

BAB I

KONSEP DASAR TERMODINAMIKA

1.1. Definisi Dan Aplikasi Termodinamika

Termodinamika adalah ilmu tentang energi, yang secara spesifik membahas tentang hubungan antara energi panas dengan kerja. Seperti telah diketahui bahwa energi didalam alam dapat terwujud dalam berbagai bentuk, selain energi panas dan kerja, yaitu energi kimia, energi listrik, energi nuklir, energi gelombang elektromagnetik, energi akibat gaya magnetik, dan lain-lain. Energi dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk lain, baik secara alami maupun hasil rekayasa teknologi. Selain itu energi di alam semesta bersifat kekal, tidak dapat dibangkitkan atau dihilangkan, yang terjadi adalah perubahan energi dari satu bentuk menjadi bentuk lain tanpa ada pengurangan atau penambahan. Prinsip ini disebut sebagai prinsip konservasi atau kekekalan energi.

Prinsip termodinamika tersebut sebenarnya telah terjadi secara alami dalam kehidupan sehari-hari. Bumi setiap hari menerima energi gelombang elektromagnetik dari matahari, dan di bumi energi tersebut berubah menjadi energi panas, energi angin, gelombang laut, proses pertumbuhan berbagai tumbuh-tumbuhan dan banyak proses alam lainnya. Proses didalam diri manusia juga merupakan proses konversi energi yang kompleks, dari input energi kimia dalam makanan menjadi energi gerak berupa segala kegiatan fisik manusia, dan energi yang sangat bernilai yaitu energi pikiran kita.

Dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi, maka prinsip alamiah dalam berbagai proses termodinamika direkayasa menjadi berbagai bentuk mekanisme untuk membantu manusia dalam menjalankan kegiatannya. Mesin-mesin transportasi darat, laut, maupun udara merupakan contoh yang sangat kita kenal dari mesin konversi energi, yang merubah energi kimia dalam bahan bakar atau sumber energi lain menjadi energi mekanis dalam bentuk gerak atau perpindahan diatas permukaan bumi, bahkan sampai di luar angkasa. Pabrik-pabrik dapat

memproduksi berbagai jenis barang, digerakkan oleh mesin pembangkit energi listrik yang menggunakan prinsip konversi energi panas dan kerja. Untuk kenyamanan hidup, kita memanfaatkan mesin air conditioning, mesin pemanas, dan refrigerator yang menggunakan prinsip dasar termodinamika.

Aplikasi termodinamika yang begitu luas dimungkinkan karena perkembangan ilmu termodinamika sejak abad 17 yang dipelopori dengan penemuan mesin uap di Inggris, dan diikuti oleh para ilmuwan termodinamika seperti *William Rankine*, *Rudolph Clausius*, dan *Lord Kelvin* pada abad ke 19. Pengembangan ilmu termodinamika dimulai dengan pendekatan makroskopik, yaitu sifat termodinamis didekati dari perilaku umum partikel-partikel zat yang menjadi media pembawa energi, yang disebut pendekatan termodinamika klasik. Pendekatan tentang sifat termodinamis suatu zat berdasarkan perilaku kumpulan partikel-partikel disebut pendekatan mikroskopis yang merupakan perkembangan ilmu termodinamika modern, atau disebut termodinamika statistik. Pendekatan termodinamika statistik dimungkinkan karena perkembangan teknologi komputer, yang sangat membantu dalam menganalisis data dalam jumlah yang sangat besar.

1.2. Bentuk-Bentuk Energi

Telah disampaikan sebelumnya bahwa energi dapat terwujud dalam berbagai bentuk, yaitu energi kimia, energi panas, energi mekanis, energi listrik, energi nuklir, energi gelombang elektromagnetik, energi gaya magnet, dan lain-lain. Suatu media pembawa energi dapat mengandung berbagai bentuk energi tersebut sekaligus, dan jumlah energinya disebut energi total (E). Dalam analisis termodinamika sering digunakan energi total setiap satuan massa media (m), yang disebut sebagai energi per-satuan massa (e) yaitu,

$$e = \frac{E}{m} \dots\dots\dots (1.1)$$

Berbagai bentuk energi diatas dapat pula dikelompokkan menjadi dua bentuk, yaitu energi makroskopik dan energi mikroskopik. Energi

makroskopik adalah keberadaan energi ditandai dari posisinya terhadap lingkungannya atau terhadap suatu referensi yang ditentukan. Contoh bentuk energi makroskopik adalah energi kinetik (KE) dan energi potensial (PE). Keberadaan energi mikroskopik ditentukan oleh struktur internal dari zat pembawa energi sendiri dan tidak tergantung kepada lingkungannya, yaitu struktur dan gerakan molekul zat tersebut. Energi mikroskopik ini disebut sebagai energi internal (U).

Energi makroskopik berhubungan dengan gerakan massa pembawa energi, dan pengaruh luar seperti gaya gravitasi, pengaruh energi listrik, sifat magnet, dan tegangan permukaan fluida. Energi kinetis (KE) adalah energi yang disebabkan oleh gerakan relatif terhadap suatu referensi, dan besarnya adalah:

$$KE = \frac{m \cdot v^2}{2} \dots\dots\dots (1.2)$$

Atau dalam bentuk energi per-satuan massa

$$ke = \frac{v^2}{2} \dots\dots\dots (1.3)$$

dengan, m = satuan massa media pembawa energi

v = satuan kecepatan gerakan massa

Energi potensial adalah energi yang disebabkan oleh posisi elevasinya dalam medan gravitasi, dan besarnya adalah:

$$PE = m \cdot g \cdot z \dots\dots\dots (1.4)$$

Atau dalam bentuk energi per-satuan massa,

$$PE = g \cdot z \dots\dots\dots (1.5)$$

dengan, g = gaya gravitasi

z = posisi elevasi terhadap suatu referensi

Energi internal meliputi semua jenis energi mikroskopik, yaitu akibat dari struktur dan aktivitas molekul dalam massa yang ditinjau. Struktur molekul adalah jarak antar molekul dan besar gaya tarik antar molekul, sedang aktivitas molekul adalah kecepatan gerak molekul. Energi laten adalah energi yang merubah jarak dan gaya tarik antar molekul, sehingga massa berubah fase antara fase padat atau cair menjadi gas. Energi

sensibel merubah kecepatan gerak molekul, yang ditandai oleh perubahan temperatur dari massa yang ditinjau.

Energi kimia adalah energi internal sebagai akibat dari komposisi kimia suatu zat, yang merupakan energi yang mengikat atom dalam molekul zat tersebut. Perubahan struktur atom menyebabkan perubahan energi pengikat atom dalam molekul, sehingga reaksinya dapat melepaskan energi (eksotermis) misalnya dalam reaksi pembakaran, atau memerlukan energi (indotermis). Bentuk energi internal lainnya adalah energi nuklir, yang merupakan energi ikatan antara atom dengan intinya.

Dalam bahasan termodinamika efek dari jenis energi makroskopik lain yaitu energi magnetik, dan tegangan permukaan fluida dapat diabaikan, sehingga energi total E dari massa pembawa energi tersebut adalah:

$$E = U + KE + PE = U + \frac{m \cdot v^2}{2} + m g z \dots\dots\dots (1.6)$$

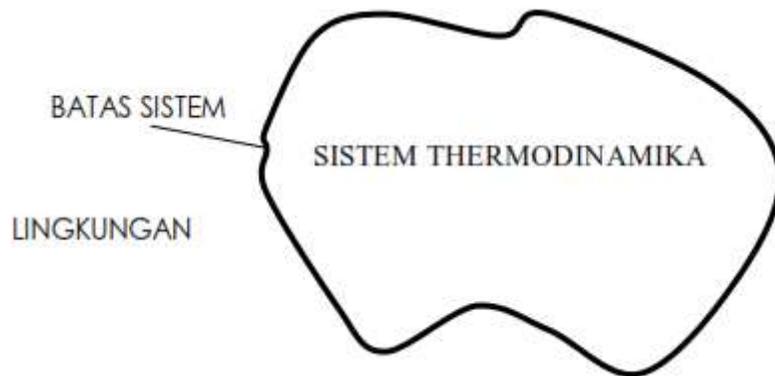
Atau dalam bentuk energi per-satuan massa:

$$e = u + ke + pe = u + \frac{v^2}{2} + g z \dots\dots\dots (1.7)$$

Dalam aplikasi bidang teknik massa atau sistem termodinamika yang ditinjau biasanya tidak bergerak selama proses berlangsung, sehingga perubahan energi potensial dan energi kinetisnya sama dengan nol.

1.3. Sistem, Proses, dan Siklus Termodinamika

Suatu sistem termodinamika adalah suatu massa atau daerah yang dipilih, untuk dijadikan obyek analisis. Daerah sekitar sistem tersebut disebut sebagai lingkungan. Batas antara sistem dengan lingkungannya disebut batas sistem (*boundary*), seperti terlihat pada Gambar 1.1. Dalam aplikasinya batas sistem merupakan bagian dari sistem maupun lingkungannya, dan dapat tetap atau dapat berubah posisi atau bergerak.



Gambar 1.1. Skema sistem termodinamika

Dalam termodinamika ada dua jenis sistem, yaitu sistem tertutup dan sistem terbuka. Dalam sistem tertutup massa dari sistem yang dianalisis tetap dan tidak ada massa keluar dari sistem atau masuk kedalam sistem, tetapi volumenya bisa berubah. Yang dapat-keluar masuk sistem tertutup adalah energi dalam bentuk panas atau kerja. Contoh sistem tertutup adalah suatu balon udara yang dipanaskan, dimana massa udara didalam balon tetap, tetapi volumenya berubah, dan energi panas masuk kedalam massa udara didalam balon.

Dalam sistem terbuka, energi dan massa dapat keluar sistem atau masuk ke dalam sistem melewati batas sistem. Sebagian besar mesin-mesin konversi energi adalah sistem terbuka. Sistem mesin motor bakar adalah ruang didalam silinder mesin, dimana campuran bahan bahan bakar dan udara masuk kedalam silinder, dan gas buang keluar sistem melalui knalpot. Turbin gas, turbin uap, pesawat jet dan lain-lain adalah merupakan sistem termodinamika terbuka, karena secara simultan ada energi dan massa keluar-masuk sistem tersebut.

Karakteristik yang menentukan sifat dari sistem disebut properti dari sistem, seperti tekanan (P), temperatur (T), volume (V), massa m , viskositas, konduksi panas, dan lain-lain. Selain itu ada juga properti yang didefinisikan dari properti yang lainnya seperti, berat jenis, volume spesifik, panas jenis, dan lain-lain.

Suatu sistem dapat berada pada suatu kondisi yang tidak berubah, apabila masing-masing jenis properti sistem tersebut dapat diukur pada semua bagiannya dan tidak berbeda nilainya. Kondisi tersebut disebut sebagai keadaan (*state*) tertentu dari sistem, dimana sistem mempunyai nilai properti yang tetap. Apabila propertinya berubah, maka keadaan sistem tersebut disebut mengalami perubahan keadaan. Suatu sistem yang tidak mengalami perubahan keadaan disebut sistem dalam keadaan seimbang (*equilibrium*).

Perubahan sistem termodinamika dari keadaan seimbang satu menjadi keadaan seimbang lain disebut proses, dan rangkaian keadaan diantara keadaan awal dan akhir disebut lintasan proses seperti terlihat pada Gambar 1.2.

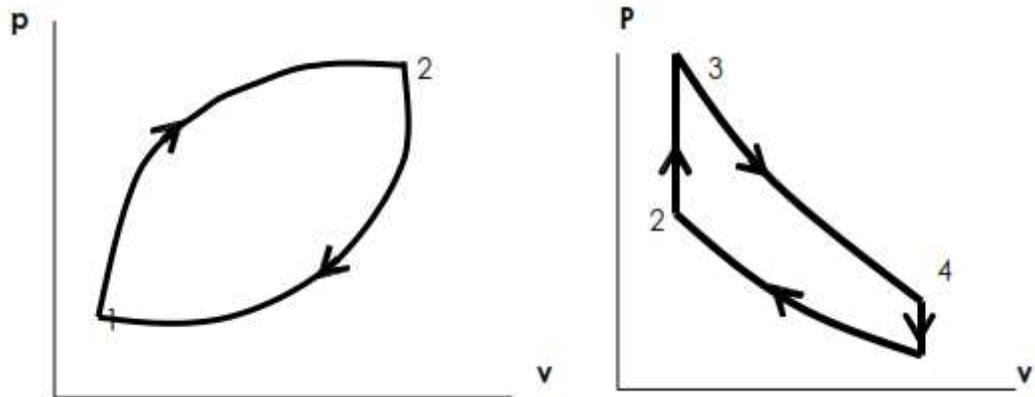


Gambar 1.2. Proses dari keadaan 1 ke keadaan 2

Tergantung dari jenis prosesnya, maka keadaan 2 dapat dicapai dari keadaan 1 melalui berbagai lintasan yang berbeda. Proses termodinamika biasanya digambarkan dalam sistem koordinat 2 properti, yaitu P-V diagram, P-v diagram, atau T-S diagram. Proses yang berjalan pada satu jenis properti tetap, disebut proses iso- diikuti nama propertinya, misalnya proses *isobaris* (tekanan konstan), proses *isochoris* (volume konstan), proses *isothermis* (temperatur konstan) dan lain-lain.

Suatu sistem disebut menjalani suatu siklus, apabila sistem tersebut menjalani rangkaian beberapa proses, dengan keadaan akhir sistem kembali ke keadaan awalnya. Pada Gambar 1.3 (a) terlihat suatu siklus

terdiri dari 2 jenis proses, dan Gambar 1.3 (b) siklus lain dengan 4 jenis proses.



(a) Siklus dengan 2 proses

(b) Siklus dengan 4 proses

Gambar 1. 3. Diagram siklus termodinamika

1.4. Sistem Satuan, Tekanan, Dan Temperatur

1.4.1. Sistem Satuan

Suatu sistem satuan adalah sistem besaran atau unit untuk mengkuantifikasikan dimensi dari suatu properti. Sistem satuan yang sekarang digunakan di seluruh dunia, termasuk Indonesia, adalah sistem SI (Sistem Internasional). Sistem ini menggantikan 2 sistem yang dipergunakan sebelumnya, yaitu sistem British dan sistem Metris.

Dalam sistem SI ada 7 macam dimensi dasar, yaitu panjang (m), massa (kg), waktu (detik), temperatur (K), arus listrik (A), satuan sinar (candela-c), dan satuan molekul (mol). Satuan gaya merupakan kombinasi dari massa dan percepatan, dan mempunyai besaran N (Newton), yang didefinisikan menurut Hukum Newton,

$$F = m \cdot a \dots\dots\dots (1.8)$$

Dan 1 N adalah gaya yang diperlukan untuk memberikan percepatan sebesar 1 m/det² pada suatu massa sebesar 1 kg sehingga

$$1 N = 1 kg \cdot m / det^2 \dots\dots\dots (1.9)$$

Ukuran berat (W) adalah gaya yang ditimbulkan oleh massa m kg, dengan percepatan sebesar medan gravitasi yang terjadi (g), sebagai berikut

$$W = m \cdot g \dots\dots\dots (1.10)$$

Satuan W adalah Newton, sedangkan besar gravitasi di bumi adalah $9,807 \text{ m/det}^2$ di permukaan laut dan semakin kecil dengan bertambahnya elevasi. Kerja yang merupakan salah satu bentuk energi, adalah gaya kali jarak dengan satuan N.m , dan disebut pula J (Joule) yaitu,

$$1 J = 1 \text{ N.m} \dots\dots\dots (1.11)$$

Satuan Joule juga digunakan dalam dimensi energi panas, dan biasanya ukurannya dalam kJ (kilojoule) atau MJ (Mega Joule).

1.4.2. Tekanan

Tekanan merupakan salah satu properti yang terpenting dalam termodinamika, dan didefinisikan sebagai gaya tekan suatu fluida (cair atau gas) pada satu satuan unit luas area. Istilah tekanan pada benda padat disebut tegangan (*stress*). Satuan tekanan adalah Pa (Pascal), yang didefinisikan sebagai

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 \dots\dots\dots (1.12)$$

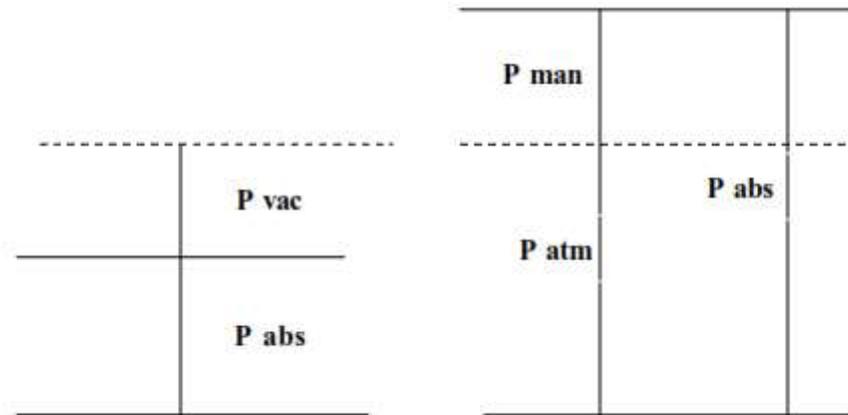
Karena satuan Pascal terlalu kecil, maka dalam analisis termodinamika sering digunakan satuan kilopascal ($1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$), atau megapascal ($1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$). Satuan tekanan yang cukup dikenal adalah satuan *bar* (*barometric*), atau *atm* (*standard atmosphere*), sebagai berikut

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0,1 \text{ Mpa} = 100 \text{ kPa} \dots\dots\dots (1.13)$$

$$1 \text{ atm} = 101.325 \text{ Pa} = 101,325 \text{ kPa} = 1,01325 \text{ bar} \dots\dots\dots (1.12)$$

Pengukuran tekanan dengan menggunakan referensi tekanan nol absolut disebut tekanan absolut (*ata*), sedang tekanan manometer (*ato*) adalah tekanan relatif terhadap tekanan atmosfer. Tekanan vakum adalah tekanan dibawah 1 atm , yaitu perbedaan antara tekanan atmosfer

dengan tekanan absolut, seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.4 sebagai berikut



Gambar 1.4 Hubungan pengukuran beberapa jenis tekanan

Alat pengukur tekanan di atas atmosfer adalah manometer, alat pengukur tekanan vakum disebut manometer vakum, sedang alat pengukur tekanan atmosfer disebut barometer. Terdapat banyak jenis metode pengukuran tekanan seperti pipa U, manometer pegas, atau transduser elektronik.

1.4.3. Temperatur

Ukuran temperatur berfungsi untuk mengindikasikan adanya energi panas pada suatu benda padat, cair, atau gas. Metodenya biasanya menggunakan perubahan salah satu properti suatu material karena panas, seperti pemuaian, dan sifat listrik.

Prinsip pengukurannya adalah apabila suatu alat ukur ditempelkan pada benda yang akan diukur temperaturnya, maka akan terjadi perpindahan panas ke alat ukur sampai terjadi keadaan seimbang. Dengan demikian temperatur yang terterapada alat ukur adalah sama dengan temperatur pada benda yang diukur temperaturnya. Prinsip tersebut menghasilkan Hukum Termodinamika Zeroth (*Zeroth Law of Thermodynamics*), yaitu apabila dua benda dalam keadaan seimbang thermal dengan benda ketiga maka dua benda tersebut juga dalam keadaan seimbang thermal walaupun tidak saling bersentuhan.

Dalam sistem SI satuan temperatur adalah Kelvin (K) tanpa derajat. Skala dari ukuran temperatur dalam derajat Celcius adalah sama dengan skala ukuran Kelvin, tetapi titik nol °C sama dengan 273,15 K. Titik nol °C adalah kondisi es mencair pada keadaan standard atmosfer, sedang kondisi 0 K adalah kondisi nol mutlak dimana semua gerakan yang menghasilkan energi pada semua materi berhenti.

Dalam analisis termodinamika, apabila yang dimaksudkan adalah ukuran temperatur maka yang digunakan adalah ukuran dalam K, sedang apabila analisis berhubungan dengan perbedaan temperatur maka baik ukuran °C maupu K dapat digunakan.

1.5. Contoh Soal

1. Massa udara dalam suatu ruangan 3x5x20 m diketahui sebesar 350 kg, Tentukan densitas, volume spesifik dan berat spesifik dari udara tersebut !

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{350}{(3)(5)(20)} = 1,167 \text{ kg/m}^3$$

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,167} = 0,857 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$w = \rho g = 1,167 \times 9,81 = 0,857 \text{ m}^3/\text{kg}$$

2. Hitunglah gaya yang diakibatkan oleh tekanan yang beraksi pada pintu horizontal berdiameter 1 m dari suatu kapal selam yang berada 600 m dibawah permukaan!

$$P = \rho gh = (1000 \text{ kg/m}^3)(9,81 \text{ m/s}^2)(600 \text{ m}) = 5,89 \text{ MPa}$$

$$F = PA = (5,89 \times 10^6 \text{ N/m}^2) \left[\frac{\pi(1)^2}{4} \text{ m}^2 \right] = 4,62 \times 10^6 \text{ N}$$

BAB II

PROPERTI ZAT MURNI DAN KARAKTERISTIK GAS IDEAL

2.1. Zat Murni

Zat murni adalah zat yang mempunyai komposisi kimia yang tetap pada semua bagiannya. Contoh zat murni misalnya, air, nitrogen, helium, CO₂, udara, dan lain-lain. Persyaratan sebagai zat murni tidak perlu hanya satu jenis saja, tetapi dapat berupa campuran zat asal campurannya homogen pada seluruh bagiannya. Udara merupakan campuran dari beberapa jenis zat tetapi masih bersifat zat murni, tetapi campuran antara minyak dengan air bukan merupakan zat murni karena tidak dapat bercampur secara homogen.

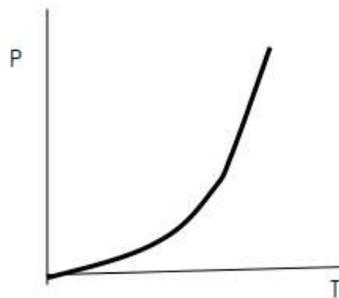
Zat murni dapat terwujud dalam fase padat, fase cair, atau fase gas. Fase padat mempunyai struktur molekul dengan jarak antar molekul paling kecil dan gaya ikat antar molekul paling besar, fase cair mempunyai gaya ikat yang lebih kecil, dan fase gas gaya ikat antar molekul paling kecil. Posisi molekul pada fase padat relatif tetap, pada fase cair molekul bergerak secara osilasi, dan pada fase gas molekul-molekul bergerak bebas tidak beraturan dan saling bertabrakan satu sama lainnya.

2.2. Diagram Fase

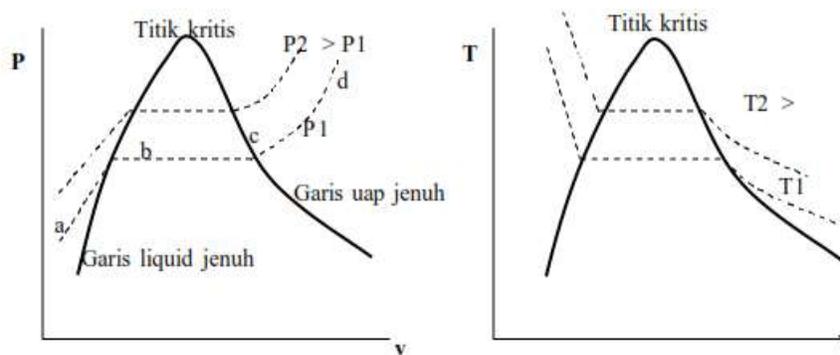
Zat murni dapat mengalami perubahan fase pada keadaan yang berbeda-beda, tergantung kepada kondisi propertinya. Air berubah fase menjadi gas pada temperatur sekitar 100°C apabila tekanannya 1 atm, tetapi pada tekanan lebih tinggi maka temperatur perubahannya lebih tinggi pula. Gambar 2.1. Menunjukkan diagram perubahan fase cair-gas pada suatu zat murni, dengan koordinat tekanan dan temperatur.

Dari sifat tersebut diatas dapat digambarkan diagram perubahan fase dari suatu zat murni secara lengkap, yaitu pada semua lingkup keadaan untuk zat murni tersebut. Contoh diagram perubahan fase lengkap tersebut diperlihatkan pada Gambar 2.2(a) dengan koordinat T-v

dan gambar 2.2(b) untuk koordinat P-v. Garis fase berbentuk lengkungan tajam pada bagian atasnya, garis di sebelah kiri adalah garis *liquid* jenuh dan garis di sebelah kanan adalah garis uap jenuh. Titik puncaknya merupakan titik kritis, dimana di atas titik tersebut kondisi fase kondisi liquid dan gas bersamaan. Keadaan titik kritis untuk zat murni air terjadi pada tekanan $P_{cr} = 22,09 \text{ MPa}$, dan temperatur $T_{cr} = 374,14^\circ\text{C}$. Daerah diantara garis *liquid* jenuh dengan garis uap jenuh adalah daerah terjadinya campuran antara fase cair dan fase gas.



Gambar 2. 1. Diagram perubahan fase cair – gas pada zat murni



(a). Koordinat P-v

(b). Koordinat T – v

Gambar 2. 2. Diagram perubahan fase suatu zat murni

Garis putus-putus pada diagram gambar 2.2(a) menunjukkan lintasan proses penguapan zat murni pada tekanan konstan P_1 dan P_2 (dengan $P_2 > P_1$), dan terlihat bahwa lintasan proses penguapan pada tekanan P_2 terjadi pada temperatur lebih tinggi daripada lintasan pada temperatur P_1 . Garis a-b menunjukkan pemanasan pada fase *liquid* sampai

mencapai titik cair jenuh di b. Sedang pada garis b-c terjadi proses penguapan yang terjadi pada temperatur konstan dan tekanan konstan, dengan fase diantara titik b dan titik c adalah kondisi campuran antara liquid dan gas. Pada titik b adalah 100% liquid, sedang pada titik d adalah 100% fase gas. Selanjutnya garis c-d menunjukkan pemanasan lanjutan dari uap, sehingga kondisi uapnya disebut uap panas lanjut (*superheated steam*). Panas yang dibutuhkan untuk pemanasan air pada garis a-b dan pemanasan uap pada garis c-d disebut panas sensibel, sedang panas yang diperlukan untuk proses penguapan pada garis b-c disebut panas laten. Terlihat pada Gambar 2.2 bahwa semakin tinggi tekanan fluida (juga temperaturnya), semakin pendek garis penguapan (garis b-c untuk tekanan P1) sehingga semakin kecil panas laten yang dibutuhkan. Garis putus-putus pada Gambar 2.2(b) adalah garis isothermis pada diagram penguapan dengan koordinat P-v.

2.3. Tabel Properti

Dalam analisis termodinamika selalu dibutuhkan data nilai properti dari suatu zat, pada semua lingkup keadaan untuk masing-masing zat yang diteliti. Nilai properti dapat diprediksi dengan mengembangkan suatu persamaan matematis hubungan antar properti dari zat yang bersangkutan. Namun biasanya bentuk hubungan antar properti untuk semua zat sangat kompleks, sehingga sangat sulit untuk direpresentasikan dalam suatu persamaan yang sederhana.

Karena itu data properti biasanya dipresentasikan dalam bentuk Tabel Termodinamika, yang berisi data properti dari beberapa zat yang sering digunakan dalam aplikasi termodinamika. Tabel tersebut membutuhkan data properti yang sangat banyak, yang dikumpulkan dari hasil pengukuran yang membutuhkan waktu yang lama. Jenis properti yang biasanya ada dalam Tabel Termodinamika adalah tekanan, temperatur, volume spesifik, energy internal, panas laten, dan dua properti baru yaitu entalpi (h) dan entropi (s) yang akan dibahas dalam bab selanjutnya.

Data properti untuk keadaan fase campuran tidak dapat dilihat secara langsung dalam Tabel Termodinamika, tetapi dapat dihitung dengan menggunakan parameter kualitas campuran (x) yaitu:

$$x = \frac{m_g}{m_{total}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana, massa total campuran (m_{total})= massa liquid + massa uap = $m_f + m_g$. Parameter x mempunyai nilai nol yaitu apabila $m_g = 0$ atau pada kondisi *liquid* jenuh, sedang $x = 1$ apabila $m_f = 0$ atau $m_g = m_{total}$, yaitu pada keadaan uap jenuh. Hubungan antara parameter x dengan nilai properti tertentu, misalnya entalpi (h) adalah:

$$h = h_f + x \cdot h_{fg} \dots\dots\dots (2.2)$$

- dimana:
- h = entalpi pada kondisi campuran
 - h_f = entalpi pada keadaan liquid jenuh
 - h_{fg} = panas laten

2.4. Gas Ideal

Molekul-molekul gas didalam suatu ruangan yang dibatasi dinding bergerak ke segala arah dengan tidak beraturan (*chaotic motion*). Karena gerakan tidak beraturan tersebut kemungkinan sering terjadi tumbukan antar molekul, sebelum menabrak dinding batas ruangan. Tabrakan molekul ke dinding ruangan tersebut terjadi secara terus- menerus, yang menimbulkan efek tekanan gas di dalam ruangan tersebut. Semakin tinggi temperatur gas, maka semakin besar kecepatan geraknya sehingga menyebabkan momentum tumbukan terhadap dinding semakin besar. Akibatnya tekanan yang terjadi di dalam ruangan akan semakin besar pula.

Dari mekanisme gerakan molekul tersebut, maka dapat dibayangkan adanya suatu persamaan matematik hubungan antar variabel properti gas didalam ruangan, terutama tekanan (P), temperatur (T), dan volume ruangan (V). Volume ruangan juga merupakan variabel karena menentukan jarak lintasan gerak molekul sebelum menabrak dinding. Namun untuk menurunkan persamaan hubungan secara analitis mengalami kesulitan,

karena kompleksitas gerakan molekul, adanya gaya tarik-menarik antar molekul, dan pengaruh volume molekul sendiri. Karena itu kemudian diasumsikan adanya suatu jenis gas ideal yang mempunyai sifat ideal, sehingga dimungkinkan penurunan persamaan matematis hubungan antar beberapa variabel dari properti gas. Sifat-sifat gas ideal yang diinginkan tersebut tersebut adalah:

1. Gaya tarik-menarik antar molekul gas diabaikan.
2. Total volume molekul gas diabaikan terhadap volume ruangan.

Asumsi pertama memungkinkan bahwa semua energi kinetik molekul menghasilkan energi tumbukan molekul ke dinding, sedang asumsi kedua memungkinkan tidak ada pengurangan energi kinetik molekul karena tumbukan antar molekul diabaikan. Dengan kedua asumsi tersebut, maka secara analitis dapat diturunkan persamaan hubungan antar variabel P, v, dan T gas ideal, atau sering disebut persamaan keadaan gas ideal atau persamaan *Boyle– Gay Lussac*, sebagai berikut

$$P \cdot v = R \cdot T \dots\dots\dots (2.3)$$

- dengan
- P = tekanan absolut gas
 - v = volume spesifik gas
 - R = konstanta gas
 - T = temperatur gas

Boyle dan Gay Lussac mendapatkan persamaan tersebut melalui eksperimen pada kondisi gas pada tekanan sangat rendah, sehingga persamaan gas ideal dapat diaplikasikan pada gas sebenarnya apabila tekanannya sangat rendah. Dalam penelitian selanjutnya did apatkan apabila pada temperatur tinggi, atau pada tekanan sangat tinggi sekitar tujuh kali tekanan kritisnya, maka sifat suatu gas juga mendekati sifat gas ideal.

Besarnya konstanta gas R berbeda untuk setiap jenis gas, dan dapat dihitung dengan

$$R = \frac{R_m}{M} \dots\dots\dots (2.4)$$

dengan R = konstanta gas universal

M = Massa setiap molekul gas

Besarnya konstanta gas universal adalah sama untuk semua jenis gas yaitu R= 8,314 kJ/(kmol.K). Massa gas didalam ruangan dapat dihitung apabila jumlah molekulnya diketahui, andaikan jumlah molekulnya N, maka massa gas didalam ruangan tersbut:

$$M = M \cdot N \dots\dots\dots (2.5)$$

Dan volume ruangan adalah

$$V = m \cdot v \dots\dots\dots (2.6)$$

Sehingga persamaan gas ideal dapat dituliskan dalam variabel volume ruangan sebagai berikut

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot T \dots\dots\dots (2.7)$$

$$P \cdot V = N \cdot R \cdot T \dots\dots\dots (2.8)$$

Dari persamaan (2.7) dapat diturunkan hubungan antara variabel gas didalam ruangan pada dua keadaan yang berbeda, dengan massa gas (m) tetap sebagai berikut

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} \dots\dots\dots (2.9)$$

dengan indeks 1 dan 2 menunjukkan bahwa gas pada keadaan 1 dan pada keadaan 2.

Menurut penelitian, beberapa jenis gas seperti udara, oksigen, hidrogen, helium, argon, neon, CO₂ dapat diperlakukan sebagai gas ideal dengan penyimpangan hasil perhitungan terhadap kondisi sebenarnya hanya sekitar 1%. Gas yang dipadatkan seperti uap didalam ketel uap, zat refrigeran didalam mesin pendingin tidak boleh diperlakukan sebagai gas ideal, karena penyimpangan atau kesalahan perhitungannya menjadi

terlalu besar. Data propertinya harus dilihat dalam Tabel Termodinamika untuk gas yang bersangkutan.

2.5. Persamaan Keadaan Gas

Persamaan gas ideal cukup sederhana, namun seperti telah dibahas sebelumnya lingkup pemakaiannya terbatas. Banyak usaha dilakukan untuk mengembangkan persamaan keadaan gas, dengan lingkup pemakaian yang lebih luas. Namun persamaan yang didapatkan umumnya lebih kompleks dibandingkan dengan persamaan gas ideal, seperti pada persamaan *Van der Waals* dan persamaan *Beattie-Bridgeman* sebagai berikut:

2.5.1. Persamaan Van der Waals.

Pada tahun 1873, *Van der Waals* mengajukan persamaan keadaan gas dengan tambahan dua konstanta a dan b sebagai berikut

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \dots\dots\dots (2.10)$$

Dengan nilai konstanta a dan b sebagai berikut

$$a = \frac{27R^2T_{cr}^2}{64P_{cr}} \text{ dan } b = \frac{RT_{cr}}{8P_{cr}} \dots\dots\dots (2.11)$$

Persamaan Van der Waals mempunyai ketelitian yang kurang baik, tetapi apabila konstanta a dan b dihitung menurut perilaku gas sebenarnya pada lingkup yang luas maka ketelitiannya menjadi lebih baik.

2.5.2. Persamaan Beattie-Bridgeman.

Persamaan Beattie-Bridgeman diajukan pada tahun 1928, dengan menggunakan lima konstanta sebagai berikut,

$$P = \frac{R_u T}{\bar{V}^2} \left(1 - \frac{c}{\bar{V} T^3}\right) (\bar{V} + B) - \frac{A}{\bar{V}^2} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dengan konstanta A dan b dihitung dengan persamaan sebagai berikut

$$A = A_0 \left(1 - \frac{a}{\bar{V}}\right) \text{ dan } B = B_0 \left(1 - \frac{b}{\bar{V}}\right) \dots\dots\dots (2.13)$$

Aplikasi persamaan ini akurat sampai dengan massa jenis $0,8 \rho_{cr}$ dimana ρ_{cr} adalah titik kritis dari densitas gas yang bersangkutan.

2.6. Contoh soal

1. Tentukanlah perubahan volume jika 1 kg air jenuh diuapkan seluruhnya pada tekanan a) 1 kPa, b) 100 kPa, c) 10.000 kPa.

Jawab:

Menggunakan Tabel properti uap, memebrikan nilai yang diperlukan. Kuantitas yang diinginkan adalah $v_{fg} = v_g - v_f$, maka

- a) 1 kPa. Maka $v_{fg} = 129,2 - 0,001 = 129,2 \text{ m}^3/\text{kg}$
- b) 100 kPa = 0,1 MPa. Maka $v_{fg} = 1,694 - 0,001 = 1,693 \text{ m}^3/\text{kg}$
- c) 10 MPa. Maka $v_{fg} = 0,01803 - 0,00145 = 0,01658 \text{ m}^3/\text{kg}$

2. Sebuah ban mobil dengan volume $0,6 \text{ m}^3$ diisi hingga ke tekanan 200 kPa. Hitunglah massa udara dalam ban tersebut jika temperaturnya adalah 20°C .

Jawab

Udara diasumsikan sebagai gas ideal dengan kondisi-kondisi yang diberikan. Dalam persamaan gas ideal $PV = mRT$ kita gunakan tekanan absolut dan temperatur absolut. Jadi, degnan menggunakan $P_{atm} = 100 \text{ kPa}$

$$P = 200 + 100 = 300 \text{ kPa dan } T = 20 + 273 = 293 \text{ K}$$

$$m = \frac{PV}{RT} = \frac{(300.000 \text{ N/m}^2)(0,6 \text{ m}^3)}{(287 \text{ N.m/kg.K})(293 \text{ K})} = 2,14 \text{ kg}$$

Ingat, perhatikan penggunaan satuan dalam menyelesaikan suatu permasalahan

BAB III

HUKUM TERMODINAMIKA I

SISTEM TERTUTUP

3.1. Perpindahan Energi Sistem

Hukum termodinamika pertama menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan dan dimusnahkan tetapi hanya dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk yang lain. Prinsip tersebut juga dikenal dengan istilah konservasi energi. Hukum pertama dapat dinyatakan secara sederhana; selama interaksi antara sistem dan lingkungan, jumlah energi yang diperoleh sistem harus sama dengan energi yang dilepaskan oleh lingkungan.

Energi dapat melintasi batas dari suatu sistem dalam 3 bentuk yang berbeda: panas (*heat*), kerja (*work*) dan Aliran massa (*mass flow*). Untuk sistem tertutup, perpindahan energi hanya terjadi dalam bentuk massa dan

3.1.1 Panas (*Heat*)

Panas (*heat*) didefinisikan sebagai bentuk energi yang dapat berpindah antara dua sistem (atau dari sistem ke lingkungan) dengan sifat perbedaan temperatur. Panas adalah sebuah energi dalam keadaan transisi, dia dikenali jika hanya melewati batas sistem sehingga dalam termodinamika panas (*heat*) sering diistilahkan dengan transfer panas (*heat transfer*).

Suatu proses jika tidak terjadi perpindahan panas disebut dengan proses adiabatik. Ada dua cara suatu proses dapat dikatakan adiabatik. Pertama, sistem diisolasi sempurna sehingga tidak ada energi panas yang keluar. Kedua, antara sistem dan lingkungan berada pada temperatur yang sama sehingga tidak terjadi aliran panas karena perbedaan temperatur. Dari pengertian diatas, tidak harus disamakan pengertian proses adiabatik dengan proses isothermal.

Satuan energi panas adalah Joule, kJ (atau Btu). *Heat transfer* per unit massa di simbolkan dengan “q”:

$$q = \frac{Q}{m} \quad (kJ/kg) \dots\dots\dots (3.1)$$

Kadang sering digunakan untuk mengetahui *rate of heat transfer* atau jumlah *heat transfer* per unit waktu dalam interval tertentu, disimbolkan dengan \dot{Q} , mempunyai satuan kJ/s (kW). Ketika \dot{Q} bervariasi dengan waktu, jumlah *heat transfer* selama proses dilakukan dengan mengintegrasikan \dot{Q} selama rentang waktu tertentu

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt \quad (kJ) \dots\dots\dots (3.2)$$

Ketika \dot{Q} konstan selama proses, maka hubungan di atas menjadi

$$Q = \dot{Q} \Delta t \quad (kJ) \dots\dots\dots (3.3)$$

dimana $t = t_2 - t_1$ adalah interval waktu selama proses terjadi.

Panas mempunyai jumlah dan arah. Untuk menandai arah dari panas ada suatu konvensi tanda (kesepakatan tanda) sebagai berikut: *Heat transfer* menuju sistem bertanda positif (+), dan keluar sistem bertanda negatif (-).

3.1.2 Kerja (*Work*)

Kerja (*work*) seperti halnya panas adalah suatu bentuk interaksi antara sistem dan lingkungan. Seperti pada penjelasan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa jika suatu energi dapat melintasi batas sistem adalah bukan panas dapat dipastikan bahwa bentuk energi tersebut adalah kerja. Lebih spesifik kerja dapat diartikan sebagai transfer energi yang berhubungan dengan gaya yang menempuh sebuah jarak.

Kerja juga merupakan bentuk energi, mempunyai satuan kJ. Kerja per unit massa dinotasikan dengan

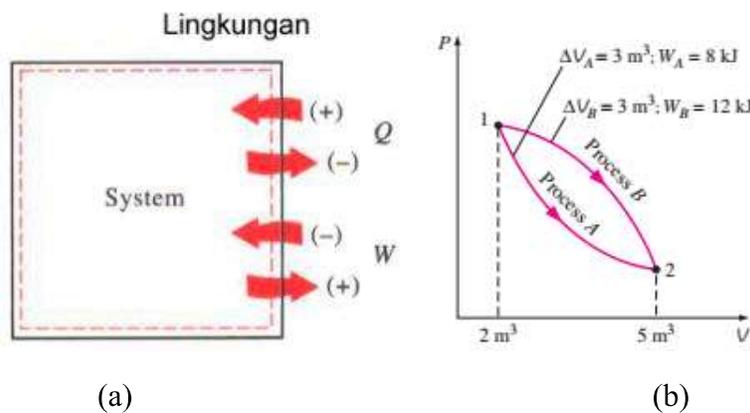
$$w = \frac{W}{m} \quad (kJ/kg) \dots\dots\dots (3.4)$$

Kerja per unit waktu disebut *power* dan dinotasikan dengan \dot{W} , mempunyai satuan kJ/s, atau kW.

Seperti halnya panas, kerja juga mempunyai tanda konvensi. Kerja yang dilakukan sistem adalah positif (+) dan jika sistem dikenai kerja maka kerja bertanda negatif (-).

Heat transfer dan kerja adalah interaksi antara sistem dengan lingkungan dan terdapat beberapa kesamaan antara keduanya:

1. Keduanya merupakan fenomena batas sistem; hanya dikenali ketika melintasi batas sistem.
2. Keduanya merupakan *fenomena transient* artinya sebuah sistem tidak bisa memiliki panas atau kalor.
3. Keduanya selalu terkait dengan proses, bukan *state*.
4. Keduanya merupakan "*path function*", differensialnya disebut differensial tidak eksak, δQ dan δW . berbeda dengan properti yang merupakan *point function*, differensialnya disebut differensial eksak, misalnya du , dh , dT , dP dan lain -lain).



Gambar 3. 1. (a) Sistem tertutup (b) kerja dan panas sebagai fungsi lintasan

Macam -macam bentuk kerja

1. Kerja Listrik

Elektron melalui batas dari sistem menjadi kerja listrik pada sistem tersebut. Ketika V adalah beda potensial listrik dan N adalah gaya coulomb dari electron, maka

$$W_e = VN \text{ (kJ)} \text{ atau } \dot{W}_e = VI \text{ (kW)} \dots\dots\dots (3.5)$$

dimana \dot{W}_e adalah daya listrik dan I adalah arus listrik. Pada umumnya V dan I bervariasi terhadap waktu, sehingga kerja listrik dalam interval waktu tertentu dinyatakan

$$W_e = \int_1^2 VI dt \text{ (kJ)} \dots\dots\dots (3.6)$$

Jika antara V dan I konstan dalam rentang waktu t , persamaan menjadi:

$$W_e = VI \Delta t \dots\dots\dots (3.7)$$

2. Bentuk-Bentuk Kerja Mekanik :

Kerja mekanik adalah kerja yang berhubungan dengan gaya yang dilakukan sampai pada jarak tertentu.

$$W = \int_1^2 F ds \dots\dots\dots (3.8)$$

Ada dua buah bentuk gaya yang akan kita bahas, yaitu gaya poros, dan gaya pegas.

a. Kerja Ekspansi atau Kompresi

Kerja ekspansi atau kompresi adalah bentuk kerja yang berhubungan dengan gaya yang berupa tekanan pada sebuah penampang dan bergerak sejauh x . secara matematis:

$$\delta W = PA dx \text{ atau } \delta W = P dV \dots\dots\dots (3.9)$$

Mengingat bahwa dV adalah positif ketika volume bertambah, maka kerja pada daerah batas bergerak adalah positif saat berekpanasi, namun saat terjadi kompresi maka bernilai negative.

$$W = \int_1^2 P dV \dots\dots\dots (3.10)$$

b. Kerja Perpanjangan Batang Padat

Sebuah batang mengalami kerja ketika ditraik dengan sejumlah gaya pada luas penampang dan tegangan normal pada ujung dari batang tersebut. Besarnya gaya adalah $F = \sigma A$, maka besarnya gaya yang dilakukan ketika terjadi pertambahan panjang pada batang sejauh x adalah

$$W = \int_1^2 \sigma A dx \dots\dots\dots (3.11)$$

c. Kerja poros

Transmisi energi dengan menggunakan sebuah poros yang berputar sangat sering dalam praktis keteknikan. Untuk sebuah torsi tertentu konstan, kerja yang dilakukan selama putaran n ditentukan sebagai berikut.

$$T = Fr \rightarrow F = \frac{T}{r} \dots\dots\dots (3.12)$$

Gaya tersebut bekerja sejauh jarak s yang jika dihubungkan dengan radius r

$$s = (2\pi r) n \dots\dots\dots (3.13)$$

Kemudian kerja poros menjadi

$$W_{sh} = Fs = \frac{T}{r} (2\pi rn) = 2\pi nT \quad (kJ) \dots\dots\dots (3.14)$$

Daya yang ditransmisikan melalui sebuah poros adalah kerja poros per unit, waktu yang dituliskan

$$W_{sh} = 2\pi r n \dot{T} \quad (kW) \dots\dots\dots (3.15)$$

d. Kerja pegas

Jika panjang dari sebuah pegas berubah sebesar differensial dx karena pengaruh sebuah gaya F , maka kerja yang dilakukan adalah

$$dW_{pegas} = F dx \dots\dots\dots (3.16)$$

Untuk menentukan total kerja pegas diperlukan sebuah fungsional hubungan antara F dan x . Untuk sebuah pegas elastis, perubahan panjang x proporsional dengan gaya:

$$F = kx \quad (kN) \dots\dots\dots (3.17)$$

Dimana k adalah konstanta pegas dengan satuan kN/m, maka kerja:

$$W_{pegas} = \frac{1}{2}k(x_2^2 - x_1^2) \quad (kJ) \dots\dots\dots (3.18)$$

3.1.3 Aliran Massa

Aliran massa dalam sebuah sistem berperan sebagai mekanisme energi tambahan. Ketika massa masuk melalui sistem, maka energi dalam

sisitem akan bertambah karena massa membawa energi di dalamnya dan begitu keluar pun akan membawa energi dari dalam sistem.

3.2. Hukum Termodinamika Pertama

Persamaan umum hukum termodinamika pertama untuk sebuah siklus tertutup diekspresikan sebagai berikut:

“Perubahan dari total energi bersih di dalam sistem selama proses adalah sama dengan total energi yang masuk ke sistem dikurangi total energi yang keluar sistem selama proses”.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Total Energi} \\ \text{masuk sistem} \\ E_{in} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Total Energi} \\ \text{keluar sistem} \\ E_{out} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Perubahan Energi} \\ \text{dalam sistem} \\ \Delta E_{system} \end{array} \right)$$

Atau

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system} \text{ (kJ)} \dots\dots\dots (3.19)$$

Seperti pada bab sebelumnya, total energi E dari sistem terdiri dari tiga bagian: energi dalam U, energi kinetik KE dan energi potensial PE. Sehingga perubahan energi total sistem dapat ditulis sebagai berikut :

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad \text{(kJ)} \dots\dots\dots (3.20)$$

Dimana:

$$\Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$\Delta KE = \frac{1}{2} m(V_2^2 - V_1^2)$$

$$\Delta PE = mg(z_2 - z_1)$$

Hampir semua sistem tertutup yang ditemui dalam praktis adalah sistem stationer, yang umumnya tidak melibatkan perubahan kecepatan dan ketinggian selama proses. Untuk sistem tertutup yang stasioner perubahan energi kinetik dan energi potensial dapat diabaikan. Sehingga hukum termodinamika pertama dapat direduksi menjadi :

$$\Delta E = \Delta U \quad \text{(kJ)} \dots\dots\dots (3.21)$$

Seperti yang dijelaskan diawal bahwa transfer energi yang terjadi pada sistem tertutup adalah hanya panas dan kerja. Maka dapat dirumuskan menjadi:

$$E_{in} - E_{out} = (Q_{in} - Q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) = \Delta E_{system} \text{ (kJ)} \dots\dots (3.21)$$

Dimana *in* menandakan nilai energi masuk dan *out* adalah energi keluar dari sistem. Dengan demikian apabila sistem dianggap stasioner, maka kita akan mendapat persamaan energi adalah

$$Q - W = \Delta U \text{ (kJ)} \dots\dots\dots (3.22)$$

Nilai Q terdiri dari komponen in dan out, serta nilai W juga demikian, namun nilai W diberikan tanda negatif karena menandakan bahwa sistem dikenai kerja untuk melakukan transfer energi atau istilahnya “terbalik”.

3.3. Panas Jenis (Specific Heat)

Panas jenis didefinisikan sebagai energi yang diperlukan untuk meningkatkan temperatur suatu zat dalam satu satuan massa sebesar satu derajat. Pada umumnya energi akan tergantung pada bagaimana proses tersebut terjadi. Dalam termodinamika, terdapat dua macam panas jenis; panas jenis pada volume konstan C_v dan panas jenis pada tekanan konstan C_p . Panas jenis pada tekanan konstan C_p selalu lebih besar dari pada C_v , karena pada tekanan konstan, sistem mengalami ekspansi dan hal tersebut memerlukan energi.

Perhatikan sebuah sistem tertutup stasioner dengan volume konstan ($W_b = 0 \rightarrow$ kerja akibat pergeseran batas sistem). Hukum termodinamika pertama dapat diekspresikan dalam bentuk diferensial sebagai berikut :

$$dq - dW = du \rightarrow \text{(dimana } W \text{ merupakan kerja selain kerja akibat pergeseran batas sistem)}$$

Pada persamaan di atas, sisi kiri menunjukkan jumlah energi yang ditransfer dalam bentuk panas dan/atau kerja. Dari definisi C_v , energi tersebut harus setara dengan $C_v dT$, dimana dT adalah perubahan diferensial temperatur, sehingga,

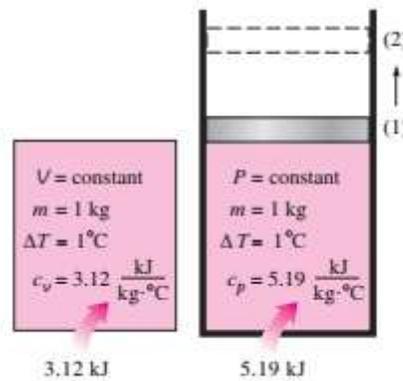
$$C_v dT = du \text{ pada volume konstan atau}$$

$$C_v = \left(\frac{\delta u}{\delta T} \right)_v \quad (kJ/(kg \cdot ^\circ C)) \dots\dots\dots (3.23)$$

Dengan ekspresi yang sama, panas jenis tekanan konstan C_p dapat diperoleh dengan memperhatikan proses tekanan konstan ($w_b + Du = Dh$), menghasilkan :

$$C_p = \left(\frac{\delta h}{\delta T} \right)_p \quad (kJ/(kg \cdot ^\circ C)) \dots\dots\dots (3.24)$$

Pada rumus di atas, C_v dapat didefinisikan sebagai perubahan energi dalam spesifik sebuah zat per unit perubahan temperatur pada volume konstan dan C_p adalah perubahan enthalpi sebuah zat perunit perubahan temperatur pada tekanan konstan. C_v dan C_p dapat juga berbentuk dalam basis molar, sehingga mempunyai satuan $J/(kmol \cdot ^\circ C)$.



Gambar 3. 2. Panas Jenis (specific heat) pada V dan P konstan

3.4. Energi Dalam, Enthalpi, dan Panas Jenis Gas Ideal

Dalam bab-bab sebelumnya telah didefinisikan bahwa gas ideal adalah gas yang temperatur, tekanan dan volume spesifik dihubungkan oleh persamaan :

$$P \cdot v = R \cdot T \dots\dots\dots (3.25)$$

Juga telah dibuktikan bahwa secara matematis dan eksperimental (Joule, 1843) bahwa untuk gas ideal energi dalam hanya merupakan fungsi temperatur,

$$u = u(T) \dots\dots\dots (3.26)$$

Dengan menggunakan definisi enthalpi dan persamaan keadaan gas ideal, didapat

$$h = u + RT \begin{cases} h = u + Pv \\ Pv = RT \end{cases} \dots\dots\dots (3.27)$$

Karena R konstan dan $u = u(T)$, maka enthalpi dari gas ideal juga merupakan fungsi dari temperatur :

$$h = h(T) \dots\dots\dots (3.28)$$

Karena u dan h hanya tergantung pada temperatur untuk gas ideal, panas jenis C_v dan C_p juga tergantung hanya pada temperatur. Oleh karena itu pada temperatur tertentu u , h , C_v dan C_p dari gas ideal akan mempunyai harga yang tertentu tanpa memperhatikan volume spesifik atau tekanan. Karena hal di atas, untuk gas ideal, ekspresi bentuk differensial perubahan energi dalam dan enthalpi menjadi:

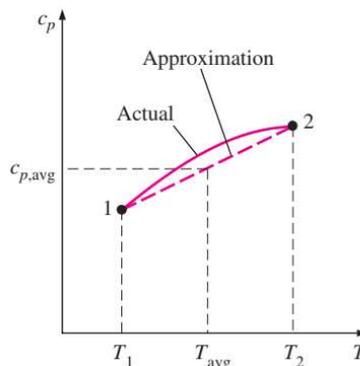
$$du = C_v(T) dT \dots\dots\dots (3.29)$$

$$dh = C_p(T) dT \dots\dots\dots (3.30)$$

Atau

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 C_v(T) dT \quad (kJ/kg) \dots\dots\dots (3.33)$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_1^2 C_p(T) dT \quad (kJ/kg) \dots\dots\dots (3.34)$$



Gambar 3.3. Grafik spesifik heat pada temperatur substans yang kecil

Pada Gambar 3.3 pengamatan gas dengan molekul yang kompleks (molekul dengan dua atom atau lebih), jika variasi panas jenis terhadap temperatur hampir mendekati linear, harga energi dalam dan enthalpi gas

ideal dapat dihitung dengan menggunakan panas jenis rata-rata konstan, seperti:

$$u_2 - u_1 = C_{v,av} (T_2 - T_1) \quad (kJ/kg) \dots\dots\dots (3.35)$$

$$h_2 - h_1 = C_{p,av} (T_2 - T_1) \quad (kJ/kg) \dots\dots\dots (3.36)$$

dimana $C_{v,av}$ dan $C_{p,av}$ dicari dari tabel dengan menggunakan temperatur rata-rata $(T_2 - T_1)/2$.

Dari pembahasan di atas dapat diambil kesimpulan untuk menentukan perubahan energi dalam dan enthalpi gas ideal :

1. Dengan menggunakan data tabel u dan h . Metode ini paling mudah dan paling akurat jika data tabel telah tersedia.
2. Dengan menggunakan hubungan C_v dan C_p sebagai fungsi temperatur dan melakukan proses integrasi. Metode tersebut tidak disukai untuk perhitungan manual, tetapi untuk penggunaan secara komputerisasi lebih disukai karena lebih akurat.
3. Dengan menggunakan panas jenis rata-rata. Metode tersebut paling sederhana dan disukai jika data tabel tidak tersedia. Hasil yang didapat akan lebih akurat jika interval temperatur tidak begitu besar.

3.5. Relasi-Relasi Panas Jenis Gas Ideal

Hubungan khusus antara C_p dan C_v gas ideal dapat diperoleh dengan mendiferensialkan $h = u + RT$, yang menghasilkan $dh = du + R dT$

Kemudian gantilah dh dengan $C_p dT$ dan du dengan $C_v dT$ dan bagi dengan hasilnya dengan dT , didapatkan :

$$C_p = C_v + R \quad (kJ/(kg.K)) \dots\dots\dots (3.37)$$

Hal tersebut merupakan hubungan penting karena kita akan dapat menentukan harga C_v dari harga C_p dan konstanta gas R .

Jika panas jenis diberikan dalam basis molar, R pada persamaan di atas harus diganti dengan konstanta gas universal R_u , sehingga

$$\overline{C_p} = \overline{C_v} + R_u \quad (kJ/(kmol.K)) \dots\dots\dots (3.38)$$

Dengan relasi-relasi diatas, kita dapat mendefinisikan properti gas ideal yang lain yang disebut dengan ratio panas jenis (*specific heat ratio*) k , sebagai berikut :

$$k = \frac{C_p}{C_v} \dots\dots\dots (3.39)$$

Rasio panas jenis juga bervariasi terhadap temperatur, tetapi variasinya tidak begitu ekstrim. Untuk gas monoatomic, harga dari k mendekati konstan 1,667. Beberapa gas diatomic, termasuk udara, mempunyai harga k kira-kira 1,4 pada temperatur ruangan.

3.6. Evaluasi Sifat Zat Cair dan Zat padat

Metode khusus seringkali dapat mengevaluasi kondisi Zat cair dan zat padat dengan perkiraan yang tidak memerlukan ketepatan tinggi. Misalnya misalnya kita ingin memperkirakan kondisi cairan menggunakan data table property, dan kondisi zat apabila dalam keadaan inkompresibel.

Suatu zat yang mempunyai spesifik volume konstan (atau densitas) disebut zat tak mampu tekan (*incompressible substance*). Spesifik volume zat pada t dan cair pada dasarnya konstan ketika mengalami proses. Asumsi volume konstan pada kasus ini harus diambil jika diterapkan untuk energi yang berhubungan dengan perubahan volume, seperti kerja akibat pergeseran batas sistem, hal tersebut dapat diabaikan dibandingkan dengan bentuk energi yang lain. Sehingga C_p dan C_v zat padat dan cair hanya disimbolkan dengan C .

$$C_p = C_v = C \dots\dots\dots (3.40)$$

$$du = C_v(T) dT = C(T)dT \dots\dots\dots (3.41)$$

$$dh = u(T) dT + Pv = C_v(T) dT + v(P_2 - P_1) \dots\dots\dots (3.42)$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 C (T) dT \quad (kJ/kg) \dots\dots\dots (3.43)$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_1^2 C (T) dT + v(P_2 - P_1) \quad (kJ/kg) \dots\dots\dots (3.44)$$

3.7. Contoh Soal

Tentukanlah perubahan entalpi untuk 1 kg nitrogen yang dipanaskan dari 300 ke 1200 K !

Jawab

- a) Dengan menggunakan table property gas, perubahan entalpi nya didapat:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 36.777 - 8723 = 28.054 \text{ kJ/kmol} = 1.002 \text{ kJ/kg}$$

- b) Dengan mengasumsikan kalor spesifik konstan (dengan menggunakan table properti gas B-2) perubahan enthalpinya diperoleh sebesar

$$\Delta h = C_p \Delta T = 1,042(1200 - 300) = 938 \text{ kJ/kg}$$

Terdapat perbedaan yang cukup besar apabila kita asumsikan entalpinya konstan.

BAB IV

MASSA DAN ENERGI ANALISIS

4.1. Analisis Massa dan Energi Volume Atur

Tujuan dari bab ini adalah untuk mengembangkan dan menggambarkan penggunaan bentuk volume atur (sistem terbuka) dari prinsip-prinsip konservasi massa dan konservasi energi.

Peralatan seperti turbin, pompa, dan kompresor dimana terdapat aliran massa, secara prinsip dapat dianalisis dengan mempelajari analisa aliran massa pada sistem terbuka. Seperti halnya pada sistem tertutup, perpindahan energi melalui sebuah volume atur dapat terjadi dalam bentuk kerja dan panas, namun selain itu pula terjadi bentuk perubahan energi yang lain yaitu energi yang membawa massa masuk atau keluar yang disebut dengan energi aliran.

Beberapa istilah yang akan sering dijumpai pada bab ini harus diterangkan terlebih dahulu, seperti *control surface*, *steady*, *unsteady*, *transient*, dan *uniform*. Batas dari sebuah volume atur disebut dengan permukaan atur (*control surface*), dan hal tersebut dapat berupa batas riil maupun imajiner. Kasus pada nosel misalnya, bagian dalam nosel merupakan batas riil sedangkan bagian masuk dan keluar nosel merupakan batas imajiner, karena pada bagian ini tidak ada batas secara fisik.



Gambar 4.1. Volume atur dan batas-batasnya

Istilah *steady* dan seragam (*uniform*) akan digunakan secara luas pada bab ini, oleh karena itu adalah sangat penting untuk mengetahui pengertiannya. *Steady* berarti tidak berubah terhadap waktu, sebaliknya adalah *unsteady* atau *transient* yaitu perubahan terjadi berdasarkan waktu.

Uniform mempunyai pengertian tidak berubah terhadap lokasi dalam region yang ditentukan. Pembahasan lebih lanjut mengenai prinsip konservasi massa dan energi pada volume atur akan dijelaskan di bawah ini.

Prinsip Konservasi Massa

Untuk sistem tertutup, prinsip konservasi massa adalah telah jelas karena tidak ada perubahan massa dalam kasus tersebut. Tetapi untuk volume atur, karena dalam kasus ini massa dapat melintasi batas sistem, jumlah massa yang masuk dan keluar sistem harus diperhitungkan.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Total} \\ \text{massa masuk} \\ \text{volume atur} \\ (\sum m_i) \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Total} \\ \text{massa keluar} \\ \text{volume atur} \\ (\sum m_e) \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Perubahan Laju aliran} \\ \text{massa masuk} \\ \text{volume atur} \\ (\Delta m_{cv}) \end{array} \right)$$

dimana subskrip *i*, *e* dan *CV* menunjukkan *masuk, keluar dan volume atur*. Persamaan diatas dapat juga dituliskan dalam bentuk *rate*, dengan membagi dengan satuan waktu.

Kecepatan Aliran Massa dan Volume (Mass dan Volume Flow Rates)

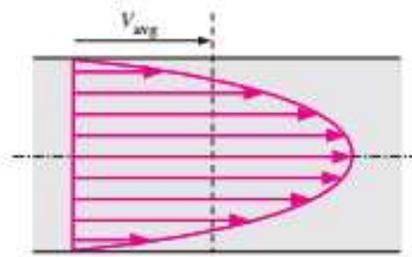
Jumlah massa yang mengalir melintasi sebuah seksi perunit waktu disebut *mass flow rate* dan dinotasikan dengan “ \dot{m} ”, tanda titik diatas menandakan bahwa laju aliran massa per satuan waktu. Jika fluida mengalir masuk dan keluar sebuah volume atur melalui pipa atau saluran, massa yang masuk adalah proporsional terhadap luas permukaan “*A*” dari pipa atau saluran, densitas “ ρ ” dan kecepatan normal (V_n) dari fluida. Maka *Mass flow rates* melalui differensial *dA* dapat dituliskan:

$$d\dot{m} = \rho V_n dA \dots\dots\dots(4-1)$$

$$\dot{m} = \int d\dot{m} = \int \rho V_n dA \dots\dots\dots(4-2)$$

$$\dot{m} = \rho V_n A \dots\dots\dots(4-3)$$

Persamaan 4-3 tidak bisa digunakan secara eksak, karena kecepatan yang terjadi didalam pipa atau saluran bervariasi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2, untuk itu diperlukan kecepatan rata-rata fluida di dalam saluran.



Gambar 4.2. Profil kecepatan pada pipa atau saluran

$$V_{avg} = \frac{1}{A} \int V_n dA \dots\dots\dots (4-4)$$

Dimana V_{avg} adalah kecepatan rata-rata fluida di dalam pipa, dengan mengintegrasikan persamaan 4-4 maka kita akan mendapatkan laju aliran massa (*mass flow rate*) adalah

$$\dot{m} = \rho V_{avg} A \quad (kg/s) \dots\dots\dots (4-5)$$

Sedangkan volume dari fluida yang mengalir melalui luas penampang pipa atau saluran disebut dengan laju aliran volume (*volume flow rate*) adalah

$$\dot{V} = \int V_n dA = V_{avg} A = VA \quad (m^3/s) \dots\dots\dots (4-6)$$

Hubungan antara laju aliran massa dan laju aliran volume adalah

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \frac{\dot{V}}{v} \dots\dots\dots (4-7)$$

Prinsip Konservasi Energi

Persamaan konservasi energi untuk sebuah volume atur ketika menjalani suatu proses dapat diungkapkan seperti:

$$\left(\begin{array}{l} \text{Total energi} \\ \text{melintasi batas} \\ \text{sebagai panas} \\ \text{dan kerja} \\ (\sum Q + W) \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Total} \\ \text{Energi masuk} \\ \text{volume atur} \\ (\sum E_{in}) \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Total} \\ \text{Energi keluar} \\ \text{volume atur} \\ (\sum E_{out}) \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Perubahan} \\ \text{energi di} \\ \text{volume atur} \\ (\Delta E_{cv}) \end{array} \right)$$

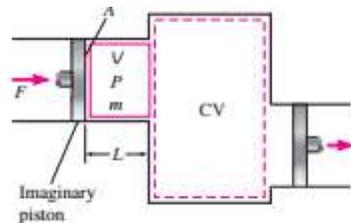
Jika tidak ada massa yang masuk dan keluar volume atur, maka suku kedua dan ketiga akan hilang, sehingga persamaan menjadi persamaan untuk sistem tertutup.

Dalam volume atur seperti juga dalam sistem tertutup, dalam interaksinya dimungkinkan bekerja lebih dari satu bentuk kerja pada waktu yang bersamaan. Misalnya: kerja listrik, kerja poros untuk sebuah sistem *compressibel* dan lain-lain. Dan untuk sebuah volume atur yang diisolasi maka heat transfer adalah nol. Bentuk energi masuk dan energi keluar yang mengalami perubahan adalah energi dalam, energi kinetik, dan energi potensial.

Kerja Aliran (Flow Work)

Energi yang diperlukan untuk mendorong fluida memasuki volume atur disebut kerja aliran (flow work atau flow energi). Untuk memperoleh hubungan kerja aliran, perhatikan elemen fluida dari sebuah volume V , seperti yang ditunjukkan Gambar. 4.3. Fluida pada bagian pangkal akan memaksa elemen fluida memasuki volume atur; yang disini dilakukan oleh sebuah piston imajiner. Jika tekanan fluida P dan luas permukaan elemen fluida adalah A , maka gaya yang bekerja pada elemen fluida adalah

$$F = PA \dots\dots\dots (4-8)$$



Gambar 4.3. Skema kerja aliran

Untuk mendorong seluruh elemen ke volume atur, gaya menempuh melalui sebuah jarak L . Sehingga kerja yang dilakukan ketika mendorong elemen fluida memasuki batas sistem adalah

$$W_{flow} = FL = PAL = PV \quad (kJ) \dots\dots\dots (4-6)$$

$$W_{flow} = Pv \quad (kJ/kg) \dots\dots\dots (4-7)$$

Energi Total pada sebuah fluida yang mengalir

Seperti pada pembahasan sebelumnya, energi total dari sebuah sistem sederhana fluida kompresibel terdiri dari tiga bagian : energi dalam, kinetik dan potensial, yang dalam unit massa :

$$e = u + ke + pe = u + \frac{v^2}{2} + gz \quad (\text{kJ/kg}) \dots\dots\dots (4-8)$$

dimana V adalah kecepatan dan z adalah ketinggian sistem relative terhadap titik acuan. Fluida yang memasuki dan keluar volume atur memiliki bentuk energi tambahan (energi aliran Pv). Massa dari fluida yang mengalir adalah: Sehingga total energi perunit (θ).

$$\theta = Pv + e = Pv + (u + ke + pe) \quad (\text{kJ/kg}) \dots\dots\dots (4-9)$$

Dan kombinasi $Pv + u$ telah didefinisikan sebelumnya sebagai enthalpi, sehingga persamaan total energinya menjadi:

$$\theta = h + ke + pe = h + \frac{v^2}{2} + gz \quad (\text{kJ/kg}) \dots\dots\dots (4-10)$$

Dengan menggunakan enthalpy maka kita tidak perlu berfokus kepada kerja aliran karena sudah termasuk di dalam entalpi itu sendiri.

4.2. Energi Analisis Pada Aliran Steadi

Sejumlah peralatan-peralatan keteknikan seperti turbin, kompresor dan nosel dioperasikan untuk periode yang lama dan dalam kondisi yang sama. Peralatan yang demikian disebut dengan peralatan aliran steady. Proses aliran stedi mempunyai pengertian sebuah proses dimana aliran fluida ketika melalui sebuah volume atur tidak mengalami perubahan terhadap waktu.

Sebuah proses aliran steady bisa dikarakteristikan sebagai berikut:

1. Tidak ada properti dalam volume atur yang berubah terhadap waktu, seperti volume V , massa m dan total energi E .
2. Tidak ada properti pada batas volume atur yang berubah terhadap waktu. Artinya tidak ada perubahan terhadap waktu properti pada *inlet* dan *exit*.
3. Interaksi panas dan kerja antara sistem aliran steady dan lingkungan tidak berubah terhadap waktu.

Beberapa peralatan siklus, seperti mesin atau kompresor *reciprocating*, sebenarnya tidak bisa memenuhi ketentuan di atas karena

alirannya bervariasi dan tidak steady. Tetapi hal tersebut dapat dianalisa sebagai proses steady dengan menggunakan nilai rata-rata dalam interval waktu tertentu pada seluruh batas sistem.

Konservasi Massa

Selama proses aliran steady, hal yang terpenting untuk dianalisa adalah *mass flow rate* (\dot{m}). Persamaan konservasi massa untuk proses aliran steady dengan multi inlet dan exit dapat diekspresikan dalam bentuk rate adalah sebagai berikut:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Total} \\ \text{massa masuk} \\ \text{perunit waktu} \\ \left(\sum m_{in} \right) \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Total} \\ \text{massa keluar} \\ \text{perunit waktu} \\ \left(\sum m_{out} \right) \end{array} \right)$$

Untuk hampir semua peralatan keteknikan seperti nosel, difuser, turbin dan kompresor umumnya hanya mempunyai satu aliran (hanya satu saluran masuk dan keluar), sehingga umumnya hanya disimbolkan dengan subskrip 1 untuk aliran masuk dan 2 untuk aliran keluar.

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \dots\dots\dots(4-11)$$

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (kg/s) \dots\dots\dots(4-12)$$

Dimana ρ adalah massa jenis dari fluida, V adalah kecepatan rata-rata fluida di dalam saluran, dan A adalah luas penampang saluran masuk atau keluar.

Konservasi Energi

Telah disebutkan sebelumnya bahwa selama proses aliran steady total energi dalam sebuah volume atur adalah konstan (E_{cv} konstan), Sehingga perubahan total energi selama proses adalah nol ($E_{cv} = 0$). Sehingga jumlah energi yang memasuki sebuah volume atur dalam semua bentuk (panas, kerja, transfer massa) harus sama dengan energi yang keluar untuk sebuah proses aliran steady.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Total} \\ \text{Energi masuk} \\ \text{volume atur} \\ (\sum E_{in}) \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Total} \\ \text{Energi keluar} \\ \text{volume atur} \\ (\sum E_{out}) \end{array} \right)$$

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum_{in} \dot{m} \theta = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum_{out} \dot{m} \theta$$

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum_{in} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum_{out} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{out} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_{in} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \dots\dots\dots (4-13)$$

Untuk peralatan yang mempunyai satu saluran keluar dan masuk serta kondisi aliran dalam steady maka didapatkan ,

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right] \dots\dots\dots (4-14)$$

4.3. Beberapa Peralatan Keteknikan Dengan Aliran Steadi

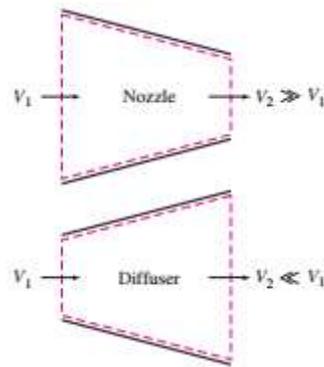
4.3.1 Nozzel dan diffuser

Nosel dan difuser pada umumnya digunakan pada mesin jet, roket, pesawat udara dan lain-lain. Nosel adalah alat untuk meningkatkan kecepatan fluida dan menurunkan tekanan. Difuser adalah kebalikan dari nosel yaitu sebuah alat untuk menaikkan tekanan dan menurunkan kecepatan fluida. Luas penampang nosel mengecil dengan arah aliran dan sebaliknya luas penampang difuser membesar dengan arah aliran fluida. Nosel dan difuser di atas adalah untuk fluida dengan kecepatan sub sonik, jika untuk kecepatan super sonik maka bentuknya merupakan kebalikannya.

Hal-hal penting yang berhubungan dengan persamaan energi untuk nosel dan difuser adalah sebagai berikut:

$W = 0$. Kerja untuk nosel dan difuser tidak ada, karena bentuknya hanya berupa saluran sehingga tidak melibatkan kerja poros ataupun kerja listrik. $ke \neq 0$. Kecepatan yang terjadi dalam nosel dan difuser adalah sangat

besar, sehingga perubahan energi kinetik tidak bisa diabaikan. $pe \cong 0$. Pada umumnya perbedaan ketinggian ketika fluida mengalir melalui nosel dan difuser adalah kecil, sehingga perubahan energi potensial dapat diabaikan. $Q \approx 0$. Rate perpindahan panas antara fluida yang melalui nosel dan difuser dengan lingkungan pada umumnya sangat kecil, bahkan meskipun alat tersebut tidak diisolasi. Hal tersebut disebabkan karena kecepatan fluida yang relatif cepat.



Gambar 4.4. Nozzel dan Difusser

4.3.2 Turbin dan Kompresor

Dalam pembangkit listrik tenaga uap, gas dan air, alat yang menggerakkan generator listrik adalah turbin. Ketika fluida mengalir melalui turbin maka kerja akan melawan sudu yang tertempel pada poros. Sebagai hasilnya, poros berputar dan turbin menghasilkan kerja. Kerja yang dihasilkan turbin adalah positif karena dilakukan oleh fluida.

Kompresor, sama seperti pompa, kipas dan blower adalah alat untuk meningkatkan tekanan fluida. Kerja harus disuplai dari sumber eksternal melalui poros yang berputar. Karena kerja dilakukan kepada fluida, maka kerja pada kompresor adalah negatif.

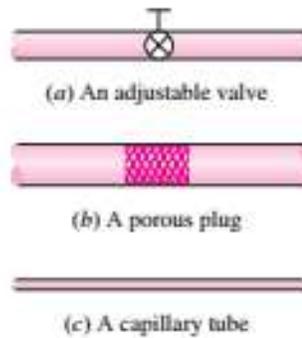
Untuk turbin dan kompresor hal-hal penting yang berhubungan dengan persamaan energi:

$Q \approx 0$ Perpindahan panas pada alat tersebut umumnya kecil jika dibandingkan dengan kerja poros, kecuali untuk kompresor yang menggunakan pendinginan intensif, sehingga dapat diabaikan. $W \neq 0$ Semua alat ini melibatkan poros yang berputar. Oleh karena itu kerja di sini sangatlah penting. Untuk turbin W menunjukkan output power, sedangkan untuk kompresor dan pompa W menunjukkan

power input power. $ke \cong 0$. Perubahan kecepatan pada alat-alat tersebut biasanya sangat kecil untuk menimbulkan perubahan energi kinetik yang signifikan (kecuali untuk turbin). Sehingga perubahan energi kinetik dianggap sangat kecil, meskipun untuk turbin, dibandingkan dengan perubahan enthalpi yang terjadi. $pe \cong 0$ Pada umumnya alat-alat tersebut bentuknya relatif kecil sehingga perubahan energi potensial dapat diabaikan.

4.3.3 Katup Cekik (Throttling valve)

Throttling valve adalah suatu alat yang aliran fluidanya diberi halangan sehingga menimbulkan penurunan tekanan yang signifikan. Misalnya katup-katup umum, tabung-tabung kapiler, hambatan berpori (*porous*) dan lain-lain seperti ditunjukkan Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Throttling Valve

Alat-alat tersebut umumnya relatif kecil, dan aliran yang melalui dianggap adiabatik $Q \cong 0$. Tidak ada kerja yang terlibat ($W = 0$). Perubahan energi kinetik sangat kecil ($ke \cong 0$) dan perubahan energi potensial juga sangat kecil ($pe \cong 0$), maka persamaan energinya menjadi:

$$h_2 \cong h_1$$

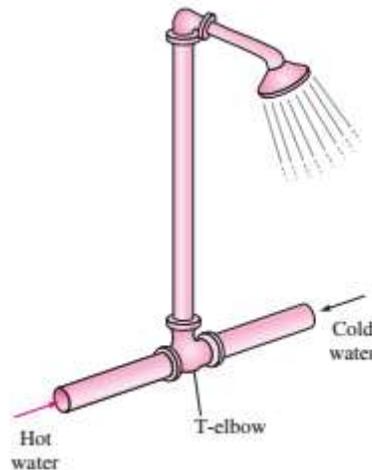
$$u_2 + P_2 v_2 = u_1 + P_1 v_1 \dots\dots\dots (4-15)$$

Oleh karena itu peralatan tersebut umumnya disebut dengan alat **isoenthalpi**. Perlu diingat bahwa untuk gas ideal, maka $h = h(T)$, jika enthalpi selama proses tetap, maka dapat dipastikan bahwa temperaturnya

juga tetap. Jika *flow work* menurun maka internal energi dan temperatur akan naik selama proses *throttling*.

4 .3.4. Mixing Chamber

Dalam aplikasi keteknikan, pencampuran dua aliran tidak jarang terjadi. Suatu tempat/ruang dimana proses pencampuran terjadi dinamakan ruang pencampuran (*mixing chamber*). Contoh sederhana adalah *T-elbow* atau *Y-elbow* untuk pencampuran aliran panas dan dingin.



Gambar 4.6. T-Elbow tempat bertemunya air dingin dan panas

Mixing chamber biasanya diisolasi sempurna ($Q \cong 0$) dan tidak melibatkan kerja ($W = 0$). Juga energi kinetik dan energi potensial dapat diabaikan ($ke \cong 0, pe \cong 0$), sehingga persamaan konservasi massa dan energi pada aliran steady adalah sebagai berikut :

$$\dot{m}_{in}h_{in} = \dot{m}_{out}h_{out} \dots\dots\dots(4-16)$$

4 .3.5 Penukar Panas (Heat Exchanger)

Penukar panas adalah sebuah alat dimana dua aliran fluida saling penukar panas tanpa keduanya bercampur. Contoh yang paling sederhana dari alat penukar panas adalah alat penukar panas tabung ganda (*tube and shell*), yang terdiri dari dua pipa konsentrik dengan diameter yang berbeda.

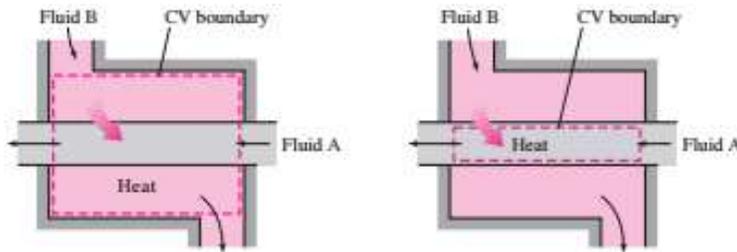
Panas ditransfer dari fluida panas ke fluida dingin melalui dinding pipa yang memisahkan.

Persamaan konservasi massa pada kondisi steady adalah jumlah *rate* massa yang memasuki sistem sama dengan *rate* massa yang keluar sistem.

Persamaan konservasi energi dari alat penukar panas pada umumnya tidak melibatkan interaksi kerja ($W = 0$), energi kinetik dan energi potensial diabaikan ($ke \cong 0, pe \cong 0$) untuk setiap aliran fluida.

$$\dot{m}_{in}h_{in} = \dot{m}_{out}h_{out} \dots\dots\dots(4-17)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{out} \dot{m}(h + \frac{v^2}{2} + gz) - \sum_{in} \dot{m}(h + \frac{v^2}{2} + gz) \dots\dots\dots(4-18)$$

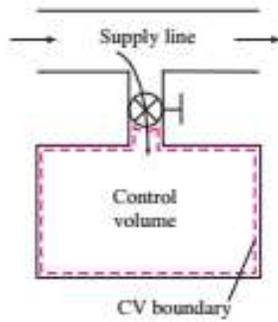


Gambar 4.7. Penukar kalor

Pertukaran panas yang berhubungan dengan alat penukar panas tergantung bagaimana volume atur yang dipilih (batas sistem). Pada umumnya batas yang dipilih adalah bagian diluar *shell*, hal tersebut untuk mencegah pertukaran panas fluida dengan lingkungan.

4.4. Proses Aliran Tidak Steady (*Unsteady Flow Processes*)

Proses tidak stedi atau proses transien adalah kebalikan dari proses stedi dimana properti dalam volume atur berubah dengan waktu, interaksi panas dan kerja antara sistem aliran steady dan lingkungan juga berubah terhadap waktu.



Gambar 4. 8. Aliran tidak stedi (pengisian tangki)

Contoh yang paling tepat untuk menggambarkan sebuah proses aliran tidak stedi adalah bejana/tangki pembuangan/pemasukan dari saluran suplai (*the charging of rigid vessel from supply line*), yang berfungsi untuk memasukkan atau membuang fluida dari sebuah bejana bertekanan (Gb. 4 -3). Contoh lainnya adalah proses pemompaan ban/balon dan *pressure cooker* dan lain-lain. Perbedaan lain dari proses aliran stedi dan tidak stedi adalah untuk proses aliran stedi umumnya tempat, ukuran dan bentuk yang tetap. Sedangkan untuk proses aliran tidak stedi tidak selalu demikian, karena memungkinkan ada pergeseran batas sistem/kerja akibat pergeseran batas sistem.

Konservasi massa

Tidak seperti proses aliran stedi, jumlah massa dalam volume atur mengalami perubahan terhadap waktu. Besarnya perubahan tersebut tergantung jumlah massa yang masuk dan keluar sistem.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Total} \\ \text{massa masuk} \\ \text{volume atur} \\ (\sum m_{in}) \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Total} \\ \text{massa keluar} \\ \text{volume atur} \\ (\sum m_{out}) \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Perubahan Laju aliran} \\ \text{massa masuk} \\ \text{volume atur} \\ \text{persatuan waktu} \\ (dm_{cv}/dt) \end{array} \right)$$

Dengan mengintegalkan terhadap waktu, maka kita mendapatkan

$$\int (\sum m)_{in} dt - \int (\sum m)_{out} dt = \int dm_{cv}/dt$$

$$\sum \int_1^2 m_{in} dt - \sum \int_1^2 m_{out} dt = \int_1^2 dm_{cv}/dt$$

$$m_{in} - m_{out} = (m_2 - m_1)_{cv} \dots \dots \dots (4-19)$$

dimana subskrip 1 dan 2 menunjukkan kondisi awal dan akhir volume atur.

Konservasi Energi

Intensitas energi pada volume atur berubah seiring dengan waktu pada sebuah proses aliran transien. Besarnya energi tergantung pada jumlah energi yang ditransfer masuk atau keluar dari batas berupa panas dan kerja serta jumlah energi yang ditransfer masuk atau keluar melalui aliran massa.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Total} \\ \text{Energi masuk} \\ \text{volume atur} \\ \text{panas, kerja dan} \\ \text{aliran massa} \\ \left(\sum E_{in} \right) \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Total} \\ \text{Energi keluar} \\ \text{volume atur} \\ \text{panas, kerja dan} \\ \text{aliran massa} \\ \left(\sum E_{out} \right) \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Perubahan} \\ \text{energi di} \\ \text{volume atur} \\ \text{kinetik, potensial} \\ \text{dll} \\ (\Delta E_{system}) \end{array} \right)$$

Secara umum *unsteady flow* proses sulit di analisa karena properti massa pada saluran masuk dan keluar selama proses berubah seiring dengan waktu.

$$\left(\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum_{in} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \right) - \left(\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum_{out} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \right) = (m_2(u + ke + pe)_2 - m_1(u + ke + pe)_1)_{system} \dots\dots\dots (4-20)$$

Jika energi kinetik dan potensial diabaikan maka kita akan mendapatkan:

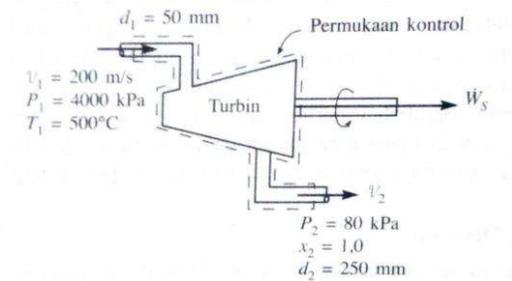
$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{out} \dot{m} h - \sum_{in} \dot{m} h + (m_2 u_2 - m_1 u_1)_{system} \dots\dots\dots (4-21)$$

Dimana Q adalah total energi bersih yang masuk ke dalam sistem $Q_{net,in} = Q_{in} - Q_{out}$ dan total kerja bersih yang keluar sistem W adalah $W_{net,out} = W_{out} - W_{in}$.

4.5. Contoh Soal

Uap masuk ke dalam sebuah turbin pada 4000 kPa dan 500 °C dan keluar seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini. Untuk kecepatan masuk sebesar 200 m/s hitunglah keluaran daya turbin tersebut. Catatan:

abaikan perpindahan kalor perubahan energi kinetik, dan tunjukkan perubahan energi kinetik dapat diabaikan.



Jawab:

Dengan menggunakan table property, $h_1 = 3445,2 \text{ kJ/kg}$ dan $h_2 = 2665,2 \text{ kJ/kg}$.

$$\dot{m} = \rho_1 A_1 V_1 = \frac{1}{v_1} A_1 V_1 = \frac{\pi(0,025)^2(200)}{0,08643} = 4,544 \text{ kg/s}$$

Daya maksimum turbin adalah

$$\dot{Q}_T - \dot{W}_T = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

$$-\dot{W}_T = \dot{m}[h_2 - h_1]$$

$$\dot{W}_T = -4,544 [3445,2 - 2665,2] = 3542 \text{ kJ/s atau } 3,542 \text{ MW}$$

Membuktikan bahwa energi kinetiknya dapat diabaikan,

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$$

$$V_2 = \frac{\rho_1 A_1 V_1}{\rho_2 A_2} = \frac{\pi(0,025)^2(200/0,08643)}{\pi(0,125)^2/2,087} = 193 \text{ m/s}$$

$$\Delta KE = \dot{m} \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right) = 4,544 \left(\frac{193^2 - 200^2}{2} \right) = -6250 \text{ J/s (sangat kecil)}$$

BAB V

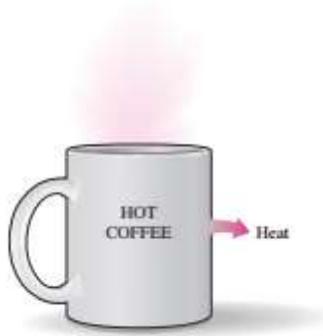
HUKUM TERMODINAMIKA II

SISTEM TERBUKA

5.1. Hukum Termodinamika Secara Umum

Dalam bab-bab sebelumnya telah dibahas mengenai Hukum termodinamika I yang menyatakan bahwa *energi tidak dapat diciptakan dan dimusnahkan tetapi hanya dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk yang lain*. Prinsip tersebut juga di kenal dengan istilah ***konservasi energi***, yang berlaku untuk sistem tertutup dan terbuka.

Coba perhatikan secangkir kopi panas ditaruh dalam suatu ruangan, maka akan dengan sendirinya kopi tersebut akan menjadi dingin (Gambar 5.1). Dalam kasus tersebut, hukum termodinamika pertama telah terpenuhi karena energi yang dilepaskan kopi sebanding dengan energi yang diterima oleh lingkungan, tetapi jika dibalik secangkir kopi tidak menjadi panas dalam sebuah ruangan yang dingin.



Gambar 5.1. Secangkir kopi yang ditempatkan di ruangan

Kita tahu bahwa hal tersebut tidak akan terjadi. Atau kita ambil contoh lain, seperti tahanan panas memanaskan sebuah ruangan, jika dibalik, kita memberikan panas pada ruangan, maka tidak mungkin arus akan mengalir dengan arah terbalik dan menghasilkan energi yang sama dengan energi yang dihasilkan listrik sebelumnya.

Dari contoh diatas jelas bahwa proses berjalan dalam suatu arah tertentu tidak sebaliknya. Suatu proses yang telah memenuhi hukum

termodinamika I, belum tentu dapat berlangsung. Diperlukan suatu prinsip selain hukum termodinamika I untuk menyatakan bahwa suatu proses dapat berlangsung, yang dikenal dengan hukum termodinamika II. Atau dengan kata lain suatu proses dapat berlangsung jika memenuhi hukum termo I dan termo II.

Kegunaan hukum termo II tidak terbatas hanya pada mengidentifikasi arah dari suatu proses, tetapi juga bisa untuk mengetahui **kualitas** energi (hukum I berhubungan dengan **kuantitas** energi dan perubahan bentuk energi tanpa memandang kualitas energi); menentukan **batas toeritis** unjuk kerja suatu sistem; dan memperkirakan **kelangsungan reaksi kimia** (*degree of completion of chemical reaction*)

5.2. Reservoir Energi Panas (Thermal Energy Reservoirs)

Sebelum membahas mengenai hukum termo II, perlu diketahui istilah reservoir energi panas (*Thermal Energy Reservoir*) atau lebih umum disebut dengan reservoir. Reservoir mempunyai pengertian adalah suatu benda/zat yang mempunyai kapasitas energi panas (massa x panas jenis) yang besar. Artinya reservoir dapat menyerap/ menyuplai sejumlah panas yang tidak terbatas tanpa mengalami perubahan temperatur. Contoh dari benda/zat besar yang disebut reservoir adalah samudera, danau dan sungai untuk benda besar berwujud air dan atmosfer untuk benda besar berwujud udara.

Sistem dua-fasa juga dapat dimodelkan sebagai suatu Reservoir, karena sistem dua -fasa dapat menyerap dan melepaskan panas tanpa mengalami perubahan temperatur. Dalam praktek, ukuran sebuah reservoir menjadi relatif. Misalnya, sebuah ruangan dapat disebut sebagai sebuah reservoir dalam suatu analisa panas yang dilepaskan oleh pesawat televisi. Reservoir yang menyuplai energi disebut dengan **source** dan reservoir yang menyerap energi disebut dengan **sink**.

5.3. Mesin Kalor (Heat Engines)

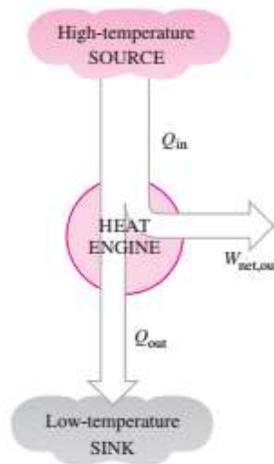
Seperti kita ketahui kerja dapat dikonversi langsung menjadi panas. Seperti misalnya pengaduk air. Kerja dapat kita berikan pada poros pengaduk sehingga temperatur naik. Tetapi sebaliknya, jika kita memberikan panas pada air, maka poros tidak akan berputar. Atau dengan kata lain, jika memberikan panas pada air, maka tidak akan tercipta kerja (poros). Dari pengamatan di atas, konversi panas menjadi kerja bisa dilakukan tetapi diperlukan sebuah alat bantu yang dinamakan dengan mesin kalor (heat engines)

Sebuah mesin kalor dapat dikarakteristikan sebagai berikut :

1. Mesin kalor menerima panas dari source bertemperatur tinggi (energi matahari, furnace bahan bakar, reaktor nuklir, dll).
2. Mesin kalor mengkonversi sebagian panas menjadi kerja (umumnya dalam bentuk poros yang berputar)
3. Mesin kalor membuang sisa panas ke *sink* bertemperatur rendah.
4. Mesin kalor beroperasi dalam sebuah siklus.

Mengacu pada karakteristik di atas, sebenarnya motor bakar dan turbin gas tidak memenuhi kategori sebagai sebuah mesin kalor, karena fluida kerja dari motor bakar dan turbin gas tidak mengalami siklus termodinamika secara lengkap.

Sebuah alat produksi kerja yang paling tepat mewakili definisi dari mesin kalor adalah pembangkit listrik tenaga air, yang merupakan mesin pembakaran luar dimana fluida kerja mengalami siklus termodinamika yang lengkap.



Gambar 5.2. Bagan analogi sederhana mesin kalor

Efisiensi Termal (Thermal Efficiency)

Efisiensi termal sebenarnya digunakan untuk mengukur unjuk kerja dari suatu mesin kalor, yaitu berapa bagian dari input panas yang diubah menjadi output kerja bersih. Unjuk kerja atau efisiensi, pada umumnya dapat diekspresikan menjadi:

$$\text{Efisiensi termal} = \frac{\text{Total Kerja bersih yang keluar sistem}}{\text{Total panas yang masuk kedalam sistem}}$$

Untuk mesin kalor, output yang diinginkan adalah output kerja bersih dan input yang diperlukan adalah jumlah panas yang disuplai ke fluida kerja. Kemudian efisiensi termal dari sebuah mesin kalor dapat diekspresikan sebagai

$$\eta_{th} = \frac{W_{net,in}}{Q_{in}} \quad \text{atau} \quad \eta_{th} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad (4-18)$$

Dalam peralatan-peralatan praktis, seperti mesin kalor, mesin pendingin dan pompa kalor umumnya dioperasikan antara sebuah media bertemperatur tinggi pada temperatur T_H dan sebuah media bertemperatur rendah pada temperatur T_L . Untuk sebuah keseragaman dalam mesin kalor, mesin pendingin dan pompa kalor perlu pendefinisian dua kuantitas:

- Q_H = besar perpindahan panas antara peralatan siklus dan media bertmeperatur tinggi pada temperatur T_H .
- Q_L = besar perpindahan panas antara peralatan siklus dan media bertmeperatur rendah pada temperatur T_L .

Sehingga efisiensi termal dapat dituliskan sebagai berikut :

$$W_{net,out} = Q_H - Q_L$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net,in}}{Q_H}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (4-18)$$

Efisiensi termal dari sebuah mesin kalor selalu kurang dari 1 karena Q_H dan Q_L didefinisikan nilainya positif.

Hukum Termodinamika Kedua:

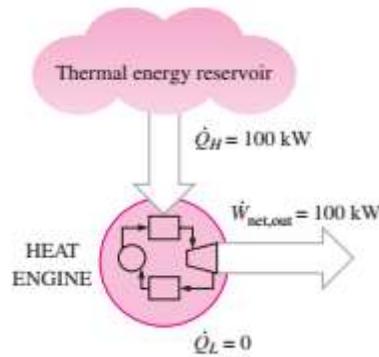
Pernyataan Kelvin-Plank

Melihat karakteristik dari sebuah mesin kalor, maka tidak ada sebuah mesin kalor yang dapat mengubah semua panas yang diterima dan kemudian mengubahnya semua menjadi kerja. Keterbatasan tersebut kemudian dibuat sebuah pernyataan oleh Kelvin-Plank yang berbunyi:

“Adalah tidak mungkin untuk sebuah alat/mesin yang beroperasi dalam sebuah siklus yang menerima panas dari sebuah reservoir tunggal dan memproduksi sejumlah kerja bersih”.

Pernyataan Kelvin -Plank (hanya diperuntuk untuk mesin kalor) diatas dapat juga diartikan sebagai tidak ada sebuah mesin/alat yang bekerja dalam sebuah siklus menerima panas dari reservoir bertemperatur tinggi dan mengubah panas tersebut seluruh menjadi kerja bersih. Atau dengan kata lain tidak ada sebuah mesin kalor yang mempunyai efisiensi 100%.

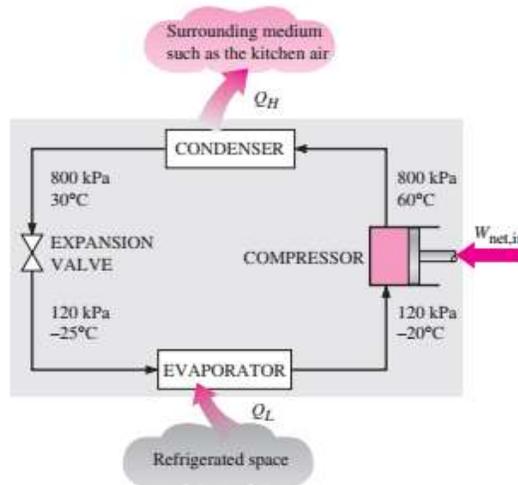
Ketidakmungkinan efisiensi 100% adalah bukan karena adanya friksi, atau kehilangan-kehilangan lainnya, melainkan karena keterbatasan yang terjadi antara mesin kalor yang ideal dan aktual.



Gambar 5.3. Hukum Termodinamika kedua menurut Kelvin-Planck

5.4. Mesin Pendingin Dan Pompa Kalor (Refrigerators And Heat Pumps)

Mesin pendingin, sama seperti mesin kalor, adalah sebuah alat siklus. Fluida kerjanya disebut dengan refrigerant. Siklus refrigerasi yang paling banyak digunakan adalah daur refrigerasi kompresi-uap yang melibatkan empat komponen: kompresor, kondensor, katup ekspansi dan evaporator (Gambar 5.4).



Gambar 5.4. Komponen-komponen mesin pendingin

Refrigerant memasuki kompresor sebagai sebuah uap dan dikompres ke tekanan kondensor. *Refrigerant* meninggalkan kompresor pada temperatur yang relatif tinggi dan kemudian didinginkan dan mengalami kondensasi dikondensor yang membuang panasnya ke

lingkungan. *Refrigerant* kemudian memasuki tabung kapilar dimana tekanan *refrigerant* turun drastis karena efek *throttling*. *Refrigerant* bertemperatur rendah kemudian memasuki evaporator, dimana disini *refrigerant* menyerap panas dari ruang refrigerasi dan kemudian *refrigerant* kembali memasuki kompresor. Efisiensi refrigerator disebut dengan istilah coefficient of performance (COP), dinotasikan dengan COP_R .

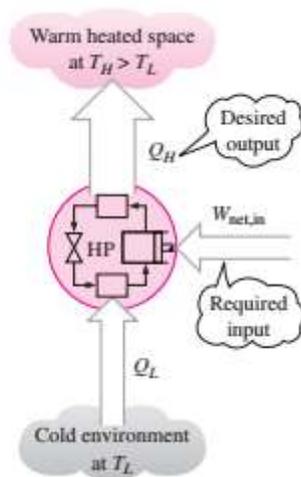
$$COP_R = \frac{\text{Output yang diinginkan}}{\text{input yang diperlukan}} = \frac{Q_L}{W_{net,in}} \quad (4-19)$$

$$COP_R = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1} \quad (4-20)$$

Perlu dicatat bahwa harga dari COP_R dapat berharga lebih dari satu, karena jumlah panas yang diserap dari ruang refrigerasi dapat lebih besar dari jumlah input kerja. Hal tersebut kontras dengan efisiensi termal yang selalu kurang dari satu. Salah satu alasan penggunaan of performance lebih disukai untuk menghindari kerancuan dengan istilah efisiensi, karena COP dari mesin pendingin lebih besar dari satu.

Pompa Kalor (Heat Pumps)

Pompa kalor adalah suatu alat yang mentransfer panas dari media bertemperatur rendah ke media bertemperatur tinggi. Tujuan dari mesin pendingin adalah untuk menjaga ruang refrigerasi tetap dingin dengan menyerap panas dari ruang tersebut. Tujuan pompa kalor adalah menjaga ruangan tetap bertemperatur tinggi. Proses pemberian panas ruangan tersebut disertai dengan menyerap panas dari sumber bertemperatur rendah.



Gambar 5.5. Bagan kerja Pompa Kalor

. Efisiensi pompa kalor disebut dengan istilah coefficient of performance (COP), dinotasikan dengan COP_{HP} .

$$COP_{HP} = \frac{\text{Output yang diinginkan}}{\text{input yang diperlukan}} = \frac{Q_H}{W_{net,in}} \quad (4-21)$$

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H} \quad (4-22)$$

Perbandingan antara performa dari mesin pendingin (*refrigerant*) dan mesin pompa kalor (*heat pump*) adalah

$$COP_{HP} = COP_R + 1 \quad (4-23)$$

Air conditioner pada dasarnya adalah sebuah mesin pendingin tetapi yang didinginkan disini bukan ruang refrigerasi melainkan sebuah ruangan/gedung atau yang lain.

Hukum Termodinamika Kedua :

Pernyataan Clausius

Terdapat dua pernyataan dari hukum termodinamika kedua—pernyataan Kelvin -Planck, yang diperuntukkan untuk mesin kalor, dan pernyataan Clausius, yang diperuntukkan untuk mesin pendingin/pompa kalor. Pernyataan Clausius dapat di ungkapkan sebagai berikut:

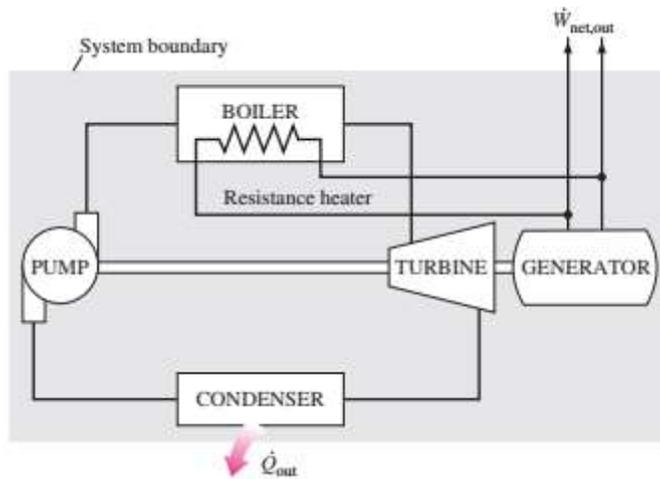
“Adalah tidak mungkin membuat sebuah alat yang beroperasi dalam sebuah siklus tanpa adanya efek dari luar untuk mentransfer panas dari media bertemperatur rendah ke media bertemperatur tinggi”.

Telah diketahui bahwa panas akan berpindah dari media bertemperatur tinggi ke media bertemperatur rendah. Pernyataan Clausius tidak mengimplikasikan bahwa membuat sebuah alat siklus yang dapat memindahkan panas dari media bertemperatur rendah ke media bertemperatur tinggi adalah tidak mungkin dibuat. Hal tersebut mungkin terjadi asalkan ada efek luar yang dalam kasus tersebut dilakukan/diwakili oleh kompresor yang mendapat energi dari energi listrik misalnya.

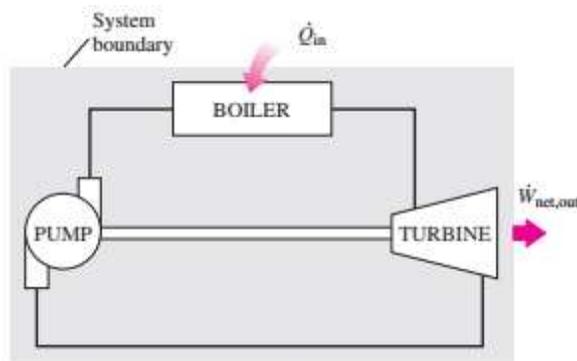
5.5. Mesin-Gerak-Abadi (*Perpetual-Motion Machines*)

Kita mempunyai pernyataan yang berulang-ulang, bahwa sebuah proses tidak akan dapat berlangsung jika tidak memenuhi hukum termodinamika pertama dan kedua. Semua alat yang melanggar baik hukum termodinamika pertama maupun kedua disebut dengan mesin gerak abadi (*Perpetual-Motion Machines*).

Sebuah alat yang melanggar hukum termodinamika pertama disebut dengan mesin gerak abadi tipe pertama (*Perpetual-Motion Machines of the first kind PMM1*) dan sebuah alat yang melanggar hukum termodinamika kedua disebut dengan mesin gerak abadi tipe kedua (*Perpetual-Motion Machines of the second kind PMM2*)



Gambar 5. 6. Mesin Gerak Abadi tipe PMM1



Gambar 5. 7. Mesin Gerak Abadi tipe PMM2

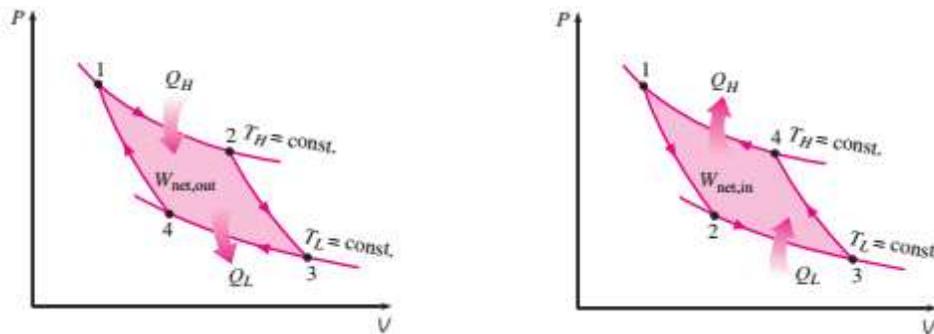
5.6. Proses Reversibel Dan Irreversibel

Hukum termodinamika II menyatakan bahwa tidak ada mesin kalor yang mempunyai efisiensi sebesar 100%. Pertanyaannya adalah berapa besar efisiensi yang dapat dimiliki oleh mesin kalor?. Sebelum itu, kita definisikan sebuah ideal proses yang disebut **proses reversibel**, yaitu proses yang dibalik tanpa ada kehilangan/kerugian pada setiap langkah proses, artinya baik itu sistem maupun lingkungan sekitar kembali kepada posisi awal pada akhir proses. Hal ini dapat terjadi apabila panas dan kerja bersih yang terjadi antara sistem dan lingkungan adalah nol. Reversibel proses tidak terjadi secara natural, bahkan hampir hanya sebatas kondisi ideal dari proses. Reversible proses hanya bisa didekati namun tidak bisa

100% diraih. Sedangkan **proses irreversibel** adalah kebalikan dari proses reversible.

5.7. Siklus Carnot

Siklus Carnot adalah sebuah siklus reversibel, yang pertama kali dikemukakan oleh Sadi Carnot pada tahun 1824, seorang insinyur Perancis. Mesin teoritis yang menggunakan siklus Carnot disebut dengan Mesin Kalor Carnot. Siklus Carnot yang dibalik dinamakan dengan siklus Carnot terbalik dan mesin yang menggunakan siklus Carnot terbalik disebut dengan Mesin refrigerasi Carnot



a) Digram P-v siklus Carnot

b) Digram P-v siklus Carnot terbalik

Gambar 5.8. Siklus Carnot

Urutan proses pada siklus Carnot adalah sebagai berikut :

1. Ekspansi isothermal reversible (proses 1-2, $T_H = \text{konstan}$)
2. Ekspansi adiabatik reversible (proses 2-3, T_H ke T_L)
3. Kompresi isothermal reversible (proses 3-4, $T_L = \text{konstan}$)
4. Kompresi adiabatik reversible (proses 4-1, T_L ke T_H)

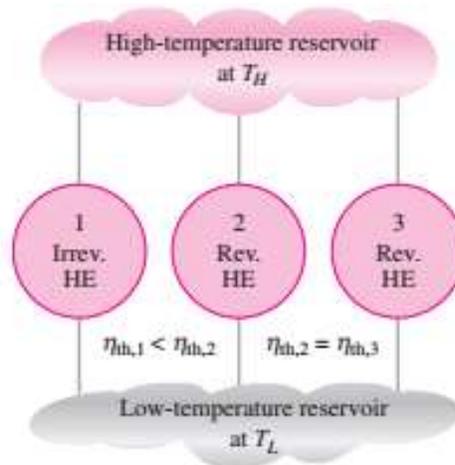
5.8. Prinsip Carnot

Hukum termodinamika kedua meletakkan pembatasan pada operasi peralatan siklus seperti yang diekspresikan oleh Kelvin-Planck dan Clausius. Sebuah mesin kalor tidak dapat beroperasi dengan menukarkan panas

hanya dengan reservoir tunggal, dan refrigerator tidak dapat beroperasi tanpa adanya input kerja dari sebuah sumber luar.

Dari pernyataan diatas kita dapat mengambil kesimpulan yang berhubungan dengan efisiensi termal dari proses reversibel dan irreversibel (Gambar 5.9):

1. Efisiensi sebuah mesin kalor irreversibel selalu lebih kecil dari mesin kalor reversibel yang beroperasi antara dua reservoir yang sama.
2. Efisiensi semua mesin kalor reversibel yang beroperasi antara dua reservoir yang sama adalah sama.



Gambar 5.9. Prinsip kerja carnot

5.9. Mesin Kalor Carnot

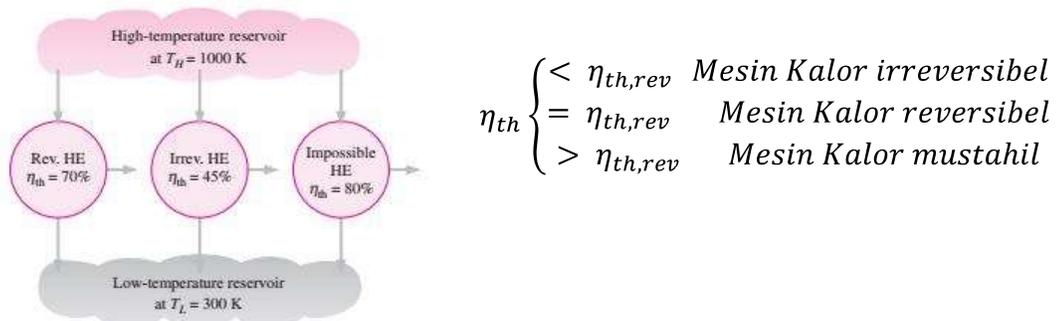
Mesin kalor yang bekerja sesuai dengan siklus carnot reversible disebut dengan mesin kalor carnot. Efisiensi termal dari semua mesin kalor reversibel atau irreversibel dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

dimana Q_H adalah panas yang ditransfer ke mesin kalor pada temperatur T_H , dan Q_L adalah panas yang diteransfer ke mesin kalor pada temperatur T_L .

Hubungan di atas adalah hubungan yang mengacu pada efisiensi Carnot, karena mesin kalor Carnot adalah mesin reversibel yang baik. Perlu dicatat bahwa T_L dan T_H adalah temperatur absolut. Penggunaan $^{\circ}\text{C}$ atau $^{\circ}\text{F}$ akan sering menimbulkan kesalahan.

Efisiensi termal dari suatu mesin kalor aktual dan reversibel yang beroperasi pada batas temperatur yang sama adalah sebagai berikut Gambar 5.10.



Gambar 5.10. Tidak ada efisiensi mesin kalor yang bisa melebihi mesin kalor reversibel

Hampir semua mesin kalor mempunyai efisiensi termal dibawah 40 persen, yang sebenarnya relatif rendah jika dibandingkan dengan 100 persen. Tetapi bagaimanapun, ketika performance dari mesin kalor diperoleh tidak harus dibandingkan dengan 100 persen, tetapi harus dibandingkan dengan efisiensi sebuah mesin kalor reversibel yang beroperasi diantara batas temperatur yang sama.

Efisiensi maksimum sebuah pembangkit tenaga listrik yang beroperasi antara temperatur $T_H = 750\text{ K}$ dan $T_L = 300\text{ K}$ adalah 70 persen jika menggunakan rumus efisiensi mesin reversibel, tetapi aktualnya hanya sekitar 40 persen. Hal ini sebenarnya tidak begitu buruk dan hal tersebut masih membutuhkan improvisasi untuk mendekati efisiensi mesin reversibel.

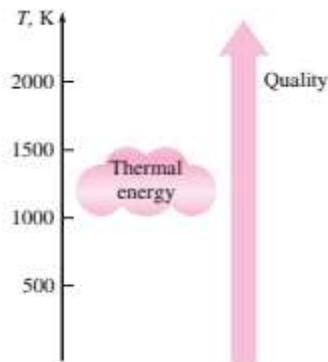
Efisiensi termal dari mesin kalor bisa dioptimumkan dengan cara memberikan panas/energi kepada mesin kalor pada temperatur yang paling tinggi (tergantung kekuatan material) dan melepaskan panas pada temperatur paling rendah (tergantung sistem pendingin).

Kualitas Energi

Sebuah mesin kalor Carnot jika menerima panas dari sebuah sumber pada temperatur 925 K dan mengubahnya 67,2 persen menjadi kerja, kemudian membuang sisanya (32,8 persent) ke sink pada 303 K. Sekarang jika dievaluasi bagaimana efisiensi termal jika sumber temperatur bervariasi dengan temperatur sink dijaga konstan.

Jika suplai panas dari temperatur sumber 500 K (bandingkan dengan 925 K), maka efisiensi termal turun drastis menjadi dari 67,2 ke 39,4 persen. Dan jika temperatur sumber sebesar 350 K, maka fraksi panas yang dikonversi hanya 13,4 persen.

Harga efisiensi menunjukkan bahwa energi mempunyai kualitas dan kuantitas. Semakin tinggi temperatur, semakin tinggi kualitas energi.



Gambar 5.11. Kualitas Energi

Contoh misalnya, jumlah yang besar dari energi matahari, jika disimpan dalam sebuah benda (body) yang disebut solar pond akan mempunyai temperatur kurang lebih 350 K. Jika hal ini disuplai ke sebuah mesin kalor untuk dijadikan dalam bentuk kerja (listrik), maka efisiensinya hanya kurang lebih 5 persen. Karena rendahnya kualitas energi yang didapat disimpan pada sebuah sumber dan biaya konstruksi dan perawatan menjadi relatif mahal. Hal ini menjadi tidak kompetitif meskipun tersedia dalam jumlah yang banyak.

5.10. Mesin Pendingin Dan Pompa Kalor Carnot

Mesin pendingin dan pompa kalor yang beroperasi menggunakan siklus terbalik dinamakan mesin pendingin Carnot. *Coefficient of performance* (COP) mesin pendingin atau pompa kalor reversibel atau irreversibel adalah:

$$COP_R = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1}$$

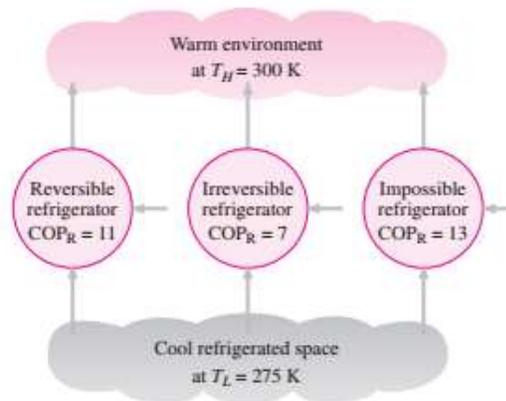
$$COP_{HP} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H}$$

Jika mesinnya adalah mesin reversibel, maka:

$$COP_{R,rev} = \frac{1}{T_H/T_L - 1}$$

$$COP_{HP,rev} = \frac{1}{1 - T_L/T_H}$$

Perbandingan *COP* mesin pendingin reversibel dan irreversibel adalah sebagai berikut (Gambar 5.12):



Gambar 5.12. Perbandingan Irreversibel dan reversibel mesin pendingin.

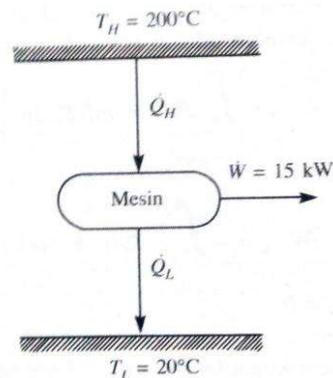
$$COP_{R,Rev} \begin{cases} < COP_{R,Rev} & \text{Mesin Pendingin irreversibel} \\ = COP_{R,Rev} & \text{Mesin Pendingin reversibel} \\ > COP_{R,Rev} & \text{Mesin Pendingin mustahil} \end{cases}$$

COP mesin pendingin dan pompa kalor menurun ketika T_L menurun. Berarti hal ini memerlukan kerja untuk menyerap panas dari media bertemperatur rendah. Ketika temperatur ruang refrigerasi mendekati nol,

jumlah kerja yang diperlukan untuk memproduksi jumlah pendinginan tertentu akan mendekati tak terbatas dan COP -nya akan mendekati nol.

5.11. Contoh Soal

Sebuah mesin carnot dioperasikan diantara dua penampung temperature yang masing-masing dijaga 200°C dan 20°C . Jika keluaran mesin yang diinginkan adalah 15 kW , seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini, tentukan besarnya perpindahan kalor dari temperatur tinggi ke rendah!



Jawab:

Efisiensi dari mesin carnot adlaah

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Jika temperatur dikonversikan kedalam temperature absolut maka,

$$Q_H = \frac{W}{1 - \frac{T_L}{T_H}} = \frac{15}{1 - \frac{293}{473}} = 39,42\text{ kW}$$

Denga menggunakan hukum pertama kita dapat:

$$Q_L = Q_H - W = 39,42 - 15 = 24,42\text{ kW}$$