1280.5 | 1414.4 | 1.6701 |
| 1.7524 | 1322.4 | 1468.3 | 1.7113 |
| 1.8941 | 1364.4 | 1522.2 | 1.7495 |
| 2.172 | 1450.0 | 1630.8 | 1.8192 |
| 2.444 | 1538.1 | 1741.7 | 1.8823 |
| 2.715 | 1629.3 | 1855.4 | 1.9403 |
| 2.983 | 1723.7 | 1972.1 | 1.9944 |
| 3.251 | 1821.3 | 2092.0 | 2.0453 |

P = 500 (467.13)

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 0.9283 | 1119.4 | 1205.3 | 1.4645 |
| 0.9924 | 1139.7 | 1231.5 | 1.4923 |
| 1.0792 | 1166.7 | 1266.6 | 1.5279 |
| 1.1583 | 1191.1 | 1298.3 | 1.5585 |
| 1.2327 | 1214.0 | 1328.0 | 1.5860 |
| 1.3040 | 1236.0 | 1356.7 | 1.6112 |
| 1.4407 | 1278.8 | 1412.1 | 1.6571 |
| 1.5723 | 1321.0 | 1466.5 | 1.6987 |
| 1.7008 | 1363.3 | 1520.7 | 1.7371 |
| 1.8271 | 1406.0 | 1575.1 | 1.7731 |
| 1.9518 | 1449.2 | 1629.8 | 1.8072 |
| 2.198 | 1537.6 | 1741.0 | 1.8704 |
| 2.442 | 1628.9 | 1854.8 | 1.9285 |
| 2.684 | 1723.3 | 1971.7 | 1.9827 |
| 2.926 | 1820.9 | 2091.6 | 2.0335 |

P = 600 (486.33)

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 0.7702 | 1118.6 | 1204.1 | 1.4464 |
| 0.7947 | 1128.0 | 1216.2 | 1.4592 |
| 0.8749 | 1158.2 | 1255.4 | 1.4990 |
| 0.9456 | 1184.5 | 1289.5 | 1.5320 |
| 1.0109 | 1208.6 | 1320.9 | 1.5609 |
| 1.0727 | 1231.5 | 1350.6 | 1.5872 |
| 1.1900 | 1275.4 | 1407.6 | 1.6343 |
| 1.3021 | 1318.4 | 1462.9 | 1.6766 |
| 1.4108 | 1361.2 | 1517.8 | 1.7155 |
| 1.5173 | 1404.2 | 1572.7 | 1.7519 |
| 1.6222 | 1447.7 | 1627.8 | 1.7861 |
| 1.8289 | 1536.5 | 1739.5 | 1.8497 |
| 2.033 | 1628.0 | 1853.7 | 1.9080 |
| 2.236 | 1722.6 | 1970.8 | 1.9622 |
| 2.438 | 1820.2 | 2090.8 | 2.0131 |

P = 700 (503.23)

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 0.6558 | 1117.0 | 1202.0 | 1.4305 |
| 0.7275 | 1149.0 | 1243.2 | 1.4723 |
| 0.7929 | 1177.5 | 1280.2 | 1.5081 |
| 0.8520 | 1205.1 | 1313.4 | 1.5387 |
| 0.9073 | 1226.9 | 1344.4 | 1.5661 |
| 1.0109 | 1272.0 | 1402.9 | 1.6145 |
| 1.1089 | 1315.6 | 1459.3 | 1.6576 |
| 1.2036 | 1358.9 | 1514.9 | 1.6970 |
| 1.2960 | 1402.4 | 1570.2 | 1.7337 |
| 1.3868 | 1446.2 | 1625.8 | 1.7682 |
| 1.5652 | 1535.3 | 1738.1 | 1.8321 |
| 1.7409 | 1627.1 | 1852.6 | 1.8906 |
| 1.9152 | 1721.8 | 1969.9 | 1.9449 |
| 2.0887 | 1819.5 | 2090.1 | 1.9958 |

P = 800 (518.36)

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 0.5691 | 1115.0 | 1199.3 | 1.4160 |
| 0.6154 | 1138.8 | 1229.9 | 1.4469 |
| 0.6776 | 1170.1 | 1270.4 | 1.4861 |
| 0.7324 | 1197.2 | 1305.6 | 1.5186 |
| 0.7829 | 1222.1 | 1338.0 | 1.5471 |
| 0.8306 | 1245.7 | 1368.6 | 1.5730 |
| 0.8764 | 1268.5 | 1398.2 | 1.5969 |
| 0.9640 | 1312.9 | 1455.6 | 1.6408 |
| 1.0482 | 1356.7 | 1511.9 | 1.6807 |

P = 1000 (544.75)

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 0.4459 | 1109.9 | 1192.4 | 1.3903 |
| 0.4534 | 1114.8 | 1198.7 | 1.3966 |
| 0.5140 | 1153.7 | 1248.8 | 1.4450 |
| 0.5637 | 1184.7 | 1289.1 | 1.4822 |
| 0.6080 | 1212.0 | 1324.6 | 1.5135 |
| 0.6490 | 1237.2 | 1357.3 | 1.5412 |
| 0.6878 | 1261.2 | 1388.5 | 1.5664 |
| 0.7610 | 1307.3 | 1448.1 | 1.6120 |
| 0.8305 | 1352.2 | 1505.9 | 1.6530 |

P = 1250 (572.56)

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 0.3454 | 1101.7 | 1181.6 | 1.3619 |
| 0.3786 | 1129.0 | 1216.6 | 1.3954 |
| 0.4267 | 1167.2 | 1266.0 | 1.4410 |
| 0.4670 | 1198.4 | 1306.4 | 1.4767 |
| 0.5030 | 1226.1 | 1342.4 | 1.5070 |
| 0.5364 | 1251.8 | 1375.8 | 1.5341 |
| 0.5984 | 1300.0 | 1438.4 | 1.5820 |
| 0.6563 | 1346.4 | 1498.2 | 1.6244 |

| | | | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1.1300 | 1400.5 | 1567.8 | 1.7178 | 0.8976 | 1396.8 | 1562.9 | 1.6908 | 0.7116 | 1392.0 | 1556.6 | 1.6631 |
| 1.2102 | 1444.6 | 1623.8 | 1.7526 | 0.9630 | 1441.5 | 1619.7 | 1.7261 | 0.7652 | 1437.5 | 1614.5 | 1.6991 |
| 1.3674 | 1534.2 | 1736.6 | 1.8167 | 1.0905 | 1531.9 | 1733.7 | 1.7909 | 0.8689 | 1529.0 | 1730.0 | 1.7648 |
| 1.5218 | 1626.2 | 1851.5 | 1.8754 | 1.2152 | 1624.4 | 1849.3 | 1.8499 | 0.9699 | 1622.2 | 1846.5 | 1.8243 |
| 1.6749 | 1721.0 | 1969.0 | 1.9298 | 1.3384 | 1719.5 | 1967.2 | 1.9046 | 1.0693 | 1717.6 | 1965.0 | 1.8791 |
| 1.8271 | 1818.8 | 2089.3 | 1.9808 | 1.4608 | 1817.4 | 2087.7 | 1.9557 | 1.1678 | 1815.7 | 2085.8 | 1.9304 |

P = 1500 (596.39)

P = 1750 (617.31)

P = 2000 (636.00)

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 0.2769 | 1091.8 | 1168.7 | 1.3359 |
| 0.2816 | 1096.6 | 1174.8 | 1.3416 |
| 0.3329 | 1147.0 | 1239.4 | 1.4012 |
| 0.3716 | 1183.4 | 1286.6 | 1.4429 |
| 0.4049 | 1214.1 | 1326.5 | 1.4767 |
| 0.4350 | 1241.8 | 1362.5 | 1.5058 |
| 0.4631 | 1267.7 | 1396.2 | 1.5320 |
| 0.4897 | 1292.5 | 1428.5 | 1.5562 |
| 0.5400 | 1340.4 | 1490.3 | 1.6001 |
| 0.5876 | 1387.2 | 1550.3 | 1.6399 |
| 0.6334 | 1433.5 | 1609.3 | 1.6765 |
| 0.7213 | 1526.1 | 1726.3 | 1.7431 |
| 0.8064 | 1619.9 | 1843.7 | 1.8031 |
| 0.8899 | 1715.7 | 1962.7 | 1.8582 |
| 0.9725 | 1814.0 | 2083.9 | 1.9096 |

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 0.2268 | 1080.2 | 1153.7 | 1.3109 |
| 0.2627 | 1122.5 | 1207.6 | 1.3603 |
| 0.3022 | 1166.7 | 1264.6 | 1.4106 |
| 0.3341 | 1201.3 | 1309.5 | 1.4485 |
| 0.3622 | 1231.3 | 1348.6 | 1.4802 |
| 0.3878 | 1258.8 | 1384.4 | 1.5081 |
| 0.4119 | 1284.8 | 1418.2 | 1.5334 |
| 0.4569 | 1334.3 | 1482.3 | 1.5789 |
| 0.4990 | 1382.2 | 1543.8 | 1.6197 |
| 0.5392 | 1429.4 | 1604.0 | 1.6571 |
| 0.6158 | 1523.1 | 1722.6 | 1.7245 |
| 0.6896 | 1617.6 | 1841.0 | 1.7850 |
| 0.7617 | 1713.9 | 1960.5 | 1.8404 |
| 0.8330 | 1812.3 | 2082.3 | 1.8919 |

| | | | |
|---------|--------|--------|--------|
| 0.18813 | 1066.6 | 1136.3 | 1.2861 |
| 0.2057 | 1091.1 | 1167.2 | 1.3141 |
| 0.2487 | 1147.7 | 1239.8 | 1.3782 |
| 0.2803 | 1187.3 | 1291.1 | 1.4216 |
| 0.3071 | 1220.1 | 1333.8 | 1.4562 |
| 0.3312 | 1249.5 | 1372.0 | 1.4860 |
| 0.3534 | 1276.8 | 1407.6 | 1.5126 |
| 0.3945 | 1328.1 | 1474.1 | 1.5598 |
| 0.4325 | 1377.2 | 1537.2 | 1.6017 |
| 0.4685 | 1425.2 | 1598.6 | 1.6398 |
| 0.5368 | 1520.2 | 1718.8 | 1.7082 |
| 0.6020 | 1615.4 | 1838.2 | 1.7692 |
| 0.6656 | 1712.0 | 1958.3 | 1.8249 |
| 0.7284 | 1810.6 | 2080.2 | 1.8765 |

P = 2500 (668.31)

P = 3000 (695.52)

P = 3500

| | | | |
|---------|--------|--------|--------|
| 0.13059 | 1031.0 | 1091.4 | 1.2327 |
| 0.16839 | 1098.7 | 1176.6 | 1.3073 |
| 0.2030 | 1155.2 | 1249.1 | 1.3686 |
| 0.2291 | 1195.7 | 1301.7 | 1.4112 |
| 0.2513 | 1229.5 | 1345.8 | 1.4456 |
| 0.2712 | 1259.9 | 1385.4 | 1.4752 |
| 0.2896 | 1288.2 | 1422.2 | 1.5018 |
| 0.3069 | 1315.2 | 1457.2 | 1.5262 |
| 0.3393 | 1366.8 | 1523.8 | 1.5704 |
| 0.3696 | 1416.7 | 1587.7 | 1.6101 |
| 0.4261 | 1514.2 | 1711.3 | 1.6804 |
| 0.4795 | 1610.2 | 1832.6 | 1.7424 |
| 0.5312 | 1708.2 | 1954.0 | 1.7986 |
| 0.5820 | 1807.2 | 2076.4 | 1.8506 |

| | | | |
|---------|--------|--------|--------|
| 0.08404 | 968.8 | 1015.5 | 1.1575 |
| 0.09771 | 1003.9 | 1058.1 | 1.1944 |
| 0.14831 | 1114.7 | 1197.1 | 1.3122 |
| 0.17572 | 1167.6 | 1265.2 | 1.3675 |
| 0.19731 | 1207.7 | 1317.2 | 1.4080 |
| 0.2160 | 1241.8 | 1361.7 | 1.4414 |
| 0.2328 | 1272.7 | 1402.0 | 1.4705 |
| 0.2485 | 1301.7 | 1439.6 | 1.4967 |
| 0.2772 | 1356.2 | 1510.1 | 1.5434 |
| 0.3036 | 1408.0 | 1576.6 | 1.5848 |
| 0.3524 | 1508.1 | 1703.7 | 1.6571 |
| 0.3978 | 1606.3 | 1827.1 | 1.7201 |
| 0.4416 | 1704.5 | 1949.6 | 1.7769 |
| 0.4844 | 1803.9 | 2072.8 | 1.8291 |

| | | | |
|---------|--------|--------|--------|
| 0.02491 | 663.5 | 679.7 | 0.8630 |
| 0.03058 | 759.5 | 779.3 | 0.9506 |
| 0.10460 | 1058.4 | 1126.1 | 1.2440 |
| 0.13626 | 1134.7 | 1223.0 | 1.3226 |
| 0.15818 | 1183.4 | 1285.9 | 1.3716 |
| 0.17625 | 1222.4 | 1336.5 | 1.4096 |
| 0.19214 | 1256.4 | 1380.8 | 1.4416 |
| 0.2066 | 1287.6 | 1421.4 | 1.4699 |
| 0.2328 | 1345.2 | 1496.0 | 1.5193 |
| 0.2566 | 1399.2 | 1565.3 | 1.5624 |
| 0.2997 | 1501.9 | 1696.1 | 1.6368 |
| 0.3395 | 1601.7 | 1821.6 | 1.7010 |
| 0.3776 | 1700.8 | 1945.4 | 1.7583 |
| 0.4147 | 1800.6 | 2069.2 | 1.8108 |

| | P = 4000 | | | | P = 5000 | | | | P = 6000 | | | |
|---|----------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|
| 0 | 0.024 47 | 657.7 | 675.8 | 0.8574 | 0.023 77 | 648.0 | 670.0 | 0.8482 | 0.023 22 | 640.0 | 665.8 | 0.8405 |
| 0 | 0.028 67 | 742.1 | 763.4 | 0.9345 | 0.026 76 | 721.8 | 746.6 | 0.9156 | 0.025 63 | 708.1 | 736.5 | 0.9028 |
| 1 | 0.063 31 | 960.7 | 1007.5 | 1.1395 | 0.033 64 | 821.4 | 852.6 | 1.0049 | 0.029 78 | 788.6 | 821.7 | 0.9746 |
| 0 | 0.105 22 | 1095.0 | 1172.9 | 1.2740 | 0.059 32 | 987.2 | 1042.1 | 1.1583 | 0.039 42 | 896.9 | 940.7 | 1.0708 |
| 1 | 0.128 33 | 1156.5 | 1251.5 | 1.3352 | 0.085 56 | 1092.7 | 1171.9 | 1.2596 | 0.058 18 | 1018.8 | 1083.4 | 1.1820 |
| 1 | 0.146 22 | 1201.5 | 1309.7 | 1.3789 | 0.103 85 | 1155.1 | 1251.1 | 1.3190 | 0.075 88 | 1102.9 | 1187.2 | 1.2599 |
| 1 | 0.161 51 | 1239.2 | 1358.8 | 1.4144 | 0.118 53 | 1202.2 | 1311.9 | 1.3629 | 0.090 08 | 1162.0 | 1262.0 | 1.3140 |
| 1 | 0.175 20 | 1272.9 | 1402.6 | 1.4449 | 0.131 20 | 1242.0 | 1363.4 | 1.3988 | 0.102 07 | 1209.1 | 1322.4 | 1.3561 |
| 1 | 0.199 54 | 1333.9 | 1481.6 | 1.4973 | 0.153 02 | 1310.6 | 1452.2 | 1.4577 | 0.122 18 | 1286.4 | 1422.1 | 1.4222 |
| 1 | 0.2213 | 1390.1 | 1553.9 | 1.5423 | 0.171 99 | 1371.6 | 1530.8 | 1.5066 | 0.139 27 | 1352.7 | 1507.3 | 1.4752 |
| 1 | 0.2414 | 1443.7 | 1622.4 | 1.5823 | 0.187 18 | 1428.6 | 1603.7 | 1.5493 | 0.154 53 | 1413.3 | 1584.9 | 1.5206 |
| 1 | 0.2603 | 1495.7 | 1688.4 | 1.6188 | 0.205 17 | 1483.2 | 1673.0 | 1.5876 | 0.168 54 | 1470.5 | 1657.6 | 1.5608 |
| 1 | 0.2959 | 1597.1 | 1816.1 | 1.6841 | 0.2348 | 1587.9 | 1805.2 | 1.6551 | 0.194 20 | 1578.7 | 1794.3 | 1.6307 |
| 1 | 0.3296 | 1697.1 | 1941.1 | 1.7420 | 0.2626 | 1689.8 | 1932.7 | 1.7142 | 0.218 01 | 1682.4 | 1924.5 | 1.6910 |
| 1 | 0.3625 | 1797.3 | 2065.6 | 1.7948 | 0.2895 | 1790.8 | 2058.6 | 1.7676 | 0.240 87 | 1784.3 | 2051.7 | 1.7450 |

Table B1-4E. Cairan terkompresi (Satuan Keteknikan)

| v | u | h | s | v | u | h | s | v | u | h | s |
|--------------------------|--------|--------|----------|--------------------------|--------|--------|----------|--------------------------|--------|--------|-----------|
| P = 500 (467.13) | | | | P = 1000 (544.75) | | | | P = 1500 (596.39) | | | |
| 0.019 748 | 447.70 | 449.53 | 0.649 04 | 0.021 591 | 538.39 | 542.38 | 0.743 20 | 0.023 461 | 604.97 | 611.48 | 0.808 24 |
| 0.015 994 | 0.00 | 1.49 | 0.000 00 | 0.015 967 | 0.03 | 2.99 | 0.000 05 | 0.015 939 | 0.05 | 4.47 | 0.000 07 |
| 0.015 998 | 18.02 | 19.50 | 0.035 99 | 0.015 972 | 17.99 | 20.94 | 0.035 92 | 0.015 946 | 17.95 | 22.38 | 0.035 84 |
| 0.016 106 | 67.87 | 69.36 | 0.129 32 | 0.016 082 | 67.70 | 70.68 | 0.129 01 | 0.016 058 | 67.53 | 71.99 | 0.128 70 |
| 0.016 318 | 117.66 | 119.17 | 0.214 57 | 0.016 293 | 117.38 | 120.40 | 0.214 10 | 0.016 268 | 117.10 | 121.62 | 0.213 64 |
| 0.016 608 | 167.65 | 169.19 | 0.293 41 | 0.016 580 | 167.26 | 170.32 | 0.292 81 | 0.016 554 | 166.87 | 171.46 | 0.292 21 |
| 0.016 972 | 217.99 | 219.56 | 0.367 02 | 0.016 941 | 217.47 | 220.61 | 0.366 28 | 0.016 910 | 216.96 | 221.65 | 0.365 54 |
| 0.017 416 | 268.92 | 270.53 | 0.436 41 | 0.017 379 | 268.24 | 271.46 | 0.435 52 | 0.017 343 | 267.58 | 272.39 | 0.434 63 |
| 0.017 954 | 320.71 | 322.37 | 0.502 49 | 0.017 909 | 319.83 | 323.15 | 0.501 40 | 0.017 865 | 318.98 | 323.94 | 0.500 34 |
| 0.018 608 | 373.68 | 375.40 | 0.566 04 | 0.018 550 | 372.55 | 375.98 | 0.564 72 | 0.018 493 | 371.45 | 376.59 | 0.563 43 |
| 0.019 420 | 428.40 | 430.19 | 0.627 98 | 0.019 340 | 426.89 | 430.47 | 0.626 32 | 0.019 264 | 425.44 | 430.79 | 0.624 70 |
| | | | | 0.020 36 | 483.8 | 487.5 | 0.6874 | 0.020 24 | 481.8 | 487.4 | 0.6853 |
| | | | | | | | | 0.021 58 | 542.1 | 548.1 | 0.7469 |
| P = 2000 (636.00) | | | | P = 3000 (695.52) | | | | P = 5000 | | | |
| 0.025 649 | 662.40 | 671.89 | 0.862 27 | 0.034 310 | 783.45 | 802.50 | 0.973 20 | 0.015 755 | 0.11 | 14.70 | -0.000 01 |
| 0.015 912 | 0.06 | 5.95 | 0.000 08 | 0.015 859 | 0.09 | 8.90 | 0.000 09 | 0.015 773 | 17.67 | 32.26 | 0.035 08 |
| 0.015 920 | 17.91 | 23.81 | 0.035 75 | 0.015 870 | 17.84 | 26.65 | 0.035 55 | 0.015 897 | 66.40 | 81.11 | 0.126 51 |
| 0.016 034 | 67.37 | 73.30 | 0.128 39 | 0.015 987 | 67.04 | 75.91 | 0.127 77 | 0.016 376 | 164.32 | 179.47 | 0.288 18 |
| 0.016 527 | 166.49 | 172.60 | 0.291 62 | 0.016 476 | 165.74 | 174.89 | 0.290 46 | 0.017 110 | 263.25 | 279.08 | 0.428 75 |
| 0.017 308 | 266.93 | 273.33 | 0.433 76 | 0.017 240 | 265.66 | 275.23 | 0.432 05 | 0.018 141 | 364.47 | 381.25 | 0.555 06 |
| 0.018 439 | 370.38 | 377.21 | 0.562 16 | 0.018 334 | 368.32 | 378.50 | 0.559 70 | 0.018 803 | 416.44 | 433.84 | 0.614 51 |
| 0.019 191 | 424.04 | 431.14 | 0.623 13 | 0.019 053 | 421.36 | 431.93 | 0.620 11 | 0.019 603 | 469.8 | 487.9 | 0.6724 |
| 0.020 14 | 479.8 | 487.3 | 0.6832 | 0.019 944 | 476.2 | 487.3 | 0.6794 | 0.020 835 | 536.7 | 556.0 | 0.7411 |
| 0.021 72 | 551.8 | 559.8 | 0.7565 | 0.021 382 | 546.2 | 558.0 | 0.7508 | | | | |

Table B1-5E. Padat terjenuhkan - uap terjenuhkan (satuan Keteknikan)

| Temp. T, °F | Specific Volume | | | Internal Energy | | | Enthalpy | | | Entropy | | |
|-------------------|------------------------------------|---------------------------------|--|---------------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| | Press. Ibf/in ² P | Sat. Solid v _f | Sat. Vapor v _g × 10 ⁻³ | Sat. Solid u _f | Subl. u _{fg} | Sat. Vapor u _g | Sat. Solid h _f | Subl. h _{fg} | Sat. Vapor h _g | Sat. Solid s _f | Subl. s _{fg} | Sat. Vapor s _g |
| 2018 | 0.0887 | 0.01747 | 3.302 | -143.34 | 1164.6 | 1021.2 | -143.34 | 1218.7 | 1075.4 | -0.292 | 2.479 | 2.187 |
| | 0.0886 | 0.01747 | 3.305 | -143.35 | 1164.6 | 1021.2 | -143.35 | 1218.7 | 1075.4 | -0.292 | 2.479 | 2.187 |
| | 0.0808 | 0.01747 | 3.607 | -144.35 | 1164.9 | 1020.5 | -144.35 | 1218.9 | 1074.5 | -0.294 | 2.489 | 2.195 |
| | 0.0641 | 0.01746 | 4.506 | -146.84 | 1165.7 | 1018.9 | -146.84 | 1219.1 | 1072.3 | -0.299 | 2.515 | 2.216 |
| | 0.0505 | 0.01745 | 5.655 | -149.31 | 1166.5 | 1017.2 | -149.31 | 1219.4 | 1070.1 | -0.304 | 2.542 | 2.238 |
| | 0.0396 | 0.01745 | 7.13 | -151.75 | 1167.3 | 1015.5 | -151.75 | 1219.7 | 1067.9 | -0.309 | 2.569 | 2.260 |
| | 0.0309 | 0.01744 | 9.04 | -154.17 | 1168.1 | 1013.9 | -154.17 | 1219.9 | 1065.7 | -0.314 | 2.597 | 2.283 |
| | 0.0240 | 0.01743 | 11.52 | -156.56 | 1168.8 | 1012.2 | -156.56 | 1220.1 | 1063.5 | -0.320 | 2.626 | 2.306 |
| | 0.0185 | 0.01743 | 14.77 | -158.93 | 1169.5 | 1010.6 | -158.93 | 1220.2 | 1061.2 | -0.325 | 2.655 | 2.330 |
| | 0.0142 | 0.01742 | 19.03 | -161.27 | 1170.2 | 1008.9 | -161.27 | 1220.3 | 1059.0 | -0.330 | 2.684 | 2.354 |
| | 0.0109 | 0.01741 | 24.66 | -163.59 | 1170.9 | 1007.3 | -163.59 | 1220.4 | 1056.8 | -0.335 | 2.714 | 2.379 |
| | 0.0082 | 0.01740 | 32.2 | -165.89 | 1171.5 | 1005.6 | -165.89 | 1220.5 | 1054.6 | -0.340 | 2.745 | 2.405 |
| | 0.0062 | 0.01740 | 42.2 | -168.16 | 1172.1 | 1003.9 | -168.16 | 1220.6 | 1052.4 | -0.345 | 2.776 | 2.431 |
| | 0.0046 | 0.01739 | 55.7 | -170.40 | 1172.7 | 1002.3 | -170.40 | 1220.6 | 1050.2 | -0.351 | 2.808 | 2.457 |
| | 0.0035 | 0.01738 | 74.1 | -172.63 | 1173.2 | 1000.6 | -172.63 | 1220.6 | 1048.0 | -0.356 | 2.841 | 2.485 |
| | 0.0026 | 0.01737 | 99.2 | -174.82 | 1173.8 | 998.9 | -174.82 | 1220.6 | 1045.8 | -0.361 | 2.874 | 2.513 |
| | 0.0019 | 0.01737 | 133.8 | -177.00 | 1174.3 | 997.3 | -177.00 | 1220.6 | 1043.6 | -0.366 | 2.908 | 2.542 |

Tabel B2-1SI

Sifat Amoniak jenuh (Uap-Cair) : tabel suhu

| Tem °C | Press bar | Volume Spesifik (Specific Volume) m ³ /kg | | Energi Dalam (Internal Energy) kJ/kg | | Entalpi (Enthalpy) kJ/kg | | | Entropi (Entropy) kJ/kg • K | | Temp. °C |
|-----------|--------------|--|--|--|--|--|--------------------------|--|---|---|-------------|
| | | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) v _f × 10 ³ | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) v _g | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) u _f | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) u _g | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) h _f | Evap. h _{fg} | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) h _g | Cair Jenuh (Sat. Liquid) s _f | Uap Jenuh (Sat. Vapor) s _g | |
| -50 | 0,4086 | 1,4245 | 2,6265 | -4394 | 1264,99 | -43,88 | 1416,20 | 1372,32 | -0,1922 | 6,1543 | -50 |
| -45 | 0,5453 | 1,4367 | 2,0060 | -22,03 | 1271,19 | 1,9 | 1402,52 | 138057 | -0,0951 | 6,0523 | -45 |
| -40 | 0,7174 | 1,4493 | 1,5524 | -0,10 | 1277,20 | 0,00 | 1388,56 | 1388,56 | 0,0000 | 5,9557 | -40 |
| -36 | 0,8850 | 1,4597 | 1,2757 | 17,47 | 1281,87 | 17,60 | 1377,17 | 1394,77 | 0,0747 | 5,8819 | -36 |
| -32 | 1,0832 | 1,4703 | 1,0561 | 35,09 | 1286,41 | 35,25 | 1365,55 | 1400,81 | 0,1484 | 5,8111 | - |
| -30 | 1,1950 | 1,4757 | 0,9634 | 43,93 | 1288,63 | 44,10 | 1359,65 | 1403,75 | 0,1849 | 5,7767 | -30 |
| -28 | 1,3159 | 1,4812 | 0,8803 | 52,78 | 1290,82 | 52,97 | 1353,68 | 1406,66 | 0,2212 | 5,7430 | -28 |
| -26 | 1,4465 | 1,4867 | 0,8056 | 61,65 | 1292,97 | 61,86 | 1347,65 | 1409,51 | 0,2572 | 5,7100 | -26 |
| -22 | 1,7390 | 1,4980 | 0,6780 | 79,46 | 1297,18 | 79,72 | 1335,36 | 1415,08 | 0,3287 | 5,6457 | -22 |
| -20 | 1,9019 | 1,5038 | 0,6233 | 88,40 | 1299,23 | 88,68 | 1329,10 | 1417,79 | 0,3642 | 5,6144 | -20 |
| -18 | 2,0769 | 1,5096 | 0,5739 | 97,36 | 1301,25 | 97,68 | 1322,77 | 1420,45 | 0,3994 | 5,5837 | -18 |
| -16 | 2,2644 | 1,5155 | 0,5291 | 106,36 | 1303,23 | 106,70 | 1316,35 | 1423,05 | 0,4346 | 5,5536 | -16 |
| -14 | 2,4652 | 1,5215 | 0,4885 | 115,37 | 1305,17 | 115,75 | 1309,86 | 1425,61 | 0,4695 | 5,5239 | -14 |
| -12 | 2,6798 | 1,5276 | 0,4516 | 124,42 | 1307,08 | 124,83 | 1303,28 | 1428,11 | 0,5043 | 5,4948 | -12 |
| -10 | 2,9089 | 1,5338 | 0,4180 | 133,50 | 1308,95 | 133,94 | 1296,61 | 1430,55 | 0,5389 | 5,4662 | -10 |
| -8 | 3,1532 | 1,5400 | 0,3874 | 142,60 | 1310,78 | 143,09 | 1289,86 | 1432,95 | 0,5734 | 5,4380 | -8 |
| -6 | 3,4134 | 1,5464 | 0,3595 | 151,74 | 1312,57 | 152,26 | 1283,02 | 1435,28 | 0,6077 | 5,4103 | -6 |
| -4 | 3,6901 | 1,5528 | 0,3340 | 160,88 | 1314,32 | 161,46 | 1276,10 | 1437,56 | 0,6418 | 5,3831 | -4 |
| 2 | 3,9842 | 1,5594 | 0,3106 | 170,07 | 1316,04 | 170,69 | 1269,08 | 1439,78 | 0,6759 | 5,3562 | -2 |
| 4 | 4,2962 | 1,5660 | 0,2892 | 179,29 | 1317,71 | 179,96 | 1261,97 | 1441,94 | 0,7097 | 5,3298 | 0 |
| 6 | 4,6270 | 1,5727 | 0,2695 | 188,53 | 1319,34 | 189,26 | 1254,77 | 1444,03 | 0,7435 | 5,3038 | 2 |
| 8 | 4,9773 | 1,5796 | 0,2514 | 197,80 | 1320,92 | 198,59 | 1247,48 | 1446,07 | 0,7770 | 5,2781 | 4 |
| 10 | 5,3479 | 1,5866 | 0,2348 | 207,10 | 1322,47 | 207,95 | 1240,09 | 1448,04 | 0,8105 | 5,2529 | 6 |
| 12 | 5,7395 | 1,5936 | 0,2195 | 216,42 | 1323,96 | 217,34 | 1232,61 | 1449,94 | 0,8438 | 5,2279 | 8 |
| 16 | 6,1529 | 1,6188 | 0,2054 | 225,77 | 1325,42 | 226,75 | 1225,13 | 1451,78 | 0,8769 | 5,2033 | 12 |
| 20 | 6,5890 | 1,6081 | 0,1923 | 235,14 | 1326,82 | 236,20 | 1217,35 | 1453,55 | 0,9099 | 5,1791 | 16 |
| 24 | 7,0524 | 1,6231 | 0,1691 | 253,95 | 1329,48 | 255,18 | 1201,70 | 1456,87 | 0,9755 | 5,1314 | 20 |
| 28 | 7,5762 | 1,6386 | 0,1492 | 272,86 | 1331,94 | 274,26 | 1185,64 | 1459,90 | 1,0404 | 5,0849 | 24 |
| 32 | 8,1624 | 1,6547 | 0,1320 | 291,84 | 1334,19 | 293,45 | 1169,16 | 1462,61 | 1,1048 | 5,0394 | 28 |
| 36 | 8,8193 | 1,6714 | 0,1172 | 310,92 | 1336,20 | 312,75 | 1152,24 | 1465,00 | 1,1686 | 4,9948 | 32 |
| 40 | 9,5480 | 1,6887 | 0,1043 | 330,07 | 1337,97 | 332,17 | 1134,87 | 1467,03 | 1,2319 | 4,9509 | 36 |
| 44 | 10,3510 | 1,7068 | 0,0930 | 349,32 | 1339,47 | 351,69 | 1117,00 | 1468,70 | 1,2946 | 4,9078 | 40 |
| 48 | 11,2320 | 1,7256 | 0,0831 | 368,67 | 1340,70 | 371,35 | 1098,62 | 1469,97 | 1,3569 | 4,8652 | 44 |
| 50 | 12,1950 | 1,7503 | 0,0725 | 393,01 | 1341,81 | 396,13 | 1074,84 | 1470,96 | 1,4341 | 4,8125 | 48 |
| 52 | 13,2440 | 1,7765 | 0,0634 | 417,56 | 1342,42 | 421,17 | 1050,09 | 1471,26 | 1,5109 | 4,7604 | 50 |

Sumber: Tabel A-13 hingga A-15 dihitung berdasarkan persamaan L. Haar dan J. S. Gallagher, "Thermodynamic Properties of Ammonia," J. Phys. Chem. Reference Data, Vol. 7, 1978, him. 635-792.

Tabel B2-2SI

Sifat Amonia Jenuh (Uap-Cair): Tabel Tekanan

| Temp. °C | Press. bar | Volume Spesifik (Specific Volume) m ³ /kg | | Energi Dalam (Internal Energy) kJ/kg | | Entalpi (Enthalpy) kJ/kg | | | Entropi (Entropy) kJ/kg·K | | Temp. °C |
|-------------|---------------|--|--|--|--|---|-------------------------|--|--|--------------------------------------|-------------|
| | | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) yr × 10 ³ | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) Yr | C.l Jenuh (Sat. Liquid) | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) U _g | Cair Jenuh (Sat. Liquid) h _l | Evap. h _g | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) h _v | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) S _r | Uap Jenuh (Sat. Vapor) S | |
| 0,40 | -50,36 | 1,4236 | 2,6795 | -45,52 | 1264,54 | -15,46 | 1417,18 | 1371,72 | --0,1992 | 6,1618 | 0,40 |
| 0,50 | -46,53 | 1,4330 | 2,1752 | -28,73 | 1269,31 | -28,66 | 1406,73 | 1378,07 | -0,1245 | 6,0829 | 0,50 |
| 0,60 | -43,28 | 1,4410 | 1,8345 | -14,51 | 1273,27 | -14,42 | 1397,76 | 1383,34 | -0,0622 | 6,0186 | 0,60 |
| 0,70 | -40,46 | 1,4482 | 1,5884 | -2,11 | 1276,66 | -2,01 | 1389,85 | 1387,84 | -0,0086 | 5,9643 | 0,70 |
| 0,80 | -37,94 | 1,4546 | 1,4020 | 8,93 | 1279,61 | 9,04 | 1382,73 | 1391,78 | 0,0386 | 5,9174 | 0,80 |
| 0,90 | -35,67 | 1,4605 | 1,2559 | 18,91 | 1282,24 | 19,04 | 1376,73 | 1395,27 | 0,0808 | 5,8760 | 0,90 |
| 1,00 | -33,60 | 1,4660 | 1,1381 | 28,03 | 1284,61 | 28,18 | 1370,23 | 1398,41 | 0,1191 | 5,8391 | 1,00 |
| 1,25 | -29,07 | 1,4782 | 0,9237 | 48,03 | 1289,65 | 48,22 | 1356,89 | 1405,11 | 0,2018 | 5,7610 | 1,25 |
| 1,50 | -25,22 | 1,4889 | 0,7787 | 65,10 | 1293,80 | 65,32 | 1345,28 | 1410,61 | 0,2712 | 5,6973 | 1,50 |
| 1,75 | -21,86 | 1,4984 | 0,6740 | 80,08 | 1297,33 | 80,35 | 1334,92 | 1415,27 | 0,3312 | 5,6435 | 1,75 |
| 2,00 | -18,86 | 1,5071 | 0,5946 | 93,50 | 1300,39 | 93,80 | 1325,51 | 1419,31 | 0,3843 | 5,5969 | 2,00 |
| 2,25 | -16,15 | 1,5151 | 0,5323 | 105,68 | 1303,08 | 106,03 | 1310,83 | 1422,86 | 0,4319 | 5,5558 | 2,25 |
| 2,50 | -13,67 | 1,5225 | 0,4821 | 116,88 | 1305,49 | 117,26 | 1308,76 | 1426,03 | 0,4753 | 5,5190 | 2,50 |
| 2,75 | -11,37 | 1,5295 | 0,4408 | 127,26 | 1307,67 | 127,68 | 1301,20 | 1428,88 | 0,5152 | 5,4858 | 2,75 |
| 3,00 | -9,24 | 1,5361 | 0,4061 | 136,96 | 1309,65 | 137,42 | 1294,05 | 1431,47 | 0,5520 | 5,4554 | 3,00 |
| 3,25 | -7,24 | 1,5424 | 0,3765 | 146,06 | 1311,46 | 146,57 | 1287,27 | 1433,84 | 0,5864 | 5,4275 | 3,25 |
| 3,50 | -5,36 | 1,5484 | 0,3511 | 154,66 | 1313,14 | 155,20 | 1280,81 | 1436,01 | 0,6186 | 5,4016 | 3,50 |
| 3,75 | -3,58 | 1,5542 | 0,3289 | 162,80 | 1314,68 | 163,38 | 1274,64 | 1438,03 | 0,6489 | 5,3774 | 3,75 |
| 4,00 | -1,90 | 1,5597 | 0,3094 | 170,55 | 1316,12 | 171,18 | 1268,71 | 1439,89 | 0,6776 | 5,3548 | 4,00 |
| 4,25 | -0,29 | 1,5650 | 0,2921 | 177,96 | 1317,47 | 178,62 | 1263,01 | 1441,63 | 0,7048 | 5,3336 | 4,25 |
| 4,50 | 1,25 | 1,5702 | 0,2767 | 185,04 | 1318,73 | 185,75 | 1257,50 | 1443,25 | 0,7308 | 5,3135 | 4,50 |
| 4,75 | 7,2 | 1,5752 | 0,2629 | 191,84 | 1319,91 | 192,59 | 1252,18 | 1444,77 | 0,7555 | 5,2946 | 4,75 |
| 5,00 | 4,13 | 1,5800 | 0,2503 | 198,39 | 1321,02 | 199,18 | 1247,02 | 1446,19 | 0,7791 | 5,2765 | 5,00 |
| 5,25 | 5,48 | 1,5847 | 0,2390 | 204,69 | 1322,07 | 205,52 | 1242,01 | 1447,53 | 0,8018 | 5,2594 | 5,25 |
| 5,50 | 6,79 | 1,5893 | 0,2280 | 210,78 | 1323,06 | 211,65 | 1237,15 | 1448,80 | 0,8236 | 5,2430 | 5,50 |
| 5,75 | 8,05 | 1,5938 | 0,2191 | 216,06 | 1324,00 | 217,58 | 1232,41 | 1449,99 | 0,8446 | 5,2273 | 5,75 |
| 6,00 | 9,27 | 1,5982 | 0,2104 | 222,37 | 1324,89 | 223,32 | 1227,79 | 1451,12 | 0,8649 | 5,2122 | 6,00 |
| 7,00 | 13,79 | 1,6148 | 0,1815 | 243,56 | 1328,04 | 244,69 | 1210,38 | 1455,07 | 0,9394 | 5,1576 | 7,10 |
| 8,00 | 17,84 | 1,6302 | 0,1596 | 262,64 | 1330,64 | 263,95 | 1194,36 | 1458,30 | 1,0054 | 5,1099 | 8,00 |
| 9,00 | 21,52 | 1,6446 | 0,1424 | 280,05 | 1332,82 | 281,53 | 1179,44 | 1460,97 | 1,0649 | 5,0675 | 9,00 |
| 10,00 | 24,89 | 1,6584 | 0,1285 | 296,10 | 1334,66 | 297,76 | 1165,42 | 1463,18 | 1,1191 | 5,0294 | 10,00 |
| 12,00 | 30,94 | 1,6841 | 0,1075 | 324,99 | 1337,52 | 327,01 | 1139,52 | 1460,53 | 1,2152 | 4,9625 | 12,00 |
| 14,00 | 36,20 | 1,7080 | 0,0923 | 350,58 | 1339,56 | 352,97 | 1115,82 | 1468,79 | 1,2987 | 4,9050 | 14,00 |
| 16,00 | 41,03 | 1,7306 | 0,0808 | 373,69 | 1340,97 | 376,46 | 1093,77 | 1470,23 | 1,3729 | 4,8542 | 16,00 |
| 18,00 | 45,38 | 1,7522 | 0,0717 | 394,85 | 1341,88 | 398,00 | 1073,01 | 1471,01 | 1,4399 | 4,8086 | 18,00 |
| 20,00 | 49,37 | 1,7731 | 0,0644 | 414,44 | 1342,37 | 417,99 | 1053,27 | 1471,26 | -0,12 | 4,7670 | 20,00 |

Tabel B2-3SI

Amoniak panas lanjut

| Tekanan mutlak kPa (Suhu jenuh.) | | Suhu, °C | | | | | | | | | | | |
|--|---|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | -20 | -10 | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 100 |
| 50 (-46,53) s | v | 2,4463 | 2,5471 | 2,6474 | 2,7472 | 2,8466 | 2,9458 | 3,0447 | 3,1435 | 3,2421 | 3,3406 | 3,4390 | |
| | h | 1434,6 | 1455,7 | 1476,9 | 1498,1 | 1519,3 | 1540,6 | 1562,0 | 1583,5 | 1605,1 | 1626,9 | 1648,8 | |
| 75 | v | 1,6222 | 1,6905 | 1,7582 | 1,8255 | 1,8924 | 1,9591 | 2,0255 | 2,0917 | 2,1577 | 2,2237 | 2,2895 | |
| | h | 1431,7 | 1453,3 | 1474,8 | 1496,2 | 1517,7 | 1539,2 | 1560,7 | 1582,4 | 1604,1 | 1626,0 | 1648,0 | |
| 100 (-33,59) s | v | 1,2101 | 1,2621 | 1,3136 | 1,3647 | 1,4153 | 1,4657 | 1,5158 | 1,5658 | 1,6156 | 1,6652 | 1,7148 | 1,8137 |
| | h | 1428,8 | 1450,8 | 1472,6 | 1494,4 | 1516,1 | 1537,7 | 1559,5 | 1581,2 | 1603,1 | 1625,1 | 1647,1 | 1691,7 |
| 125 | v | 0,9627 | 1,0051 | 1,0468 | 1,0881 | 1,1290 | 1,1696 | 1,2100 | 1,2502 | 1,2903 | 1,3302 | 1,3700 | 1,4494 |
| | h | 1425,9 | 1448,3 | 1470,5 | 1492,5 | 1514,4 | 1536,3 | 1558,2 | 1580,1 | 1602,1 | 1624,1 | 1646,3 | 1691,0 |
| 150 (-29,06) s | v | 0,7977 | 0,8336 | 0,8689 | 0,9037 | 0,9381 | 0,9723 | 1,0062 | 1,0398 | 1,0734 | 1,1068 | 1,1401 | 1,2065 |
| | h | 1422,9 | 1445,7 | 1468,3 | 1490,6 | 1512,8 | 1534,8 | 1556,9 | 1578,9 | 1601,0 | 1623,2 | 1645,4 | 1690,2 |
| 150 (-25,21) s | v | 5,7465 | 5,8349 | 5,9189 | 5,9992 | 6,0761 | 6,1502 | 6,2217 | 6,2910 | 6,3583 | 6,4238 | 6,4877 | 6,6112 |
| | h | 5,7465 | 5,8349 | 5,9189 | 5,9992 | 6,0761 | 6,1502 | 6,2217 | 6,2910 | 6,3583 | 6,4238 | 6,4877 | 6,6112 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 200 | h | 0.6193 | 0.6465 | 0.6732 | 0.6995 | 0.7255 | 0.7513 | 0.7769 | 0.8023 | 0.8275 | 0.8527 | 0.9028 |
| (-18.85) | s | 1440.6 | 1463.8 | 1486.8 | 1509.4 | 1531.9 | 1554.3 | 1576.6 | 1598.9 | 1621.3 | 1643.7 | 1688.8 |
| | | 5.6791 | 5.7659 | 5.8484 | 5.9270 | 6.0025 | 6.0751 | 6.1453 | 6.2133 | 6.2794 | 6.3437 | 6.4579 |
| 250 | h | 0.4905 | 0.5129 | 0.5348 | 0.5563 | 0.5774 | 0.5983 | 0.6190 | 0.6396 | 0.6600 | 0.6803 | 0.7206 |
| (-13.65) | s | 1435.3 | 1459.3 | 1482.9 | 1506.0 | 1529.0 | 1551.7 | 1574.3 | 1596.8 | 1619.4 | 1641.9 | 1687.3 |
| | | 5.5544 | 5.6441 | 5.7288 | 5.8093 | 5.8861 | 5.9599 | 6.0309 | 6.0997 | 6.1663 | 6.2312 | 6.3561 |
| 300 | h | 0.4238 | 0.4425 | 0.4608 | 0.4787 | 0.4964 | 0.5138 | 0.5311 | 0.5483 | 0.5653 | 0.5822 | 0.5992 |
| (-9.22) | s | 1454.7 | 1478.9 | 1502.6 | 1525.9 | 1549.0 | 1571.9 | 1594.7 | 1617.5 | 1640.2 | 1662.8 | 1685.8 |
| | | 5.5420 | 5.6290 | 5.7113 | 5.7896 | 5.8645 | 5.9365 | 6.0060 | 6.0732 | 6.1385 | 6.2042 | 6.2642 |
| 350 | h | 0.3601 | 0.3765 | 0.3925 | 0.4081 | 0.4235 | 0.4386 | 0.4536 | 0.4685 | 0.4832 | 0.4983 | 0.5124 |
| (-5.34) | s | 1449.9 | 1474.9 | 1499.1 | 1522.9 | 1546.3 | 1569.5 | 1592.6 | 1615.5 | 1638.4 | 1661.3 | 1684.3 |
| | | 5.4532 | 5.5427 | 5.6270 | 5.7068 | 5.7828 | 5.8557 | 5.9259 | 5.9938 | 6.0596 | 6.1246 | 6.1860 |
| 400 | h | 0.3123 | 0.3270 | 0.3413 | 0.3552 | 0.3688 | 0.3823 | 0.3955 | 0.4086 | 0.4216 | 0.4347 | 0.4473 |
| (-1.87) | s | 1445.1 | 1470.7 | 1495.6 | 1519.8 | 1543.6 | 1567.1 | 1590.4 | 1613.6 | 1636.7 | 1659.8 | 1682.8 |
| | | 5.3741 | 5.4663 | 5.5525 | 5.6338 | 5.7111 | 5.7850 | 5.8560 | 5.9244 | 5.9907 | 6.0579 | 6.1179 |
| 450 | h | 0.2750 | 0.2885 | 0.3014 | 0.3140 | 0.3263 | 0.3384 | 0.3503 | 0.3620 | 0.3737 | 0.3854 | 0.3967 |
| (-1.27) | s | 1440.2 | 1466.5 | 1492.0 | 1516.7 | 1540.9 | 1564.7 | 1588.2 | 1611.6 | 1634.9 | 1658.1 | 1681.3 |
| | | 5.3023 | 5.3972 | 5.4855 | 5.5685 | 5.6470 | 5.7219 | 5.7936 | 5.8627 | 5.9295 | 6.0005 | 6.0575 |

Tekanan mutlak
K_aPa
(Suhu jenuh.)

Suhu, °C

| | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|-----|
| 500 h | 1488.3 | 1513.5 | 1538.1 | 1562.3 | 1586.1 | 1609.6 | 1633.1 | 1679.8 | 1726.6 | 1773.8 | | |
| (41.5) s | 5.4244 | 5.5090 | 5.5889 | 5.6647 | 5.7373 | 5.8070 | 5.8744 | 6.0031 | 6.1253 | 6.2422 | | |
| 600 h | 1480.8 | 1507.1 | 1532.5 | 1557.3 | 1581.6 | 1605.7 | 1629.5 | 1676.8 | 1724.0 | 1771.5 | | |
| (9.29) s | 5.3156 | 5.4037 | 5.4862 | 5.5641 | 5.6383 | 5.7094 | 5.7778 | 5.9081 | 6.0314 | 6.1491 | | |
| 700 h | 1473.0 | 1500.4 | 1526.7 | 1552.2 | 1577.1 | 1601.6 | 1625.8 | 1673.7 | 1721.4 | 1769.2 | | |
| (13.81) s | 5.2196 | 5.3115 | 5.3968 | 5.4770 | 5.5529 | 5.6254 | 5.6949 | 5.8268 | 5.9512 | 6.0698 | | |
| 800 h | 1464.9 | 1493.5 | 1520.8 | 1547.0 | 1572.5 | 1597.5 | 1622.1 | 1670.6 | 1718.7 | 1766.9 | | |
| (17.86) s | 5.1328 | 5.2287 | 5.3171 | 5.3996 | 5.4774 | 5.5513 | 5.6219 | 5.7555 | 5.8811 | 6.0006 | | |
| 90 h | 1486.5 | 1514.7 | 1541.7 | 1567.9 | 1593.3 | 1618.4 | 1643.5 | 1667.5 | 1716.1 | 1764.5 | | |
| (21.53) s | 5.1530 | 5.2447 | 5.3296 | 5.4093 | 5.4847 | 5.5565 | 5.6249 | 5.7519 | 5.8187 | 5.9389 | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|---------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1000 | v | 0.1321 | 0.1387 | 0.1450 | 0.1511 | 0.1570 | 0.1627 | 0.1739 | 0.1848 | 0.1955 | 0.2060 | 0.2164 |
| (24.91) | h | 1479.1 | 1508.5 | 1536.3 | 1563.1 | 1589.1 | 1614.6 | 1664.3 | 1713.4 | 1762.2 | 1811.2 | 1860.5 |
| | s | 5.0826 | 5.1778 | 5.2654 | 5.3471 | 5.4240 | 5.4971 | 5.6342 | 5.7622 | 5.8834 | 5.9992 | 6.1105 |
| 1200 | u | 0.1129 | 0.1185 | 0.1238 | 0.1289 | 0.1339 | 0.1385 | 0.1435 | 0.1527 | 0.1618 | 0.1707 | 0.1795 |
| (30.95) | h | 1495.4 | 1525.1 | 1553.3 | 1580.5 | 1606.8 | 1658.0 | 1708.0 | 1757.5 | 1786.0 | 1807.1 | 1856.9 |
| | s | 5.0564 | 5.1497 | 5.2357 | 5.3159 | 5.3916 | 5.5325 | 5.6631 | 5.7860 | 5.7860 | 5.9031 | 6.0156 |
| 1400 | u | 0.0943 | 0.0994 | 0.1042 | 0.1088 | 0.1132 | 0.1177 | 0.1217 | 0.1299 | 0.1378 | 0.1455 | 0.1532 |
| (36.26) | h | 1481.6 | 1513.4 | 1543.1 | 1571.5 | 1598.8 | 1651.4 | 1651.4 | 1702.5 | 1752.8 | 1802.9 | 1853.2 |
| | s | 4.9463 | 5.0462 | 5.1370 | 5.2209 | 5.2994 | 5.4443 | 5.5775 | 5.5775 | 5.7023 | 5.8208 | 5.9343 |
| 1600 | u | 0.0851 | 0.0895 | 0.0937 | 0.0987 | 0.0977 | 0.1054 | 0.1054 | 0.1127 | 0.1197 | 0.1266 | 0.1334 |
| (41.03) | h | 1501.0 | 1532.5 | 1562.3 | 1590.7 | 1590.7 | 1644.8 | 1644.8 | 1696.9 | 1748.0 | 1798.7 | 1849.5 |
| | s | 4.9510 | 5.0472 | 5.1351 | 5.2167 | 5.2167 | 5.3659 | 5.5018 | 5.5018 | 5.6286 | 5.7485 | 5.8637 |
| 1800 | u | 0.0738 | 0.0780 | 0.0819 | 0.0857 | 0.0857 | 0.0927 | 0.0927 | 0.0993 | 0.1057 | 0.1119 | 0.1180 |
| (45.37) | h | 1487.9 | 1521.4 | 1552.7 | 1582.2 | 1582.2 | 1638.0 | 1638.0 | 1691.2 | 1743.1 | 1794.5 | 1845.7 |
| | s | 4.8614 | 4.9637 | 5.0561 | 5.1410 | 5.1410 | 5.2948 | 5.4337 | 5.4337 | 5.5624 | 5.6838 | 5.7995 |
| 2000 | u | 0.0647 | 0.0687 | 0.0725 | 0.0760 | 0.0760 | 0.0825 | 0.0825 | 0.0886 | 0.0945 | 0.1002 | 0.1057 |
| (49.36) | h | 1473.9 | 1509.8 | 1542.7 | 1573.5 | 1573.5 | 1631.1 | 1631.1 | 1685.5 | 1738.2 | 1790.2 | 1842.0 |
| | s | 4.7754 | 4.8848 | 4.9821 | 5.0707 | 5.0707 | 5.2294 | 5.3714 | 5.5022 | 5.5022 | 5.6251 | 5.7420 |

Tabel B2-1E

Sifat Amonia Jenuh (Uap-Cair): Tabel Suhu

| Temp. °F | Press. lbf/in. ² | Volume Spesifik (Specific Volume) ft ³ /lb | | Energi Dalam (Internal Energy) Btu/lb | | Entalpi (Enthalpy) Btu/lb | | | Entropi (Entropy) Btu/lb/R | | Temp. °F |
|-------------|--------------------------------|---|--|--|--|--|--------------------------|--|--|--|-------------|
| | | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) v _l | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) v _g | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) u _l | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) u _g | Cair- Jenuh (S. Liquid) h _l | Evap. h _{fg} | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) h _g | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) s _l | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) s _g | |
| -60 | 5,548 | 0,02278 | 44,7537 | -21,005 | 543,61 | 20,97 | 61056 | 589,58 | -0,0512 | 1,4765 | -60 |
| -55 | 6,536 | 0,02188 | 35,3991 | -15,765 | 545,11 | -15,73 | 60731 | 591,58 | -0,0381 | 1,4627 | -55 |
| -50 | 7,664 | 0,02299 | 33,0880 | -10,525 | 546,59 | -10,49 | 60404 | 593,54 | -0,0253 | 1,4492 | -50 |
| -45 | 8,949 | 0,02310 | 28,6284 | 5,295 | 548,04 | -5,25 | 60072 | 595,48 | -0,0126 | 1,4361 | -45 |
| -40 | 10,405 | 0,02322 | 24,8672 | -0,045 | 549,46 | 0,00 | 59737 | 597,37 | 0,0000 | 1,4235 | -40 |
| -35 | 12,049 | 0,02333 | 21,6812 | 5,20 | 550,86 | 5,26 | 59398 | 599,24 | 0,0124 | 1,4111 | -35 |
| -30 | 13,899 | 0,02345 | 18,9715 | 10,46 | 552,24 | 10,52 | 59054 | 601,06 | 0,0247 | 1,3992 | -30 |
| -25 | 15,972 | 0,02357 | 16,6577 | 15,73 | 553,59 | 15,80 | 58705 | 602,85 | 0,0369 | 1,3875 | -25 |
| -20 | 18,290 | 0,02369 | 14,6744 | 21,01 | 554,91 | 21,09 | 58351 | 604,61 | 0,0490 | 1,3762 | -20 |
| -15 | 20,871 | 0,02381 | 12,9682 | 26,31 | 556,20 | 26,40 | 57992 | 606,32 | 0,0610 | 1,3652 | -15 |
| -10 | 23,738 | 0,02393 | 11,4951 | 31,63 | 557,46 | 31,73 | 57626 | 607,99 | 0,0729 | 1,3544 | -10 |
| -5 | 26,912 | 0,02406 | 10,2190 | 36,96 | 558,70 | 37,08 | 57254 | 609,62 | 0,0847 | 1,3440 | -5 |
| 0 | 30,416 | 0,02419 | 9,1100 | 42,32 | 559,91 | 42,45 | 56876 | 611,22 | 0,0964 | 1,3338 | 0 |
| 5 | 34,275 | 0,02432 | 8,1430 | 47,69 | 561,08 | 47,85 | 56492 | 612,76 | 0,1080 | 1,3238 | 5 |
| 10 | 38,512 | 0,02440 | 7,2974 | 53,09 | 562,23 | 53,27 | 56100 | 614,27 | 0,1196 | 1,3141 | 10 |
| 15 | 43,153 | 0,02460 | 6,5556 | 58,52 | 563,34 | 58,72 | 55701 | 615,73 | 0,1311 | 1,3046 | 15 |
| 20 | 48,224 | 0,02474 | 5,9032 | 63,97 | 564,43 | 64,19 | 55295 | 617,14 | 0,1425 | 1,2953 | 20 |
| 25 | 53,752 | 0,02488 | 5,3278 | 69,43 | 565,48 | 69,68 | 54882 | 618,51 | 0,1539 | 1,2862 | 25 |
| 30 | 59,765 | 0,02503 | 4,8188 | 74,93 | 566,49 | 75,20 | 54462 | 619,82 | 0,1651 | 1,2774 | 30 |
| 35 | 66,291 | 0,02517 | 4,3675 | 80,44 | 567,48 | 80,75 | 54034 | 621,09 | 0,1764 | 1,2687 | 35 |
| 40 | 73,359 | 0,02533 | 3,9664 | 85,98 | 568,42 | 86,33 | 53597 | 622,30 | 0,1875 | 1,2602 | 40 |
| 45 | 81,000 | 0,02548 | 3,6090 | 91,55 | 569,33 | 91,93 | 53154 | 623,46 | 0,1986 | 1,2518 | 45 |
| 50 | 89,242 | 0,02564 | 3,2897 | 97,13 | 570,21 | 97,55 | 52702 | 624,57 | 0,2096 | 1,2436 | 50 |
| 55 | 98,118 | 0,02581 | 3,0040 | 102,73 | 571,04 | 103,20 | 52242 | 625,62 | 0,2205 | 1,2356 | 55 |
| 60 | 107,66 | 0,02597 | 2,7476 | 108,35 | 571,83 | 108,87 | 51774 | 626,61 | 0,2314 | 1,2277 | 60 |
| 65 | 117,90 | 0,02614 | 2,5171 | 113,99 | 572,59 | 114,56 | 51297 | 627,54 | 0,2422 | 1,2199 | 65 |
| 70 | 128,87 | 0,02632 | 2,3095 | 119,65 | 573,29 | 120,28 | 50811 | 628,40 | 0,2530 | 1,2123 | 70 |
| 75 | 140,60 | 0,02650 | 2,1220 | 125,33 | 573,95 | 126,02 | 50318 | 629,20 | 0,2636 | 1,2048 | 75 |
| 80 | 153,13 | 0,02668 | 1,9524 | 131,02 | 574,57 | 131,78 | 49815 | 629,93 | 0,2742 | 1,1973 | 80 |
| 85 | 166,50 | 0,02687 | 1,7988 | 136,73 | 575,13 | 137,56 | 49303 | 630,59 | 0,2848 | 1,1900 | 85 |
| 90 | 180,73 | 0,02707 | 1,6593 | 142,46 | 575,65 | 143,37 | 48781 | 631,18 | 0,2953 | 1,1827 | 90 |
| 95 | 195,87 | 0,02727 | 1,5324 | 148,21 | 576,10 | 149,20 | 48249 | 631,68 | 0,3057 | 1,1756 | 95 |
| 100 | 211,96 | 0,02747 | 1,4168 | 153,98 | 576,51 | 155,05 | 47706 | 632,11 | 0,3161 | 1,1685 | 100 |
| 105 | 229,02 | 0,02768 | 1,3113 | 159,76 | 576,85 | 160,94 | 47152 | 632,46 | 0,3264 | 1,1614 | 105 |
| 110 | 247,10 | 0,02790 | 1,2149 | 165,58 | 577,13 | 166,85 | 46586 | 632,71 | 0,3366 | 1,1544 | 110 |
| 115 | 266,24 | 0,02813 | 1,1266 | 171,41 | 577,34 | 172,80 | 46008 | 632,88 | 0,3469 | 1,1475 | 115 |
| 120 | 286,47 | 0,02836 | 1,0456 | 177,28 | 577,48 | 178,79 | 45416 | 632,95 | 0,3570 | 1,1405 | 120 |

Sumber: Tabel A 13E hingga A-13F dihitung berdasarkan persamaan L. Haar dan J. S. Gallagher, "Thermodynamic Properties of Ammonia," J. Phys. Chem. Reference Data, Vol. 7, 1978, hlm. 635-792.

Tabel B2-2E

Sifat Amonia Jenuh (Uap-Cair): Tabel Tekanan

| Press. Ibf/in. ² | Temp. °F | Volume Spesifik (Specific Volume) ft ³ /lb | | Energi Dalam (Internal Energy) Btu/lb | | Entalpi (Enthalpy) Btu/lb | | | Entropi (Entropy) Btu/lb °R | | Press. Ibf/in. ² |
|--------------------------------|-------------|---|--|--|--|--|--------------------------------|--|--|--|--------------------------------|
| | | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) <i>v</i> | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) <i>u_l</i> | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) <i>u_v</i> | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) <i>h_l</i> | Evap. <i>h_{fg}</i> | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) <i>h_v</i> | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) <i>s_l</i> | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) <i>s_v</i> | |
| 5 | 63,10 | 0,02271 | 49,320 | 24,24 | 542,67 | - .22 | 612,56 | 588,33 | -0,0593 | 1 485 | 5 |
| 6 | -57,63 | 0,02283 | 41,594 | -18,51 | 544,32 | -18,49 | 609,02 | 590,54 | -0,0450 | 1 4699 | 6 |
| 7 | -52,86 | 0,02293 | 36,014 | -13,52 | 545,74 | -13,49 | 605,92 | 591,42 | -0,0326 | 1 4569 | 7 |
| 8 | -48,63 | 0,02302 | 31,790 | -9,09 | 546,98 | -9,06 | 603,13 | 594,08 | -0,0218 | 1,4456 | 8 |
| | -44,81 | 0,02311 | 28,477 | -5,09 | 548,09 | -5,05 | 600,60 | 595,55 | -0,0121 | 1 4357 | 9 |
| 10 | -41,33 | 0,02319 | 25,807 | -1,44 | 549,09 | -1,40 | 598,27 | 596,87 | -0,0033 | 1,4"68 | 10 |
| 12 | -35,14 | 0,02333 | 21,764 | 5,06 | 550,82 | 5,11 | 594,08 | 599,18 | 0,0121 | 1 4115 | 12 |
| 14 | -29,74 | 0,02345 | 18,843 | 10,73 | 552,31 | 10,79 | 590,36 | 601,16 | 0,0254 | 1 3986 | 14 |
| 16 | -24,94 | 0,02357 | 16,631 | 15,80 | 553,60 | 15,87 | 587,01 | 602,88 | 0,0371 | 1 3874 | 16 |
| 18 | -20,60 | 0,02367 | 14,896 | 20,38 | 554,75 | 20,46 | 583,94 | 604,40 | 0,0476 | 1 3775 | 18 |
| 20 | -16,63 | 0,02377 | 13,497 | 24,58 | 555,78 | 24,67 | 581,10 | 605,76 | 0,0571 | 1 3687 | 20 |
| 25 | -7,95 | 0,02399 | 10,950 | 33,(1 | 557,97 | 33,92 | 574,75 | 608,67 | 0,0777 | 1 3501 | 25 |
| 30 | -0,57 | 0,02418 | 9,229 | 41,71 | 559,77 | 41,84 | 569,20 | 611,04 | 0,0951 | 1 3349 | 30 |
| 35 | 5,89 | 0,02435 | 7,984 | 48,65 | 561,29 | 48,81 | 564,22 | 613,03 | 0,1101 | 1,3 21 | 35 |
| 40 | 11,65 | 0,02450 | 7,041' | 54,89 | 562,60 - | 55,07 | 559,69 | 614,76 | 0,1234 | 1,3109 | 40 |
| 45 | 16,87 | 0,02465 | 6,302 | 60,56 | 563,75 | 60,76 | 555,50 | 616,26 | 0,1354 | 1,3011 | 45 |
| 50 | 21,65 | 0,02478 | 5,705 | 65,77 | 564,78 | 66,00 | 551,59 | 617,60 | 0,1463 | 1,29)3 | 50 |
| 55 | 26,07 | 0,02491 | 5,213 | 70,61 | 565,70 | 70,86 | 547,93 | 618,79 | 0,1563 | 1 2843 | 55 |
| 60 | 30,19 | 0,02503 | 4,801 | 75,13 | 566,53 | 75,41 | 544,46 | 619,87 | 0,1656 | 1 2770 | 60 |
| 65 | 34,04 | 0,02515 | 4,450 | 79,39 | 567,29 | 79,69 | 541,16 | 620,85 | 0,1742 | 1 "703 | 65 |
| 70 | 37,67 | 0,02526 | 4,1473 | 83,40 | 567,99 | 83,73 | 538,01 | 621,74 | 0,1823 | 1,2641 | 70 |
| 75 | 41,11 | 0,02536 | 3,8837 | 87,21 | 5 | 87,57 | 535,00 | 622,56 | 0,1900 | 1 258 | 75 |
| 80 | 44,37 | 0,02546 | 3,6520 | 90,84 . | 569,22 - | 91,22 | 532,10 | 623,32 | 0,1972 | 1,2529 | so |
| 85 | 47,47 | 0,02556 | 3,4466 | 94,30 | 569,77 | 94,71 | 529,31 | 624,02 | 0,2040 | 1 2478 | 85 |
| 90 | 50,44 | 0,02566 | 3,2632 | 97,62 | 570,28 | 98,05 | 526,62 | 624,66 | 0,2106 | 1 2429 | 90 |
| 100 | 56,01 | 0,02584 | 2,9497 | 103,87 | 571,21 | 104,35 | 521,48 | 625,82 | 0,2227 | 1,-340 | 100 |
| 110 | 61,17 | 0,02601 | 2,6913 | 109,68 | 572,01 | 110,20 | 516,63 | 626,83 | 0,2340 | 1""59 | 110 |
| 120 | 65,98 | 0,02618 | 2,4745 | 115,11 | 572,73 | 115,69 | 512,02 | 627,71 | 0,2443 | 1 "184 | 120 |
| 130 | 70,50 | 0,02634 | 2,2899 | 120,21 | 573,36 | 120,85 | 507,64 | 628,48 | 0,2540 | 1 1115 | 131 |
| 140 | 74,75 | 0,02649 | 2,1309 | 125,04 | 573,92 | 125,73 | 503,43 | 629,16 | 0,2631 | 1 2051 | 140 |
| 150 | 78,78 | 0,02664 | 1,9923 | 129,63 | 574,42 | 130,37 | 499,39 | 629,76 | 0,2717 | 1,1991 | 150 |
| 175 | 88,02 | 0,02699 | 1,7128 | 140,19 | 575,45 | 141,07 | 489,89 | 630,95 | 0,2911 | 1 1856 | 175 |
| 200 | 96,31 | 0,02732 | 1,5010 | 149,72 | 576,21 | 150,73 | 481,07 | 631,80 | 0,3084 | 1 1737 | 200 |
| 225 | 103,85 | 0,02764 | 1,3348 | 158,43 | 576,77 | 159,58 | 472,80 | 632,38 | 0,3240 | 1 1630 | 225 |
| 250 | 110,78 | 0,02794 | 1,2007 | 166,48 | 577,16 | 167,77 | 464,97 | 632,74 | 0,3382 | ,1533 | 250 |
| 275 | 117,20 | 0,02823 | 1,0901 | 173,99 | 577,41 | 175,43 | 457,49 | 632,92 | 0,3513 | 1,1444 | 275 |
| 300 | 123,20 | 0,02851 | 0,9974 | 181,05 | 577,54 | 182,63 | 450,31 | 632,94 | 0,3635 | 1 1361 | 300 |

TABEL B2-3E AMONIA PANAS LANJUT

| Tekanan mutlak (suhu jenuh) | | Suhu, F | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 | 220 |
| 10 | v | 28,567 | 29,881 | 31,185 | 32,481 | 33,770 | 35,055 | 36,336 | 37,613 | 38,889 | 40,162 | 41,434 | |
| | h | 617,9 | 628,1 | 638,3 | 648,5 | 658,8 | 669,1 | 679,4 | 689,8 | 700,2 | 710,7 | 721,3 | |
| (-41,32) s | | 1,475 | 1,496 | 1,517 | 1,537 | 1,557 | 1,575 | 1,593 | 1,611 | 1,628 | 1,645 | 1,661 | |
| 15 | v | 18,909 | 19,804 | 20,688 | 21,564 | 22,434 | 23,298 | 24,159 | 25,017 | 25,872 | 26,726 | 27,577 | |
| | h | 616,2 | 626,7 | 637,2 | 647,5 | 657,9 | 668,3 | 678,7 | 689,1 | 699,6 | 710,2 | 720,8 | |
| (-27,26) s | | 1,425 | 1,447 | 1,468 | 1,489 | 1,508 | 1,527 | 1,545 | 1,563 | 1,580 | 1,597 | 1,613 | |
| 20 | v | 14,077 | 14,763 | 15,439 | 16,105 | 16,765 | 17,420 | 18,071 | 18,719 | 19,364 | 20,007 | 20,649 | 21,290 |
| | h | 614,5 | 625,3 | 635,9 | 646,5 | 657,0 | 667,5 | 678,0 | 688,5 | 699,1 | 709,7 | 720,4 | 731,1 |
| (-16,61) s | | 1,388 | 1,411 | 1,433 | 1,454 | 1,473 | 1,492 | 1,511 | 1,529 | 1,546 | 1,563 | 1,579 | 1,595 |
| 25 | v | 11,177 | 11,738 | 12,288 | 12,829 | 13,363 | 13,893 | 14,418 | 14,940 | 15,459 | 15,976 | 16,492 | 17,006 |
| | h | 612,8 | 623,9 | 634,7 | 645,5 | 656,1 | 666,7 | 677,3 | 687,9 | 698,5 | 709,2 | 719,9 | 730,7 |
| (-7,93) s | | 1,359 | 1,383 | 1,405 | 1,426 | 1,446 | 1,465 | 1,484 | 1,502 | 1,519 | 1,536 | 1,553 | 1,569 |
| 30 | v | 9,242 | 9,721 | 10,187 | 10,645 | 11,095 | 11,541 | 11,982 | 12,420 | 12,855 | 13,289 | 13,721 | 14,151 |
| | h | 611,1 | 622,4 | 633,5 | 644,4 | 655,2 | 665,9 | 676,6 | 687,3 | 698,0 | 708,7 | 719,5 | 730,3 |
| (-0,54) s | | 1,335 | 1,359 | 1,382 | 1,403 | 1,424 | 1,443 | 1,462 | 1,480 | 1,497 | 1,514 | 1,531 | 1,547 |

| | | | | | | | | | | |
|----------|---|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 35 | n | 8279 | 8686 | 9,084 | 9,475 | 9,861 | 10,242 | 10,620 | 10,996 | 11,369 |
| (5.92) | s | 620.9 | 632.2 | 643.3 | 654.3 | 665.1 | 675.9 | 686.7 | 697.4 | 708.2 |
| | | 1.339 | 1.362 | 1.384 | 1.404 | 1.424 | 1.443 | 1.461 | 1.479 | 1.496 |
| 40 | n | 7196 | 7560 | 7,913 | 8,260 | 8,600 | 8,937 | 9,270 | 9,601 | 9,929 |
| (11.69) | s | 619.4 | 631.0 | 642.3 | 653.4 | 664.3 | 675.2 | 686.0 | 696.9 | 707.7 |
| | | 1.321 | 1.344 | 1.366 | 1.387 | 1.407 | 1.426 | 1.445 | 1.463 | 1.480 |
| 45 | n | 6,354 | 6,683 | 7,002 | 7,314 | 7,620 | 7,922 | 8,220 | 8,516 | 8,809 |
| (16.91) | s | 617.8 | 629.7 | 641.2 | 652.4 | 663.5 | 674.5 | 685.4 | 696.3 | 707.2 |
| | | 1.304 | 1.329 | 1.351 | 1.372 | 1.393 | 1.412 | 1.430 | 1.448 | 1.465 |
| 50 | n | 5,981 | 6,284 | 6,573 | 6,857 | 7,110 | 7,380 | 7,648 | 7,914 | 8,174 |
| (21.69) | s | 628.4 | 640.1 | 651.5 | 662.7 | 673.8 | 684.8 | 695.7 | 706.7 | 717.4 |
| | | 1.314 | 1.337 | 1.359 | 1.379 | 1.399 | 1.417 | 1.435 | 1.453 | 1.471 |
| 60 | n | 4,928 | 5,179 | 5,422 | 5,659 | 5,891 | 6,120 | 6,346 | 6,569 | 6,789 |
| (30.23) | s | 625.7 | 637.8 | 649.6 | 661.1 | 672.3 | 683.5 | 694.6 | 705.6 | 716.5 |
| | | 1.289 | 1.313 | 1.335 | 1.356 | 1.375 | 1.394 | 1.413 | 1.430 | 1.448 |

| Tekanan mutlak | | Suhu, F | | | | | | | | | | | |
|-------------------|---|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| psi | | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 |
| 70 (37.71) | y | 4.396 | 4.610 | 4.817 | 5.020 | 5.219 | 5.415 | 5.609 | 5.801 | 6.182 | 6.558 | | |
| | h | 635.5 | 647.6 | 659.4 | 670.9 | 682.2 | 693.4 | 704.6 | 715.7 | 738.0 | 760.5 | | |
| 80 (44.40) | s | 1.291 | 1.314 | 1.335 | 1.356 | 1.375 | 1.393 | 1.411 | 1.428 | 1.461 | 1.492 | | |
| | y | 3.808 | 4.001 | 4.186 | 4.367 | 4.544 | 4.717 | 4.889 | 5.059 | 5.394 | 5.725 | | |
| 90 (50.48) | h | 633.2 | 645.6 | 657.7 | 669.4 | 680.9 | 692.3 | 703.6 | 714.8 | 737.2 | 759.8 | | |
| | s | 1.272 | 1.296 | 1.318 | 1.338 | 1.358 | 1.376 | 1.394 | 1.412 | 1.445 | 1.476 | | |
| 100 (56.05) | y | 3.350 | 3.526 | 3.695 | 3.858 | 4.018 | 4.174 | 4.329 | 4.481 | 4.782 | 5.078 | | |
| | h | 630.7 | 643.6 | 655.9 | 667.9 | 679.6 | 691.1 | 702.5 | 713.8 | 736.4 | 759.1 | | |
| 140 (74.77) | s | 1.255 | 1.279 | 1.301 | 1.322 | 1.342 | 1.361 | 1.379 | 1.397 | 1.430 | 1.462 | | |
| | y | 2.983 | 3.146 | 3.301 | 3.451 | 3.597 | 3.740 | 3.880 | 4.019 | 4.291 | 4.560 | | |
| 100 (56.05) | h | 628.3 | 641.5 | 654.2 | 666.4 | 678.2 | 689.9 | 701.4 | 712.9 | 735.6 | 758.4 | | |
| | s | 1.239 | 1.264 | 1.287 | 1.308 | 1.328 | 1.347 | 1.366 | 1.383 | 1.417 | 1.449 | | |
| 140 (74.77) | y | 2.164 | 2.164 | 2.287 | 2.403 | 2.514 | 2.622 | 2.727 | 2.830 | 3.031 | 3.228 | 3.421 | |
| | h | 632.7 | 646.8 | 660.0 | 672.7 | 685.0 | 697.1 | 709.0 | 732.4 | 755.6 | 779.0 | | |
| 140 (74.77) | s | 1.212 | 1.237 | 1.261 | 1.282 | 1.302 | 1.321 | 1.340 | 1.340 | 1.374 | 1.407 | 1.437 | |

| | | | | | | | | | | |
|-----------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 220 | v | 1,443 | 1,524 | 1,602 | 1,676 | 1,747 | 1,884 | 2,016 | 2,145 | 2,208 |
| | h | 646.0 | 660.8 | 674.7 | 687.9 | 700.8 | 725.6 | 749.9 | 774.1 | 786.1 |
| (102,40)s | | | | | | | | | | |
| | v | 1,189 | 1,214 | 1,237 | 1,258 | 1,278 | 1,314 | 1,348 | 1,380 | 1,395 |
| | h | 1,301 | 1,379 | 1,452 | 1,522 | 1,588 | 1,716 | 1,839 | 1,958 | 2,017 |
| 240 | v | 642.2 | 657.6 | 671.9 | 685.6 | 698.7 | 723.9 | 748.5 | 772.8 | 785.0 |
| | h | 1,174 | 1,200 | 1,223 | 1,245 | 1,265 | 1,302 | 1,337 | 1,369 | 1,384 |
| (108,07)s | | | | | | | | | | |
| | v | 1,180 | 1,256 | 1,325 | 1,391 | 1,454 | 1,575 | 1,689 | 1,801 | 1,855 |
| | h | 638.2 | 654.3 | 669.1 | 683.1 | 696.5 | 722.2 | 747.0 | 771.6 | 783.8 |
| 260 | v | 1,159 | 1,186 | 1,211 | 1,233 | 1,253 | 1,291 | 1,326 | 1,358 | 1,374 |
| | h | 1,076 | 1,149 | 1,216 | 1,279 | 1,339 | 1,453 | 1,561 | 1,665 | 1,717 |
| 280 | v | 634.0 | 650.9 | 666.2 | 680.6 | 694.3 | 720.4 | 745.6 | 770.3 | 782.6 |
| | h | 1,145 | 1,173 | 1,198 | 1,221 | 1,242 | 1,281 | 1,316 | 1,348 | 1,364 |
| (118,43)s | | | | | | | | | | |
| TCM | | | | | | | | | | |

Tabel B3-2E

700 A-RE Sifat Refrijeran Jenuh 22 (Uap-Cair): Tabel Tekanan

| Press. lb/in. ² | Temp. °F | Volume (Specific Volume) (ft ³ /lb) | | Energi Dalam (Internal Energy) Btu/lb | | | Entalpi (Enthalpy) Btu/lb | | | Entropi (Entropy) Btu/lb • °R | | Press. lb/in. ² |
|-------------------------------|-------------|--|--|---|--|---|---------------------------------|--|--|--|-----|-------------------------------|
| | | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) v _l | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) v _g | Cair Jenuh (Sat. Liquid) u _l | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) u _g | Cair Jenuh (Sat. Liquid) h _l | Evap. h | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) h _g | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) s _l | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) s _g | | |
| 5 | -78,62 | 0,01091 | 9,3014 | 9,95 | 87,37 | -9,93 | 105,92 | 95,98 | -0,0248 | 0,2532 | 5 | |
| 10 | -55,66 | 0,01119 | 4,8769 | 4,08 | 89,58 | -4,00 | 102,67 | 98,61 | -0,0098 | 0,2443 | 10 | |
| 15 | -40,67 | 0,01138 | 3,3402 | -0,21 | 91,00 | -0,17 | 100,45 | 100,28 | -0,0004 | 0,2393 | 15 | |
| 20 | -29,22 | 0,01153 | 2,5518 | 2,78 | 92,07 | 3 | 98,70 | 101,52 | 0,0066 | 0,2359 | 20 | |
| 25 | -19,84 | 0,01166 | 2,0695 | 5,25 | 92,94 | 5,31 | 97,22 | 102,52 | 0,0123 | 0,2333 | 25 | |
| 30 | -11,82 | 0,01178 | 1,7430 | 7,38 | 93,67 | 7,44 | 95,91 | 103,35 | 0,0171 | 0,2313 | 30 | |
| 35 | -4,77 | 0,01189 | 1,5068 | 9,25 | 94,30 | 9,33 | 94,74 | 104,07 | 0,0212 | 0,2295 | 35 | |
| 40 | 1,54 | 0,01198 | 1,3277 | 10,94 | 94,86 | 11,03 | 93,66 | 104,70 | 0,0249 | 0,2280 | 40 | |
| 45 | 7,27 | 0,01207 | 1,1870 | 12,49 | 95,37 | 12,59 | 92,67 | 105,26 | 0,0283 | 0,2267 | 45 | |
| 50 | 12,53 | 0,01216 | 1,0735 | 13,91 | 95,82 | 14,03 | 91,73 | 105,76 | 0,0313 | 0,2256 | 50 | |
| 55 | 17,41 | 0,01224 | 0,9799 | 15,24 | 96,23 | 13,6 | 90,85 | 106,21 | 0,0341 | 0,2245 | 55 | |
| 60 | 21,96 | 0,01232 | 0,9014 | 10,48 | 96,62 | 16,6 | 90,01 | 106,63 | 0,0367 | 0,2236 | 60 | |
| 65 | 26,23 | 0,01239 | 0,8345 | 17,65 | 96,97 | 7,80 | 89,21 | 107,01 | 0,0391 | 0,2227 | 65 | |
| 70 | 30,26 | 0,01247 | 0,7768 | 18,76 | 97,30 | 18 | 88,45 | 107,37 | 0,0414 | 0,2219 | 70 | |
| 75 | 34,08 | 0,01254 | 0,7265 | 19,82 | 97,61 | 19,9 | 87,71 | 107,70 | 0,0435 | 0,2212 | 75 | |
| 80 | 37,71 | 0,01260 | 0,6823 | 20,83 | 97,90 | 21,01 | 86,99 | 108,00 | 0,0456 | 0,2205 | 80 | |
| 85 | 41,18 | 0,01267 | 0,6431 | 21,79 | 98,17 | 21,99 | 86,30 | 108,29 | 0,0475 | 0,2198 | 85 | |
| 90 | 44,49 | 0,01274 | 0,6081 | 22,72 | 98,43 | 22,93 | 85,63 | 108,56 | 0,0494 | 0,2192 | 90 | |
| 95 | 47,67 | 0,01280 | 0,5766 | 23,61 | 98,67 | 23,84 | 84,98 | 108,81 | 0,0511 | 0,2186 | 95 | |
| 100 | 50,73 | 0,01286 | 0,5482 | 24,47 | 98,90 | 24,71 | 84,34 | 109,05 | 0,0528 | 0,2181 | 100 | |
| 110 | 56,52 | 0,01298 | 0,4988 | 20,11 | 99,33 | 26,37 | 83,11 | 109,49 | 0,0560 | 0,2170 | 110 | |
| 120 | 61,92 | 0,01310 | 0,4573 | 27,65 | 99,71 | 27,4 | 81,93 | 109,88 | 0,0590 | 0,2161 | 120 | |
| 130 | 67,00 | 0,01321 | 0,4220 | 29,11 | 100,07 | 28,3 | 80,80 | 110,22 | 0,0618 | 0,2152 | 130 | |
| 140 | 71,80 | 0,01332 | 0,3915 | 30,50 | 100,39 | 29,18 | 79,70 | 110,54 | 0,0644 | 0,2144 | 140 | |
| 150 | 76,36 | 0,01343 | 0,3649 | 31,82 | 100,69 | 30,0 | 78,63 | 110,82 | 0,0669 | 0,2136 | 150 | |
| 160 | 80,69 | 0,01354 | 0,3416 | 33,09 | 100,96 | 30,79 | 77,59 | 110,08 | 0,0693 | 0,2128 | 160 | |
| 170 | 84,82 | 0,01365 | 0,3208 | 34,31 | 101,21 | 31,54 | 76,57 | 111,31 | 0,0715 | 0,2121 | 170 | |
| 180 | 88,78 | 0,01375 | 0,3023 | 35,49 | 101,44 | 32,25 | 75,57 | 111,52 | 0,0737 | 0,2115 | 180 | |
| 190 | 92,58 | 0,01386 | 0,2857 | 36,62 | 101,66 | 32,91 | 74,60 | 111,71 | 0,0757 | 0,2108 | 190 | |
| 200 | 96,24 | 0,01396 | 0,2706 | 37,72 | 101,86 | 33,54 | 73,64 | 111,88 | 0,0777 | 0,2102 | 200 | |
| 225 | 104,82 | 0,01422 | 0,2386 | 40,34 | 102,8 | 40,93 | 71,29 | 112,22 | 0,0824 | 0,2087 | 225 | |
| 250 | 112,73 | 0,01447 | 0,2126 | 42,79 | 102,63 | 41,6 | 69,02 | 112,47 | 0,0867 | 0,2073 | 250 | |
| 275 | 120,07 | 0,01473 | 0,1912 | 45,10 | 102,91 | 42,25 | 66,79 | 112,64 | 0,0908 | 0,2060 | 275 | |
| 300 | 126,94 | 0,01499 | 0,1732 | 47,30 | 103,11 | 42,8 | 64,60 | 112,73 | 0,0946 | 0,2047 | 300 | |
| 325 | 133,39 | 0,01525 | 0,1577 | 49,42 | 103,76 | 50,43 | 62,42 | 112,75 | 0,0982 | 0,2034 | 325 | |
| 350 | 139,49 | 0,01552 | 0,1444 | 51,45 | 103,35 | 2,46 | 60,25 | 112,71 | 0,1016 | 0,2022 | 350 | |

Tabel B3-1SI

Sifat Refrijeran Jenuh 22 (Uap-Cair): Tabel Suhu

| Temp. °C | Press. bar | Volume (Specific m ³ /kg) | | Energi (Internal kJ/kg) | | Entalpi (Enthalpy) kJ/kg | | | Entropi (Entropy) kJ/kg · K | | Temp. p. °C |
|-------------|---------------|---|---|---|---|--|--------------------------|---|---|---|-------------------|
| | | Cair Jenuh (Sat. Liquid) v _f × 10 ³ | Uap Jenuh (Sat. Vapor) v _g | Cair Jenuh (Sat. Liquid) u _f | Uap Jenuh (Sat. Vapor) u _g | Cair Jenuh (Sa. Liquid) h _f | Evap. h _{fg} | Uap Jenuh (Sat. Vapor) h _g | Cair Jenuh (Sat. Liquid) s _f | Uap Jenuh (Sat. Vapor) s _g | |
| -50 | 0,3749 | 0,6833 | 0,5370 | -21,57 | 203,67 | -21,55 | 245,35 | 223,81 | -0,0964 | 1,0547 | -60 |
| -50 | 0,6451 | 0,6966 | 0,5239 | -10,89 | 207,70 | -10,85 | 239,44 | 228,60 | -0,0474 | 1,0256 | -0 |
| -45 | 0,8290 | 0,7037 | 0,2564 | -5,50 | 209,70 | -5,44 | 236,39 | 230,95 | -0,0235 | 1,0126 | -45 |
| -40 | 1,0522 | 0,7109 | 0,2052 | -0,07 | 211,68 | 0,00 | 233,27 | 233,27 | 0,0000 | 1,0005 | -40 |
| -36 | 1,2627 | 0,7169 | 0,1730 | 9 | 213,25 | 4,38 | 230,71 | 235,09 | 0,0186 | 0,9914 | -36 |
| -32 | 1,5049 | 0,7231 | 0,1468 | 8,68 | 214,80 | 8,79 | 228,10 | 236,89 | 0,0369 | 0,9828 | -32 |
| -30 | 1,6389 | 0,7262 | 0,1355 | 10,88 | 215,58 | 11,00 | 226,77 | 237,78 | 0,0460 | 0,9787 | -30 |
| -28 | 1,7819 | 0,7294 | 0,1252 | 13,09 | 216,34 | 13,22 | 225,43 | 238,66 | 0,0551 | 0,9746 | -28 |
| -26 | 1,9345 | 0,7327 | 0,1159 | 15,31 | 217,11 | 15,45 | 224,08 | 239,53 | 0,0641 | 0,9707 | -26 |
| -22 | 2,2698 | 0,7393 | 0,0997 | 19,76 | 218,62 | 19,92 | 221,32 | 241,24 | 0,0819 | 0,9631 | -22 |
| -20 | 2,4534 | 0,7427 | 0,0926 | 21,99 | 219,37 | 22,17 | 219,91 | 242,09 | 0,0908 | 0,9595 | -20 |
| -18 | 2,6482 | 0,7462 | 0,0861 | 24,23 | 220,11 | 24,43 | 218,49 | 242,92 | 0,0996 | 0,9559 | -18 |
| -16 | 2,8547 | 0,7497 | 0,0802 | 26,48 | 220,85 | 26,69 | 217,05 | 243,74 | 0,1084 | 0,9525 | -16 |
| -14 | 3,0733 | 0,7533 | 0,0748 | 28,73 | 221,58 | 28,97 | 215,59 | 244,56 | 0,1171 | 0,9490 | -14 |
| -12 | 3,3044 | 0,7569 | 0,0698 | 31,00 | 222,30 | 31,25 | 214,11 | 245,36 | 0,1258 | 0,9457 | -12 |
| -10 | 3,5485 | 0,7606 | 0,0652 | 33,27 | 223,02 | 33,54 | 212,62 | 246,15 | 0,1345 | 0,9424 | -10 |
| -8 | 3,8062 | 0,7644 | 0,0610 | 35,54 | 223,73 | 35,83 | 211,10 | 246,93 | 0,1431 | 0,9392 | -8 |
| -6 | 4,0777 | 0,7683 | 0,0571 | 37,83 | 224,43 | 38,14 | 209,56 | 247,70 | 0,1517 | 0,9361 | |
| -4 | 4,3638 | 0,7722 | 0,0535 | 40,12 | 225,13 | 40,46 | 208,00 | 248,45 | 0,1602 | 0,9330 | -4 |
| -2 | 4,6647 | 0,7762 | 0,0501 | 42,42 | 225,82 | 42,78 | 206,41 | 249,20 | 0,1688 | 0,9300 | -2 |
| 0 | 4,9811 | 0,7803 | 0,0470 | 44,73 | 226,50 | 45,12 | 204,81 | 249,92 | 0,1773 | 0,9271 | 0 |
| 2 | 5,3133 | 0,7844 | 0,0442 | 47,04 | 227,17 | 47,46 | 203,18 | 250,64 | 0,1857 | 0,9241 | 2 |
| 4 | 5,6619 | 0,7887 | 0,0415 | 49,37 | 227,83 | 49,82 | 201,52 | 251,34 | 0,1941 | 0,9213 | 4 |
| 6 | 6,0275 | 0,7930 | 0,0391 | 51,71 | 228,48 | 52,18 | 199,84 | 252,03 | 0,2025 | 0,9184 | 6 |
| 8 | 6,4105 | 0,7974 | 0,0368 | 54,05 | 229,13 | 54,56 | 198,14 | 252,70 | 0,2109 | 0,9157 | 8 |
| 10 | 6,8113 | 0,8020 | 0,0346 | 56,40 | 229,76 | 56,95 | 196,40 | 253,35 | 0,2193 | 0,9129 | 10 |
| 12 | 7,2307 | 0,8066 | 0,0326 | 58,77 | 230,38 | 59,35 | 194,64 | 253,99 | 0,2276 | 0,9102 | 12 |
| 16 | 8,1268 | 0,8162 | 0,0291 | 63,53 | 231,59 | 64,19 | 191,02 | 255,21 | 0,2442 | 0,9048 | 16 |
| 20 | 9,1030 | 0,8263 | 0,0259 | 68,33 | 232,76 | 69,09 | 187,28 | 256,37 | 0,2607 | 0,8996 | 20 |
| 24 | 10,164 | 0,8369 | 0,0232 | 73,19 | 233,87 | 74,04 | 183,40 | 257,44 | 0,2772 | 0,8944 | 24 |
| 28 | 11,313 | 0,8480 | 0,0208 | 78,09 | 234,92 | 79,05 | 179,37 | 258,43 | 0,2936 | 0,8893 | 28 |
| 32 | 12,556 | 0,8599 | 0,0186 | 83,06 | 235,91 | 84,14 | 175,18 | 259,32 | 0,3101 | 0,8842 | 32 |
| 36 | 13,897 | 0,8724 | 0,0168 | 88,08 | 236,83 | 89,29 | 170,82 | 260,11 | 0,3265 | 0,8790 | 36 |
| 40 | 15,341 | 0,8858 | 0,0151 | 93,18 | 237,66 | 94,53 | 166,25 | 260,79 | 0,3429 | 0,8738 | 40 |
| 45 | 17,298 | 0,9039 | 0,0132 | 99,65 | 238,59 | 101,21 | 160,24 | 261,46 | 0,3635 | 0,8672 | 45 |
| 50 | 19,433 | 0,9238 | 0,0116 | 106,26 | 239,34 | 108,06 | 153,84 | 261,90 | 0,3842 | 0,8603 | 50 |
| 60 | 24,281 | 0,9705 | 0,0089 | 120,00 | 240,24 | 122,35 | 139,61 | 261,96 | 0,4264 | 0,8455 | 60 |

Sumber: Tabele A-7 hingga A-9 dihitung berdasarkan persamaan dari A. Kamei dan S. W. Beyerlein, "A Fundamental Equation for Chlorodifluoromethane (R-22)", *fluid Phase Equilibria*, Vol. 80, No. 11, 1992, hlm. 71-8

Tabel B3-2SI

Sifat Refrijeran Jenuh 22 (Uap-Cair): Tabel Tekanan

| Press. bar | Temp. °C | Volume Spesifik (Specific Volume) m ³ /kg | | Energi Dalam (Internal Energy) kJ/kg | | Entalpi (Enthalpy) kJ/kg | | | Entropi (Entropy) kJ/kg·K | | Press. bar |
|---------------|-------------|--|--|--|--|--|--------------------------|--|--|--|---------------|
| | | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) v _f × 10 ³ | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) v _g | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) u _f | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) u _g | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) h _f | Evap. h _{fg} | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) h _g | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) s _f | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) s _g | |
| 0,40 | -58,86 | 0,6847 | 0,5056 | -20,36 | 204,13 | -20,34 | 244,69 | 4,36 | -0,0907 | 1,0512 | 0,40 |
| 0,5 | -54,83 | 0,6901 | 0,4107 | -16,07 | 205,76 | -16,03 | 242,33 | 226,30 | -0,0709 | 1,0391 | 0,50 |
| 0,60 | -51,40 | 0,6947 | 0,3466 | -12,39 | 207,14 | -12,35 | 240,28 | 227,93 | -0,0542 | 1,0294 | 0,60 |
| 0,70 | -48,40 | 0,6989 | 0,3002 | -9,17 | 208,34 | -9,12 | 238,47 | 229,35 | -0,0397 | 1,0213 | 0,70 |
| 0,80 | -45,73 | 0,7026 | 0,2650 | -6,28 | 209,41 | -6,23 | 236,84 | 230,61 | -0,0270 | 1,0144 | 0,80 |
| 0,90 | -43,30 | 0,7061 | 0,2374 | 3,66 | 210,37 | -3,60 | 235,34 | 231,74 | -0,0155 | 1,0084 | 0,90 |
| 1,00 | -41,09 | 0,7093 | 0,2152 | -1,26 | 211,25 | -1,19 | 233,95 | 232,77 | -0,0051 | 1,0031 | 1,00 |
| 1,25 | -36,23 | 0,7166 | 0,1746 | 4,04 | 213,16 | 4,13 | 230,86 | 234,99 | 0,0175 | 0,9919 | 1,25 |
| 1,50 | -32,08 | 0,7230 | 0,1472 | 8,60 | 214,77 | 8,70 | 228,15 | 236,86 | 0,0366 | 0,9830 | 1,50 |
| 1,75 | -28,44 | 0,7287 | 0,1274 | 12,61 | 216,18 | 12,74 | 225,73 | 238,47 | 0,0531 | 0,9755 | 1,75 |
| 2,00 | -25,18 | 0,7340 | 0,1123 | 16,22 | 217,42 | 16,37 | 223,52 | 239,88 | 0,0678 | 0,9691 | 2,00 |
| 2,25 | -22,22 | 0,7389 | 0,1005 | 19,51 | 218,53 | 19,67 | 221,47 | 241,15 | 0,0809 | 0,9636 | 2,25 |
| 2,50 | -19,51 | 0,7436 | 0,0910 | 22,54 | 219,55 | 22,72 | 219,57 | 242,29 | 0,0930 | 0,9586 | 2,50 |
| 2,75 | -17,00 | 0,7479 | 0,0831 | 25,36 | 220,48 | 25,56 | 217,77 | 243,33 | 0,1040 | 0,9542 | 2,75 |
| 3,00 | -14,66 | 0,7521 | 0,0765 | 27,99 | 221,34 | 28,22 | 216,07 | 244,29 | 0,1143 | 0,9502 | 3,00 |
| 3,25 | -12,46 | 0,7561 | 0,0709 | 30,47 | 222,13 | 30,72 | 214,46 | 245,18 | 0,1238 | 0,9465 | 3,25 |
| 3,50 | -10,39 | 0,7599 | 0,0661 | 32,82 | 222,88 | 33,09 | 212,91 | 246,00 | 0,1328 | 0,9431 | 3,50 |
| 3,75 | -8,43 | 0,7636 | 0,0618 | 35,06 | 223,58 | 35,34 | 211,42 | 246,77 | 0,1413 | 0,9399 | 3,75 |
| 4,00 | -6,56 | 0,7672 | 0,0581 | 37,18 | 224,24 | 37,49 | 209,99 | 247,48 | 0,1493 | 0,9370 | 4,00 |
| 4,25 | -4,78 | 0,7706 | 0,0548 | 39,22 | 224,86 | 39,55 | 208,61 | 248,16 | 0,1569 | 0,9342 | 4,25 |
| 4,50 | -3,08 | 0,7740 | 0,0519 | 41,17 | 225,45 | 41,52 | 207,27 | 248,80 | 0,1642 | 0,9316 | 4,50 |
| 4,75 | -1,45 | 0,7773 | 0,0492 | 43,05 | 226,00 | 43,42 | 205,98 | 249,40 | 0,1711 | 0,9292 | 4,75 |
| 5,00 | 0,1 | 0,7805 | 0,0469 | 44,86 | 226,54 | 45,25 | 204,71 | 249,97 | 0,1777 | 0,9269 | 5,00 |
| 5,25 | 1,63 | 0,7836 | 0,0447 | 46,61 | 227,04 | 47,02 | 203,48 | 250,51 | 0,1841 | 0,9247 | 5,25 |
| 5,50 | 3,08 | 0,7867 | 0,0427 | 48,30 | 227,53 | 48,74 | 202,28 | 251,02 | 0,1903 | 0,9226 | 5,50 |
| 5,75 | 4,49 | 0,7897 | 0,0409 | 49,94 | 227,99 | 50,40 | 201,11 | 251,51 | 0,1962 | 0,9206 | 5,75 |
| 6,00 | 5,85 | 0,7927 | 0,0392 | 51,53 | 228,44 | 52,01 | 199,97 | 251,98 | 0,2019 | 0,9186 | 6,00 |
| 7,00 | 10,91 | 0,8041 | 0,0337 | 57,48 | 230,04 | 58,04 | 195,60 | 253,64 | 0,2231 | 0,9117 | 7,00 |
| 8,00 | 15,45 | 0,8149 | 0,0295 | 62,88 | 231,43 | 63,53 | 191,52 | 255,05 | 0,2419 | 0,9056 | 8,00 |
| 9,00 | 19,59 | 0,8252 | 0,0262 | 67,84 | 232,64 | 68,59 | 187,67 | 256,25 | 0,2591 | 0,9001 | 9,00 |
| 10,00 | 23,40 | 0,8352 | 0,0236 | 72,46 | 233,71 | 73,30 | 183,99 | 257,28 | 0,2748 | 0,8952 | 10,00 |
| 12,0 | 30,25 | 0,8546 | 0,0195 | 80,87 | 235,48 | 81,90 | 177,04 | 258,94 | 0,3029 | 0,8864 | 2,00 |
| 14,0 | 36,29 | 0,8734 | 0,0166 | 88,45 | 236,89 | 89,68 | 170,49 | 260,16 | 0,3277 | 0,8786 | 14,00 |
| 16,0 | 41,73 | 0,8919 | 0,0144 | 95,41 | 238,00 | 96,83 | 164,21 | 261,04 | 0,3500 | 0,8715 | 16,00 |
| 18,0 | 46,69 | 0,9104 | 0,0127 | 101,87 | 238,86 | 103,51 | 158,13 | 261,64 | 0,3705 | 0,8649 | 18,00 |
| 20,0 | 51,26 | 0,9291 | 0,0112 | 107,95 | 239,51 | 109,81 | 152,17 | 261,98 | 0,3895 | 0,8586 | 20,00 |
| 24,0 | 59,46 | 0,9677 | 0,0091 | 119,24 | 240,22 | 121,56 | 140,43 | 261,99 | 0,4241 | 0,8463 | 24,00 |

Tabel B3-3SI Uap panas lanjut R-22 (Satuan SI)

| P Temp. °C | v m ³ /kg | h kJ/kg | s kJ/kg K | v m ³ /kg | h kJ/kg | s kJ/kg K | v m ³ /kg | h kJ/kg | s kJ/kg K |
|------------------|-------------------------|-----------------|--------------|-------------------------|-----------------|--------------|-------------------------|-----------------|--------------|
| | | | | | | | | | |
| -40 | 0.440633 | 234.724 | 1.07616 | 0.216331 | 233.337 | 1.00523 | | | |
| -30 | 0.460641 | 240.602 | 1.10084 | 0.226754 | 239.359 | 1.03052 | | | |
| -20 | 0.480543 | 246.586 | 1.12495 | 0.237064 | 245.466 | 1.05513 | | | |
| -10 | 0.500357 | 252.676 | 1.14855 | 0.247279 | 251.665 | 1.07914 | | | |
| 0 | 0.520095 | 258.874 | 1.17166 | 0.257415 | 257.956 | 1.10261 | | | |
| 10 | 0.539771 | 265.180 | 1.19433 | 0.267485 | 264.345 | 1.12558 | | | |
| 20 | 0.559393 | 271.594 | 1.21659 | 0.277500 | 270.831 | 1.14809 | | | |
| 30 | 0.578970 | 278.115 | 1.23846 | 0.287467 | 277.416 | 1.17017 | | | |
| 40 | 0.598507 | 284.743 | 1.25998 | 0.297394 | 284.101 | 1.19187 | | | |
| 50 | 0.618011 | 291.478 | 1.28114 | 0.307287 | 290.887 | 1.21320 | | | |
| 60 | 0.637485 | 298.319 | 1.30199 | 0.317149 | 297.772 | 1.23418 | | | |
| 70 | 0.656935 | 305.265 | 1.32253 | 0.326986 | 304.757 | 1.25484 | | | |
| 80 | 0.676362 | 312.314 | 1.34278 | 0.336801 | 311.842 | 1.27519 | | | |
| 90 | 0.695771 | 319.465 | 1.36275 | 0.346596 | 319.026 | 1.29524 | | | |
| | | 0.20 MPa | | | 0.25 MPa | | | 0.30 MPa | |
| -20 | 0.115203 | 243.140 | 0.98184 | 0.095280 | 248.492 | 0.98231 | 0.078344 | 247.382 | 0.96170 |
| -10 | 0.120647 | 249.574 | 1.00676 | 0.099689 | 255.097 | 1.00695 | 0.082128 | 254.104 | 0.98677 |
| 0 | 0.126003 | 256.069 | 1.03098 | 0.104022 | 261.755 | 1.03089 | 0.085832 | 260.861 | 1.01106 |
| 10 | 0.131286 | 262.633 | 1.05458 | 0.108292 | 268.476 | 1.05421 | 0.089469 | 267.667 | 1.03468 |
| 20 | 0.136509 | 269.273 | 1.07763 | 0.112508 | 275.267 | 1.07699 | 0.093051 | 274.531 | 1.05771 |
| 30 | 0.141681 | 275.992 | 1.10016 | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|-----|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|
| 40 | 0.146809 | 282.796 | 1.12224 | 0.116681 | 282.132 | 1.09927 | 0.096588 | 281.460 | 1.08019 |
| 50 | 0.151902 | 289.686 | 1.14390 | 0.120815 | 289.076 | 1.12109 | 0.100085 | 288.460 | 1.10220 |
| 60 | 0.156963 | 296.664 | 1.16516 | 0.124918 | 296.102 | 1.14250 | 0.103550 | 295.535 | 1.12376 |
| 70 | 0.161997 | 303.731 | 1.18607 | 0.128993 | 303.212 | 1.16353 | 0.106986 | 302.689 | 1.14491 |
| 80 | 0.167008 | 310.890 | 1.20663 | 0.133044 | 310.409 | 1.18420 | 0.110399 | 309.924 | 1.16569 |
| 90 | 0.171999 | 318.139 | 1.22687 | 0.137075 | 317.692 | 1.20454 | 0.113790 | 317.241 | 1.18612 |
| 100 | 0.176972 | 325.480 | 1.24681 | 0.141089 | 325.063 | 1.22456 | 0.117164 | 324.643 | 1.20623 |
| 110 | 0.181931 | 332.912 | 1.26646 | 0.145086 | 332.522 | 1.24428 | 0.120522 | 332.129 | 1.22603 |

| | | | | | | | | | |
|----------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|
| 0.40 MPa | | | | | | | | | |
| 0 | 0.060731 | 252.051 | 0.95359 | 0.049355 | 257.108 | 0.95223 | 0.040180 | 255.109 | 0.92945 |
| 10 | 0.063060 | 259.023 | 0.97866 | 0.051751 | 264.295 | 0.97717 | 0.042280 | 262.517 | 0.95517 |
| 20 | 0.065915 | 266.010 | 1.00291 | 0.054081 | 271.483 | 1.00128 | 0.044307 | 269.888 | 0.97989 |
| 30 | 0.068710 | 273.029 | 1.02646 | 0.056358 | 278.690 | 1.02467 | 0.046276 | 277.280 | 1.00378 |
| 40 | 0.071455 | 280.092 | 1.04938 | 0.058590 | 285.990 | 1.04743 | 0.048198 | 284.622 | 1.02685 |
| 50 | 0.074160 | 287.209 | 1.07175 | 0.060786 | 293.215 | 1.06963 | 0.050081 | 292.020 | 1.04950 |
| 60 | 0.076830 | 294.386 | 1.09362 | 0.062951 | 300.552 | 1.09133 | 0.051931 | 299.456 | 1.07149 |
| 70 | 0.079470 | 301.630 | 1.11605 | 0.065090 | 307.949 | 1.11257 | 0.053754 | 306.938 | 1.09298 |
| 80 | 0.082085 | 308.944 | 1.13605 | 0.067206 | 315.410 | 1.13340 | 0.055553 | 314.475 | 1.11403 |
| 90 | 0.084679 | 316.332 | 1.15668 | 0.069303 | 322.939 | 1.15386 | 0.057332 | 322.071 | 1.13466 |
| 100 | 0.087254 | 323.796 | 1.17695 | 0.071384 | 330.539 | 1.17395 | 0.059094 | 329.731 | 1.15492 |
| 110 | 0.089813 | 331.339 | 1.19690 | 0.073450 | 338.213 | 1.19373 | 0.060842 | 337.458 | 1.17482 |
| 120 | 0.092358 | 338.961 | 1.21654 | 0.075503 | 345.953 | 1.21319 | 0.062576 | 345.255 | 1.19441 |
| 130 | 0.094890 | 346.664 | 1.23588 | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|----------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|
| 0.70 MPa | | | | | | | | | |
| 20 | 0.035487 | 260.667 | 0.93565 | 0.039366 | 258.737 | 0.91787 | 0.026355 | 256.713 | 0.90132 |
| 30 | 0.037305 | 268.240 | 0.96105 | 0.032034 | 266.533 | 0.94402 | 0.027915 | 264.760 | 0.92831 |
| 40 | 0.039059 | 275.769 | 0.98549 | 0.033632 | 274.243 | 0.96905 | 0.029397 | 272.670 | 0.95398 |
| 50 | 0.040763 | 283.282 | 1.00910 | 0.035175 | 281.907 | 0.99314 | 0.030819 | 280.497 | 0.97859 |
| 60 | 0.042424 | 290.800 | 1.03201 | 0.036674 | 289.553 | 1.01644 | 0.032193 | 288.278 | 1.00230 |
| 70 | 0.044052 | 298.339 | 1.05431 | 0.038136 | 297.202 | 1.03906 | 0.033528 | 296.042 | 1.02526 |
| 80 | 0.045650 | 305.912 | 1.07606 | 0.039568 | 304.868 | 1.06108 | 0.034832 | 303.807 | 1.04757 |
| 90 | 0.047224 | 313.527 | 1.09732 | 0.040974 | 312.565 | 1.08257 | 0.036108 | 311.590 | 1.06930 |

| | | | | | | | | | |
|----------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|
| 0.80 MPa | | | | | | | | | |
| 20 | 0.035487 | 260.667 | 0.93565 | 0.039366 | 258.737 | 0.91787 | 0.026355 | 256.713 | 0.90132 |
| 30 | 0.037305 | 268.240 | 0.96105 | 0.032034 | 266.533 | 0.94402 | 0.027915 | 264.760 | 0.92831 |
| 40 | 0.039059 | 275.769 | 0.98549 | 0.033632 | 274.243 | 0.96905 | 0.029397 | 272.670 | 0.95398 |
| 50 | 0.040763 | 283.282 | 1.00910 | 0.035175 | 281.907 | 0.99314 | 0.030819 | 280.497 | 0.97859 |
| 60 | 0.042424 | 290.800 | 1.03201 | 0.036674 | 289.553 | 1.01644 | 0.032193 | 288.278 | 1.00230 |
| 70 | 0.044052 | 298.339 | 1.05431 | 0.038136 | 297.202 | 1.03906 | 0.033528 | 296.042 | 1.02526 |
| 80 | 0.045650 | 305.912 | 1.07606 | 0.039568 | 304.868 | 1.06108 | 0.034832 | 303.807 | 1.04757 |
| 90 | 0.047224 | 313.527 | 1.09732 | 0.040974 | 312.565 | 1.08257 | 0.036108 | 311.590 | 1.06930 |

| | | | | | | | | | |
|----------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|
| 0.90 MPa | | | | | | | | | |
| 20 | 0.035487 | 260.667 | 0.93565 | 0.039366 | 258.737 | 0.91787 | 0.026355 | 256.713 | 0.90132 |
| 30 | 0.037305 | 268.240 | 0.96105 | 0.032034 | 266.533 | 0.94402 | 0.027915 | 264.760 | 0.92831 |
| 40 | 0.039059 | 275.769 | 0.98549 | 0.033632 | 274.243 | 0.96905 | 0.029397 | 272.670 | 0.95398 |
| 50 | 0.040763 | 283.282 | 1.00910 | 0.035175 | 281.907 | 0.99314 | 0.030819 | 280.497 | 0.97859 |
| 60 | 0.042424 | 290.800 | 1.03201 | 0.036674 | 289.553 | 1.01644 | 0.032193 | 288.278 | 1.00230 |
| 70 | 0.044052 | 298.339 | 1.05431 | 0.038136 | 297.202 | 1.03906 | 0.033528 | 296.042 | 1.02526 |
| 80 | 0.045650 | 305.912 | 1.07606 | 0.039568 | 304.868 | 1.06108 | 0.034832 | 303.807 | 1.04757 |
| 90 | 0.047224 | 313.527 | 1.09732 | 0.040974 | 312.565 | 1.08257 | 0.036108 | 311.590 | 1.06930 |

| no | Temp. °C | h kJ/kg | s kJ/kg K | h kJ/kg | s kJ/kg K | h kJ/kg | s kJ/kg K |
|-----|----------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|
| 100 | 0.048778 | 321.192 | 1.11845 | 0.042359 | 320.303 | 1.10359 | 0.037363 |
| 110 | 0.050313 | 328.914 | 1.13856 | 0.043725 | 328.087 | 1.12417 | 0.038598 |
| 120 | 0.051834 | 336.696 | 1.15861 | 0.045076 | 335.925 | 1.14437 | 0.039817 |
| 130 | 0.053341 | 344.541 | 1.17832 | 0.046413 | 343.821 | 1.16420 | 0.041022 |
| 140 | 0.054836 | 352.454 | 1.19770 | 0.047738 | 351.778 | 1.18369 | 0.042215 |
| 150 | 0.056321 | 360.435 | 1.21679 | 0.049052 | 359.799 | 1.20288 | 0.043398 |
| 160 | | | | | | | |

| no | Temp. °C | h kJ/kg | s kJ/kg K | h kJ/kg | s kJ/kg K | h kJ/kg | s kJ/kg K |
|-----|----------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|
| 30 | 0.024600 | 262.912 | 0.91358 | 0.020851 | 267.602 | 0.91411 | 0.017120 |
| 40 | 0.025995 | 271.042 | 0.93996 | 0.022051 | 276.011 | 0.94055 | 0.018247 |
| 50 | 0.027323 | 279.046 | 0.96512 | 0.023191 | 284.263 | 0.96570 | 0.019299 |
| 60 | 0.028601 | 286.973 | 0.98928 | 0.024282 | 292.415 | 0.98981 | 0.020295 |
| 70 | 0.029836 | 294.859 | 1.01260 | 0.025336 | 300.508 | 1.01305 | 0.021248 |
| 80 | 0.031038 | 302.727 | 1.03520 | 0.026359 | 308.570 | 1.03356 | 0.022167 |
| 90 | 0.032213 | 310.599 | 1.05718 | 0.027357 | 316.623 | 1.05744 | 0.023058 |
| 100 | 0.033364 | 318.488 | 1.07861 | 0.028334 | 324.682 | 1.07875 | 0.023926 |
| 110 | 0.034495 | 326.405 | 1.09955 | 0.029292 | 332.762 | 1.09957 | 0.024775 |
| 120 | 0.035609 | 334.360 | 1.12004 | 0.030236 | 340.871 | 1.11994 | 0.025608 |
| 130 | 0.036709 | 342.360 | 1.14014 | 0.031166 | 349.019 | 1.13990 | 0.026426 |
| 140 | 0.037797 | 350.410 | 1.15986 | 0.032084 | 357.210 | 1.15949 | 0.027233 |
| 150 | 0.038873 | 358.514 | 1.17924 | 0.032993 | 365.450 | 1.17873 | 0.028029 |
| 160 | 0.039940 | 366.677 | 1.19831 | | | | |

| 1.00 MPa | | | | | | | |
|----------|----------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|
| no | Temp. °C | h kJ/kg | s kJ/kg K | h kJ/kg | s kJ/kg K | h kJ/kg | s kJ/kg K |
| 50 | 0.015351 | 269.262 | 0.89689 | 0.013052 | 265.423 | 0.87625 | 0.012135 |
| 60 | 0.016351 | 278.358 | 0.92461 | 0.014028 | 275.097 | 0.90573 | 0.012135 |

| 1.80 MPa | | | | | | | |
|----------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|
| 2.00 MPa | | | | | | | |
| 50 | 0.015351 | 269.262 | 0.89689 | 0.013052 | 265.423 | 0.87625 | 0.012135 |
| 60 | 0.016351 | 278.358 | 0.92461 | 0.014028 | 275.097 | 0.90573 | 0.012135 |

| | | | | | | | | | |
|-----|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| 70 | 0.017 284 | 287.171 | 0.95068 | 0.014921 | 284.331 | 0.93304 | 0.013 008 | 281.310 | 0.91612 |
| 80 | 0.018 167 | 295.797 | 0.97546 | 0.015755 | 293.282 | 0.95876 | 0.013 811 | 290.640 | 0.94292 |
| 90 | 0.019 011 | 304.301 | 0.99920 | 0.016546 | 302.046 | 0.98323 | 0.014 563 | 299.697 | 0.96821 |
| 100 | 0.019 825 | 312.725 | 1.02209 | 0.017 303 | 310.683 | 1.00669 | 0.015 277 | 308.571 | 0.99232 |
| 110 | 0.020 614 | 321.103 | 1.04424 | 0.018 032 | 319.239 | 1.02932 | 0.015 960 | 317.322 | 1.01546 |
| 120 | 0.021 382 | 329.457 | 1.06576 | 0.018 738 | 327.745 | 1.05123 | 0.016 619 | 325.991 | 1.03780 |
| 130 | 0.022 133 | 337.805 | 1.08673 | 0.019 427 | 336.224 | 1.07253 | 0.017 258 | 334.610 | 1.05944 |
| 140 | 0.022 869 | 346.162 | 1.10721 | 0.020 099 | 344.695 | 1.09329 | 0.017 881 | 343.201 | 1.08049 |
| 150 | 0.023 592 | 354.540 | 1.12724 | 0.020 759 | 353.172 | 1.11356 | 0.018 490 | 351.783 | 1.10102 |
| 160 | 0.024 305 | 362.945 | 1.14688 | 0.021 407 | 361.656 | 1.13340 | 0.019 087 | 360.369 | 1.12107 |
| 170 | 0.025 008 | 371.386 | 1.16614 | 0.022 045 | 370.186 | 1.15284 | 0.019 673 | 368.970 | 1.14070 |
| 180 | 0.025 703 | 379.869 | 1.18507 | 0.022 675 | 378.738 | 1.17193 | 0.020 251 | 377.595 | 1.15995 |

2.50 MPa

3.00 MPa

3.50 MPa

| | | | | | | | | | |
|-----|-----------|---------|----------|-----------|---------|----------|-----------|---------|----------|
| 70 | 0.009 459 | 272.677 | 0.87476 | 0.007 747 | 274.530 | 0.86780 | 0.005 765 | 262.739 | 0.82489 |
| 80 | 0.010 243 | 283.332 | 0.90537 | 0.008 465 | 286.042 | 0.89995 | 0.006 597 | 277.268 | 0.86548 |
| 90 | 0.010 948 | 293.338 | 0.933 32 | 0.009 098 | 296.663 | 0.92881 | 0.007 257 | 289.504 | 0.89872 |
| 100 | 0.011 598 | 302.935 | 0.95939 | 0.009 674 | 306.744 | 0.95547 | 0.007 829 | 300.640 | 0.928 18 |
| 110 | 0.012 208 | 312.261 | 0.98405 | 0.010 211 | 316.470 | 0.98053 | 0.008 346 | 311.129 | 0.95520 |
| 120 | 0.012 788 | 321.400 | 1.00760 | 0.010 717 | 325.955 | 1.00435 | 0.008 825 | 321.196 | 0.98049 |
| 130 | 0.013 343 | 330.412 | 1.030 23 | 0.011 200 | 335.270 | 1.027 18 | 0.009 276 | 330.976 | 1.00445 |
| 140 | 0.013 880 | 339.336 | 1.05210 | 0.011 665 | 344.467 | 1.04918 | 0.009 704 | 340.554 | 1.02736 |
| 150 | 0.014 400 | 348.205 | 1.073 31 | 0.012 114 | 353.584 | 1.070 47 | 0.010 114 | 349.989 | 1.04940 |
| 160 | 0.014 907 | 357.040 | 1.09395 | 0.012 550 | 362.647 | 1.091 16 | 0.010 510 | 359.324 | 1.070 71 |
| 170 | 0.015 402 | 365.860 | 1.114 08 | 0.012 976 | 371.679 | 1.111 31 | 0.010 894 | 368.590 | 1.091 38 |
| 180 | 0.015 887 | 374.679 | 1.13376 | 0.013 392 | 380.695 | 1.130 99 | 0.011 268 | 377.810 | 1.111 51 |
| 190 | 0.016 364 | 383.508 | 1.153 03 | 0.013 801 | 389.708 | 1.15024 | 0.011 634 | 387.004 | 1.131 15 |
| 200 | 0.016 834 | 392.354 | 1.17192 | | | | | | |

4.00 MPa

5.00 MPa

6.00 MPa

| | | | | | | | | | |
|-----|-----------|---------|----------|-----------|---------|----------|-----------|---------|---------|
| 90 | 0.005 037 | 265.629 | 0.82544 | 0.003 334 | 253.042 | 0.78005 | 0.002 432 | 243.278 | 0.74674 |
| 100 | 0.005 804 | 280.997 | 0.867 21 | 0.004 255 | 275.919 | 0.84064 | 0.003 333 | 272.385 | 0.82185 |
| 110 | 0.006 405 | 293.748 | 0.90094 | 0.004 851 | 291.362 | 0.88045 | 0.003 899 | 290.253 | 0.86675 |
| 120 | 0.006 924 | 305.273 | 0.93064 | 0.005 335 | 304.469 | 0.913 37 | 0.004 345 | 304.757 | 0.90230 |
| 130 | 0.007 391 | 316.080 | 0.95778 | | | | | | |
| 140 | 0.007 822 | 326.422 | 0.983 12 | 0.005 757 | 316.379 | 0.94256 | | | |

| | | | | | | | | | |
|-----|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|
| 150 | 0.008226 | 336.446 | 1.00710 | 0.006439 | 327.563 | 0.96931 | 0.004728 | 317.633 | 0.93310 |
| 160 | 0.008610 | 346.246 | 1.02999 | 0.006493 | 338.266 | 0.99431 | 0.005071 | 329.553 | 0.96094 |
| 170 | 0.008978 | 355.885 | 1.05199 | 0.006826 | 348.633 | 1.01797 | 0.005386 | 340.849 | 0.98673 |
| 180 | 0.009332 | 365.409 | 1.07324 | 0.007142 | 358.760 | 1.04057 | 0.005680 | 351.715 | 1.01098 |
| 190 | 0.009675 | 374.853 | 1.09386 | 0.007444 | 368.713 | 1.06230 | 0.005958 | 362.271 | 1.03402 |
| 200 | 0.010009 | 384.240 | 1.11391 | 0.007735 | 378.537 | 1.08328 | 0.006222 | 372.602 | 1.05609 |
| 210 | 0.010335 | 393.593 | 1.13347 | 0.008018 | 388.268 | 1.10363 | 0.006477 | 382.764 | 1.07734 |
| 220 | 0.010654 | 402.925 | 1.15259 | 0.008292 | 397.932 | 1.12343 | 0.006722 | 392.801 | 1.09790 |

2.50 MPa

3.00 MPa

3.50 MPa

| | | | | | | | | | |
|----------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|
| 70 | 0.009459 | 272.677 | 0.87476 | 0.007747 | 274.530 | 0.86780 | 0.005765 | 262.739 | 0.82489 |
| 80 | 0.010243 | 283.332 | 0.90537 | 0.008465 | 286.042 | 0.89995 | 0.006597 | 277.268 | 0.86548 |
| 90 | 0.010948 | 293.338 | 0.93332 | 0.009098 | 296.663 | 0.92881 | 0.007257 | 289.504 | 0.89872 |
| 100 | 0.011598 | 302.935 | 0.95939 | 0.009674 | 306.744 | 0.95547 | 0.007829 | 300.640 | 0.92818 |
| 110 | 0.012208 | 312.261 | 0.98405 | 0.010211 | 316.470 | 0.98053 | 0.008346 | 311.129 | 0.95520 |
| 120 | 0.012788 | 321.400 | 1.00760 | 0.010717 | 325.955 | 1.00435 | 0.008825 | 321.196 | 0.98049 |
| 130 | 0.013343 | 330.412 | 1.03023 | 0.011200 | 335.270 | 1.02718 | 0.009276 | 330.976 | 1.00445 |
| 140 | 0.013880 | 339.336 | 1.05210 | 0.011665 | 344.467 | 1.04918 | 0.009704 | 340.554 | 1.02736 |
| 150 | 0.014400 | 348.205 | 1.07331 | 0.012114 | 353.584 | 1.07047 | 0.010114 | 349.989 | 1.04940 |
| 160 | 0.014907 | 357.040 | 1.09395 | 0.012550 | 362.647 | 1.09116 | 0.010510 | 359.324 | 1.07071 |
| 170 | 0.015402 | 365.860 | 1.11408 | 0.012976 | 371.679 | 1.11131 | 0.010894 | 368.590 | 1.09138 |
| 180 | 0.015887 | 374.679 | 1.13376 | 0.013392 | 380.695 | 1.13099 | 0.011268 | 377.810 | 1.11151 |
| 190 | 0.016364 | 383.508 | 1.15303 | 0.013801 | 389.708 | 1.15024 | 0.011634 | 387.004 | 1.13115 |
| 200 | 0.016834 | 392.354 | 1.17192 | 0.014211 | 398.708 | 1.16916 | 0.012000 | 396.171 | 1.15000 |
| 4.00 MPa | | | | | | | | | |
| 90 | 0.005037 | 265.629 | 0.82544 | - | 253.042 | 0.78005 | - | 243.278 | 0.74674 |
| 100 | 0.005804 | 280.997 | 0.86721 | 0.003334 | 275.919 | 0.84064 | 0.002432 | 272.385 | 0.82185 |
| 110 | 0.006405 | 293.748 | 0.90094 | 0.004255 | 291.362 | 0.88045 | 0.003333 | 272.385 | 0.82185 |
| 120 | 0.006924 | 305.273 | 0.93064 | 0.004851 | 291.362 | 0.88045 | 0.003333 | 272.385 | 0.82185 |
| 5.00 MPa | | | | | | | | | |
| 6.00 MPa | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|-----|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|
| 130 | 0.007391 | 316.080 | 0.95778 | 0.005335 | 304.469 | 0.91337 | 0.003899 | 290.253 | 0.86675 |
| 140 | 0.007822 | 326.422 | 0.98312 | 0.005757 | 316.379 | 0.94256 | 0.004345 | 304.757 | 0.90230 |
| 150 | 0.008226 | 336.446 | 1.00710 | 0.006139 | 327.563 | 0.96931 | 0.004728 | 317.633 | 0.93310 |
| 160 | 0.008610 | 346.246 | 1.02999 | 0.006493 | 338.266 | 0.99431 | 0.005071 | 329.553 | 0.96094 |
| 170 | 0.008978 | 355.885 | 1.05199 | 0.006826 | 348.633 | 1.01797 | 0.005386 | 340.849 | 0.98673 |
| 180 | 0.009332 | 365.409 | 1.07324 | 0.007142 | 358.760 | 1.04057 | 0.005680 | 351.715 | 1.01098 |
| 190 | 0.009675 | 374.853 | 1.09386 | 0.007444 | 368.713 | 1.06230 | 0.005958 | 362.271 | 1.03402 |
| 200 | 0.010009 | 384.240 | 1.11391 | 0.007735 | 378.537 | 1.08328 | 0.006222 | 372.602 | 1.05609 |
| 210 | 0.010335 | 393.593 | 1.13347 | 0.008018 | 388.268 | 1.10363 | 0.006477 | 382.764 | 1.07734 |
| 220 | 0.010654 | 402.925 | 1.15259 | 0.008292 | 397.932 | 1.12343 | 0.006722 | 392.801 | 1.09790 |

Tabel B3-1E

Sifat Refrijeran Jenuh 22 (Uap-Cair): Tabel Suhu

| Temp. °F | Press. lbf/in ² | Volume Spesifik (Specific Volume) ft ³ /lb | | Energi Dalam (Internal Energy) Btu/lb | | Entalpi (Enthalpy) Btu/lb | | | Entropi (Entropy) Btu/lb - °R | | Temp. °F |
|-------------|-------------------------------|---|--|---|-------------------------------------|---|------------|--|--|---|-------------|
| | | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) v _l | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) v _v | Cair Jenuh (Sat. Liquid) t | Uap Jenuh (Sa. Vapor) u | Cair Jenuh (Sat. Liquid) h _l | Evap. h | Uap- Jenuh (Sat. Vapor) h _v | Cair- Jenuh (Sat. Liquid) s _l | Uap Jenuh (Sat. Vapor) s _v | |
| -80 | 4,781 | 0,01090 | 9,6954 | -10,30 | 87,24 | -10,29 | 106,11 | 95,82 | -0,0257 | 0,2538 | -80 |
| -60 | 8,834 | 0,01111 | 5,4744 | -5,20 | 89,16 | -5,18 | 102,30 | 98,12 | -0,0126 | 0,2458 | -60 |
| -55 | 10,187 | 0,01120 | 4,7933 | -3,91 | 89,64 | -3,89 | 102,58 | 98,68 | -0,0094 | 0,2441 | -55 |
| -50 | 11,701 | 0,01126 | 4,2123 | 6 | 90,12 | -2,60 | 101,84 | 99,24 | -0,0063 | 0,2424 | -50 |
| -45 | 13,387 | 0,0111 | 3,7147 | -1,33 | 90,59 | -1,30 | 101,10 | 99,80 | -0,0031 | 0,2407 | -45 |
| -40 | 15,261 | 0,01139 | 3,2669 | -4,03 | 91,07 | 0,00 | 100,35 | 100,35 | 0,0000 | 0,2391 | -40 |
| -35 | 17,335 | 0,01145 | 2,9176 | 1,27 | 91,54 | 1,31 | 99,59 | 100,90 | 0,0031 | 0,2376 | -35 |
| -30 | 19,624 | 0,01152 | 2,5976 | 2,58 | 92,00 | 2,62 | 98,82 | 101,44 | 0,0061 | 0,2361 | -30 |
| -25 | 22,142 | 0,01159 | 2,3195 | 3,89 | 92,47 | 3,94 | 98,04 | 101,98 | 0,0092 | 0,2347 | -25 |
| -20 | 24,906 | 0,01166 | 2,0768 | 5,21 | 92,93 | 5,26 | 97,24 | 102,50 | 0,0122 | 0,2334 | -20 |
| -15 | 27,931 | 0,01173 | 1,8644 | 6,53 | 93,38 | 6,59 | 96,43 | 103,03 | 0,0152 | 0,2321 | -15 |
| -10 | 31,233 | 0,01181 | 1,6780 | 7,86 | 93,84 | 7,93 | 95,61 | 103,54 | 0,0182 | 0,2308 | -10 |
| -5 | 34,829 | 0,01188 | 1,5138 | 9,19 | 94,28 | 9,27 | 94,78 | 104,05 | 0,0211 | 0,2296 | -5 |
| 0 | 38,734 | 0,01190 | 1,3688 | 10,53 | 94,73 | 10,61 | 93,93 | 104,55 | 0,0240 | 0,2284 | 0 |
| 5 | 42,967 | 0,01204 | 1,2404 | 11,88 | 95,17 | 11,97 | 93,06 | 105,04 | 0,0270 | 0,2272 | 5 |
| 10 | 47,545 | 0,01212 | 1,1264 | 13,23 | 95,60 | 13,33 | 92,18 | 105,52 | 0,0298 | 0,2261 | 10 |
| 15 | 52,486 | 0,01220 | 1,0248 | 14,58 | 96,03 | 14,70 | 91,29 | 105,99 | 0,0327 | 0,2250 | 15 |
| 20 | 57,808 | 0,01229 | 0,9342 | 15,95 | 96,45 | 16,08 | 90,38 | 106,45 | 0,0356 | 0,2240 | 20 |
| 25 | 63,529 | 0,01237 | 0,8531 | 17,31 | 96,87 | 17,46 | 89,45 | 106,90 | 0,0384 | 0,2230 | 25 |
| 30 | 69,668 | 0,01246 | 0,7804 | 18,69 | 97,28 | 18,85 | 88,50 | 107,35 | 0,0412 | 0,2220 | 30 |
| 35 | 76,245 | 0,01255 | 0,7150 | 20,07 | 97,68 | 20,25 | 87,53 | 107,78 | 0,0441 | 0,2210 | 35 |
| 40 | 83,278 | 0,01265 | 0,6561 | 21,46 | 98,08 | 21,66 | 86,54 | 108,20 | 0,0468 | 0,2200 | 40 |
| 45 | 90,787 | 0,01275 | 0,6029 | 2,86 | 98,47 | 23,07 | 85,53 | 108,60 | 0,0496 | 0,2191 | 45 |
| 50 | 98,792 | 0,01285 | 0,5548 | 24,27 | 98,84 | 24,50 | 84,49 | 108,99 | 0,0524 | 0,2182 | 50 |
| 55 | 107,31 | 0,01295 | 0,5112 | 25,68 | 99,22 | 25,94 | 83,44 | 109,37 | 0,0552 | 0,2173 | 55 |
| 60 | 116,37 | 0,01306 | 0,4716 | 27,10 | 99,58 | 27,38 | 82,36 | 109,74 | 0,0579 | 0,2164 | 60 |
| 65 | 125,98 | 0,01317 | 0,4355 | 28,53 | 99,93 | 28,84 | 81,25 | 110,09 | 0,0607 | 0,2155 | 65 |
| 70 | 136,18 | 0,01328 | 0,4027 | 29,98 | 100,27 | 30,31 | 80,11 | 110,42 | 0,0634 | 0,2147 | 70 |
| 75 | 146,97 | 0,01340 | 0,3726 | 31,43 | 100,60 | 31,79 | 78,95 | 110,74 | 0,0661 | 0,2138 | 75 |
| 80 | 158,38 | 0,01352 | 0,3452 | 32,89 | 100,92 | 33,29 | 77,75 | 111,04 | 0,0689 | 0,2130 | 80 |
| 85 | 170,44 | 0,01365 | 0,3200 | 34,36 | 101,22 | 34,80 | 76,53 | 111,32 | 0,0716 | 0,2121 | 85 |
| 90 | 183,16 | 0,01378 | 0,2969 | 35,85 | 101,51 | 36,32 | 75,26 | 111,58 | 0,0743 | 0,2113 | 90 |
| 95 | 196,57 | 0,01392 | 0,2756 | 37,35 | 101,79 | 37,86 | 73,96 | 111,82 | 0,0771 | 0,2104 | 95 |
| 100 | 210,69 | 0,01407 | 0,2560 | 38,86 | 102,05 | 39,41 | 72,63 | 112,04 | 0,0798 | 0,2095 | 100 |
| 105 | 225,54 | 0,01422 | 0,2379 | 40,39 | 102,29 | 40,99 | 71,24 | 112,23 | 0,0825 | 0,2087 | 105 |
| 110 | 241,15 | 0,01438 | 0,2212 | 41,94 | 102,52 | 42,58 | 69,82 | 112,40 | 0,0852 | 0,2078 | 110 |
| 115 | 257,55 | 0,01455 | 0,2058 | 43,50 | 102,72 | 44,19 | 68,34 | 112,53 | 0,0880 | 0,2069 | 115 |
| 120 | 274,75 | 0,01472 | 0,1914 | 45,08 | 102,90 | 45,83 | 66,81 | 112,64 | 0,0907 | 0,2060 | 120 |
| 140 | 352,17 | 0,01555 | 0,1433 | 51,62 | 103,36 | 52,64 | 60,06 | 112,70 | 0,1019 | 0,2021 | 140 |

Sumber: Tabel A-7E hingga A-9E, dihitung berdasarkan persamaan A. Kamci dan S. W. Boyerlein, "A Fundamental Equation for Chlorodifluoromethane (R-22)," *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 80, No. 11, 1992, hlm. 71-86. TABEL DALAM SATUAN INGGRES

Tabel B3-3E Uap panas Injut -22 (satuan)

| N Inqaris | F Subtu | 5.90 lb/ftm. ² | | 10.00 lb/ftm. ² | | 15.00 lb/ftm. ² | | | | |
|--------------|------------|---------------------------|--------------|----------------------------|--------------|----------------------------|--------------|-----------|---------|----------|
| | | V ft ³ /lbm | h Btu/lbm | V ft ³ /lbm | h Btu/lbm | V ft ³ /lbm | h Btu/lbm | | | |
| -20 | | 10.803 437 | 103.885 | 0.27238 | 5.345 980 | 103.526 | 0.25588 | 3.526 127 | 103.159 | 0.24596 |
| 0 | | 11.311 411 | 106.735 | 0.27872 | 5.606 006 | 106.414 | 0.26230 | 3.703 682 | 106.088 | 0.25248 |
| 20 | | 11.817 729 | 109.643 | 0.28491 | 5.864 306 | 109.356 | 0.26856 | 3.879 438 | 109.065 | 0.25882 |
| 40 | | 12.322 672 | 112.611 | 0.29097 | 6.121 184 | 112.353 | 0.27468 | 4.053 721 | 112.091 | 0.26500 |
| 60 | | 12.826 471 | 115.638 | 0.29691 | 6.376 884 | 115.404 | 0.28067 | 4.226 790 | 115.168 | 0.27103 |
| 80 | | 13.329 310 | 118.724 | 0.30274 | 6.631 601 | 118.512 | 0.28654 | 4.398 851 | 118.298 | 0.27694 |
| 100 | | 13.831 342 | 121.867 | 0.30845 | 6.885 493 | 121.674 | 0.29229 | 4.570 068 | 121.480 | 0.28273 |
| 120 | | 14.332 691 | 125.069 | 0.314 07 | 7.138 689 | 124.892 | 0.29794 | 4.740 576 | 124.715 | 0.28841 |
| 140 | | 14.833 460 | 128.327 | 0.31960 | 7.391 295 | 128.165 | 0.30349 | 4.910 485 | 128.003 | 0.29399 |
| 160 | | 15.333 734 | 131.642 | 0.32504 | 7.643 400 | 131.493 | 0.30895 | 5.079 885 | 131.344 | 0.29947 |
| 180 | | 15.833 586 | 135.012 | 0.33039 | 7.895 077 | 134.875 | 0.31432 | 5.248 850 | 134.737 | 0.30486 |
| 200 | | 16.333 073 | 138.437 | 0.33566 | 8.146 385 | 138.310 | 0.31961 | 5.417 443 | 138.183 | 0.31016 |
| 220 | | 16.832 247 | 141.916 | 0.34086 | 8.397 376 | 141.799 | 0.32482 | 5.585 717 | 141.680 | 0.31538 |
| 240 | | 17.331 150 | 145.449 | 0.34598 | 8.648 094 | 145.339 | 0.32995 | 5.753 713 | 145.229 | 0.32053 |
| 0 | | 2.752110 | 105.756 | 0.24535 | 2.180 820 | 105.419 | 0.23970 | 1.799 655 | 105.076 | 0.23497 |
| 20 | | 2.886 696 | 108.769 | 0.25177 | 2.290 794 | 108.469 | 0.24619 | 1.893 302 | 108.165 | 0.241 54 |
| 40 | | 3.019 756 | 111.826 | 0.25801 | 2.399 184 | 111.558 | 0.25250 | 1.985 301 | 111.286 | 0.24792 |
| 60 | | 3.151 564 | 114.930 | 0.26410 | 2.506 281 | 114.689 | 0.25864 | 2.075 964 | 114.445 | 0.25412 |
| 80 | | 3.282 337 | 118.082 | 0.27005 | 2.612 314 | 117.865 | 0.26464 | 2.165 535 | 117.645 | 0.26016 |
| 100 | | 3.412 247 | 121.284 | 0.27588 | 2.717 465 | 121.087 | 0.27050 | 2.254 201 | 120.888 | 0.26606 |
| 120 | | 3.541 434 | 124.536 | 0.281 59 | 2.821 879 | 124.357 | 0.27624 | 2.342 116 | 124.176 | 0.271 83 |

Tabel B3-3E Uap panas Injut -22 (satuan

| No Inqaris Suhu F | 5,90 Btu/in. ² | | | 10,00 Btu/in. ² | | | 15,00 Btu/in. ² | | |
|----------------------------|---------------------------|--------------|----------------|----------------------------|--------------|----------------|----------------------------|--------------|----------------|
| | V ft ³ /lbm | h Btu/lbm | s Btu/lbm R | V ft ³ /lbm | h Btu/lbm | s Btu/lbm R | V ft ³ /lbm | h Btu/lbm | s Btu/lbm R |
| -20 | 10,803 437 | 103,885 | 0,27238 | 5,345 980 | 103,526 | 0,25588 | 3,526 127 | 103,159 | 0,24596 |
| 0 | 11,311 411 | 106,735 | 0,27872 | 5,606 006 | 106,414 | 0,26230 | 3,703 682 | 106,088 | 0,25248 |
| 20 | 11,817 729 | 109,643 | 0,28491 | 5,864 306 | 109,356 | 0,26856 | 3,879 438 | 109,065 | 0,25882 |
| 40 | 12,322 672 | 112,611 | 0,29097 | 6,121 184 | 112,353 | 0,27468 | 4,053 721 | 112,091 | 0,26500 |
| 60 | 12,826 471 | 115,638 | 0,29691 | 6,376 884 | 115,404 | 0,28067 | 4,226 790 | 115,168 | 0,27103 |
| 80 | 13,329 310 | 118,724 | 0,30274 | 6,631 601 | 118,512 | 0,28654 | 4,398 851 | 118,298 | 0,27694 |
| 100 | 13,831 342 | 121,867 | 0,30845 | 6,885 493 | 121,674 | 0,29229 | 4,570 068 | 121,480 | 0,28273 |
| 120 | 14,332 691 | 125,069 | 0,31407 | 7,138 689 | 124,892 | 0,29794 | 4,740 576 | 124,715 | 0,28841 |
| 140 | 14,833 460 | 128,327 | 0,31960 | 7,391 295 | 128,165 | 0,30349 | 4,910 485 | 128,003 | 0,29399 |
| 160 | 15,333 734 | 131,642 | 0,32504 | 7,643 400 | 131,493 | 0,30895 | 5,079 885 | 131,344 | 0,29947 |
| 180 | 15,833 586 | 135,012 | 0,33039 | 7,895 077 | 134,875 | 0,31432 | 5,248 850 | 134,737 | 0,30486 |
| 200 | 16,333 073 | 138,437 | 0,33566 | 8,146 385 | 138,310 | 0,31961 | 5,417 443 | 138,183 | 0,31016 |
| 220 | 16,832 247 | 141,916 | 0,34086 | 8,397 376 | 141,799 | 0,32482 | 5,585 717 | 141,680 | 0,31538 |
| 240 | 17,331 150 | 145,449 | 0,34598 | 8,648 094 | 145,339 | 0,32995 | 5,753 713 | 145,229 | 0,32053 |
| | | | | | | | | | |
| 0 | 2,752110 | 105,756 | 0,24535 | 2,180 820 | 105,419 | 0,23970 | 1,799 655 | 105,076 | 0,23497 |
| 20 | 2,886 696 | 108,769 | 0,25177 | 2,290 794 | 108,469 | 0,24619 | 1,893 302 | 108,165 | 0,24154 |
| 40 | 3,019 756 | 111,826 | 0,25801 | 2,399 184 | 111,558 | 0,25250 | 1,985 301 | 111,286 | 0,24792 |
| 60 | 3,151 564 | 114,930 | 0,26410 | 2,506 281 | 114,689 | 0,25864 | 2,075 964 | 114,445 | 0,25412 |
| 80 | 3,282 337 | 118,082 | 0,27005 | 2,612 314 | 117,865 | 0,26464 | 2,165 535 | 117,645 | 0,26016 |
| 100 | 3,412 247 | 121,284 | 0,27588 | 2,717 465 | 121,087 | 0,27050 | 2,254 201 | 120,888 | 0,26606 |
| 120 | 3,541 434 | 124,536 | 0,28159 | 2,821 879 | 124,357 | 0,27624 | 2,342 116 | 124,176 | 0,27183 |

| | | | | | | | | | |
|-----|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| 260 | 1.242 834 | 147.677 | 0.28909 | 1.083 276 | 147.463 | 0.26581 | 0.859 850 | 147.032 | 0.28026 |
| 280 | 1.280 461 | 151.401 | 0.29419 | 1.116 488 | 151.202 | 0.29094 | 0.886 890 | 150.800 | 0.28542 |
| 300 | 1.317 892 | 155.167 | 0.29922 | 1.149 500 | 154.981 | 0.29598 | 0.913 725 | 154.805 | 0.29050 |

(Continued)

| P. F | 125.00 lbf/in. ² | | 150.00 lbf/in. ² | | 175.00 lbf/in. ² | |
|---------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|----------------|
| | v ft/lbm | h Btu/lbm | s Btu/lbm R | c ft/lbm | h Btu/lbm | s Btu/lbm R |

| | | | | | | | | | |
|-----|-----------|---------|---------|-----------|---------|----------|-----------|---------|---------|
| 80 | 0.462 187 | 112.989 | 0.22104 | 0.370 548 | 111.556 | 0.21484 | 0.327 308 | 114.180 | 0.21668 |
| 100 | 0.489 623 | 116.743 | 0.22787 | 0.395 343 | 115.504 | 0.22202 | 0.348 835 | 118.221 | 0.22378 |
| 120 | 0.515 842 | 120.456 | 0.23439 | 0.418 698 | 119.368 | 0.22880 | 0.369 104 | 122.172 | 0.23048 |
| 140 | 0.541 119 | 124.148 | 0.24065 | 0.440 974 | 123.181 | 0.23527 | 0.388 428 | 126.069 | 0.23687 |
| 160 | 0.565 647 | 127.835 | 0.24670 | 0.462 413 | 126.968 | 0.24148 | 0.407 018 | 129.935 | 0.24301 |
| 180 | 0.589 569 | 131.528 | 0.25256 | 0.483 188 | 130.744 | 0.24748 | 0.425 024 | 133.787 | 0.24894 |
| 200 | 0.612 993 | 135.234 | 0.25827 | 0.503 424 | 134.520 | 0.25329 | 0.442 555 | 137.637 | 0.25469 |
| 220 | 0.636 004 | 138.959 | 0.26383 | 0.523 219 | 138.305 | 0.25895 | 0.459 695 | 141.493 | 0.26028 |
| 240 | 0.658 668 | 142.708 | 0.26927 | 0.542 646 | 142.107 | 0.26446 | 0.476 509 | 145.363 | 0.26573 |
| 260 | 0.681 039 | 146.485 | 0.27459 | 0.561 765 | 145.929 | 0.26984 | 0.493 050 | 149.251 | 0.27106 |
| 280 | 0.703 159 | 150.292 | 0.27980 | 0.580 621 | 149.775 | 0.275 12 | 0.509 357 | 153.162 | 0.27628 |
| 300 | 0.725 065 | 154.130 | 0.28493 | 0.599 254 | 153.649 | 0.28028 | 0.525 464 | 157.098 | 0.28139 |
| 320 | 0.746 785 | 158.003 | 0.28996 | 0.617 695 | 157.553 | 0.28536 | 0.541 400 | 161.062 | 0.28641 |
| 340 | 0.768 345 | 161.911 | 0.29491 | 0.635 970 | 161.489 | 0.29034 | | | |

200.00 lbf/in.²

250.00 lbf/in.²

300.00 lbf/in.²

| | | | | | | | | | |
|-----|-----------|---------|---------|-----------|---------|----------|-----------|---------|---------|
| 100 | 0.275 532 | 112.750 | 0.21165 | 0.220 383 | 114.297 | 0.21036 | 0.185 201 | 116.199 | 0.21042 |
| 120 | 0.295 948 | 117.004 | 0.21911 | 0.237 948 | 118.818 | 0.21803 | 0.200 622 | 120.938 | 0.21820 |
| 140 | 0.314 866 | 121.114 | 0.22608 | 0.254 012 | 123.141 | 0.225 12 | 0.214 601 | 125.436 | 0.22534 |
| 160 | 0.332 701 | 125.134 | 0.23268 | 0.269 023 | 127.340 | 0.23179 | 0.227 586 | 129.784 | 0.23204 |
| 180 | 0.349 717 | 129.100 | 0.23898 | 0.283 251 | 131.461 | 0.238 14 | 0.239 842 | 134.035 | 0.23839 |
| 200 | 0.366 094 | 133.034 | 0.24503 | 0.29 876 | 135.533 | 0.24422 | 0.251 540 | 138.225 | 0.24446 |
| 220 | 0.381 960 | 136.953 | 0.25089 | 0.310 023 | 139.576 | 0.25008 | 0.262 797 | 142.375 | 0.25031 |
| 240 | 0.397 409 | 140.867 | 0.25656 | 0.322 782 | 143.604 | 0.25576 | 0.273 699 | 146.503 | 0.25597 |
| 260 | 0.412 513 | 144.787 | 0.26209 | 0.335 222 | 147.629 | 0.26127 | 0.284 308 | 150.621 | 0.26146 |
| 280 | 0.427 330 | 148.719 | 0.26747 | 0.347 397 | 151.659 | 0.26665 | | | |
| 300 | 0.441 904 | 152.668 | 0.27274 | | | | | | |

| P | Subu F | 125.00 lbf/in. ² | | 150.00 lbf/in. ² | | 175.00 lbf/in. ² | | | | |
|-----------------------------|-----------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------|---------------------------|--------------|----------------|
| | | v ft ³ /lbm | h Btu/lbm | s Btu/lbm R | c ft ³ /lbm | h Btu/lbm | s Btu/lbm R | v ft ³ /lbm | h Btu/lbm | s Btu/lbm R |
| 260 | | 1.242 834 | 147.677 | 0.28909 | 1.083 276 | 147.463 | 0.28561 | 0.859 850 | 147.032 | 0.28026 |
| 280 | | 1.280 461 | 151.401 | 0.29419 | 1.116 488 | 151.202 | 0.29094 | 0.886 890 | 150.800 | 0.28542 |
| 300 | | 1.317 892 | 155.167 | 0.29922 | 1.149 500 | 154.981 | 0.29598 | 0.913 725 | 154.605 | 0.29050 |
| (Continued) | | | | | | | | | | |
| 200.00 lbf/in. ² | | | | | | | | | | |
| 100 | | 0.275 532 | 112.750 | 0.21165 | 0.220 383 | 114.297 | 0.21036 | 0.185 201 | 116.199 | 0.21042 |
| 120 | | 0.295 948 | 117.004 | 0.21911 | 0.237 948 | 118.818 | 0.21803 | 0.200 622 | 120.938 | 0.21820 |
| 140 | | 0.314 866 | 121.114 | 0.22608 | 0.254 012 | 123.141 | 0.22512 | 0.214 601 | 125.436 | 0.22534 |
| 160 | | 0.332 701 | 125.134 | 0.23268 | 0.269 033 | 127.340 | 0.23179 | 0.227 586 | 129.784 | 0.23204 |
| 180 | | 0.349 717 | 129.100 | 0.23898 | 0.283 251 | 131.461 | 0.23814 | 0.239 842 | 134.035 | 0.23839 |
| 200 | | 0.366 094 | 133.034 | 0.24503 | 0.29 876 | 135.533 | 0.24422 | 0.251 540 | 138.225 | 0.24446 |
| 220 | | 0.381 960 | 136.953 | 0.25089 | 0.310 023 | 139.576 | 0.25008 | 0.262 797 | 142.375 | 0.25031 |
| 240 | | 0.397 409 | 140.867 | 0.25656 | 0.322 782 | 143.604 | 0.25576 | 0.273 699 | 146.503 | 0.25597 |
| 260 | | 0.412 513 | 144.787 | 0.26209 | 0.335 222 | 147.629 | 0.26127 | 0.284 308 | 150.621 | 0.26146 |
| 280 | | 0.427 330 | 148.719 | 0.26747 | 0.347 397 | 151.659 | 0.26665 | | | |
| 300 | | 0.441 904 | 152.668 | 0.27274 | | | | | | |
| 250.00 lbf/in. ² | | | | | | | | | | |
| 100 | | 0.275 532 | 112.750 | 0.21165 | 0.220 383 | 114.297 | 0.21036 | 0.185 201 | 116.199 | 0.21042 |
| 120 | | 0.295 948 | 117.004 | 0.21911 | 0.237 948 | 118.818 | 0.21803 | 0.200 622 | 120.938 | 0.21820 |
| 140 | | 0.314 866 | 121.114 | 0.22608 | 0.254 012 | 123.141 | 0.22512 | 0.214 601 | 125.436 | 0.22534 |
| 160 | | 0.332 701 | 125.134 | 0.23268 | 0.269 033 | 127.340 | 0.23179 | 0.227 586 | 129.784 | 0.23204 |
| 180 | | 0.349 717 | 129.100 | 0.23898 | 0.283 251 | 131.461 | 0.23814 | 0.239 842 | 134.035 | 0.23839 |
| 200 | | 0.366 094 | 133.034 | 0.24503 | 0.29 876 | 135.533 | 0.24422 | 0.251 540 | 138.225 | 0.24446 |
| 220 | | 0.381 960 | 136.953 | 0.25089 | 0.310 023 | 139.576 | 0.25008 | 0.262 797 | 142.375 | 0.25031 |
| 240 | | 0.397 409 | 140.867 | 0.25656 | 0.322 782 | 143.604 | 0.25576 | 0.273 699 | 146.503 | 0.25597 |
| 260 | | 0.412 513 | 144.787 | 0.26209 | 0.335 222 | 147.629 | 0.26127 | 0.284 308 | 150.621 | 0.26146 |
| 280 | | 0.427 330 | 148.719 | 0.26747 | 0.347 397 | 151.659 | 0.26665 | | | |
| 300 | | 0.441 904 | 152.668 | 0.27274 | | | | | | |
| 300.00 lbf/in. ² | | | | | | | | | | |
| 100 | | 0.275 532 | 112.750 | 0.21165 | 0.220 383 | 114.297 | 0.21036 | 0.185 201 | 116.199 | 0.21042 |
| 120 | | 0.295 948 | 117.004 | 0.21911 | 0.237 948 | 118.818 | 0.21803 | 0.200 622 | 120.938 | 0.21820 |
| 140 | | 0.314 866 | 121.114 | 0.22608 | 0.254 012 | 123.141 | 0.22512 | 0.214 601 | 125.436 | 0.22534 |
| 160 | | 0.332 701 | 125.134 | 0.23268 | 0.269 033 | 127.340 | 0.23179 | 0.227 586 | 129.784 | 0.23204 |
| 180 | | 0.349 717 | 129.100 | 0.23898 | 0.283 251 | 131.461 | 0.23814 | 0.239 842 | 134.035 | 0.23839 |
| 200 | | 0.366 094 | 133.034 | 0.24503 | 0.29 876 | 135.533 | 0.24422 | 0.251 540 | 138.225 | 0.24446 |
| 220 | | 0.381 960 | 136.953 | 0.25089 | 0.310 023 | 139.576 | 0.25008 | 0.262 797 | 142.375 | 0.25031 |
| 240 | | 0.397 409 | 140.867 | 0.25656 | 0.322 782 | 143.604 | 0.25576 | 0.273 699 | 146.503 | 0.25597 |
| 260 | | 0.412 513 | 144.787 | 0.26209 | 0.335 222 | 147.629 | 0.26127 | 0.284 308 | 150.621 | 0.26146 |
| 280 | | 0.427 330 | 148.719 | 0.26747 | 0.347 397 | 151.659 | 0.26665 | | | |
| 300 | | 0.441 904 | 152.668 | 0.27274 | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|-----|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| 360 | 0.120 566 | 155.695 | 0.25099 | 0.102 306 | 153.686 | 0.24603 | 0.088 104 | 151.600 | 0.24134 |
| 380 | 0.125 992 | 160.387 | 0.25664 | 0.107 373 | 158.557 | 0.25190 | 0.092 910 | 156.672 | 0.24745 |
| 400 | 0.131 218 | 165.025 | 0.26210 | 0.112 219 | 163.344 | 0.25753 | 0.097 471 | 161.623 | 0.25328 |
| 420 | 0.136 279 | 169.625 | 0.26739 | 0.116 884 | 168.071 | 0.26297 | 0.101 836 | 166.487 | 0.25888 |
| 440 | 0.141 201 | 174.201 | 0.27253 | 0.121 399 | 172.756 | 0.26824 | 0.106 039 | 171.289 | 0.26427 |
| 460 | 0.146005 | 178.761 | 0.27755 | 0.125 787 | 177.412 | 0.27335 | 0.110108 | 176.046 | 0.26950 |
| 480 | 0.150 707 | 183.315 | 0.28245 | 0.130 067 | 182.049 | 0.27834 | 0.114 063 | 180.771 | 0.27458 |
| 500 | 0.155 321 | 187.867 | 0.28724 | 0.134 254 | 186.675 | 0.28321 | 0.117 920 | 185.475 | 0.27954 |

0-

| | | | | | | | | | |
|-----|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| 360 | 0.120 566 | 155.695 | 0.25099 | 0.102 306 | 153.686 | 0.24603 | 0.088 104 | 151.600 | 0.24134 |
| 380 | 0.125 992 | 160.387 | 0.25664 | 0.107 373 | 158.557 | 0.25190 | 0.092 910 | 156.672 | 0.24745 |
| 400 | 0.131 218 | 165.025 | 0.26210 | 0.112 219 | 163.344 | 0.25753 | 0.097 471 | 161.623 | 0.25328 |
| 420 | 0.136 279 | 169.625 | 0.26739 | 0.116 884 | 168.071 | 0.26297 | 0.101 836 | 166.487 | 0.25888 |
| 440 | 0.141 201 | 174.201 | 0.27253 | 0.121 399 | 172.756 | 0.26824 | 0.106 039 | 171.289 | 0.26427 |
| 460 | 0.146005 | 178.761 | 0.27755 | 0.125 787 | 177.412 | 0.27335 | 0.110108 | 176.046 | 0.26950 |
| 480 | 0.150 707 | 183.315 | 0.28245 | 0.130 067 | 182.049 | 0.27834 | 0.114 063 | 180.771 | 0.27458 |
| 500 | 0.155 321 | 187.867 | 0.28724 | 0.134 254 | 186.675 | 0.28321 | 0.117 920 | 185.475 | 0.27954 |

0-

| T K | h kJ/kg | Pr | u kJ/kg | v_r | ϕ kJ/kg K |
|----------|--------------|--------|--------------|--------|-------------------|
| 470 | 472.25 | 6.742 | 337.34 | 46.48 | 2.9693 |
| 480 | 482.48 | 7.268 | 344.74 | 44.04 | 2.9909 |
| 490 | 492.74 | 7.824 | 352.11 | 41.76 | 3.0120 |
| 500 | 503.02 | 8.411 | 359.53 | 39.64 | 3.0328 |
| 510 | 513.32 | 9.031 | 366.97 | 37.65 | 3.0532 |
| 520 | 523.63 | 9.684 | 374.39 | 35.80 | 3.0733 |
| 530 | 533.98 | 10.372 | 381.88 | 34.07 | 3.0930 |
| 540 | 544.35 | 11.097 | 389.40 | 32.45 | 3.1124 |
| 550 | 554.75 | 11.858 | 396.89 | 30.92 | 3.1314 |
| 560 | 565.17 | 12.659 | 404.44 | 29.50 | 3.1502 |
| 570 | 575.57 | 13.500 | 411.98 | 28.15 | 3.1686 |
| 580 | 586.04 | 14.382 | 419.56 | 26.89 | 3.1868 |
| 590 | 596.53 | 15.309 | 427.17 | 25.70 | 3.2047 |
| 600 | 607.02 | 16.278 | 434.80 | 24.58 | 3.2223 |
| 610 | 617.53 | 17.297 | 442.43 | 23.51 | 3.2397 |
| 620 | 628.07 | 18.360 | 450.13 | 22.52 | 3.2569 |
| 630 | 638.65 | 19.475 | 457.83 | 21.57 | 3.2738 |
| 640 | 649.21 | 20.64 | 465.55 | 20.674 | 3.2905 |
| 650 | 659.84 | 21.86 | 473.32 | 19.828 | 3.3069 |
| 660 | 670.47 | 23.13 | 481.06 | 19.026 | 3.3232 |
| 670 | 681.15 | 24.46 | 488.88 | 18.266 | 3.3392 |
| 680 | 691.82 | 25.85 | 496.65 | 17.543 | 3.3551 |
| 690 | 702.52 | 27.29 | 504.51 | 16.857 | 3.3707 |
| 700 | 713.27 | 28.80 | 512.37 | 16.205 | 3.3861 |
| 710 | 724.01 | 30.38 | 520.26 | 15.585 | 3.4014 |
| 720 | 734.20 | 31.92 | 527.72 | 15.027 | 3.4156 |
| 730 | 745.62 | 33.72 | 536.12 | 14.434 | 3.4314 |
| 740 | 756.44 | 35.50 | 544.05 | 13.900 | 3.4461 |
| 750 | 767.30 | 37.35 | 552.05 | 13.391 | 3.4607 |
| 760 | 778.21 | 39.27 | 560.08 | 12.905 | 3.4751 |
| 770 | 789.10 | 41.17 | 568.10 | 12.440 | 3.4894 |
| 780 | 800.03 | 43.35 | 576.15 | 11.998 | 3.5035 |
| 790 | 810.98 | 45.51 | 584.22 | 11.575 | 3.5174 |
| 800 | 821.94 | 47.75 | 592.34 | 11.172 | 3.5312 |
| 810 | 832.96 | 50.08 | 600.46 | 10.785 | 3.5449 |
| 820 | 843.97 | 52.49 | 608.62 | 10.416 | 3.5584 |
| 830 | 855.01 | 55.00 | 616.79 | 10.062 | 3.5718 |
| 840 | 866.09 | 57.60 | 624.97 | 9.724 | 3.5850 |
| 850 | 877.16 | 60.29 | 633.21 | 9.400 | 3.5981 |
| 860 | 888.28 | 63.09 | 641.44 | 9.090 | 3.6111 |
| 870 | 899.42 | 65.98 | 649.70 | 8.792 | 3.6240 |
| 880 | 910.56 | 68.98 | 658.00 | 8.507 | 3.6367 |
| 890 | 921.75 | 72.08 | 666.31 | 8.233 | 3.6493 |

| T K | h kJ/kg | Pr | u kJ/kg | v_r | ϕ kJ/kg K |
|----------|--------------|--------|--------------|--------|-------------------|
| 470 | 472.25 | 6.742 | 337.34 | 46.48 | 2.9693 |
| 480 | 482.48 | 7.268 | 344.74 | 44.04 | 2.9909 |
| 490 | 492.74 | 7.824 | 352.11 | 41.76 | 3.0120 |
| 500 | 503.02 | 8.411 | 359.53 | 39.64 | 3.0328 |
| 510 | 513.32 | 9.031 | 366.97 | 37.65 | 3.0532 |
| 520 | 523.63 | 9.684 | 374.39 | 35.80 | 3.0733 |
| 530 | 533.98 | 10.372 | 381.88 | 34.07 | 3.0930 |
| 540 | 544.35 | 11.097 | 389.40 | 32.45 | 3.1124 |
| 550 | 554.75 | 11.858 | 396.89 | 30.92 | 3.1314 |
| 560 | 565.17 | 12.659 | 404.44 | 29.50 | 3.1502 |
| 570 | 575.57 | 13.500 | 411.98 | 28.15 | 3.1686 |
| 580 | 586.04 | 14.382 | 419.56 | 26.89 | 3.1868 |
| 590 | 596.53 | 15.309 | 427.17 | 25.70 | 3.2047 |
| 600 | 607.02 | 16.278 | 434.80 | 24.58 | 3.2223 |
| 610 | 617.53 | 17.297 | 442.43 | 23.51 | 3.2397 |
| 620 | 628.07 | 18.360 | 450.13 | 22.52 | 3.2569 |
| 630 | 638.65 | 19.475 | 457.83 | 21.57 | 3.2738 |
| 640 | 649.21 | 20.64 | 465.55 | 20.674 | 3.2905 |
| 650 | 659.84 | 21.86 | 473.32 | 19.828 | 3.3069 |
| 660 | 670.47 | 23.13 | 481.06 | 19.026 | 3.3232 |
| 670 | 681.15 | 24.46 | 488.88 | 18.266 | 3.3392 |
| 680 | 691.82 | 25.85 | 496.65 | 17.543 | 3.3551 |
| 690 | 702.52 | 27.29 | 504.51 | 16.857 | 3.3707 |
| 700 | 713.27 | 28.80 | 512.37 | 16.205 | 3.3861 |
| 710 | 724.01 | 30.38 | 520.26 | 15.585 | 3.4014 |
| 720 | 734.20 | 31.92 | 527.72 | 15.027 | 3.4156 |
| 730 | 745.62 | 33.72 | 536.12 | 14.434 | 3.4314 |
| 740 | 756.44 | 35.50 | 544.05 | 13.900 | 3.4461 |
| 750 | 767.30 | 37.35 | 552.05 | 13.391 | 3.4607 |
| 760 | 778.21 | 39.27 | 560.08 | 12.905 | 3.4751 |
| 770 | 789.10 | 41.17 | 568.10 | 12.440 | 3.4894 |
| 780 | 800.03 | 43.35 | 576.15 | 11.998 | 3.5035 |
| 790 | 810.98 | 45.51 | 584.22 | 11.575 | 3.5174 |
| 800 | 821.94 | 47.75 | 592.34 | 11.172 | 3.5312 |
| 810 | 832.96 | 50.08 | 600.46 | 10.785 | 3.5449 |
| 820 | 843.97 | 52.49 | 608.62 | 10.416 | 3.5584 |
| 830 | 855.01 | 55.00 | 616.79 | 10.062 | 3.5718 |
| 840 | 866.09 | 57.60 | 624.97 | 9.724 | 3.5850 |
| 850 | 877.16 | 60.29 | 633.21 | 9.400 | 3.5981 |
| 860 | 888.28 | 63.09 | 641.44 | 9.090 | 3.6111 |
| 870 | 899.42 | 65.98 | 649.70 | 8.792 | 3.6240 |
| 880 | 910.56 | 68.98 | 658.00 | 8.507 | 3.6367 |
| 890 | 921.75 | 72.08 | 666.31 | 8.233 | 3.6493 |

Tabel B7-SI. SIFAT-SIFAT METAL

| Logam | T | | ρ Kg/m ³ | cp kJ/kg ⁰ C | k W/m ⁰ C |
|---------------------------|----------------|----------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------|
| | ⁰ C | ⁰ F | | | |
| Aluminum, murni | 20 | 68 | 2707 | 0.896 | 204 |
| | 200 | 392 | | | 215 |
| | 400 | 752 | | | 249 |
| Timah | 20 | 68 | 11373 | 0.13 | 35 |
| | 300 | 572 | | | 29.8 |
| Besi murni | 20 | 68 | 7897 | 0.452 | 73 |
| | 300 | 572 | | | 55 |
| | 1000 | 1832 | | | 35 |
| tempa | 20 | 68 | 7849 | 0.46 | 59 |
| Baja karbon (maks 0.5% C) | 20 | 68 | 7833 | 0.465 | 54 |
| Baja karbon (1.5% C) | 20 | 68 | 7753 | 0.486 | 36 |
| | 400 | 752 | | | 33 |
| | 1200 | 2192 | | | 29 |
| Baja anti karat | 20 | 68 | | | Dcc-45 |
| Tembaga murni | 20 | 68 | 8954 | 0.383 | 386 |
| | 300 | 572 | | | 369 |
| | 600 | 1112 | | | 353 |
| Perunggu (75% Cu, 25% Zn) | 20 | 68 | 8666 | 0.343 | 26 |
| Kuningan (70% Cu, 30% Zn) | 20 | 68 | 8522 | 0.385 | 111 |
| Perak, murni | 20 | 68 | 10524 | 0.234 | 407 |
| Tungsten | 20 | 68 | 19350 | 0.134 | 163 |

PENJURUS

PENJURUS

- Aliran laminar, 74
Aliran turbulen, 74
Atmosfer standar, 15
- Barometer, 17
Benda hitam, 82
Berat jenis, 12
Berat molekul, 30
Bilangan Avogadro, 30
Bilangan Grashof, 74
Bilangan Reynold, 74
- Cairan jenuh, 114,122,124
Cairan subdingin, 114
Cairan tekan, 114
Campuran cairan jenuh-uap jenuh, 123
Campuran dua fase cair-uap, 114
Campuran dua fase padat-cair, 113
- Daerah dua fase, 115,122
Dayaguna aliran, 234
Dayaguna, definisi 224
 Sistem tertutup, 225
 Untuk volum atur,233
Diagram fase, 118
Diagram h-s, 199
Diagram Mollier, 201
Dimensi, 6
Dinding adiabatik, 9
Dinding diatemal, 22
- Efisiensi, 171
Efisiensi isentropik, 218
Efisiensi kompresor,220
Efisiensi mesin Carnot, 179,202,203
Efisiensi mesin reversibel, 183
Efisiensi nosel, 220
Efisiensi termal, 218
Efisiensi turbin, 220
Ekspansi bebas, 209
Ekspansi politropik, 96
Emitansi radian, 81
Energi, definisi, 65
 dalam gas ideal, 92-93
 dalam, 66
 kinetik, 51
 mekanis, 54
 potensial, 53
 radian, 81
Energi tak berdayaguna, 229
Entalpi, definisi, 91
 jenis molal, 91
 jenis, 91
Entropi, definisi, 191
 jenis, 192
 lingkungan, 192
 molal, 192
- Fase tunggal, 115
Fase, 9,112
Fraksi kelembaban, 126
Fungsi dayaguna, 234
Fungsi Gibbs, 237
Fungsi Helmholtz, 237
- Garis cairan jenuh, 198
Garis panas lanjut, 198
Garis peleburan, 188
Garis penguapan, 118
Garis sublimasi, 118
Gas diatomik, 89,98
Gas ideal, 95
Gas monoatomik, 89,98
Gas poliatomik, 89
Gas, 114
Gradien suhu, 70
- Hantaran, 69
Harga Dulong dan Petit, 89
Hukum Bernoulli, 218
Hukum kedua termodinamika, 173
Hukum kedua untuk volum atur, 215
Hukum kekekalan energi mekanis, 54
Hukum kekekalan energi, 83
Hukum kenol termodinamika, 22
Hukum Newton tentang pendinginan, 74
Hukum Newton, 6
Hukum pertama termodinamika, 65,83

Ireversibilitas eksternal, 176
 Ireversibilitas internal, 176
 Ireversibilitas, 210
 Isotermal kritis, 120,122

Kakas konservatif, 53
 Kalor jenis purata, 211
 Kalor jenis terintegrasi, 211
 Kalor laten, 204
 Kalor, definisi, 67
 Kapasitas kalor jenis molal, 89
 Kapasitas kalor jenis, 88
 Kapasitas kalor tekanan konstan, 87, 92
 Kapasitas kalor volum konstan, 87, 92
 Kapasitas kalor, 86
 Keadaan mati untuk aliran, 234
 Keadaan mati, 224
 Keadaan, 11
 Kekekalan nergi utnuK volumatur, 142
 Kerja berguna, 226
 Kerja yang hilang, 209
 Kesetimbangan fase, 20
 Kesetimbangan kimia, 20
 Kesetimbangan mekanis, 20
 Kesetimbangan termal, 20
 Kesetimbangan termal, 21
 Kesetimbangan termodinamis, 20
 Kesetimbangan tiga fase, 115
 Kesetimbangan, 19
 Ketel uap, 154
 Ketidasamaan Clausius, 186
 Kalorik, 67
 Koefisien Joule Thomson, 147
 Koefisien kinerja mesin carnot, 179
 Koefisien kinerja, 172
 Koefisien pemuaiian, 38
 Kofisien keternampatan, 39
 Kompresor, 157,220
 Kondensor, 156
 Konduktivitas termal, 70
 Konveksi alamiah, 74
 Konveksi paksa, 73
 Konveksi perubahan fase, 74
 Konveksi, definisi, 73
 Koordinat termodinamik, 8

Kualitas, 114,126
 Kubah uap, 116,198
 Kurva balik, 148
 Kurva isentalpi, 148

Laju aliran massa, 140
 Laju aliran volumetris, 142
 Laju perpindahan entropi, 216
 Laju perubahan energi, 85
 Laju perubahan entropi dalam volum atur, 216
 Laju produksi entropi, 216
 Lingkungan, 4

Manometer, 16
 Massa atur, 9
 Mekanika statistik, 5
 Mencair, 112
 Mendidih, 114
 Menguap, 114
 Mesin kalor, 10
 Mesin pendingin, 171
 Modifikasi es, 120

Neraca dayaguna sistem terisolasi, 233
 Neraca dayaguna sistemtertutup, 232
 Neraca laju dayaguna sistem tertutup, 233
 Neraca laju massa, 141
 Nosel, 152,220

Padatan jenuh, 113
 Pemerian makroskopik, 5
 Pemerian mikroskopik, 5
 Pemusnahan dayaguna, 232
 Permuakaan p-v-T, 117
 Permuakaan atur, 8
 Permuakaan batas, 4
 Permuakaan termodinamik, 115
 Perpindahan dayaguna mendampingi kalor, 228
 Perpindahan dayaguna mendampingi kerja, 231
 Perpindahan dayaguna mendampingi kerja, 231
 Perpindahan kerja berguna, 225

Persamaan energi untuk aliran tunak, 147
 Persamaan energi untuk proses
 Persamaan keadaan gas ideal, 31
 Persamaan kekekalan energi untuk volum atur, 145
 Persamaan kontinuitas, 146
 Persamaan laju aliran massa, 142
 Persamaan politropik umum, 96
 Perubahan entropi dalam keadaan jenuh, 201
 Perubahan entropi dalam sistem tertutup, 207
 Perubahan entropi selama proses adiabatik, 202
 Perubahan entropi selama proses reversibel, 202
 Perubahan entropi selama proses isothermal, 202
 Perubahan fase, 112
 Perubahan entropi zat termampatkan, 215
 Potensial kerja, 229
 Prinsip kekekalan massa untuk volum atur, 139
 Prinsip pertambahan entropi, 193
 Produksi entropi, 207, 208, 210
 Proses adiabatik, 21, 97, 217
 Proses aliran seragam, keadaan seragam, 217
 Proses aliran tunak, keadaan tunak, 216
 Proses ireversibel, 176, 209
 Proses isentropik gas ideal, 221
 Proses isentropik, 203
 Proses isobarik, 21, 59, 97
 Proses isochorik, 21, 97
 Proses isothermal-reversibel, 218
 Proses isothermal, 21
 Proses kuasistatik, 20
 Proses pengekangan, 147
 Proses politropik, 222
 Proses reversibel, 176, 209
 Proses, definisi, 20

 Radiasi, 81
 Radiator sempurna, 82

 Sifat bebas, 111
 Sifat ekstensif, 10
 Sifat intensif, 11
 Sifat sistem, 10
 Sifat termometrik, 23
 Sifat-sifat bebas zat murni, 111
 Siklus Carnot, 201
 Siklus daya, 171
 Siklus pompa kalor, 172
 Siklus refrjerasi, 172
 Siklus terbuka, 169
 Siklus tertutup, 169
 Siklus, definisi, 168
 Siklus Carnot, 178
 Sistem homogen, 12
 Sistem pembangkit daya uap, 158
 Sistem sederhana, 111
 Sistem terbuka, 8
 Sistem terisolasi, 9
 Sistem termodinamik, 8
 Sistem tertutup, 9
 Sistem, definisi, 4
 Skala Celcius, 25
 Skala Fahrenheit, 25
 Skala Rankine, 25
 Skala suhu internasional, 27
 Skala suhu termodinamika, 186
 Skala suhu, 23
 Sublimasi, 118
 Suhu jenuh, 114
 Suhu kritis, 116
 Suhu nol mutlak, 185
 Suhu, 21

 Tabel termodinamik, 123
 Tara kalor mekanis, 68
 Tekanan hampa, 16
 Tekanan kritis, 117
 Tekanan mutlak, 15
 Tekanan tolak, 15
 Tekanan, definisi, 15
 Teorema usaha-energi, 51
 Teori kinetik gas ideal, 33
 Termodinamika klasik, 5
 Termometer, 22
 Termoneter gas ideal, 26

Tetapan Boltzman, 81
Tetapan gas universal, 31
Tetapan tak berdimensi, 7
Titik balik, 148
Titik kritis, 116,198,199
Turbin, 150,219

Uap basah, 126
Uap jenuh, 122,124
Uap panas lanjut, 115,131
Unjuk kerja aktual, 218
Usaha adiabatik, 64
Usaha mekanis, 47
Usaha pada gas ideal, 98
Usaha pada proses adiabatik, 99
Usaha pada proses isothermal, 99
Usaha pemuaian bebas, 63
Usaha untuk mengubah volum, 58

Volum atur, 8,139,215
Volum jenis molal, 13
Volum jenis, 12
Volum kritis, 117

Zat murni, 10,111,112
Zat termampatkan sederhana, 111

DAFTAR PUSTAKA

Abbot, M.M and Van Ness, H.C, 1989. *Seri Buku Schaum : Termodinamika*, Terjemahan oleh Kusno Darmadi, 1994, Erlangga, Jakarta, 391 hal.

Akizuki, 2005, *LCD thermometer*, www.interq.or.jp/japan/se-inoue/e_ckt26.htm - 4k, diakses tanggal 6 April 2005

Applied **Thermodynamics**, Energy, Power Plant, Combustion, Heat, Air Conditioning, Turbine, Pump, Condenser, Heat Exchanger. www.taftan.com/thermodynamics/-5k, diakses 25 September 2005

Carrington, G, 1994. *Basic Thermodynamics*, Oxford University Press, New York, pp 385.

Colina C.M, Lisal, M, Siperstein F.R, Gubbins, K.E, 2002, *Accurate CO₂ Joule-Thomson inversion curve by molecular simulations*, Fluid Phase Equilibria 202 (2002) 253-262.

F. Hellman, 2005 "*calorimetry-on-a-chip*"

www.compres.stonybrook.edu/.../

Cal%20on%20a%20chip%20compres%20workshop%203-7-05.pdf – diakses 6 April 2005

Halliday, D, Resnick, R, terjemahan oleh Silaban P dan Sucipto, E, 1984, "*Fisika*", Erlangga, Jakarta

Harijono Djodjodiharjo, 1985, *Dasar-dasar Termodinamika Teknik*, PT Gramedia, Jakarta

Holman, J.P, 1988. *Thermodynamics*, McGraw-Hill International Edition, 4th ed. Singapore, pp 780.

[Http--www_buythermocouple_com-clip_image003_gif_files\Temperature.htm](http://www.buythermocouple.com-clip_image003_gif_files\Temperature.htm), B.S.Pyromatic India (P) Ltd diakses tanggal 22 Nopember 2005 jam 05.15.

Johnston, J.F, Brockett, W.A, Bock, A.E, and Keating, E.L, 1992. *Elements of Applied Thermodynamics*, 5th edition, United State Naval Institut, USA, pp 574

J. Van Wylen, G and Sontag, R.E, 1985. *Fundamental of Clasical Thermodynamics*. 3rd edition, John Wiley & Son, Canada, pp 722

Lee, J, F, Sears, F.W, 1963, "*Thermodynamics*", Addison-Wesley Company, Inc, Massachusetts.

MAE-320: Lecture Notes [http--smirnov_mae_wvu_edu-courses-mae320-figs-f8-1_jpg.htm](http://smirnov_mae_wvu_edu-courses-mae320-figs-f8-1_jpg.htm), diakses tanggal 20 Nopember 2005 jam 23.00

Mulyatono, 1992, *Panas dan Termodinamika*, Intan Pariwara.

Moran, M,J, and Shapiro,H,N, 2004, *Termodinamika Teknik*, alih bahasa oleh Nugroho, Y,S, Erlangga, Jakarta

Reynold, C,R, Perkins, H, C terjemahan oleh Harahap, F , 1994, “ *Termodinamika Teknik*”, Erlangga, Jakarta

Saad,M,A,2000,"Thermodinamika", alih bahasa oleh Harahap, Z, 2000, Pearson Education Asia Pte Ltd.

Sontag, R.E and Van Wylen, G.J, 1991. *Introduction to Thermodynamics, Classical and Statistical*. 3rd edition, John Wiley & Sons, Canada, pp 771

Sutrisno dan Tan Ik Gie, 1983, *Seri Fisika Dasar : Listrik Magnet dan Termofisika*, ITB, 1983

Wark, K and Richards,.D.E, 1999. *Thermodynamics*, Mc-Graw-Hill International Editions. Singapore, pp 1164

Zemansky, M.W and Dittman, R.H,1982 *Kalor dan Termodinamika*. Edisi ke-2 Terjemahan oleh The How Liong 1986, Institut Teknologi Bandung, Bandung. 613 hal.