

INSTITUT KEJURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN PADANG
KOLEKSI BIDANG ILMU
TIDAK DIPINJAMKAN
KHUSUS DIPAKAI DALAM PENELITIAN

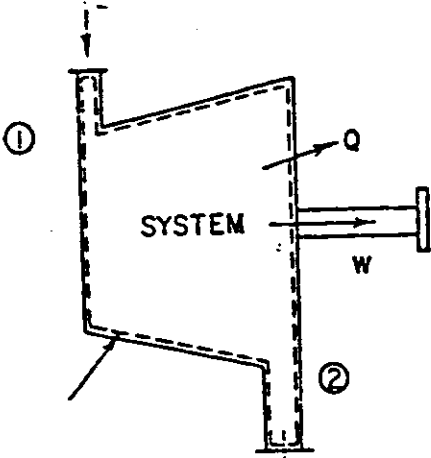
Seri Mekanika Teknik

TERMODINAMIKA

Bagian 1

236/HD/90

Drs. Ambiyar. M.Pd.



MILIK UPT PERPUSTAKAAN
IKIP PADANG



INSTITUT KEJURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN PADANG
FAKULTAS PENDIDIKAN TEKNOLOGI DAN KEJURUAN

KATA PENGANTAR

Berkat rahmat Tuhan Yang Maha Esa dapatlah diselesaikan buku mekanika teknik seri termodinamika sesuai dengan rencana. Buku ini disusun untuk memenuhi kebutuhan bahan bacaan tentang mekanika teknik yang dirasa masih kurang dalam bahasa Indonesia. Materi yang disajikan diusahakan memakai bahasa yang mudah dipahami serta menghindarkan pemakaian matematik yang kompleks dan rumit.

Dalam buku ini dilengkapi dengan contoh-contoh soal dan penyelesaiannya dan ditambah dengan soal-soal latihan beserta kunci jawabannya. Dengan demikian diharapkan supaya lebih mudah memahami dan mengetahui pemakaian rumus yang ada.

Pada kesempatan yang baik ini, penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada semua pihak yang turut membantu dalam penyelesaian buku ini.

Terakhir sekali, bagaimanapun juga buku ini jauh dari sempurna dan segala kritik membangun dan koreksi dari teman sejawat, para ahli, dan para pembaca sangat ditunggu dengan hormat dan segala senang hati, guna untuk perbaikan dimasa yang akan datang.

Penulis.

Jan '90

HD

K1

236/HD/90-t₁(2)

530 Amb t₁

DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	v
BAB I. PENDAHULUAN	1
A. PANDANGAN UMUM TENTANG TERMODINAMIKA	1
B. SISTEM, LINGKUNGAN, DAN BATAS	2
C. PANAS	6
D. KERJA	7
E. SATUAN DAN DIMENSI	8
F. SIFAT-SIFAT FLUIDA	11
G. PROSES REVERSIBEL DAN IRREVERSIBEL	13
H. SOAL-SOAL LATIHAN	16
BAB II. HUKUM PERTAMA TERMODINAMIKA	18
A. KONVERSI ENERGI	18
B. KERJA LUAR (EXTERNAL WORK)	20
C. ENERGI DALAM (INTERNAL ENERGY)	26
D. SOAL-SOAL LATIHAN	30
BAB III. PROSES ALIRAN MANTAP	33
A. PERSAMAAN ENERGI ALIRAN MANTAP	34
B. APLIKASI PERSAMAAN ENERGI ALIRAN MANTAP.	38
1. Ketel Uap	38
2. Kondensor	41
3. Turbin Gas	43
4. Kompresor	45
5. Pipa Pancar	47
6. Katup (Throttling)	49
C. PERSAMAAN KONTINUITAS	50
D. SOAL-SOAL LATIHAN	55
BAB IV. PROSES NON ALIRAN	59
A. PERSAMAAN ENERGI NON ALIRAN	61

B. APLIKASI PERSAMAAN ENERGI NON ALIRAN . .	61
1. Proses Volume Konstan	61
2. Proses Tekanan Konstan	63
3. Proses Adiabatis	66
4. Proses Polytropis	67
C. SOAL-SOAL LATIHAN	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Sistem Terbuka	3
2. Sistem Terbuka Dengan Batas Sistem Yang Bergerak.	3
3. Air Panas Dalam Teko	4
4. Gas Di Dalam Ruang Bakar	5
5. Dua Buah Benda Memiliki Suhu Berbeda	7
6. Diagram Keadaan Sistem Dengan Koordinat P dan Q .	12
7. Suatu Proses Irreversibel	13
8. Proses Reversibel	14
9. Suatu Proses Konversi Tenaga	19
10 Kerja Yang Dilakukan Gas Dalam Silinder	21
11 Suatu Instalasi Tenaga Panas	22
12 Suatu Proses dari Suatu Siklus	23
13 Diagram p - V	25
14 Suatu Perubahan Keadaan Pada Sistem	27
15 Proses Aliran Mantap	34
16 Ketel Uap	39
17 Kondensor	41
18 Turbin Gas	44
19 Kompresor	46
20 Pipa Pancar	47
21 Katup (Throttling)	49
22 Gas Mengalir Dalam Pipa	51
23 Skema Aliran Gas Pada Turbin Gas	52
24 Skema Aliran Gas Melalui Kompresor	54
25 Proses Kerja Motor 4 Tak	59
26 Diagram Proses Volume Konstan	61
27 Diagram Proses Tekanan Konstan	63
28 Diagram Proses Polytropis	68

BAB I

PENDAHULUAN

A. PANDANGAN UMUM TENTANG TERMODINAMIKA

Semua makhluk hidup membutuhkan energi untuk hidupnya, dan kehidupan moderen dapat berlangsung terus bilamana manusia mampu mengembangkan sumber energi sesuai dengan kebutuhan. Energi terdiri dari bermacam-macam, misalnya yang dimiliki oleh atom sesuatu unsur sampai dengan yang dipancarkan oleh matahari. Dalam batasan tersebut termasuk energi kimia yang dikandung oleh suatu bahan bakar dan energi potensial yang dimiliki air.

Beberapa proses perubahan energi yang satu menjadi bentuk energi lainnya seperti :

1. Massa air yang besar dialirkan melalui suatu turbin dan memutarinya guna menggerakkan generator untuk menghasilkan daya listrik.
2. Batu bara dibakar untuk menguapkan air dan kemudian uap digunakan untuk menggerakkan turbin.
3. Minyak dibakar dalam silinder motor bakar menghasilkan tenaga gerak pada porosnya.
4. Atom Uranium ditembakkan dan diuraikan menghasilkan panas yang tinggi, dipakai untuk menghasilkan energi listrik.

Proses perubahan energi tersebut telah berkembang sangat pesatnya sejak instalasi tenaga uap ditemukan oleh James Watt sampai pada bentuk yang sangat kompleks dewasa ini.

Termodinamika terapan adalah ilmu yang mempelajari hubungan antara panas, kerja dan sifat-sifat suatu sistem. Ilmu ini erat hubungannya dengan konversi energi

panas dari suatu sumber menjadi kerja mekanik.

Pesawat panas (heat engines) adalah suatu nama yang diberikan pada suatu sistem dengan melalui proses siklus tertentu akan menghasilkan kerja dari pemberian panas. Hukum-hukum termodinamika berisikan hipotesa yang didasarkan pada observasi terhadap dunia dimana manusia hidup. Observasi mana menunjukkan bahwa panas dan kerja dua hal yang merupakan bentuk energi yang dapat berubah bentuk. Ini merupakan dasar hukum pertama termodinamika.

Kemudian dinyatakan bahwa panas jarang mengalir dari bertemperatur rendah ke temperatur tinggi. Pernyataan ini menjadi dasar bagi hukum kedua termodinamika, yang menunjukkan bahwa suatu pesawat panas tak dapat mengubah seluruh energi panas menjadi kerja mekanik, akan tetapi selalu ada kerugian atau perpindahan ke benda bertemperatur rendah.

B. SISTEM, LINGKUNGAN, DAN BATAS

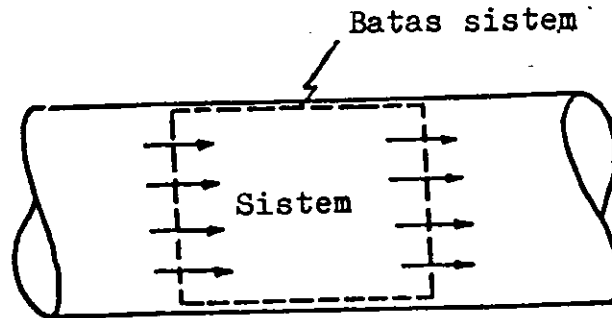
Dalam mempelajari termodinamika perlu kiranya, kita mendefinisikan beberapa istilah atau konsepsi sebagai berikut :

1. Sistem

Suatu sistem dapat didefinisikan sebagai suatu kumpulan benda yang berada dalam batas-batas tertentu. Batas tertentu dapat merupakan permukaan yang tetap dan permukaan yang khayal (gambar 1) serta permukaan yang bergerak (gambar 2). Sistem dapat dibagi menjadi sistem tertutup dan sistem terbuka (T.H.Thomas, 1979 : 1).

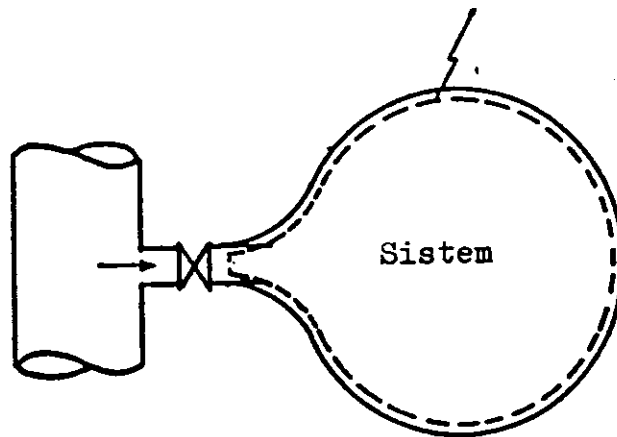
Pada sistem terbuka perpindahan massa dan perpindahan energi dari dan ke dalam sistem melalui batas sistem dapat berlangsung. Tidak demikian halnya dengan sistem tertutup. Pada sistem tertutup, massa tidak dapat keluar atau masuk ke dalam sistem, jumlah massa didalam sistem tidak berubah. Energi dapat masuk atau keluar

dari sistem (Sulaiman Kamil, 1983 : 2)



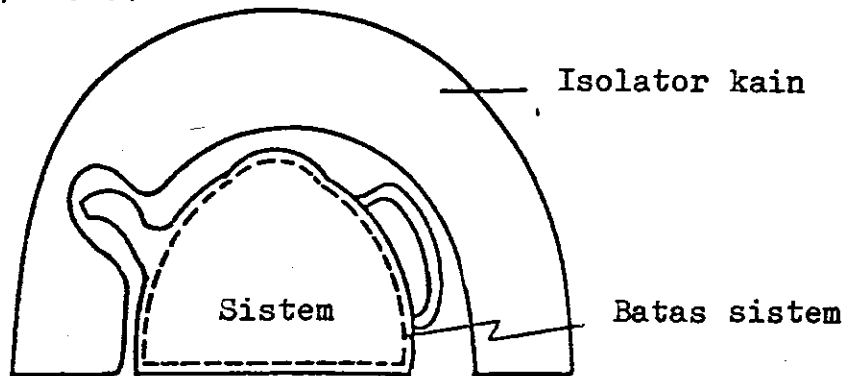
Gambar 1
Sistem Terbuka

Batas sistem bergerak
sesuai dengan gerakan
dinding balon.



Gambar 2
Sistem Terbuka dengan Batas Sistem
yang Bergerak

Selain kedua macam sistem di atas, ada lagi sistem macam ketiga, yaitu sistem diisolasi. Pada sistem diisolasi, jumlah massa dan energi di dalam sistem tidak berubah, selama selang waktu sistem digunakan. Baik massa maupun energi tidak dapat menembus batas sistem. (S.Kamil,1983:3).



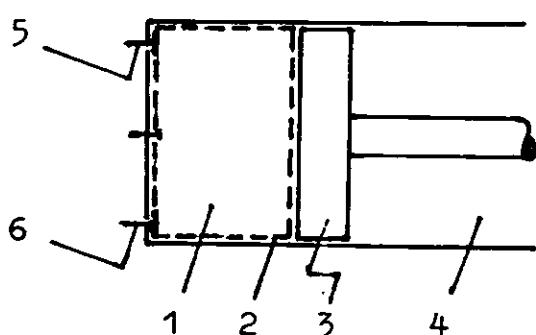
Gambar 3

Air panas dalam teko

Perhatikanlah sebuah teko berisi air seperti ditunjukkan pada gambar 3. Bila teko tersebut dipanaskan beberapa lama, maka akan terlihat adanya uap air yang keluar dari mulutnya. Teko yang dipanaskan ini merupakan sistem yang terbuka, karena massa atau uap air dapat keluar dari batas sistem. Sekarang teko tersebut diletakkan di atas meja dan ditutup oleh kain dan meja. Sistem yang baru ini merupakan sistem tertutup, karena tidak ada massa keluar dari batas sistem. Bila meja dianggap isolator sempurna, maka sistem baru ini adalah sistem yang diisolasi, karena tidak hanya massa yang tidak dapat keluar melalui batas sistem, melainkan juga energi panas.

Gambar 4 memperlihatkan gas yang berada di dalam ruang bakar, lengkap dengan katup isap dan katup buang serta piston. Apakah sistem seperti terlihat dalam gam-

bar merupakan sistem terbuka atau sistem tertutup?. Ini tergantung dari selang waktu penentuan dari sistem tersebut. Untuk selang waktu tertentu dari putaran poros engkol, dimana semua katup dalam keadaan tertutup, maka



Keterangan :

- 1 = Sistem (Gas)
- 2 = Batas sistem
- 3 = Piston
- 4 = Lingkungan
- 5 = Katup buang
- 6 = Katup masuk

Gambar 4

Gas di dalam ruang bakar

sistem ini merupakan sistem tertutup. Sistem tersebut tidak dapat dinamakan sistem diisolasi, karena energi dapat keluar atau masuk melalui batas sistem. Untuk selang waktu dimana katup isap dan katup buang dalam keadaan terbuka, dimana bahan bakar dan udara mengalir masuk melalui katup isap atau keluar melalui katup buang, maka sistem tersebut merupakan sistem terbuka.

2. Ciri Sistem

Suatu sistem mempunyai beberapa ciri. Ciri sistem dapat dibagi menjadi ciri ekstensif dan intensif. Ciri ekstensif adalah karakteristik keseluruhan dari suatu sistem yang menyatakan jumlah sesuatu di dalam tersebut (Sulaiman Kamil, 1983 : 5). Misalnya volume, massa, entropi, energi, dan sebagainya. Perlu diingat bahwa untuk waktu tertentu, hanya ada satu harga dari volume, massa, entropi, dan energi. Pada waktu yang lain, harga-harga ini akan berlainan. Dengan kata lain ciri ekstensif hanya tergantung dari waktu (S. Kamil, 1983 : 5).

Selanjutnya ciri intensif adalah ciri yang mempunyai harga tertentu untuk tiap titik dari suatu sistem pada waktu tertentu, misalnya temperatur, tekanan, dan sebagainya. Jadi ciri intensif tergantung dari posisinya dalam sistem tersebut pada waktu tertentu (S.Kamil, 1983 :5). Perhatikan sebatang besi yang dipanaskan salah satu ujungnya. Pada waktu tertentu, suhu dari tiap titik pada batang tadi akan mempunyai harga tertentu.

3. Lingkungan

Daerah yang menutup sistem dinamakan lingkungan (surrounding). Lingkungan dapat dipengaruhi oleh perubahan dalam sistem.

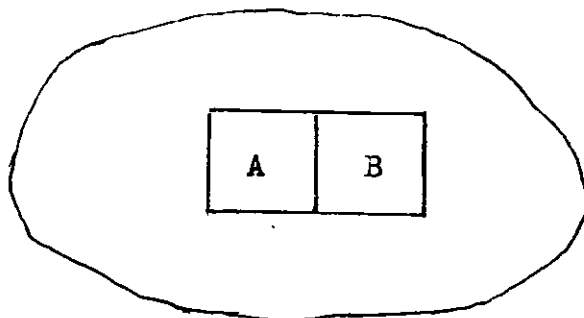
4. Batas Sistem

Permukaan yang terpisah antara sistem dan lingkungan dinamakan batas sistem. Untuk permukaan yang tetap dan permukaan yang khayal, batas sistem seperti ditunjukkan pada gambar 1. Sedangkan untuk permukaan yang bergerak, batas sistem terlihat pada gambar 2. Pada sistem tertutup, fluida tetap dalam batas sistem. Dan sistem terbuka, energi panas, energi kerja, dan fluida dapat menembus batas sistem.

C. PANAS

Panas adalah suatu bentuk energi yang dipindahkan dari suatu benda ke benda lainnya yang bertemperatur rendah dengan perubahan perbedaan temperatur. Misalnya sebuah sketsa pada gambar 5. Ketika benda A memiliki temperatur yang lebih rendah dikontakkan dengan benda B yang memiliki temperatur tinggi, maka akan timbul pengaliran panas dari benda B ke benda A sampai keduanya mencapai temperatur yang sama. Dan saat temperatur benda A sama dengan benda B, maka tidak akan terjadi lagi perpindahan panas dan dikatakan keduanya dalam

kondisi "thermal equilibrium" (kesetimbangan panas).



Gambar 5

Dua Buah Benda Memiliki Suhu Berbeda

Panas hanya terlihat selama proses itu saja dan merupakan energi yang tidak kekal, karena energi panas mengalir dari benda B ke benda A. Pada hakekatnya akan terjadi penurunan energi di B dan kenaikan di A. Energi yang demikian merupakan fungsi dari temperatur dan tidak boleh salah pengertian dengan panas. Perlu dicatat bahwa panas tidak dapat diisikan ke dalam suatu benda.

Perjanjian tanda yang digunakan untuk panas adalah positif bila energi panas mengalir ke dalam sistem dari lingkungan. Sebaliknya, energi panas yang mengalir dari sistem ke lingkungan dinyatakan dengan tanda negatif (T.H.Thomas, 1979 : 7)

D. KERJA

Kerja dapat didefinisikan sebagai hasil suatu gaya dan jarak perpindahan dalam arah gaya tersebut (T.H. Thomas, 1979 : 4). Apabila suatu batas untuk sistem tertutup bergerak dalam arah gaya yang bekerja padanya, maka sistem ini melakukan kerja pada lingkungan. Jika batas sistem bergerak kedalam (menyempit), maka kerja yang dilakukan oleh lingkungan.

Dengan kata lain, pengembangan merupakan hasil kerja sistem, sedangkan pemampatan merupakan kerja yang diberikan kepada sistem.

Perjanjian tanda yang digunakan untuk kerja adalah positif, apabila kerja dipindahkan dari sistem ke lingkungan. Sebaliknya, jika kerja yang dipindahkan dari lingkungan ke dalam sistem maka dinyatakan sebagai negatif (T.H.Thomas, 1979 : 6). Dengan demikian, kerja selama proses ekspansi adalah positif dan kerja selama proses pemampatan adalah negatif.

E. SATUAN DAN DIMENSI

Satuan yang digunakan dalam termodinamika adalah satuan SI (Sistem Internasional) yang merupakan sistem koheren. Sistem ini didasarkan pada enam satuan dasar, yakni :

1. meter standar satuan panjang
2. kilogram standar satuan massa
3. detik standar satuan waktu
4. Ampere standar satuan arus listrik
5. Kadela standar satuan intensitas cahaya
6. Kelvin standar satuan temperatur.

Sistem ini juga menggunakan satuan radian (rad) untuk mengukur sudut, baik sudut dibidang datar maupun di dalam ruang. Di samping itu, beberapa satuan utama lain yang digunakan dalam sistem SI adalah : kecepatan dalam satuan m/detik, percepatan dalam satuan m/det.^2 , volume dalam satuan m^3 , volume jenis dalam satuan m^3/kg dan sebagainya.

Di bawah ini akan diuraikan mengenai satuan gaya, energi, daya, tekanan, dan temperatur.

1. Satuan Gaya, Energi, dan Daya

Hukum Newton II dapat ditulis sebagai gaya berbanding lurus dengan massa benda dan percepatannya. Un-

tuk benda dengan massa konstan dapat ditulis dalam bentuk persamaan :

$$F = k \times m \times a$$

dimana :

F = Gaya

k = konstanta

m = massa benda

a = percepatan benda

Dalam satuan sistem koheren SI diambil $k = 1$, sehingga persamaan di atas dapat ditulis menjadi :

$$F = m \times a$$

Bila satuan massa adalah kilogram dan satuan percepatan adalah m/det.^2 , maka satuan gaya menjadi kg m/det.^2 atau Newton.

Untuk satuan energi diturunkan dari hasil perkalian gaya dengan jarak perpindahan (definisi kerja). Bila gaya mempunyai satuan Newton dan jarak perpindahan dalam satuan meter, maka kerja mempunyai satuan $\text{kg m}^2 / \text{det}^2$ atau Nm. Sedangkan $1 \text{ Nm} = 1 \text{ Joule}$. Dengan demikian energi mempunyai satuan Joule. Begitu pula dengan kerja dan energi panas, satuannya Joule. Sebab kerja dan panas merupakan dua bentuk energi.

Selanjutnya satuan daya diturunkan dari satuan kerja dan waktu. Sebab daya adalah usaha per waktu. Bila kerja (usaha) mempunyai satuan Joule dan waktu dalam satuan detik, maka satuan daya adalah Joule/detik. Disingkat saja dengan J/det. Dimana $1 \text{ J/det} = 1 \text{ Nm/det} = 1 \text{ Watt}$. Dengan demikian, satuan untuk daya adalah Watt. Biasanya daya suatu motor, generator, dan sebagainya dinyatakan dalam faktor kelipatan yang lebih besar, misalnya kilo Watt atau Mega Watt. Untuk itulah dalam sistem SI ada faktor kelipatan dan sub kelipatan dengan menggunakan awalan sebagai berikut :

faktor kelipatan	awalan	simbul
satu milyar ; 10^9	Giga	G
satu juta ; 10^6	Mega	M
seribu ; 10^3	Kilo	k
sepersepuluh; 10^{-1}	Deci	d
seperseratus; 10^{-2}	Centi	c
seperseribu ; 10^{-3}	milli	m
sepersejuta ; 10^{-6}	micro	μ

Untuk mendapatkan tabel yang lengkap dapatlah di lihat pada buku sistem SI. Akan tetapi pada kebanyakan tabel di atas rasanya sudah cukup. Di samping itu , faktor kelipatan dan sub kelipatan di atas tidak hanya berlaku untuk satuan daya, akan tetapi berlaku untuk se mua satuan lainnya, seperti gaya, energi, dan sebagai - nya.

2. Satuan Tekanan

Satuan tekanan adalah N/m^2 dan biasanya dikenal dengan Pascal (Pa). Untuk kebanyakan kasus yang terjadi pada termodinamika, maka tekanan ditunjukkan dalam Pa, akan sangat kecil. Satuan yang biasa dipakai adalah bar
 $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 10^5 \text{ Pa}.$

Keuntungan satuan ini adalah karena 1 bar tersebut mendekati tekanan atmosfir (atm). Walaupun tekanan atmos - fir standar adalah 1,01325 bar. Sering pula tekanan di tunjukkan sebagai head (tekanan) zat cair, karenanya te kanan atm standar = 1,0132 bar = 76 mm^{hg} Hg.

3. Satuan Temperatur

Dalam termodinamika yang berhubungan dengan me - sin-mesin motor yang bekerja, hal ini diperlukan untuk menghitung temperatur dari suatu titik dimana gas di perkirakan tidak mempunyai energi. Pada titik ini tidak ada pergerakan relatif antara molekul-molekul dan gas tidak terjadi perubahan volume. Temperatur yang terjadi

dinamakan temperatur absolut (mutlak) dan diperkirakan besarnya 273°C dan 460°F .

Temperatur mutlak pada skala Celsius dihubungkan dengan $^{\circ}\text{K}$ (derajat Kelvin) dan skala Fahrenheit dihubungkan dengan derajat Rankine ($^{\circ}\text{R}$). Temperatur normal (nisbi) ditulis dengan t dan temperatur mutlak dengan T . Dengan demikian hubungan antara skala Celsius dengan skala Kelvin dan skala Fahrenheit dengan skala Rankine dapat ditulis dalam bentuk persamaan :

$$T = 273 + t^{\circ}\text{C}$$

$$T = 460 + t^{\circ}\text{F}$$

Berhubung satuan yang dipakai adalah sistem SI, maka satuan temperatur nisbi dalam derajat Celsius dan satuan temperatur mutlak dalam derajat Kelvin. Sedangkan satuan temperatur dalam derajat Fahrenheit dan Rankine digunakan dalam satuan British atau satuan sistem FPS (Foot - Pound - Second System).

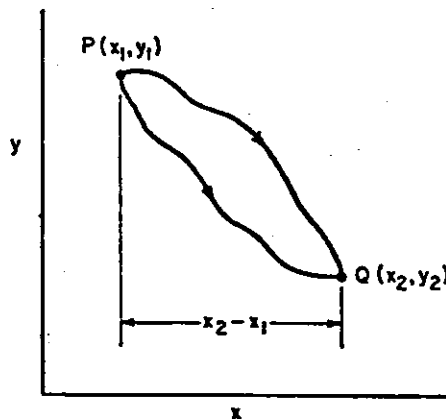
F. SIFAT-SIFAT FLUIDA

Sifat dari suatu sistem merupakan karakteristik yang ditentukan dari kondisinya. Pada umumnya dalam termodinamika meliputi tekanan, volume dan temperatur. Meskipun banyak sifat yang lain, yang akan dibahas dalam bagian berikutnya. Beberapa sifat itu adalah internal energi (energi dalam), enthalpi, dan entropi. Jika dua sifat bebas dari suatu fluida dalam sistem tertutup diketahui, maka keadaan (state) sistem juga diketahui, dan kondisi sistem secara lengkap dapat diuraikan.

Ini sama dengan cara untuk menggambarkan sebuah titik P pada sebuah gambar (diagram) yang mempunyai dua sumbu koordinat, yakni X dan Y. Jika koordinat P diketahui, katakanlah X_1 dan Y_1 , maka posisi P pada diagram secara lengkap dapat diuraikan. Karenanya jika X_1

dan Y_1 (yakni titik P) menentukan keadaan suatu sistem pada suatu saat (instant), sedangkan X_2 dan Y_2 (yakni titik Q) merupakan kondisi pada saat berikutnya. , maka titik dapat digambarkan pada sebuah diagram seperti ditunjukkan pada gambar 6. Tidak peduli lintasan mana dilalui oleh sistem titik P ke titik Q, lintasan itu dapat dilihat sebesar $X_2 - X_1$.

Penting untuk diingat bahwa suatu sifat mempunyai karakteristik dasar, yakni perubahan nilainya bebas dari lintasan yang dilalui dari keadaan awal sampai akhir. Jika suatu diskripsi dari sejumlah sifat tidak ditemukan, maka jumlah ini tidak merupakan suatu sifat. Dapat dilihat bahwa kerja yang dipindahkan dan panas yang dipindahkan adalah tidak merupakan sifat-sifat, sebab kerja yang dipindahkan ini tidak ditulis sebagai W_2 dikurangi W_1 ($W_2 - W_1$) atau panas yang dipindahkan sebagai $Q_2 - Q_1$, dalam suatu proses. Malahan ditulis W_{12} atau cara sederhana W dan Q_{12} atau Q .



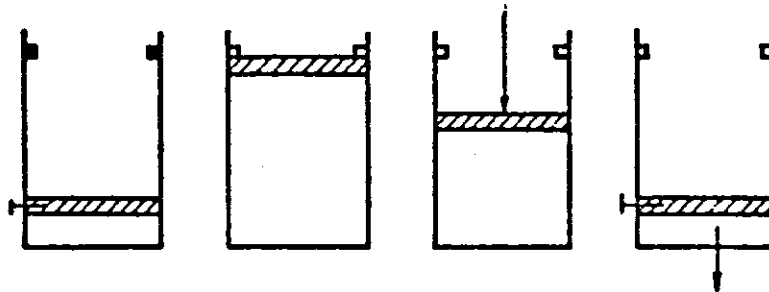
Gambar 6

Diagram Keadaan Sistem Dengan
Koordinat P dan Q.

G. PROSES REVERSIBEL DAN IRREVERSIBEL

Suatu proses dikatakan reversibel atau dapat dibalik, apabila sistem dapat dikembalikan ke keadaan semula tanpa menimbulkan perubahan keadaan pada sistem tersebut maupun pada lingkungan. Sebaliknya, bila keadaan mula-mula dari sistem tidak dapat dikembalikan tanpa menimbulkan perubahan keadaan pada sistem tersebut maupun pada lingkungannya, maka proses ini dikatakan proses irreversibel atau proses yang tidak dapat dibalik (Sulaiman Kamil, 1983 : 77)

Perhatikanlah sebuah silinder pada gambar 7, dimana di dalamnya ada udara bertekanan tinggi yang ditutup oleh piston. Piston ini ditahan oleh sebuah pena.



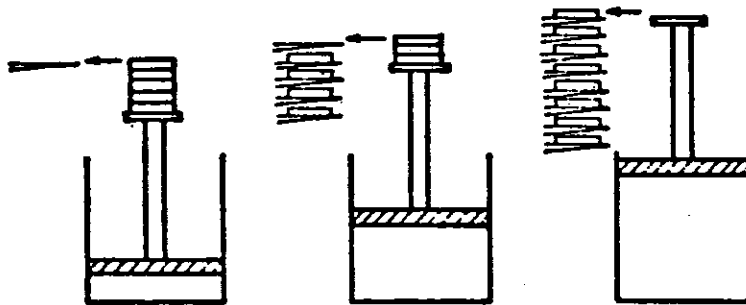
Gambar 7

Suatu proses Irreversibel

Jika pena ini dilepas, maka piston akan bergerak keatas, karena ada udara bertekanan tinggi di dalam silinder. Artinya udara di dalam silinder melakukan kerja sebesar W kepada lingkungannya. Apabila di bagian atas silinder disediakan penghalang, maka piston tersebut akan berhenti pada penghalang. Jika hendak menghasilkan udara di dalam silinder ke tingkat semula, maka piston harus ditekan ke bawah sehingga kembali pada posisi awal.

Ternyata energi bentuk kerja yang diberikan kepada piston sewaktu menekan kebawah lebih besar dibandingkan dengan energi bentuk kerja yang dilakukan oleh udara sewaktu mengembang. Selain itu udara di dalam silinder menjadi naik temperaturnya. Agar kembali ke tingkat keadaan semula, maka perlulah energi bentuk panas dikeluarkan dari sistem kepada lingkungan. Dengan demikian proses kembali ini adalah proses irreversibel, karena lingkungannya berubah sewaktu proses kembali ke tingkat keadaan semula.

Selanjutnya proses ekspansi dan kompresi di atas dapat dilakukan secara hampir reversibel dengan cara berikut, lihat gambar 8.



Gambar 8

Proses Reversibel

Dalam keadaan awal, udara bertekanan tinggi di dalam silinder di bawah piston ditahan oleh setumpukan pemberat. Pemberat ini berada dalam keadaan setimbang dengan udara yang bertekanan tinggi tersebut. Proses ekspansi dengan mengurangi pemberat sedikit demi sedikit. Setiap pemberat yang diambil diletakkan pada sisi poros dengan ketinggian tertentu. Demikianlah seterusnya sampai se-

bagian besar pemberat telah diletakkan di sisi poros , sehingga udara di dalam silinder telah berekspansi dan melakukan kerja. Kini pada proses sebaliknya, pemberat tersebut digeser dari tempat penyimpanannya sedikit demi sedikit sehingga piston bergerak kebawah. Setelah semua pemberat diletakkan pada piston, maka kondisi dari udara dalam gas praktis sama dengan kondisi semula. Proses reversibel akan lebih sempurna, bila pemberat tersebut terdiri dari sejumlah pemberat-pemberat yang masing-masingnya sangat ringan.

Ada beberapa kriteria suatu proses reversibel (T. D. Eastop dan A. Mc. Conkey, 1978 : 12) :

1. Proses harus berjalan tanpa gesekan.
Fluida itu sendiri harus tidak memiliki gesekan internal dan gesekan mekanik, misalnya antara dinding silinder dan torak.
2. Perbedaan tekanan antara fluida dan lingkungannya selama proses berlangsung haruslah sangat kecil. Hal ini dimaksudkan, bahwa proses harus dilakukan dengan sangat perlahan-lahan karena gaya yang diperlukan untuk menggerakkan batas sistem sangat kecil.
3. Perbedaan temperatur antara fluida dan lingkungannya selama proses berlangsung sangatlah kecilnya. Maksudnya panas yang diberikan atau dikeluarkan ke dalam dan dari sistem harus berjalan sangat perlahan.

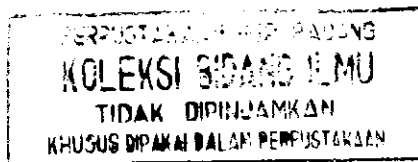
Dari kriteria di atas jelaslah bahwa proses reversibel ini tidak akan pernah terjadi dalam praktek , tetapi konsep reversibel begitu sangat berguna. Namun dalam beberapa proses yang secara prakteknya mendekati "reversibel" dapat dicapai. Dalam proses ini keadaan lingkungan tidak dapat dikembalikan kepada awalnya, sedangkan fluidanya dapat dikembalikan. Secara umum dapat

dikatakan proses dalam silinder motor (pesawat) dengan piston dapat dianggap sebagai proses reversibel. Akan tetapi pesawat berputar seperti turbin, adalah proses irreversibel yang disebabkan oleh turbulensi fluidanya.

Suatu proses reversibel dapat dinyatakan pada sebuah diagram, misalnya diagram P-V, diagram V-T, diagram T-s, dan diagram yang lainnya. Biasanya digambarkan sebagai sebuah garis yang terputus. Sedangkan pada proses irreversibel hanya keadaan awal dan akhirnya yang diketahui, dan biasanya digambarkan dengan garis putus-putus yang menghubungkan awal dan akhirnya.

H. SOAL-SOAL LATIHAN

1. Apa yang dipelajari dalam termodinamika terapan ?
2. Jelaskanlah pengertian atau definisi dari beberapa istilah di bawah ini :
 - a. Sistem
 - b. Sistem terbuka dan sistem tertutup
 - c. Sistem diisolasi.
 - d. Lingkungan.
 - e. Batas sistem.
 - f. Panas.
 - g. Kerja
 - h. Proses reversibel.
 - i. Proses irreversibel.
3. Apa yang dimaksud dengan ciri sistem yang intensif , dan ekstensif ?. Berikan contoh-contohnya !.
4. Keadaan berikut ini, manakah yang menyatakan sifat-sifat suatu fluida : tekanan, temperatur, volume, panas, dan kerja. Berikanlah penjelasan dalam mendukung jawaban anda !.
5. Buktikanlah mengapa tekanan atmosfer standar = 1,013 bar !.
6. Sebutkanlah kriteria-kriteria dari suatu proses yang



530

Amb

t,

17

dikatakan reversibel.

7. Temperatur uap meninggalkan ketel 490°F . Nyatakanlah temperatur ini dalam derajat Celsius !
8. Temperatur dari sebuah mesin pendingin adalah minus 40°F . Berapakah temperatur mesin pendingin dalam derajat Celsius.
9. Sebuah balon diisi dengan gas helium sehingga balon tersebut makin mengembang. Perhatikanlah balon tersebut sebagai suatu sistem, dimana batas sistem adalah dinding balon dan bagian masuk dari gas helium. Tentukanlah :
 - a. Sistem apakah ini ?
 - b. Bagaimanakah massa balon ?
 - c. Apakah kecepatan dari gas helium di dalam sistem merupakan ciri dari sistem.
 - d. Jumlah massa gas helium yang mengalir selama 2 menit, apakah merupakan ciri dari sistem ?

WILIK UPT PERPUSTAKAAN
IKIP PADANG

BAB II

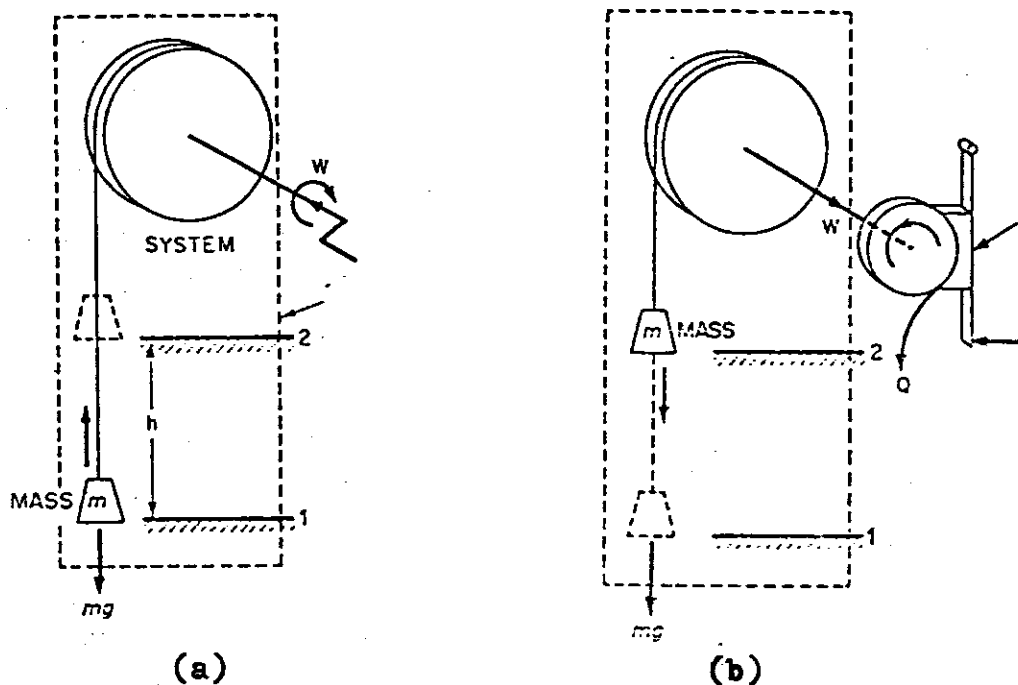
HUKUM PERTAMA TERMODINAMIKA

A. KONVERSI ENERGI

Konsep energi dan hipotesis yang menyatakan bahwa energi itu dapat berubah bentuk, tetapi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan dikembangkan oleh para ilmuwan sejak awal abad ke 19 dan menjadi terkenal dengan sebutan *The Principle of Conservation of Energy* atau Prinsip Konversi Energi. Prinsip Konversi Energi hukum pertama tentang termodinamika merupakan salah satu pernyataan dari prinsip umum tentang konversi energi dengan dasar energi panas dan energi mekanik (misalnya kerja). Pada abad ke 18, panas dipandang sebagai fluida (daya sebutan kalorik) oleh para ilmuwan, dua buah energi, sampai percobaan Joule lebih kurang pada tahun 1840, yang menunjukkan bahwa panas dan kerja merupakan dua hal dapat saling dikonversikan. Sejak itulah panas dipandang sebagai energi.

Perhatikanlah suatu sistem ideal pada gambar 9a, yang terdiri dari massa m yang dihubungkan dengan sebuah drum dengan bantuan seutas tali. Bila sistem berubah dari keadaan 1 ke keadaan 2, besarnya $W = mgh$ menembus batas sistem dan masuk ke dalam sistem, dimana berubah menjadi energi potensial. Jumlah kerja W akan bertanda negatif, sebab kerja yang dipindahkan dari lingkungan ke dalam sistem. Jika sistem kembali ke keadaan awal (jika massa m kembali ke bidang 1 secara perlahan dengan menggunakan gaya pada engkol) perubahan pada energi potensial mgh akan diubah menjadi energi kerja W yang kembali dari sistem ke lingkungan menembus batas sistem. Kerja ini akan bertanda positif dan kerja bersih yang dilakukan akan sama dengan nol. Ini dapat

ditulis $\oint \delta W = 0$, dimana \oint berarti jumlah seluruh bagian terkecil dari δW yang mengalami perubahan dari keadaan 1 ke keadaan 2 dan kembali ke keadaan 1, Menarik untuk dicatat, kita tidak mengatakan bahwa disimpan pada keadaan 2, tetapi energi yang terdapat pada keadaan 2 adalah besar energi potensial. Karena sistem kembali ke keadaan awal setelah mengalami satu seri proses, sistem dikatakan mengalami suatu siklus tertutup.



Gambar 9

Suatu Proses Konversi Tenaga

Ambil suatu proses untuk memindahkan massa dari 1 ke 2 dan massa kembali dari 2 ke 1. Bila gerakanya di kontrol dengan sebuah rem ban seperti dalam gambar 9.b. Kerja yang dipindahkan sewaktu massa turun akan diubah menjadi energi panas Q oleh rem ban. Jika energi panas Q diukur secara tepat, untuk massa yang bergerak melalui bermacam-macam ketinggian, kita dapat menentukan nilai kerja yang dipindahkan, yakni berbanding langsung

dengan energi panas, yakni $W \propto Q$ atau $\delta W \propto \delta Q$. Jika tanda perbandingan diganti dengan tanda yang setara maka $\delta W = \text{konstanta} \times \delta Q$. Jika $\delta W = 1 \text{ Nm}$, panas dapat dihitung $\delta Q = 1 \text{ Joule}$. Dimana persamaan menjadi $1 \text{ Nm} = \text{konstanta} \times 1 \text{ Joule}$, sebab $1 \text{ Nm} = 1 \text{ Joule}$. Konstanta adalah kesatuan (unity).

Persamaan dapat ditulis $\delta W = \delta Q$.

Persamaan ini menyatakan satu bentuk dari hukum pertama termodinamika. Dapat dinyatakan dalam bentuk kata-kata sebagai berikut :

Jika sebuah sistem dalam sebuah siklus tertutup, maka kerja bersih yang dipindahkan berbanding langsung dengan panas bersih yang dipindahkan. Tidak ada bukti matematis tentang hukum ini, tetapi semua eksperimen mendukungnya.

B. KERJA LUAR (EXTERNAL WORK)

Kerja didefinisikan sebagai hasil kali gaya dan jarak perpindahan dalam arah gaya tersebut. Perhatikanlah fluida yang mengembang di samping piston dari sebuah mesin seperti ditunjukkan pada gambar 10.

Gaya F akan menghasilkan $F = p \cdot A$, dimana p adalah tekanan pada piston dan A luas piston. Jika dx perpindahan piston dan p dianggap konstan, maka kerja yang dilakukan sebesar :

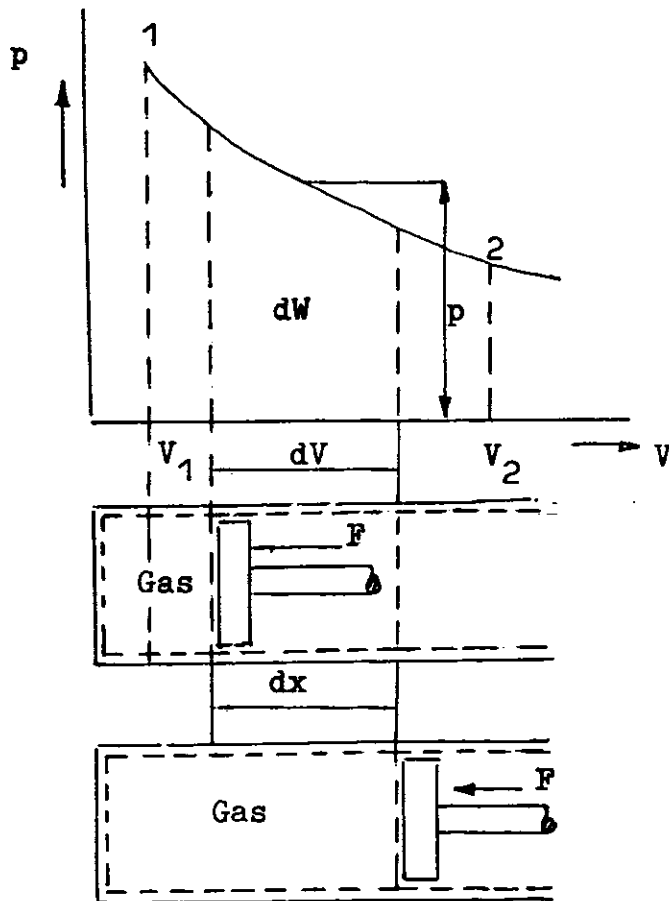
$$\begin{aligned} dW &= F \cdot dx \\ dW &= p \cdot A \cdot dx \quad \dots\dots\dots 1 \end{aligned}$$

Sedangkan $A \cdot dx = dV$

Dengan mensubstitusikan dV ke persamaan 1, maka didapatlah persamaan dalam bentuk :

$$dW = p \cdot dV \quad \dots\dots\dots 2$$

Dimana dW adalah elemen luas yang diarsir.



Gambar 10

Kerja Yang Dilakukan Gas Dalam Silinder

Dari gambar di atas, bila arah dx ke kanan (dx berlawanan arah dengan F) berarti gas mengembang atau volume bertambah atau dV positif. Jadi sistem akan melakukan kerja terhadap sekelilingnya, bila dV positif. Hal ini terdapat pada proses ekspansi. Secara singkat, pada proses ekspansi dV adalah positif, maka kerja adalah positif. Sebaliknya, bila arah dx ke kiri (dx searah dengan gaya F) berarti volume gas berkurang atau dV negatif. Jadi sistem akan menerima kerja dari sekelilingnya, bila dV negatif. Hal ini terdapat pada proses kompresi. Secara singkat, pada proses kompresi dV adalah negatif, maka kerja adalah negatif.

Selanjutnya, bila sistem berubah dari keadaan 1 ke keadaan 2, maka kerja total yang dilakukan atau diterima oleh sistem (Werlin.S.Nainggolan, 1976 : 59) :

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV \quad \dots\dots\dots 3$$

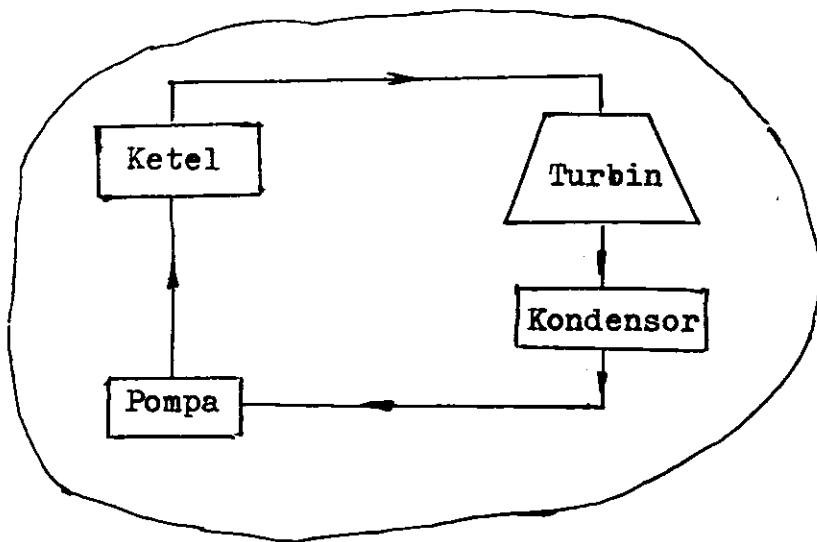
Bila p konstan, maka kerja total yang dilakukan atau diterima oleh sistem adalah :

$$W = p (V_2 - V_1) \quad \dots\dots\dots 4$$

Jadi kerja total yang dilakukan atau diterima oleh sistem dengan mengabaikan gesekan antara piston dan silinder, dan gesekan di dalam fluida sendiri adalah sebesar yang tertera pada persamaan 4.

Contoh Soal 2.1

Dalam suatu instalasi tenaga panas, turbin menghasilkan daya sebesar 1000 kW. Panas yang diberikan kepada uap dalam ketel sejumlah 2800 kJ/kg, sedangkan pa-



Gambar 11

Suatu Instalasi Tenaga Panas

nas yang dilepaskan oleh sistem kepada air pendingin dalam kondensator sebanyak 2100 kJ/kg dan pompa air pengisi (kondensat) membutuhkan kerja sebesar 5 kW. Hitung jumlah aliran uap yang mengalir dalam siklus dalam kg/det. Siklus ini ditunjukkan pada gambar 11.

Penyelesaian :

Perhatikanlah gambar 9 di atas. Batas siklus dipandang sebagai pedoman fluida kerja saja.

$$Q = 2800 - 2100 = 700 \text{ kJ/kg.}$$

Misalnya aliran uap tersebut dalam kg/det. , sehingga :

$$Q = 700 \text{ m kJ/det.}$$

$$W = 1000 - 5 = 995 \text{ kW} = 995 \text{ kJ/det.}$$

Dari persamaan konversi energi, maka diperoleh :

$$Q = W$$

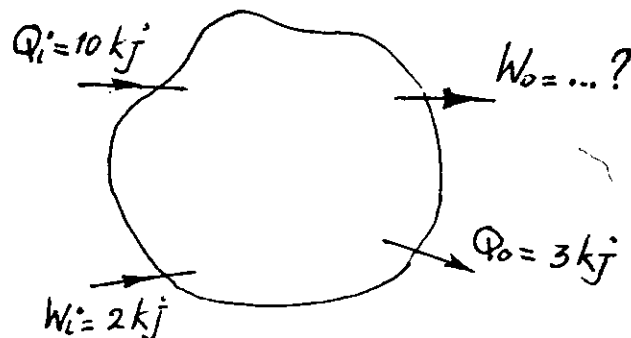
$$700 \text{ m} = 995$$

$$m = \frac{995}{700} = 1,421 \text{ kg/det.}$$

Jadi massa uap yang mengalir dalam siklus = 1,421 kg/det

Contoh Soal 2.2

Gambar 12 menunjukkan suatu proses tertentu yang mengalami suatu siklus yang lengkap. Tentukanlah kerja yang dilakukan (W_o).



Gambar 12

Suatu Proses dari Suatu Siklus

Penyelesaian :

Untuk suatu siklus yang lengkap :

$$\sum \delta Q - \sum \delta W = 0$$

Dimana Q_i adalah positif, W_o adalah positif, Q_o adalah negatif, dan W_i adalah negatif.

$$\sum \delta Q = Q_i - Q_o = 10 - 3 = 7 \text{ kJ}$$

$$\sum \delta W = W_o - 2$$

$$\sum \delta Q - \sum \delta W = 0$$

$$7 - W_o + 2 = 0$$

$$W_o = 9 \text{ kJ}$$

Contoh Soal 2.3

Suatu fluida pada tekanan 3 bar dan mempunyai volume jenis (v) = 0,18 m³/kg, dimasukkan ke dalam silinder yang tertutup, dengan piston diekspansikan secara reversibel sampai tekanan 0,6 bar. Proses mengikuti rumus $p = C/v^2$, dimana C suatu konstanta. Hitunglah kerja yang dilakukan fluida kepada torak.

Penyelesaian :

$$\text{Kerja yang dilakukan} = \int_{v_1}^{v_2} p \cdot dv$$

$$\text{dimana } p = C/v^2,$$

$$\text{sehingga kerja yang dilakukan} = \int_{v_1}^{v_2} dv/v^2$$

$$W = C \left[-1/v \right]_{v_1}^{v_2}$$

Selanjutnya,

$$C = p \cdot v^2$$

$$= 3 \cdot (0,18)^2 = 0,0972 \text{ bar (m}^3/\text{kg)}^2$$

dan

$$v_2 = \sqrt{C/p_2} = \sqrt{\frac{0,0972}{0,6}} = 0,402 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Kerja yang dilakukan} = C \cdot (1/v_1 - 1/v_2)$$

$$W = 0,0972 \times 10^5 (1/0,18 - 0,402) \text{ Nm/kg}$$

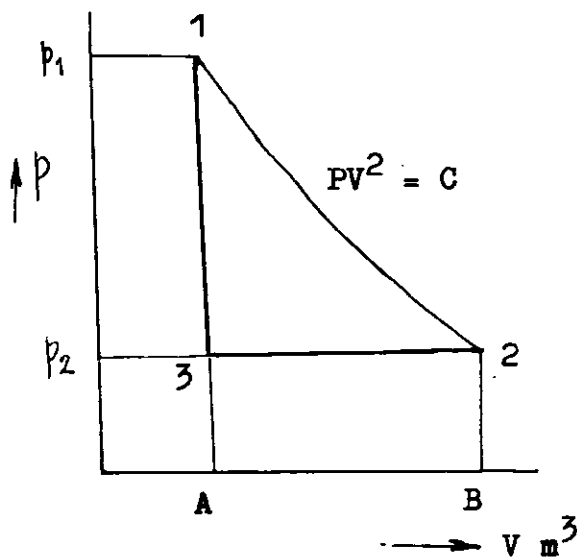
$$W = 29840 \text{ Nm/kg.}$$

Contoh Soal 2.4

1 kg fluida dimasukkan ke dalam sebuah silinder pada tekanan awal 20 bar. Fluida ini diekspansikan menurut proses reversibel menurut rumus $pV^2 = \text{konstan}$ sampai volumenya menjadi dua kali lebih besar. Kemudian didinginkan kembali secara reversibel pada tekanan konstan sampai fluida mencapai kondisi awalnya. Kemudian fluida dipanaskan secara reversibel dengan piston tetap pada tempatnya sampai tekanan naik mencapai 20 bar, Hitunglah kerja bersih yang dilakukan oleh fluida, apabila volume awalnya adalah $0,05 \text{ m}^3$.

Penyelesaian :

Perhatikanlah gambar.



Gambar 13

Diagram p - V

$$p_1 \cdot V_1^2 = p_2 \cdot V_2^2$$

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

$$= 20 (1/2)^2$$

$$= 5 \text{ bar.}$$

Kerja yang dilakukan pada proses 1-2 adalah W_1 .

$$W_1 = \text{luas } 12BA1$$

$$= \int_{V_1}^{V_2} p \, dV$$

$$= \int_{V_1}^{V_2} C/V^2 \, dV$$

$$= C \left[-1/V \right]_{V_1}^{V_2}$$

$$\text{Dimana } C = p_1 V_1^2 = 20 \times 0,05^2 = 0,05$$

$$V_1 = 0,05 \text{ m}^3 \quad ; \quad V_2 = 2 V_1 = 2 \times 0,05 = 0,1 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned}
 W_1 &= 10^5 \times 20 \times 0,05^2 \left(\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right) \\
 &= 0,05 \times 10^5 (1/0,1 - 1/0,05) \\
 &= 50 \times 10^3 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

Kerja yang dilakukan oleh fluida dari 2 - 3 adalah W_2 .

$$\begin{aligned}
 W_2 &= \text{luas } 32BA3 \\
 &= p_2 (V_3 - V_2) \\
 &= 10^5 \times 5 \times (0,05 - 0,1) \\
 &= - 25 \times 10^3 \text{ Nm.}
 \end{aligned}$$

Kerja yang dilakukan dari 3 - 1 adalah sama dengan nol, sebab piston tidak bergerak sehingga tidak terjadi perubahan volume ($dV = 0$).

$$W_3 = 0$$

Total kerja yang dibutuhkan oleh fluida selama siklus adalah :

$$\begin{aligned}
 W_{\text{tot}} &= W_1 + W_2 + W_3 \\
 &= 50 \times 10^3 - 25 \times 10^3 + 0 \\
 &= 25 \times 10^3 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

C. INTERNAL ENERGI (ENERGI DALAM)

Perhatikanlah suatu perubahan dalam sistem dari keadaan 1 ke keadaan 2 dengan lintasan A dan kembali ke keadaan awal 1 dengan lintasan C, sebagai diilustrasikan dalam gambar 14.

Dari hukum pertama termodinamika dapat diperoleh suatu persamaan sebagai berikut :

$$\sum \delta Q - \sum \delta W = 0 \quad \dots\dots\dots 1$$

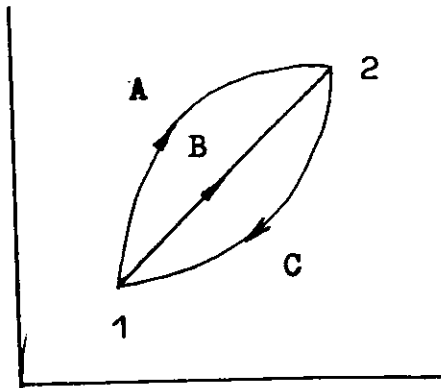
atau

$$\begin{aligned}
 (\sum_1^2 \delta Q + \sum_2^1 \delta Q) - (\sum_1^2 \delta W + \sum_2^1 \delta W) = 0 \quad \dots 2 \\
 \text{lewat A} \quad \text{lewat C} \quad \text{lewat A} \quad \text{lewat C}
 \end{aligned}$$

atau

$$(\sum_1^2 \delta Q - \sum_1^2 \delta W) - (\sum_2^1 \delta Q - \sum_2^1 \delta W) = 0 \dots 3$$

lewat A lewat A lewat C lewat C



Gambar 14

Suatu Perubahan Pada Sistem

Selanjutnya sistem berubah dari keadaan 1 ke keadaan 2 lewat lintasan B dan kembali ke keadaan 1 melalui lintasan C. Dengan alasan yang sama, maka :

$$(\sum_1^2 \delta Q - \sum_1^2 \delta W) - (\sum_2^1 \delta Q - \sum_2^1 \delta W) = 0 \dots 4$$

lewat B lewat B lewat C lewat C

Bandingkan persamaan 3 dan 4, kelihatan bahwa :

$$(\sum_1^2 \delta Q - \sum_1^2 \delta W) = (\sum_1^2 \delta Q - \sum_1^2 \delta W) \dots 5$$

karenanya

$$\sum_1^2 \delta Q - \sum_1^2 \delta W = 0$$

mempunyai harga yang sama pada lintasan yang dilalui, dari keadaan 1 ke keadaan 2, dan oleh karenanya menyatakan perubahan sifat dari suatu sistem, ditulis dengan U, dan perubahan energi dalam antara 1 dan 2, menghasilkan :

$$\begin{aligned} U_2 - U_1 &= \sum_1^2 \delta Q - \sum_1^2 \delta W \\ &= Q_{12} - W_{12} \quad (\text{T.H.Thomas, 1979 : 11}). \end{aligned}$$

Energi dalam adalah jumlah seluruh energi yang dimiliki fluida dan tersimpan dalam dirinya. Molekul suatu fluida dapat dibayangkan dalam keadaan bergerak, karena memiliki energi kinetik yang bergerak linier dan berputar sebagai pengaruh energi dan getaran atom-atom dalam molekul. Tambahan lagi, fluida juga memiliki energi potensial yang disebabkan oleh gaya intermolekul. Total energi ini merupakan bentuk dari energi dalam.

Bila suatu gas mengembang tanpa ada panas yang diberikan dari suatu tekanan yang tinggi ke tekanan rendah di samping piston, maka energi dalam tersebut berguna bagi gas untuk melakukan kerja. Pada kasus ini dalam kenyataannya perubahan energi dalam $U_2 - U_1$ sama dengan kerja yang dilakukan (W). Adalah tidak mungkin untuk menentukan harga mutlak dari energi dalam pada suatu keadaan, tetapi ini tidak merupakan suatu kerugian, sebab selalu yang dibutuhkan untuk diketahui hanya perubahan energi dalam. Energi dalam dari satu satuan diartikan energi dalam spesifik dan total energi dalam $U = m \cdot u$, dimana m = massa fluida.

Contoh Soal 2.5

Suatu sistem melakukan kerja sebesar 500 kNm sedangkan energi panas sebesar 800 kJ dipindahkan kedalam sistem. Hitunglah perubahan energi dalam dan keadaannya apakah naik atau turun ?.

Penyelesaian :

$$U_2 - U_1 = Q_{12} - W_{12}$$

dimana

$$W_{12} = + 500.000 \text{ Nm} = + 500.000 \text{ J} = 500 \text{ kJ}$$

sehingga :

$$U_2 - U_1 = 800 - 500 = 300 \text{ kJ}$$

Tentu $U_2 > U_1$, dengan demikian energi dalamnya naik.

Contoh Soal 2.6

Pada langkah kompresi sebuah motor, panas yang dilepaskan kepada air pendingin adalah 45 kJ/kg dan kerja inputnya 90 kJ/kg. Hitunglah perubahan energi dalam dari fluida kerja, dan hal itu merupakan pertambahan atau pengurangan.

Penyelesaian :

$$Q = - 45 \text{ kJ/kg (tanda negatif adalah panas yang dilepaskan)}$$

$$W = - 90 \text{ kJ/kg (tanda negatif merupakan bentuk kerja input kepada sistem)}$$

Dengan menggunakan rumus persamaan energi dalam di atas, maka diperoleh :

$$\begin{aligned} U_2 - U_1 &= Q_{12} - W_{12} \\ &= (- 45) - (- 90) \\ &= - 45 + 90 \\ &= + 45 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Pertambahan energi dalam adalah 45 kJ/kg.

Contoh Soal 2.7

Dalam silinder motor, udara yang terkompresi memiliki energi dalam 420 kJ/kg pada awal ekspansi dan energi dalam 200 kJ/kg di akhir ekspansi. Hitunglah jumlah panas yang mengalir keluar atau masuk silinder apabila kerja yang dilakukan oleh udara selama ekspansi adalah 100 kJ/kg.

Penyelesaian :

Dengan menggunakan rumus persamaan energi dalam di atas, maka akan diperoleh :

$$\begin{aligned} U_2 - U_1 &= Q_{12} - W_{12} \\ (200 - 420) &= Q_{12} - 100 \\ - 220 &= Q_{12} - 100 \end{aligned}$$

$$Q_{12} = - 220 + 100$$

$$Q_{12} = - 120 \text{ kJ/kg.}$$

Jadi panas yang dilepaskan oleh udara sebanyak 120 kJ/kg.

D. SOAL-SOAL LATIHAN

1. Sebuah sistem bekerja secara siklus sempurna. Panas yang dibutuhkan sistem 800 kJ dan yang dikeluarkan 550 kJ. Pada dua titik, kerja yang dilakukan sistem 96 kNm dan 20 kNm. Pada titik ketiga ada kerja yang dipindahkan. Tentukanlah jumlah kerja yang dilakukan dan keadaannya, apakah kerja dilakukan oleh sistem atau pada sistem.

(Kunci : 134 kNm, dan
kerja dilakukan oleh sistem).

2. Sebuah mesin dinamometer menyerap 89,5 kW selama percobaan pada sebuah mesin. Panas dalam dinamometer didinginkan dengan air pendingin. Setelah kondisi mantap, tentukanlah jumlah air pendingin yang mengalir untuk menaikkan suhu 17°C , kapasitas panas jenis untuk air = $4,2 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}$.

(Kunci : 75 kg/menit).

3. Sebuah kipas angin (fan) berputar dalam suatu ruangan tertutup. Pada suatu titik energi kinetiknya 678 kJ. Daya dari kipas angin berkurang dan putaran kipas berangsur-angsur turun. Diperkirakan panas yang hilang dari ruangan (chamber) selama kipas berputar adalah 50 kJ. Tentukanlah perubahan energi dalam dari ruangan.

(Kunci : 628 kJ):

4. Pada sebuah motor bensin diperlukan energi untuk air pendingin 30 %, untuk gas bekas 4 %, dan lingkungan

8 % dari energi yang diberikan. Kerja bermanfaat yang dihasilkan mesin 7,5 kW. Tentukanlah jumlah panas yang dibutuhkan dalam kJ/menit dan jumlah bahan bakar bensin yang diperlukan per jam jika panas yang ditimbulkan oleh setiap kg bensin adalah 419000 kJ. Gambarkanlah sebuah diagram dari mesin yang menunjukkan aliran energi.

(Kunci : 2046 kJ/menit; 2,75 kg/h)

5. Dalam langkah kompresi suatu pesawat, kerja yang diberikan kepada gas oleh torak adalah 70 kJ/kg dan panas yang dibuang kepada air pendingin adalah 42 kJ/kg. Hitunglah perubahan energi dalam dan sebutkan energi ini merupakan penerimaan atau pembuangan).

(Kunci : 28 kJ/kg ; penerimaan)

6. Jika tekanan di samping sebuah piston tetap konstan sebesar 690 kN/m^2 , sedangkan volume naik dari $0,003 \text{ m}^3$ sampai $0,024 \text{ m}^3$ dan panas sebesar 6 kJ dipancarkan dari dinding silinder, hitunglah perubahan energi dalam.

(Kunci : - 20,5 kJ)

7. Sejumlah massa gas dengan energi dalam 1500 kJ dimasukkan ke dalam sebuah silinder yang mempunyai isolasi panas yang sempurna. Gas diekspansikan di bawah torak sampai energi dalamnya menjadi 1400 kJ. Hitunglah kerja yang dilakukan gas. Apabila ekspansinya mengikuti rumus $pV^2 = \text{konstan}$, dan tekanan dan volume awalnya 28 bar dan $0,06 \text{ m}^3$, hitunglah tekanan dan volume akhirnya.

(Kunci : 100 kJ ; 4,59 bar ; $0,148 \text{ m}^3$)

8. Gas dalam silinder motor bakar mempunyai energi dalam 800 kJ/kg dan volume spesifik $0,06 \text{ m}^3/\text{kg}$ pada awal ekspansi. Ekspansi ini merupakan proses reversibel dengan $pV^{1,5} = \text{konstan}$, dari 55 bar menjadi 1,4 bar. Energi dalam setelah ekspansi 230 kJ/kg. Hitunglah panas yang terbuang kepada air pendingin tiap kg gas selama

langkah ekspansi.

(Kunci : 104 kJ/kg)

BAB III

PROSES ALIRAN MANTAP

Perubahan keadaan dari suatu sistem termodinamika dinamakan proses. Proses ini secara garis besarnya dapat dibagi menjadi dua jenis, bergantung pada sistem apakah sebuah sistem tertutup atau sistem terbuka. Suatu proses yang dialami oleh sebuah sistem tertutup, dinyatakan sebagai proses non aliran (non flow processes) Sedangkan suatu proses yang dialami oleh suatu sistem terbuka, dinyatakan suatu proses aliran. Proses ini dapat dibagi atas proses aliran mantap dan proses aliran tidak mantap. Dibawah ini akan diuraikan proses aliran mantap, sedangkan proses non aliran akan diuraikan pada bagian (bab) berikutnya.

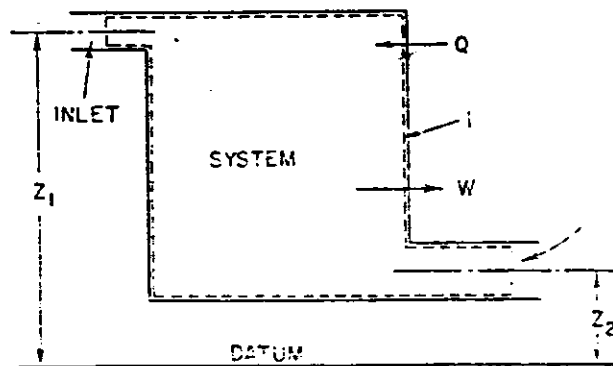
Pada proses aliran mantap, kondisi yang harus dipenuhi (T.H.Thomas, 1979 : 14) :

1. Massa fluida yang mengalir pada setiap penampang dalam sistem harus konstan.
2. Sifat-sifat fluida pada penampang utama dalam sistem harus konstan.
3. Seluruh energi kerja dan energi panas yang dipindahkan harus merata.

Contoh dari suatu proses aliran mantap adalah sebuah ketel uap, kondensor, turbin uap, kompressor, dan pipa pancar (nozzle). Misalnya pada sebuah ketel uap, agar diperoleh batas air yang tetap dalam ketel, maka pompa air harus mengalirkan air dengan debit yang tetap sehingga uap dapat dikeluarkan dari ketel. Untuk memperoleh uap dengan debit ini pada suatu tekanan yang mantap, maka tungku akan membutuhkan energi panas. Dalam kondisi ini, sifat-sifat fluida kerja pada setiap penampang dalam sistem harus konstan.

A. PERSAMAAN ENERGI ALIRAN MANTAP

Untuk menganalisa suatu proses aliran mantap digunakan prinsip kekekalan energi, yakni energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan tetapi hanya berubah bentuk dari satu bentuk ke bentuk yang lainnya. Hasil kesetimbangan energi untuk suatu proses aliran mantap, dinamakan persamaan energi aliran mantap. Perhatikanlah sebuah sistem yang mengalami proses aliran mantap (gambar 15).



Gambar 15

Proses Aliran Mantap

Fluida kerja akan mengalir sepanjang pipa masuk dengan debit yang konstan dan memasuki sistem, di mana macam-macam energi yang dipindahkan bergantung pada fungsi sistem (yakni untuk sebuah ketel, energi panas akan menembus batas sistem dan memasuki sistem, untuk sebuah mesin, energi kerja akan menembus batas dan meninggalkan sistem). Bila energi yang dipindahkan ini sempurna, maka fluida akan mengalir meninggalkan sistem sepanjang pipa keluar (outlet pipe).

Untuk memperoleh kesetimbangan energi pada sistem, perhatikanlah sejumlah energi yang menembus batas sistem per satuan waktu (katakanlah per detik).

Bila $p \text{ N/m}^2 =$ tekanan

$v \text{ m}^3/\text{kg} =$ volume 1 kg fluida (yakni volume jenis).

$u \text{ J/kg} =$ energi dalam 1 kg fluida (yakni energi dalam spesifik).

$C \text{ m/det} =$ kecepatan

$g \text{ m/det}^2 =$ percepatan gravitasi

$Z \text{ m} =$ tinggi

$Q \text{ J/det} =$ energi bersih yang dipindahkan dalam bentuk energi panas menembus batas sistem dan masuk ke dalam sistem.

$W \text{ J/det} =$ energi bersih yang dipindahkan dalam bentuk energi kerja yang menembus batas sistem dan keluar sistem.

$m \text{ kg/det} =$ massa yang mengalir melalui sistem.

akhiran 1 = menyatakan kondisi pada pintu masuk sistem

akhiran 2 = menyatakan kondisi pada pintu keluar sistem.

Selanjutnya gunakan prinsip kesetimbangan energi terhadap sistem, bahwa jumlah energi total yang memasuki sistem per detik harus sama dengan jumlah energi total yang meninggalkan sistem per detik. Energi yang memasuki sistem adalah :

1. Energi panas yang dipindahkan menembus batas sistem masuk ke dalam sistem (yakni $Q \text{ J/det}$).
2. Energi fluida yang mengalir memasuki sistem per detik pada penampang 1 - 1. Ini akan ter-

masuk energi dalam, energi potensial, dan energi kinetik.

Energi potensial 1 kg fluida setinggi Z m di atas acuan (datum) = $1 \times Z \times g \text{ kg m m/det}^2 = Z g \text{ Nm} = Zg \text{ Joule}$.

Energi kinetik bergerak dengan suatu kecepatan C m/det adalah

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1 \times C^2}{2} \quad \text{kg (m/det)}^2 \\
 &= \frac{C^2}{2} \quad \text{kg m m/det}^2 \\
 &= \frac{C^2}{2} \quad \text{Nm} \\
 &= \frac{C^2}{2} \quad \text{Joule}
 \end{aligned}$$

Karenanya energi fluida setiap kg = $(u + Zg + C^2/2)$ Joule. Jika massa fluida yang mengalir m kg/det, maka :

$$= m \left(u + Zg + \frac{C^2}{2} \right) \text{ J/det.}$$

Oleh sebab itu energi yang masuk ke dalam sistem adalah :

$$= m \left(u_1 + Z_1g + \frac{C_1^2}{2} \right) \text{ J/det.}$$

3. Agar fluida memasuki sistem pada penampang 1-1, harus dialirkan fluida ke dalam sistem, yakni fluida memasuki sistem harus memindahkan energi kerja ke dalam sistem. Oleh sebab itu tekanan pada penampang 1-1 tetap konstan $p_1 \text{ N/m}^2$. Jumlah energi kerja yang dipindahkan ke dalam sistem per detik :

$$\begin{aligned}
 &= (p_1 \text{ N/m}^2) \times \text{volume fluida per detik} \\
 &= p_1 \text{ N/m}^2 \times v_1 \text{ m}^3/\text{kg} \times m \text{ kg/det.} \\
 &= m p_1 v_1 \text{ Nm/det.} = m p_1 v_1 \text{ J/det.}
 \end{aligned}$$

Energi total yang memasuki sistem adalah :

$$= Q + m \left(u_1 + Z_1 g + \frac{c_1^2}{2} \right) + m p_1 v_1 \text{ J/det.}$$

Selanjutnya energi yang meninggalkan sistem adalah sebagai berikut :

1. Energi kerja yang dipindahkan menembus batas sistem dan meninggalkan sistem, yakni W Joule per detik
2. Energi fluida yang mengalir keluar sistem per pada penampang 2-2. Ini termasuk energi dalam, energi potensial, dan energi kinetik, yakni :

$$= \left(u_2 + Z_2 g + \frac{c_2^2}{2} \right) \text{ J/kg} \times m \text{ kg/det.}$$

$$= m \left(u_2 + Z_2 g + \frac{c_2^2}{2} \right) \text{ J/det.}$$

3. Agar fluida dapat meninggalkan sistem pada penampang 2-2, harus memindahkan energi kerja ke lingkungannya. Oleh sebab itu tekanan pada penampang 2-2 tetap konstan $p_2 \text{ N/m}^2$. Jumlah energi kerja yang dipindahkan ke lingkungan per detik :

$$= p_2 \text{ (N/m}^2\text{)} \times \text{volume fluida per detik.}$$

$$= p_2 \text{ N/m}^2 \times v_2 \text{ m}^3/\text{kg} \times m \text{ kg/det.}$$

$$= m p_2 v_2 \text{ J/det.}$$

Energi total yang meninggalkan sistem per detik adalah :

$$= W + m \left(u_2 + Z_2 g + \frac{c_2^2}{2} \right) + m p_2 v_2 \text{ J/det..}$$

Oleh karena energi yang memasuki sistem per detik = energi yang meninggalkan sistem per detik, maka :

$$Q + m \left(u_1 + Z_1 g + \frac{c_1^2}{2} \right) + m p_1 v_1 =$$

$$= W + m \left(u_2 + z_2 g + \frac{c_2^2}{2} \right) + m p_2 v_2$$

$$Q - W = m \left[(u_2 + p_2 v_2) - (u_1 + p_1 v_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + (z_2 g - z_1 g) \right]$$

Kombinasi $(u + pv)$ sering terjadi dalam termodinamika. Ini dinamakan dengan enthalpi spesifik dan biasanya ditulis dengan h . Jadi :

$$h_1 = u_1 + p_1 v_1$$

$$h_2 = u_2 + p_2 v_2$$

dan persamaan di atas dapat ditulis menjadi :

$$Q - W = m \left[(h_2 - h_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + z_2 g - z_1 g \right]$$

Bandingkan dengan besaran lain, dimana besaran energi potensial $(z_2 g - z_1 g)$ secara umum cukup kecil, sehingga dapat diabaikan, dan persamaan di atas menjadi :

$$Q - W = m \left[(h_2 - h_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \right] \quad (TU \text{ mmx } 44:18)$$

B. APLIKASI PERSAMAAN ENERGI ALIRAN MANTAP

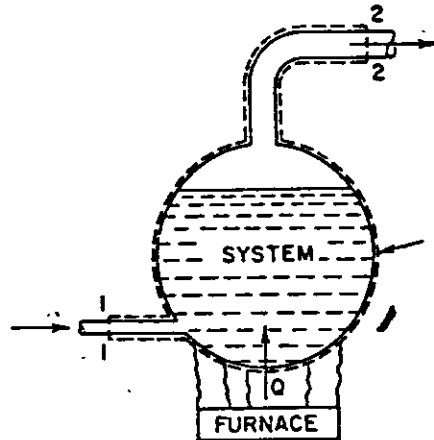
Persamaan energi aliran mantap dapat diaplikasikan pada bermacam-macam alat (apparatus) melalui mana suatu fluida mengalir, asalkan kondisi sama seperti diuraikan dalam bagian dimuka (sebelumnya). Beberapa kasus yang paling umum ditemukan dalam permesin akan diuraikan di bawah ini.

1. Ketel Uap

Pada sebuah ketel uap yang bekerja dengan kondisi mantap, dipompakan air ke dalam ketel dengan debit yang sama sebagai mana uap meninggalkan ketel, dan energi panas yang diberikan oleh tungku konstan. Persamaan

energi aliran mantap adalah :

$$Q - W = m \left[(h_2 - h_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \right]$$



Gambar 16

Ketel Uap

Dalam pemakaian persamaan di atas pada ketel, hal - hal berikut ini dapat dicatat :

1. Q merupakan energi panas yang mengalir ke dalam fluida per detik.
2. W akan menjadi nol, karena sebuah ketel tidak ada bagian yang bergerak akibat pengaruh suatu pemindahan kerja.
3. $(c_2^2 - c_1^2)/2$ menjadi sangat kecil bila dibandingkan dengan besaran lain dan biasanya diabaikan.
4. m merupakan massa fluida yang mengalir.

Sehingga persamaan di atas dirubah menjadi :

$$Q = m (h_2 - h_1) \quad (\text{T.H.Thomas, 1979 : 19})$$

Contoh Soal 3.1

Sebuah ketel bekerja pada tekanan konstan 15 bar,

dan massa fluida yang mengalir = 1000 kg/jam. Pada pintu masuk dari ketel, fluida mempunyai enthalpi 165 kJ / kg, dan meninggalkan ketel enthalpinya 2200 kJ/kg. Pipa keluar berada setinggi 16 meter di atas pipa masuk, dan kecepatan fluida masuk 13 m/det serta kecepatan keluar 33 m/det. Jika 65 persen energi panas yang diberikan untuk ketel digunakan untuk penguapan fluida, maka tentukanlah banyak bahan bakar yang dibutuhkan, jika 1 kilogram bahan bakar menghasilkan 32000 kJ energi panas.

Penyelesaian :

Persamaan energi aliran mantap adalah :

$$Q-W = m \left[(h_2-h_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g (z_2 - z_1) \right]$$

dimana :

Q = energi panas setiap jam yang memasuki sistem.

W = Energi kerja setiap jam yang meninggalkan sistem = 0.

m = massa fluida yang mengalir = 1000 kg/jam

$h_2 = 2200$ kJ/kg

$h_1 = 165$ kJ/kg

$c_2 = 33$ m/det.

$c_1 = 13$ m/det.

$(z_2-z_1) = 16$ meter

$g = 9,807$ m/det.²

Persamaan energi aliran mantap menjadi :

$$Q - 0 = 1000 (2200 - 165) + \left(\frac{33^2 - 13^2}{2} \right) + 9,807 \times 16$$

Besaran yang menyatakan perubahan energi kinetik dan energi potensial adalah kecil; bila dibandingkan dengan perubahan enthalpi dan dapat diabaikan, sehingga :

$$Q = 1000 \text{ kg/jam} \times 2035 \text{ kJ/kg} \\ = 2035 \times 10^3 \text{ kJ/jam.}$$

Energi panas yang dibutuhkan dari bahan bakar se-
tiap jam adalah :

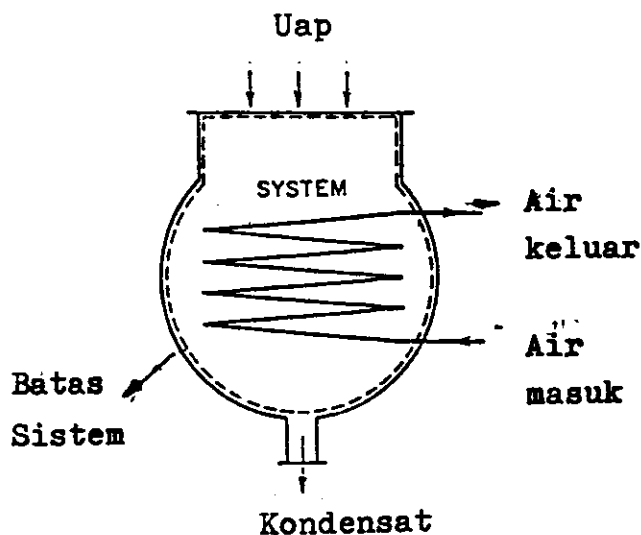
$$Q = \frac{2035 \times 10^3}{0,65} = 3,13 \times 10^6 \text{ kJ/jam}$$

Energi panas yang diperoleh dari bahan bakar ada-
lah 32000 kJ/kg. Banyak bahan bakar yang dibutuh-
kan :

$$B = \frac{3,13 \times 10^6}{32000} = 97,8 \text{ kg/jam.}$$

2. Kondensor

Pada prinsipnya, sebuah kondensor adalah sebuah ketel terbalik. Pada sebuah ketel energi panas yang di-
berikan untuk mengubah air (liquid) menjadi uap (vapour)
Pada sebuah kondensor energi panas digunakan untuk men-
dinginkan (mengembunkan) uap menjadi air. Jika kondens-
sor dalam suatu keadaan mantap, jumlah air yang mening-
galkan kondensor harus sama dengan jumlah uap yang me-



Gambar 17
Kondensor .

masuk ke kondensator. Persamaan energi aliran mantap adalah :

$$Q - W = m \left[(h_2 - h_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \right]$$

Hal-hal untuk dicatat :

- Q adalah jumlah energi panas per detik, yang dipindahkan dari sistem.
- $W = 0$, sebagai mana dalam sebuah ketel.
- Energi kinetik dapat diabaikan sebagai mana pada sebuah ketel.
- m adalah massa fluida yang mengalir.

Oleh karena itu, persamaan di atas dirubah menjadi :

$$Q = m (h_2 - h_1) \quad (\text{T.H.Thomas, 1979 : 22})$$

Contoh Soal 3.2.

Fluida memasuki sebuah kondensator dengan massa = 35 kg/menit dan enthalpi spesifik = 2200 kJ/kg, serta meninggalkan kondensator dengan enthalpi spesifik = 255 kJ/kg. Air pendingin kondensator mengalir dengan massa = 730 kg/menit dan enthalpi spesifik air melalui kondensator = 92 kJ/kg. Hitunglah energi panas yang hilang ke udara luar (atmosfir).

Penyelesaian :

Untuk menghitung energi panas yang hilang ke udara luar dapat digunakan dua cara berikut ini.

- Perhatikanlah sistem seperti ditunjukkan pada gambar di atas.

$$\begin{aligned} Q &= m (h_2 - h_1) \\ &= m h_2 - m h_1 \\ &= \text{enthalpi meninggalkan sistem} - \text{enthalpi} \\ &\quad \text{memasuki sistem} \\ &= (m_f h_{fo} + m_w h_{wo}) - (m_f h_{fi} + m_w h_{wi}) \\ &= m_f (h_{fo} - h_{fi}) - m_w (h_{wo} - h_{wi}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q &= 35 (255 - 2200) + 730 \times 92 \\
 &= - 68000 + 67000 \\
 &= - 1000 \text{ kJ/menit.}
 \end{aligned}$$

Tanda negatif menyatakan panas yang hilang ke udara luar.

- b. Perhatikanlah fluida kondensor. Q menyatakan energi panas yang dipindahkan fluida. Oleh sebab itu :

$$\begin{aligned}
 Q &= m_f (h_{fo} - h_{fi}) \\
 &= 35 (255 - 2200) \\
 &= - 68000 \text{ kJ/menit.}
 \end{aligned}$$

yakni 68000 kJ/menit dipindahkan dari fluida. Dari ini, $(730 \times 92) = 67000$ kJ/menit mengalir ke dalam air pendingin. Oleh karena itu, yakni $68000 - 67000 = 1000$ kJ/menit hilang ke udara luar.

3.. Turbin

Sebuah turbin adalah sebuah alat (pesawat) yang menggunakan suatu perbedaan tekanan untuk menghasilkan energi kerja, yang digunakan untuk menggerakkan atau memutar sebuah beban.

Persamaan energi aliran mantapnya adalah sebagai berikut :

$$Q - W = m \left[(h_2 - h_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \right]$$

Hal-hal untuk dicatat :

- a. Kecepatan rata aliran fluida melalui sebuah turbin umumnya tinggi, dan fluida mengalir secara cepat melalui turbin. Dapat diassumsikan bahwa energi panas tidak mempunyai waktu untuk mengalir ke dalam turbin atau keluar tur-

bin, sehingga $Q = 0$.

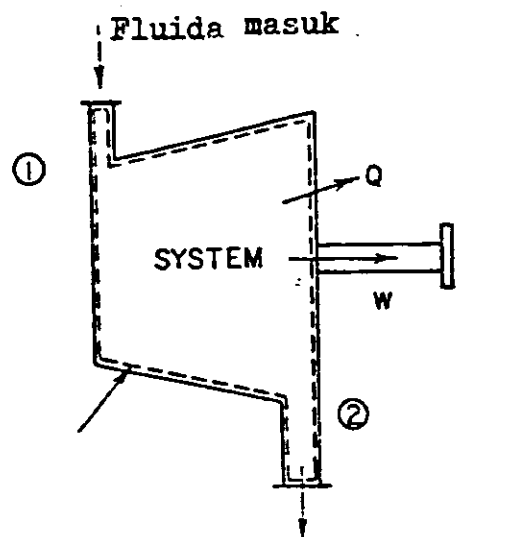
- b. Meskipun kecepatan tinggi, perbedaan antara kecepatan masuk dan keluar tidaklah besar dan besaran yang menyatakan perubahan energi kinetik dapat diabaikan.
- c. W adalah jumlah energi kerja yang dihasilkan per detik.

Persamaan energi aliran mantap menjadi :

$$- W = m (h_2 - h_1)$$

$$W = m (h_1 - h_2) \quad (\text{T.H.Thomas, 1979:24})$$

yakni kerja positif, sebab h_1 besar dari h_2 .



Gambar 18
Turbin Gas

Contoh Soal 3.3

Suatu fluida mengalir melalui sebuah turbin dengan massa aliran 45 kg/menit. Menembus turbin dengan entalpi spesifik 580 dan turbin kehilangan 2100 kJ/menit dalam bentuk energi panas. Tentukanlah daya yang dihasilkan oleh turbin, diassumsikan bahwa perubahan energi kinetik dan energi potensial dapat diabaikan.

Penyelesaian :

Persamaan energi aliran mantap adalah :

$$Q - W = m \left[(h_2 - h_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g (z_2 - z_1) \right]$$

dimana :

Q = energi panas yang mengalir ke dalam sistem = - 2100 kJ/menit.

W = energi kerja yang mengalir dari sistem.

m = massa aliran fluida = 45 kg/menit.

$h_2 - h_1 = - 580$ kJ/menit.

$c_2^2 - c_1^2/2$ dan $(z_2 - z_1)$ diabaikan

Oleh karena itu, persamaan energi aliran mantap menjadi :

$$-2100 \text{ kJ/men} - W = 45 \text{ kg/men.} (- 580 \text{ kJ/kg})$$

$$W = (26100 - 2100) = 24000 \text{ kJ/menit.}$$

$$W = 400 \text{ kW}$$

4. Kompresor

Kerja dari sebuah kompresor adalah kebalikan dari sebuah turbin, yakni menggunakan energi kerja luar untuk menghasilkan suatu kenaikan tekanan. Dalam penggunaan persamaan energi aliran mantap untuk sebuah kompresor, kira-kira mempunyai argumen (pendapat) yang sama untuk sebuah turbin dan persamaan menjadi :

$$- W = m (h_2 - h_1) \quad (\text{T.H.Thomas, 1979 : 25})$$

Oleh karena h_2 lebih besar dari pada h_1 , maka kerja (W) akan menjadi negatif.

Contoh Soal 3.4

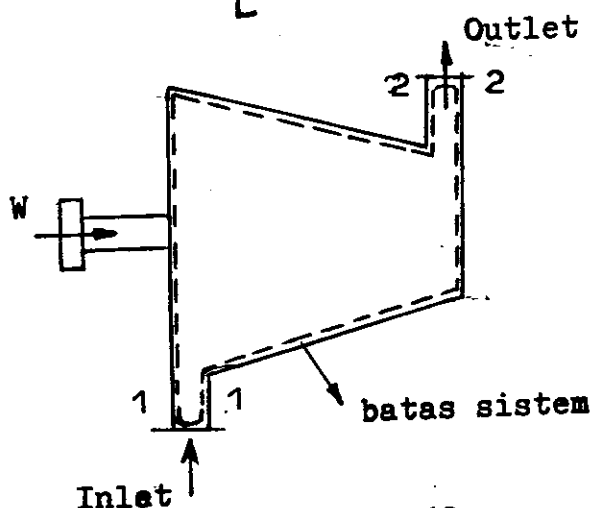
Sebuah kompresor mengalirkan fluida dengan massa 45 kg/menit. Pada pintu masuk (inlet) kompresor enthalpi spesifik 46 kJ/kg dan pada pintu keluar dari kom

pressor enthalpi spesifik fluida 175 kJ/kg. Jika 105 kJ /menit dari energi panas hilang ke lingkungan oleh kompressor, tentukanlah daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompressor, jika efisiensi penggerak 85 persen. Penyelesaian :

Massa aliran fluida = 45 kg/menit = 0,75 kg/det.

Persamaan energi aliran mantap adalah :

$$Q - W = m \left[(h_2 - h_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \right]$$



Gambar 19
Kompressor

$$Q = - 105 \text{ kJ/menit} = - 1,75 \text{ kJ/det.}$$

$$W = \text{energi kerja (kJ/det)}$$

$$h_1 = 46 \text{ kJ/kg.}$$

$$h_2 = 175 \text{ kJ/kg}$$

$$m = 0,75 \text{ kg/det.}$$

$$(c_2^2 - c_1^2)/2 \text{ dapat diabaikan.}$$

Selanjutnya di subsitusikan ke dalam persamaan energi aliran mantap, sehingga diperoleh :

$$- 1,75 \text{ kJ/det} - W = 0,75 \text{ kg/det} (175-46)\text{kJ/kg}$$

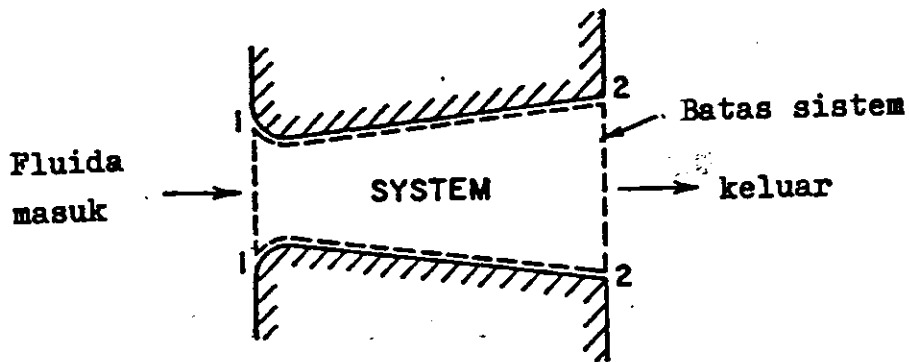
$$W = - 1,75 - (0,75 \times 129) \text{ kJ/det}$$

$$W = - 1,75 - 96,75 \text{ kJ/det} = - 98,5 \text{ kW.}$$

5. Pipa Pancar (Nozzle)

Suatu pipa pancar menggunakan tekanan untuk menghasilkan suatu kenaikan energi kinetik fluida. Persamaan energi aliran mantap adalah :

$$Q - W = m \left[(h_2 - h_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \right]$$



Gambar 20
Pipa Pancar

Hal-hal untuk dicatat :

- Kecepatan rata-rata aliran melalui pipa pancar adalah tinggi, dimana fluida mengalir hanya dalam waktu yang singkat pada pipa pancar. Untuk alasan ini, dapat diassumsikan bahwa tak cukup waktu untuk energi panas mengalir ke dalam dan keluar pipa pancar, yakni $Q = 0$.
- Karena sebuah pipa pancar tidak mempunyai bagian-bagian yang bergerak, maka tidak ada energi kerja yang dipindahkan ke pipa pancar atau dari pipa pancar, sehingga $W = 0$

Persamaan energi aliran mantap menjadi :

$$Q = m \left[(h_2 - h_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \right]$$

(T.H.Thomas, 1979 : 27)

Sering C_1 diabaikan dibandingkan C_2 . Pada kasus pipa pancar ini persamaan energi aliran mantap menjadi :

$$0 = m (h_2 - h_1) + \frac{C_2^2}{2}$$

$$\frac{C_2^2}{2} = (h_2 - h_1)$$

$$C_2 = \sqrt{2 (h_2 - h_1)}$$

Contoh Soal 3.5

Fluida dengan enthalpi spesifik 2800 kJ/kg memasuki sebuah pipa pancar dengan posisi horizontal, dimana kecepatan fluida masuk diabaikan, dan massanya 14 kg se tiap detik. Pada pintu keluar dan pipa pancar enthalpi spesifik menjadi 2250 kJ/kg dan volume jenis 1,25 m³/kg. Diassumsikan aliran adiabatik, tentukanlah luas pintu keluar yang dibutuhkan untuk pipa pancar.

Penyelesaian :

Persamaan energi aliran mantap untuk pipa pancar apabila kecepatan masuk diabaikan dan energi panas serta energi kerja sama dengan nol adalah :

$$\begin{aligned} C_2 &= \sqrt{2 (h_2 - h_1)} \\ &= \sqrt{2 (2800 - 2250) \times 10^3} \\ &= 1050 \text{ m/det.} \end{aligned}$$

Selanjutnya gunakan persamaan kontinuitas pada pintu keluar, sehingga diperoleh :

$$m = \frac{A_2 C_2}{V_2}$$

$$A_2 = m \times V_2 / C_2$$

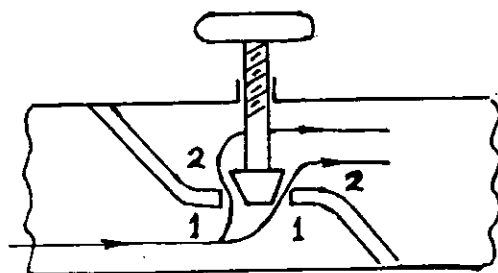
$$A_2 = 14 \text{ kg/det} \times 1,25 \text{ m}^3/\text{kg} / 1050 \text{ m/det}$$

$$A_2 = 0,01668 \text{ m}^2$$

6. Katup (Throttling)

Proses sebuah katup adalah dimana fluida mengalir melalui suatu batas (restriction), yakni suatu bagian yang dibuka oleh katup (valve) atau lobang (orifice) dan disebabkan oleh perbedaan tekanan fluida. Persamaan energi aliran mantap adalah :

$$Q - W = m \left[(h_2 - h_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \right]$$



Gambar 21
Katup (Throttling)

Hal-hal untuk dicatat

- Karena katup mempunyai jarak angkat yang sangat kecil, maka luas yang digunakan untuk energi panas dapat mengalir juga sangat kecil dan diassumsikan tidak ada energi yang hilang akibat perpindahan panas, yakni $Q = 0$.
- Karena tidak ada bagian yang bergerak, tidak ada energi yang dapat dipindahkan dalam bentuk energi kerja, sehingga $W = 0$.
- Perbedaan antara C_1 dan C_2 tidaklah besar dan sebaliknya besaran yang menyatakan perubahan energi kinetik umumnya diabaikan.

Persamaan energi aliran mantap menjadi :

$$0 = m (h_2 - h_1) \quad \text{atau} \quad h_2 = h_1$$

(T.H.Thomas, 1979 : 29)

yakni selama proses sebuah katup berlangsung, enthalpi tetap konstan.

Contoh Soal 3.6

Fluida mengalir sepanjang pipa yang mengalami suatu proses katup dari 10 bar sampai 1 bar. Volume jenis fluida sebelum katup terbuka $0,3 \text{ m}^3/\text{kg}$ dan sesudah katup terbuka $1,8 \text{ m}^3/\text{kg}$. Tentukanlah perubahan energi dalam spesifik selama proses katup berlangsung.

Penyelesaian :

Untuk proses sebuah katup berlaku :

$$m (h_2 - h_1) = 0$$

$$h_2 = h_1$$

$$h_2 = u_2 + p_2 v_2$$

$$h_1 = u_1 + p_1 v_1$$

Karenanya perubahan energi dalam spesifik (du) adalah :

$$\begin{aligned} du &= u_2 - u_1 \\ &= (h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1) \\ &= (h_2 - h_1) - (p_2 v_2 - p_1 v_1) \\ &= 0 - (1 \times 1,8 - 10 \times 0,3) \times 10^5 \\ &= 1,2 \times 10^5 \text{ J/kg} \\ &= 120 \text{ kJ/kg.} \end{aligned}$$

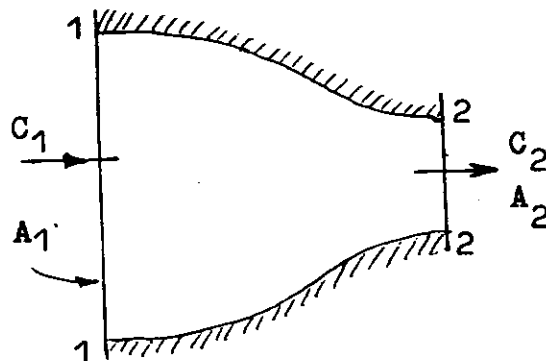
C. PERSAMAAN KONTINUITAS

Persamaan ini sering digunakan dalam hubungan dengan persamaan energi aliran mantap. Persamaan didasarkan pada kenyataan bahwa sebuah sistem dalam keadaan mantap, maka fluida yang mengalir pada setiap penampang harus konstan.

Perhatikanlah sebuah massa $m \text{ kg/det}$ mengalir me-

lalui sebuah sistem yang seluruh kondisinya mantap, seperti diilustrasikan dalam gambar 22.

Ambil A_1 = luas aliran pada pintu masuk (inlet) m^2 .
 A_2 = luas aliran pada pintu keluar (outlet) m^2 .
 v_1 = volume jenis pada pintu masuk m^3/kg .
 v_2 = volume jenis pada pintu keluar m^3/kg .
 C_1 = kecepatan fluida pada pintu masuk m/det .
 C_2 = kecepatan fluida pada pintu keluar m/det .



Gambar 22

Gas Mengalir Dalam Pipa

Massa fluida yang mengalir per detik = $\frac{\text{volume yang mengalir/detik}}{\text{volume per kg}}$

$$= \frac{A_1 C_1}{v_1} \text{ kg/det pada inlet}$$

$$= \frac{A_2 C_2}{v_2} \text{ kg/det pada outlet}$$

$$m = \frac{A_1 C_1}{v_1} = \frac{A_2 C_2}{v_2}$$

(T.D.Eastop, 1978 : 26)

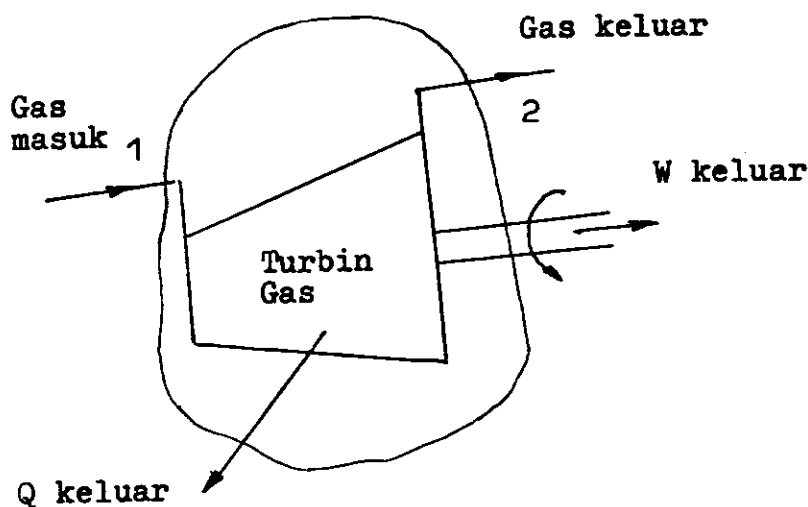
Contoh Soal 3.7

Dalam sebuah turbin gas, banyaknya gas yang mengalir melewati turbin adalah 17 kg/det dan daya yang

dihasilkan turbin adalah 14000 kW. Enthalpi gas pada inlet adalah 1200 kJ/kg dan pada outlet 360 kJ/kg. Kecepatan gas di inlet 60 m/det. dan di outlet 150 m/det. Hitunglah panas rata-rata yang dibuang dari turbin. Hitunglah luas penampang pipa inlet apabila volume jenis gas pada inlet $0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Penyelesaian :

Untuk memudahkan pengertian, perhatikanlah skema dalam gambar



Gambar 23

Skema Aliran Gas Pada Turbin Gas

Persamaan energi aliran mantap adalah :

$$Q - W = m \left[(h_2 - h_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \right]$$

Energi kinetik pada inlet = $c_1^2/2$

$$= (60 \text{ m/det})^2/2$$

$$= 1800 \text{ Nm/kg}$$

$$= 1,8 \text{ kJ/kg}$$

Energi kinetik pada outlet = $c_2^2/2$

$$\begin{aligned}\text{Energi kinetik pada outlet} &= (150 \text{ m/det})^2 \\ &= 11,25 \text{ kJ/kg.}\end{aligned}$$

Hasil-hasil ini disubsitusikan ke dalam persamaan energi aliran mantap di atas, sehingga diperoleh :

$$\begin{aligned}Q - 14 \times 10^6 &= 17 [(360000 - 1200000) + (11250 - 1800)] \\ Q - 14 \times 10^6 &= 17 [(-840000) + (9450)] \\ Q - 14 \times 10^6 &= 17 \times (-830550) \\ Q - 14 \times 10^6 &= - 14119350 \\ Q &= - 14119350 + 14000000 \\ Q &= - 119350 \text{ J/det} \\ Q &= - 119,35 \text{ kJ/det.}\end{aligned}$$

Dengan demikian, panas yang dikeluarkan oleh turbin adalah 119,35 kJ/det.

Untuk mencari luas pipa masuk, dapat digunakan persamaan kontinuitas, yakni :

$$m = \frac{A_1 C_1}{v_1} = \frac{A_2 C_2}{v_2}$$

$$A_1 = \frac{m \times v_1}{C_1}$$

$$\begin{aligned}A_1 &= \frac{17 \times 0,5}{60} \\ &= 0,142 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Jadi luas penampang pipa masuk adalah 0,142 m².

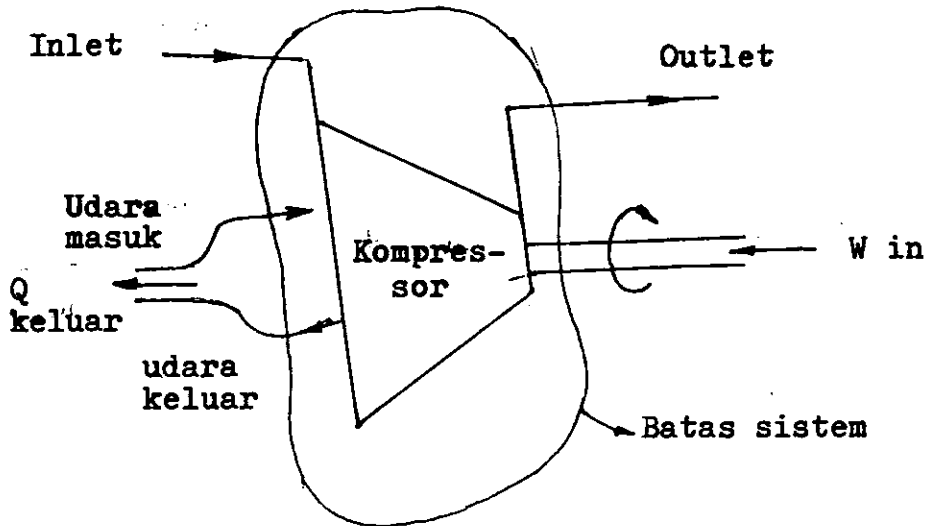
Contoh Soal 3.8

Udara mengalir dengan aliran mantap melalui sebuah kompresor. Kecepatan aliran masuk 6 m/det, tekanan 1 bar, volume jenis 0,85 m³/kg, dan massa fluida yang mengalir 0,4 kg/det. Pada waktu keluar kompresor dengan kecepatan 4,5 m/det. dan tekanannya 6,9 bar serta volume jenisnya 0,16 m³/kg. Energi dalam sewaktu keluar 88 kJ/kg lebih besar dari ketika masuk. Air pendingin di-

sekeliling silinder menyerap panas dari udara 59 kJ/det
Hitunglah daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor dan luas penampang pipa masuk dan keluar.

Penyelesaian :

Untuk memudahkan pengertian, perhatikanlah skema dalam gambar.



Gambar 24

Skema Aliran Gas Melalui Kompresor

Persamaan energi aliran mantap adalah :

$$Q - W = m \left[(h_2 - h_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \right] \text{ atau}$$

$$Q - W = m \left[(u_2 + p_2 v_2) - (u_1 + p_1 v_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \right]$$

atau

$$Q - W = m \left[(u_2 - u_1) + (p_2 v_2 - p_1 v_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \right]$$

$$m = 0,4 \text{ kg/det.}$$

$$u_2 - u_1 = 88 \text{ kJ/kg.}$$

$$p_1 v_1 = (1 \times 10^5) \times (0,85) = 85000 \text{ J/kg} = 85 \text{ kJ/kg}$$

$$p_2 v_2 = (6,9 \times 10^5) \times (0,16) = 110400 \text{ J/kg.}$$

$$Q = 59 \text{ kJ/det.}$$

$$C_1^2/2 = (6 \text{ m/det})^2 = 18 \text{ J/kg.}$$

$$C_2^2/2 = (4,5 \text{ m/det})^2 = 10,125 \text{ J/kg}$$

Hasil-hasil ini disubsitusikan ke dalam persamaan energi aliran mantap di atas, sehingga diperoleh :

$$59000 - W = m (88000) + (110400 - 85000) \\ + (10,125 - 18)$$

$$- W = (0,4 \times 113392,125) - 59000$$

$$W = 59000 - (0,4 \times 113392,125)$$

$$W = 13643,15 \text{ J/det.}$$

$$W = 13,64 \text{ kJ/det} = 13,64 \text{ kW}$$

Jadi daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompressor adalah 13,64 kW.

Untuk mencari luas pipa masuk dan keluar, dapat digunakan persamaan kontinuitas, yakni :

$$m = \frac{A_1 C_1}{v_1} = \frac{A_2 C_2}{v_2}$$

$$A_1 = \frac{m \times v_1}{C_1} = \frac{0,4 \times 0,85}{6} \\ = 0,057 \text{ m}^2$$

$$A_2 = \frac{m \times v_2}{C_2} = \frac{0,4 \times 0,16}{4,5} \\ = 0,014 \text{ m}^2$$

Jadi luas pipa masuk = $0,057 \text{ m}^2$ dan luas pipa keluar = $0,014 \text{ m}^2$.

D. SOAL-SOAL LATIHAN

1. Sebuah ketel menggunakan batu bara 3000 kg/jam dalam menghasilkan uap dengan enthalpi spesifik 2700 kJ/kg

dari air dengan enthalpi spesifik 280 kJ/kg. Pembakaran 1 kg batu bara menghasilkan 28000 kJ, yang mana 80 persen digunakan dalam menghasilkan uap. Hitunglah massa uap yang dihasilkan setiap jam.

(Kunci : 27800 kg/jam)

2. Fluida dengan enthalpi spesifik 2280 kJ/kg memasuki sebuah kondensor dan massanya 4500 kg/jam, serta meninggalkan kondensor dengan enthalpi spesifik 163 kJ per kg. Jika enthalpi air pendingin yang beredar melalui tabung kondensor naik menjadi 148000 kJ/menit, tentukanlah banyak energi panas yang mengalir dari kondensor ke udara luar.

(Kunci : 646000 kJ/jam)

3. Uap mengalir melalui sebuah turbin 4500 kJ/jam. Kecepatan uap pada inlet 15 m/det. dan pada outlet 180 m/det. Energi panas mengalir dari rumah turbin ke lingkungan 23 kJ/kg dari uap yang mengalir. Jika enthalpi spesifik uap turun 420 kJ/kg dalam turbin, hitunglah daya yang berguna.

(Kunci : 476 kW)

4. Suatu kompressor udara membutuhkan 11,5 kW untuk memutar udara yang massanya 2,3 kg/menit. Kompresor didinginkan dengan air yang mana enthalpi spesifik naik selama proses dan tidak melebihi 35 kJ/kg. Diasumsikan perubahan energi kinetik udara diabaikan, dan energi panas yang hilang ke udara luar diabaikan. Hitunglah banyak air pendingin yang dibutuhkan. Data berikut ini merupakan hubungan antara keadaan udara pada inlet dan outlet dari kompressor.

Penampang	tekanan	volume	energi dalam
		jenis	spesifik
	bar	m ³ /kg	kJ/kg

inlet	1,0	0,92	237
outlet	7,5	0,185	437

(kunci : 208 kg/jam.)

5. Suatu pipa pancar dialirkan uap yang mempunyai enthalpi spesifik 2780 kJ/kg dengan massa 9,1 kg/menit. Pada outlet dari pipa pancar, kecepatan uap 1070 meter per detik. Dianggap kecepatan uap pada inlet diabaikan dan proses adalah adiabatik; maka tentukanlah :

a. Enthalpi spesifik uap pada keluar pipa pancar

b. Luas pintu keluar yang dibutuhkan, jika volume jenis akhir uap $18,75 \text{ m}^3/\text{kg}$.

(Kunci : 2208 kJ/kg; 2660 mm^2)

6. Fluida dengan tekanan 10,35 bar mempunyai volume jenis $0,18 \text{ m}^3/\text{kg}$. Jika volume jenis fluida setelah katup dibuka $0,107 \text{ m}^3/\text{kg}$ dan tekanan 1 bar, maka hitunglah perubahan energi dalam spesifik.

(Kunci : + 175,7 kJ/kg)

7. Gas dengan enthalpi spesifik 840 kJ/kg mengalir melalui sebuah turbin yang massanya 680 kg/menit, dan meninggalkan turbin dengan enthalpi spesifik 640 kJ/kg. Dianggap bahwa proses adiabatik dan besaran energi kinetik diabaikan. Hitunglah daya yang berguna dari turbin.

(Kunci : 2276 kW)

8. Data berikut ini menyatakan keadaan suatu gas pada pipa pancar.

Penampang	Tekanan	volume jenis	energi dalam spesifik
	bar	m^3/kg	kJ/kg
inlet	4,8	0,520	725
intermediate	2,6	0,825	620
outlet	1,0	1,750	510

Dianggap kecepatan gas pada inlet diabaikan dan proses adalah adiabatik. Jika luas aliran pada penampang tengah (intermediate) 645 mm^2 , tentukanlah massa gas yang mengalir melalui pipa pancar dan luas outlet yang dibutuhkan.

(Kunci : $27,24 \text{ kg/menit}$; $0,001 \text{ m}^2$)

9. Suatu fluida A mempunyai enthalpi spesifik 2260 kJ/kg dialirkan ke dalam sebuah tangki dengan massa $0,75 \text{ kg/det}$. Fluida kedua B mempunyai enthalpi spesifik 160 kJ/kg juga mengalir ke dalam tangki. Selama percampuran, energi panas yang hilang ke udara luar 1260 kJ/menit . Jika spesifik enthalpi campuran aliran dalam tangki adalah 1040 kJ/kg , dan batasnya fluida tetap mantap, maka tentukanlah massa fluida B yang mengalir.

(Kunci : 1016 kg/det .)

10. Sebuah turbin uap menggunakan 3600 kg uap per jam. Pada inlet turbin, uap mempunyai kecepatan sebesar $27,5 \text{ m/det}$, dan enthalpi spesifik 3000 kJ/kg . Uap meninggalkan turbin dengan kecepatan $182,5 \text{ m/det}$, dan enthalpi spesifik 2220 kJ/kg . Jika proses adalah adiabatik, hitunglah daya output dari turbin.

(Kunci: 784 kW)

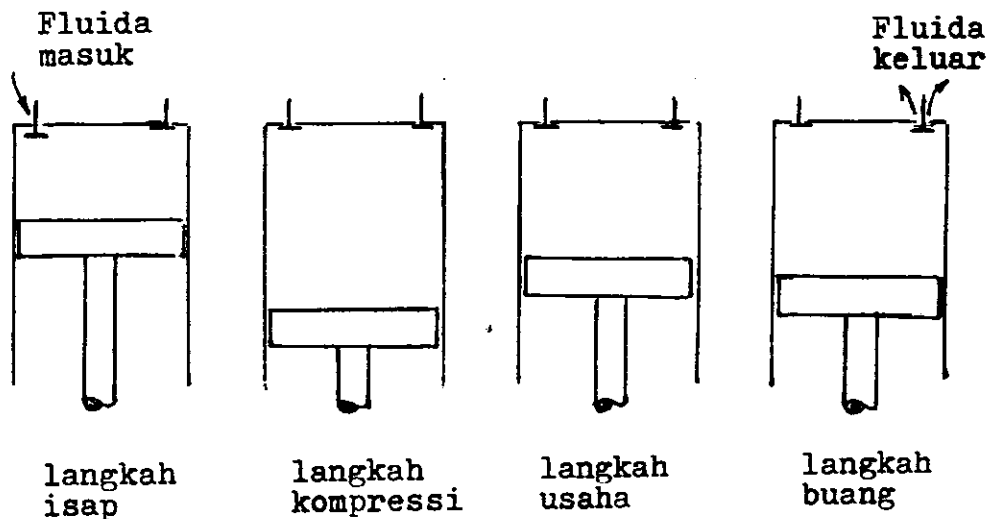
11. Udara memasuki sebuah kompresor sentrifugal dengan tekanan 1 bar dan meninggalkan kompresor dengan tekanan $2,1 \text{ bar}$. Selama udara melalui kompresor, energi dalam spesifik naik menjadi 56 kJ/kg dan volume jenis turun dari $0,825 \text{ m}^3/\text{kg}$ menjadi $0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$. Dianggap proses adalah adiabatik dan perubahan energi kinetik diabaikan. Tentukanlah daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor, bila udara mengalir dengan massa 135 kg/menit .

(Kunci : 177 kW)

BAB IV

PROSES NON ALIRAN

Dalam termodinamika, sering timbul dimana penggunaan persamaan energi dapat disederhanakan. Suatu fluida dimasukkan ke dalam suatu sistem, mungkin mengalami suatu seri proses yang mana fluida tidak mengalir. Suatu contoh adalah silinder dari sebuah motor bakar. Pada langkah isap, fluida kerja mengalir ke dalam silinder melalui katup isap sedangkan katup buang dalam tertutup. Sementara kedua katup tertutup atau silinder tertutup, fluida ditekan oleh gerakan piston ke dalam



Gambar 25

Proses Kerja Motor 4 Tak

silinder, setelah terjadi pembakaran timbullah energi panas, sehingga fluida memiliki energi yang cukup untuk mendorong piston turun kebawah, menyebabkan mesin melakukan kerja luar. Katup buang selanjutnya dibuka dan fluida mengalir keluar silinder menuju lingkungan. Proses yang dialami oleh sebuah sistem bila fluida kerja

tidak dapat menembus batas sistem dinamakan proses non aliran. Proses ini terjadi selama kompresi dan langkah usaha dalam contoh di atas. Persamaan energi umum yang disederhanakan dapat digunakan untuk proses ini dan dinamakan Persamaan Energi Non Aliran.

A. PERSAMAAN ENERGI NON ALIRAN

Dalam bagian yang lalu, satu bentuk persamaan energi umum dengan massa m kg/det. ditunjukkan sebagai berikut :

$$m \left(Z_1 g + \frac{c_1^2}{2} + u_1 + p_1 v_1 \right) + Q - W = m \left(Z_2 g + \frac{c_2^2}{2} + u_2 + p_2 v_2 \right)$$

Jika fluida mengalami suatu proses non aliran dari keadaan 1 ke keadaan 2, maka besaran $p_1 v_1$ dan $p_2 v_2$ (yang menyatakan jumlah energi kerja yang dibutuhkan untuk dimasukkan dan dikeluarkan dari sistem) akan sama dengan nol, sebab fluida sudah ada dalam sistem dan masih ada dalam sistem sampai proses selesai. Untuk alasan yang sama, perubahan energi kinetik dan energi potensial dari fluida juga sama dengan nol. Dengan demikian persamaan menjadi :

$$U_1 + Q - W = U_2$$

dimana $U_1 = m u_1$ dan $U_2 = m u_2$, atau

$$U_2 - U_1 = Q - W \quad (\text{T.D.Eastop, 1978 : 21})$$

Dalam kata-kata, persamaan ini menyatakan, bahwa dalam proses non aliran perubahan energi dalam dari fluida sama dengan jumlah energi panas bersih yang diberikan kepada fluida dikurangi dengan jumlah energi kerja.

Persamaan ini dinamakan persamaan energi non aliran, dan selanjutnya akan diuraikan dibawah ini, bagaimana persamaan di atas dapat diaplikasikan untuk berma-

cam-macam proses non aliran.

B. APLIKASI PERSAMAAN ENERGI NON ALIRAN

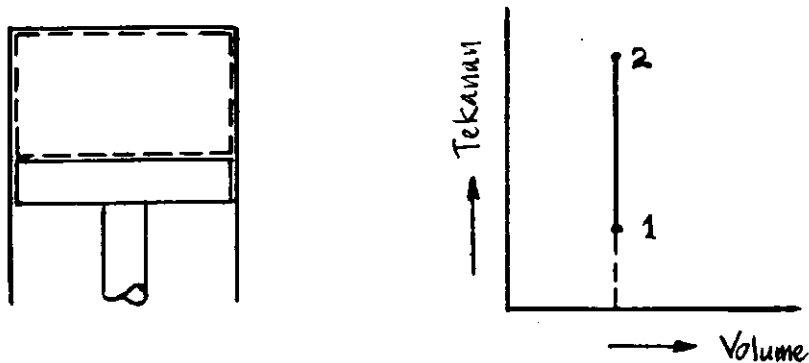
Persamaan energi non aliran dapat diaplikasikan untuk bermacam-macam proses non aliran sebagai berikut:

1. Proses volume konstan.
2. Proses tekanan konstan.
3. Proses adiabatik.
4. Proses polytropis.

Keempat macam proses non aliran di atas akan diuraikan satu per satu di bawah ini.

1. Proses Volume Konstan

Perhatikanlah sejumlah fluida yang berada dalam batas sistem, seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 26

Diagram Proses Volume Konstan

Jika volume tetap konstan, maka piston tidak bergerak. Jadi tidak ada energi yang dipindahkan dalam bentuk energi kerja, sehingga $W = 0$. Karenanya, jika ada perubahan energi maka diperoleh energi atau kehilangan energi oleh pemindahan energi panas. Jika U_1 menyatakan

energi dalam mula-mula dari fluida, U_2 menyatakan energi dalam akhir dari fluida, dan Q menyatakan jumlah bersih energi panas yang mengalir, maka pemakaian persamaan energi non aliran adalah :

$$Q - W = U_2 - U_1$$

$$Q - 0 = U_2 - U_1$$

$$Q = U_2 - U_1 \quad (\text{T.H.Thomas, 1979 : 36})$$

untuk suatu proses volume konstan.

Hasil ini adalah penting dan perlu diingat, menunjukkan bahwa jumlah bersih energi panas yang diberikan kepada atau dari suatu fluida selama suatu proses volume konstan adalah sama dengan perubahan energi dalam dari fluida.

Contoh Soal 4.1

Energi dalam spesifik dari suatu fluida naik dari 120 kJ/kg menjadi 180 kJ/kg selama proses volume konstan. Tentukanlah energi panas yang dibutuhkan untuk 2 kg fluida.

Penyelesaian :

Persamaan energi non aliran adalah :

$$Q - W = U_2 - U_1$$

Untuk proses volume konstan, $W = 0$
dan persamaan menjadi :

$$\begin{aligned} Q &= U_2 - U_1 \\ &= 180 - 120 \\ &= 60 \text{ kJ/kg.} \end{aligned}$$

Untuk 2 kg fluida,

$$Q = 2 \text{ kg} \times 60 \text{ kJ/kg} = 120 \text{ kJ.}$$

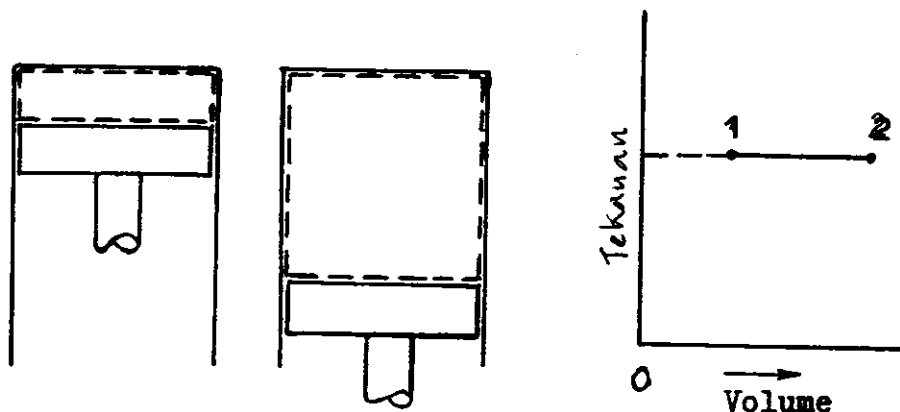
Jadi energi panas yang dibutuhkan = 120 kJ.

2. Proses Tekanan Konstan

Perhatikanlah sejumlah fluida berada dalam batas sistem pada keadaan 1, seperti ditunjukkan pada gambar 27. Jika tekanan fluida tetap konstan $P \text{ N/m}^2$, jumlah energi yang dipindahkan dalam bentuk energi kerja dengan gerakan piston dari volume $V_1 \text{ m}^3$ sampai $V_2 \text{ m}^3$ adalah

$$W = P (V_2 - V_1)$$

Jika U_1 dan U_2 menyatakan keadaan energi dalam mula-mula dan akhir dari fluida, Q menyatakan jumlah energi



Gambar 27

Diagram Proses Tekanan Konstan

panas, maka persamaan energi non aliran menjadi :

$$Q - W = U_2 - U_1$$

$$Q - P (V_2 - V_1) = U_2 - U_1$$

$$Q = U_2 - U_1 + P (V_2 - V_1)$$

$$= (U_2 + P_2 V_2) - (U_1 + P_1 V_1) \quad (\text{Thomas, 1979})$$

$$\text{Dimana } P = P_1 = P_2$$

Dalam bab 3, besaran dari bentuk $(U + PV)$ adalah dinam-

kan enthalpi dan ditulis dengan H atau mh , dimana m adalah massa fluida dan h adalah enthalpi spesifik. Dengan demikian :

$$H_1 = U_1 + P_1 V_1$$

$$H_2 = U_2 + P_2 V_2$$

$$Q = H_2 - H_1 = m (h_2 - h_1)$$

untuk suatu proses reversibel tekanan konstan.

Hasil ini juga penting dan perlu diingat, menunjukkan bahwa jumlah bersih energi panas yang diberikan kepada atau dari suatu fluida selama proses reversibel tekanan konstan adalah sama dengan perubahan enthalpi dari fluida selama proses.

Contoh Soal 4.2

2,25 kg fluida mempunyai volume $0,1 \text{ m}^3$ berada dalam sebuah silinder dengan tekanan konstan 7 bar. Energi panas diberikan untuk fluida sampai volume menjadi $0,2 \text{ m}^3$. Jika spesifik enthalpi mula-mula 210 kJ/kg dan spesifik enthalpi akhir 280 kJ/kg , tentukanlah :

- Jumlah energi panas yang diberikan kepada fluida.
- perubahan energi dalam.

Penyelesaian :

Untuk suatu proses tekanan konstan berlaku persamaan :

$$\begin{aligned} Q &= H_2 - H_1 = m (h_2 - h_1) \\ &= 2,25 \text{ kg} (280 \text{ kJ/kg} - 210 \text{ kJ/kg}) \\ &= 157,5 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Untuk menjawab pertanyaan b, maka dapat diselesaikan dengan dua metoda berikut ini.

Metoda 1 :

$$H = U + PV$$

Setiap kg fluida :

$$h_1 = 210 \text{ kJ/kg}$$

$$v_1 = 0,1/2,25 = 0,0445 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\begin{aligned} u_1 &= h_1 - p_1 v_1 \\ &= 210000 - 7 \times 10^5 \times 0,0445 \\ &= 210000 - 31150 = 178850 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama, maka diperoleh :

$$h_2 = 280 \text{ kJ/kg}$$

$$v_2 = \frac{0,2}{2,25} = 0,089 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\begin{aligned} u_2 &= h_2 - p_2 v_2 \\ &= 280000 - 7 \times 10^5 \times 0,089 \\ &= 280000 - 62300 \\ &= 217700 \text{ J/kg} = 217,7 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Perubahan energi dalam per kg :

$$\begin{aligned} du &= u_2 - u_1 \\ &= 217700 - 178850 \\ &= 38850 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

Perubahan energi dalam untuk 2,25 kg :

$$\begin{aligned} du &= 2,25 \times 38850 \\ &= 87500 \text{ J} \\ &= 87,5 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Metoda 2 :

Untuk suatu proses tekanan konstan :

$$\begin{aligned} W &= P (V_2 - V_1) \\ &= 7 \times 10^5 \times (0,2 - 0,1) \\ &= 70000 \text{ J} \end{aligned}$$

Gunakan persamaan energi non aliran :

$$Q - W = U_2 - U_1$$

$$157500 - 70000 = U_2 - U_1$$

$$U_2 - U_1 = 157500 - 70000$$

$$U_2 - U_1 = 87500 \text{ J} = 87,5 \text{ kJ}$$

Jadi perubahan energi dalam = 87,5 kJ.

3. Proses Adiabatis

Dalam suatu proses adiabatik, tidak ada energi panas yang diizinkan untuk menembus batas sistem (biasanya dengan mengisolasi batas). Q adalah nol. Bila U_1 dan U_2 = energi dalam mula-mula dan akhir dari sistem, dan W = jumlah kerja bersih yang mengalir dari sistem. Gunakan persamaan energi non aliran. (Thomas, 1979:39) :

$$0 - W = U_2 - U_1$$

$$W = U_1 - U_2$$

Ini artinya, jika W positif maka $(U_1 - U_2)$ harus juga positif, yakni energi dalam akhir lebih kecil dari energi dalam mula-mula. Karenanya, jika sebuah sistem melakukan kerja luar pada lingkungan selama suatu proses adiabatik non aliran, kerja yang dilakukan dengan mengurangi energi dalam dari sistem. Sebaliknya, jika kerja dilakukan pada sistem selama suatu proses adiabatik non aliran, maka energi dalam dari sistem akan naik.

Contoh Soal 4.3

Selama proses ekspansi adiabatik, 0,5 kg fluida memindahkan 43,5 kJ energi kerja. Tentukanlah energi dalam spesifik dari fluida selama proses berlangsung.

Penyelesaian :

Persamaan energi non aliran adalah :

$$Q - W = U_2 - U_1$$

Untuk suatu proses adiabatik, maka :

$$0 - W = U_2 - U_1$$

$$U_2 - U_1 = -W$$

$$U_2 - U_1 = -43,5 \text{ kJ}$$

Perubahan energi dalam untuk 0,5 kg = -43,5 kJ

Perubahan energi dalam untuk 1 kg adalah :

$$U_2 - U_1 = -43,5/0,5 = -87 \text{ kJ/kg}$$

Jadi energi dalam turun selama proses.

4. Proses Polytropik

Ini adalah jenis proses yang paling umum, yang mana energi panas dan energi kerja menembus batas sistem. Proses ini dinyatakan dengan suatu persamaan dalam bentuk (T.H.Thomas, 1979 : 39) :

$$PV^n = \text{konstan}$$

dimana n adalah indeks ekspansi dan kompresi dan merupakan suatu konstanta. Jika suatu fluida berubah dari keadaan awal (1) ke keadaan akhir (2) dengan suatu proses, maka jumlah energi kerja yang menembus batas sistem adalah :

$$W = \frac{P_1 V_1 - P_2 V_2}{n - 1}$$

Karenanya, pemakaian persamaan energi non aliran untuk suatu proses polytropik adalah :

$$Q - W = U_2 - U_1$$

$$Q - \frac{P_1 V_1 - P_2 V_2}{n - 1} = U_2 - U_1$$

(T.H.Thomas, 1979:40)

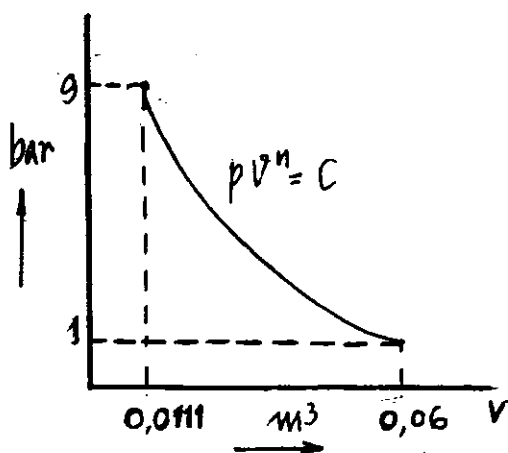
Contoh Soal 4.4

Suatu silinder berisi 0,07 kg fluida yang mempunyai tekanan 1 bar, volume $0,06 \text{ m}^3$, dan energi dalam

spesifik 200 kJ/kg. Setelah kompresi polytropis, tekanan menjadi 9 bar, volume 0,0111 m³, dan energi dalam spesifik 370 kJ/kg. Tentukanlah :

- Jumlah energi kerja yang dibutuhkan untuk kompresi.
- Jumlah energi panas dan arahnya mengalir selama kompresi.

Penyelesaian :



Gambar 28

Diagram Proses Polytropis

Jumlah energi kerja yang dibutuhkan untuk kompresi adalah :

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{P_1 V_1 - P_2 V_2}{n - 1} \\
 &= \frac{(1 \times 10^5 \times 0,06) - (9 \times 10^5 \times 0,0111)}{1,302 - 1} \\
 &= \frac{6 - 9,99}{0,302} \\
 &= - 13,2 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa energi kerja akan mengalir ke dalam sistem selama proses.

- Untuk suatu proses poly - tropis :

$$P V^n = C = \text{konstan}$$

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$$

Dalam hal ini :

$$1 \times 0,06^n = 9 \times 0,0111^n$$

$$\left(\frac{0,06}{0,0111} \right)^n = 9$$

$$5,4^n = 9$$

$$n = 1,302$$

b. Persamaan energi non aliran :

$$Q - W = U_2 - U_1$$

$$Q - (-13,2) = (370 \times 0,07) - (200 \times 0,07)$$

$$Q + 13,2 = 25,95 - 14$$

$$Q = 25,95 - 14 - 13,2$$

$$Q = - 1,3 \text{ kJ}$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa energi panas mengalir keluar sistem selama proses berlangsung.

C. SOAL-SOAL LATIHAN

1. Selama suatu proses non aliran, volume dari 1,35 kg fluida tetap konstan sebesar 0,27 m³. Tekanan awal dari fluida 7 bar dan enthalpi spesifik 465 kJ/kg. Jika energi dalam spesifik 256 kJ/kg, hitunglah energi panas yang dipindahkan selama proses.

(Kunci : - 93,1 kJ)

2. Sebuah bola tertutup dengan diameter dalam 1 m berisi fluida yang mempunyai volume jenis 0,375 m³/kg. Jika 100 kJ energi panas diberikan kepada fluida, tentukanlah perubahan energi dalam spesifik.

(Kunci : + 71,5 kJ/kg)

3. Sebuah silinder berisi 0,014 m³ fluida dengan tekanan 7 bar, yang mempunyai enthalpi spesifik 695 kJ/kg dan volume jenis 0,00125 m³/kg. Energi panas diberikan sampai volume fluida menjadi 0,28 m³, tekanan tetap 7 bar. Jika energi dalam spesifik dari fluida 885 kJ/kg, hitunglah :

a. massa fluida

b. volume jenis akhir

c. energi panas yang diberikan.

d. energi kerja yang dipindahkan.

(Kunci : 11,2 kg ; 0,025 m³/kg ; 2324 kJ ; 186,2 kJ)

4. Selama suatu proses non aliran, 05 kg uap didinginkan pada tekanan konstan dari volume $0,3 \text{ m}^3$ menjadi $0,028 \text{ m}^3$. Jika energi yang dipindahkan selama proses 900 kJ dalam bentuk energi panas dan 81,6 kJ dalam bentuk energi kerja, tentukanlah tekanan uap dan perubahan energi dalam spesifik.

(Kunci : 3 bar ; - 1636,8 kJ/kg)

5. Jika sebuah sistem mengalami suatu proses adiabatik non aliran, yang mana 90 kJ dari energi kerja dipindahkan dari lingkungan ke dalam sistem dan energi dalam dari sistem berubah menjadi 37 kJ/kg. Hitunglah massa fluida yang ada dalam sistem.

(Kunci : 2,43 kg)

6. Suatu fluida yang ada dalam sebuah silinder mengalami suatu proses adiabatik, yang mana 40 kJ energi kerja dipindahkan ke lingkungan, dilanjutkan dengan suatu proses volume konstan dimana 53 kJ energi panas dipindahkan ke lingkungan. Jika massa fluida dalam silinder 2 kg, hitunglah perubahan energi dalam spesifik tiap-tiap proses, dan juga secara keseluruhan perubahan energi dalam dari fluida.

(Kunci : - 20 kJ/kg ; - 26,5 kJ/kg ; - 93 kJ)

7. Sejumlah fluida volumenya $0,56 \text{ m}^3$ dan tekanan 1 bar. Setelah suatu proses kompresi yang mengikuti hukum $PV^n = \text{konstan}$, tekanan dan volumenya menjadi 6,3 bar dan $0,14 \text{ m}^3$. Hitunglah nilai indeks n dan energi kerja yang dipindahkan, jika energi dalam dari fluida naik 85 kJ selama proses. Hitung juga energi panas yang dipindahkan.

(Kunci : 1,328 ; - 98,2 kJ ; - 13,2 kJ)

8. Sebuah silinder berisi 0,75 kg fluida pada tekanan 7 bar. Fluida mengembang menurut hukum $PV^{1,27} = \text{kon}$ -

stan sampai tekanan 1,4 bar. Volume jenis awal 0,25 m^3/kg . Hitunglah volume akhir dari fluida. Jika 33kJ energi panas dipindahkan ke fluida selama proses ekspansi, hitunglah perubahan energi dalam spesifik dari fluida.

(Kunci : 0,665 m^3 ; - 142,8 kJ/kg)

DAFTAR PUSTAKA

Eastop, T.D dan A. Mc. Conkey, Applied Thermodynamics for Engineering Technologist, Logman Group Limited, 1978.

Sulaiman Kamil dan Parwito, Termodinamika dan Perpindahan Panas 1, Jakarta, Depdikbud, 1983.

Thomas, T.H dan R. Hunt, Applied Heat, London, Heinemann Educational Books, 1979.

Werlin. S. Nainggolan, Termodinamika, Teori-Soal-Penyelesaian, Bandung, Armico, 1976.