

PRINSIP DASAR KONVERSI ENERGI

PERPUSTAKAAN UNIV. NEGERI PADANG	
TERIMA ISL :	15 November 2000
SUMBER / HARGA :	Hadiah
KOLEKSI :	R.i
NO. INVENTARIS :	2659 / 21 2000 - 1 / 2 /
KLASIFIKASI :	621.042 Dar - 10

Oleh

Drs. Darmawi, M.Pd



FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2000

KATA PENGANTAR

Berkat Rahmat Tuhan Yang Maha Esa, serta didorong oleh semangat yang tinggi, akhirnya berhasil juga disusun buku Prinsip Dasar Konversi Energi ini.

Buku ini merupakan dasar atau langkah awal untuk mempelajari seluk-beluk panas dan proses konversi energi panas kepada bentuk energi lain yang dibutuhkan oleh manusia dalam kehidupan sehari-hari.

Di dalam buku ini suatu materi atau hukum konversi energi selalu diterangkan dengan cara-cara yang sederhana dan dilengkapi dengan beberapa contoh soal sebagai aplikasi dari hukum tersebut. Dengan demikian akan mempermudah para pembaca untuk memahaminya, sehingga dapat membantu pembaca untuk menerapkannya di lapangan.

Untuk kesempurnaan buku ini penulis menerima kritik & saran yang bersifat membangun dari para pembaca. Akhirnya penulis mengucapkan banyak terima kasih.

Padang, April 2000.

Penulis.

DAFTAR ISI

BAB	HALAMAN
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL	iv
I. PENDAHULUAN	1
A. Gaya, Tekanan dan Kerja	3
B. Temperatur dan Panas	4
C. Daya dan System	7
D. Dymensi (Satuan)	8
II. HUKUM I THERMODINAMIKA	13
A. Konservasi Energi	13
B. Persamaan Non Aliran (Non Flow Equation)	15
C. Persamaan Aliran (Flow Equation)	18
III. FLUIDA KERJA	28
A. Cair, Uap dan Gas	28
B. Penggunaan Tabel Uap	35
C. Gas Sempurna dan Panas Jenis Gas	57
IV. PROSES YANG DAPAT DIBALIK DAN TIDAK DAPAT DIBALIK ..	72
A. Proses Non Aliran Dapat Dibalik	72
B. Proses Non Aliran Adiabatik yang Dapat Dibalik ..	82
C. Proses Polytropik	89
D. Proses yang Tidak Dapat Dibalik	97
DAFTAR KEPUSTAKAAN	102

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR	HALAMAN
1. 1. Gambaran Timbulnya Usaha	4
1. 2. Gambaran Perpindahan Panas	6
1. 3. System	8
2. 1. System Panas Pada Turbin Uap	14
2. 2. System Terbuka	19
2. 3. Fluida Dalam Inlet	20
2. 4. Turbin Gas	24
2. 5. Kompresor	25
3. 1. Diagram P-V Untuk Awal Penguapan Pada Tekanan yang Berbeda-beda	29
3. 2. Diagram P-V Untuk Akhir Penguapan pada Tekanan yang Berbeda-beda	30
3. 3. Diagram P-V Untuk Penguapan	31
3. 4. Garis Temperatur Pada Diagram P-V	33
3. 5. Hubungan Tabel Uap Dengan Diagram P-V	38
3. 6. Diagram P-V Untuk Menentukan Keadaan Uap	45
3. 7. Interpolasi Tengah	47
3. 8. Interpolasi Atas	48
3. 9. Interpolasi Bawah	48
3.10. Interpolasi Temperatur Terhadap Tekanan	51
3.11. Interpolasi Enthalpy Terhadap Tekanan	51
3.12. Interpolasi Tenaga Dalam Terhadap Tekanan	52
3.13. Hubungan Keadaan Uap Dengan Diagram P-V	56
4. 1. Diagram P-V, P-T dan V-T untuk Isovolume	73
4. 2. Diagram P-V, P-T dan V-T untuk Isobaric	76
4. 3. Diagram P-V Isobaric	78
4. 4. Diagram P-B Isobaric Gas Ideal	80
4. 5. Diagram P-V Isothermal	81
4. 6. Diagram P-V Proses Adiabatik	88
4. 7. Diagram P-V Proses Polytropik	93
4. 8. Diagram P-V Proses Polytropik Untuk Beberapa Keadaan	94
4. 9. Ekspansi Bebas	98

DAFTAR TABEL

TABEL	HALAMAN
I. 1. BESARAN DAN SATUAN	9
I. 2. KELIPATAN DAN SYMBOL	10
I. 3. ANGKA KONVERSI	11
III. 1. SIMBOL DAN NOTASI TABEL UAP	36
III. 2. TABEL UAP PANAS LANJUT	43
III. 3. INTERPOLASI GANDA	54
III. 4. PANAS JENIS GAS	64

BAB I

PENDAHULUAN

Semua benda hidup tergantung kepada energi (tenaga) untuk kelangsungan hidupnya, dan suatu peradaban moderen dapat berkembang pesat, bila ada sumber energi yang dapat dikembangkan untuk kelangsungan hidupnya. Energi terdapat dalam beberapa bentuk dari energi yang terikat pada atom suatu benda sampai kepada panas yang dipancarkan dengan kuat oleh matahari, dan sumber energi lainnya seperti energi kimia dari bahan bakar dan energi potensial dari massa air. Sumber energi tersebut ada yang telah diketahui, dan mungkin juga ada yang belum diketahui oleh manusia. Suatu sumber energi yang telah didapat harus ditranspormasikan ke dalam bentuk energi lain yang sesuai dengan kebutuhan manusia. Energi potensial dari massa air yang besar, dirobah kebentuk energi listrik, sebagaimana air tersebut melewati sudut turbin air disaat di menuju laut dari pegunungan. Energi pembakaran dari batu bara digunakan untuk menghasilkan tenaga uap untuk membangkitkan energi listrik. Energi pembakaran dari petrolium digunakan untuk memanaskan udara yang mengembang dan mendorong piston pada mesin pembakaran didalam silinder (Internal Combustin Enggine), sehingga dapat dihasilkan energi mekanik. Uranium dibomkan, dan energi nuklir yang dilepaskan, dan digunakan untuk membangkitkan energi listrik. Mesin-mesin semacam itu sudah dikembangkan lebih dari 2 abad yang lalu.

Thermodinamika terapan merupakan ilmu tentang hubungan antara panas, kerja dan sifat-sifat dari system. Hal ini sangat erat hubungannya dengan pesawat yang dapat merubah energi panas dari suatu sumber kebentuk energi lain yang dibutuhkan oleh manusia, misalnya energi pembakaran menjadi kerja mekanik, energi panas proses kimia menjadi energi listrik.

Mesin panas merupakan nama yang diberikan kepada suatu system yang bekerja dalam suatu cyclus panas yang menghasilkan jaringan suatu sumber panas yang tersedia. Hukum-hukum thermodinamika merupakan hypothesis natural hasil dari observasi terhadap alam lingkungan hidup manusia. Hukum ini mempelajari bahwa panas dan kerja merupakan 2 bentuk yang saling dapat berubah.

Hal ini merupakan dasar dari hukum pertama thermodinamika. Hukum ini juga menyatakan bahwa panas tidak pernah bergerak dari suatu benda yang bertemperatur rendah ke benda yang bertemperatur tinggi tanpa bantuan atau suplay tenaga.

Dalam hal yang sama air juga tidak dapat mengalir ke atas, jika tidak ada bantuan (suplay) tenaga. Hal ini merupakan dasar dari hukum thermodinamika II, yang dapat digunakan untuk menunjukkan bahwa mesin panas tidak dapat merubah semua energi panas yang tersedia menjadi energi mekanik. Karena sebahagian panas akan berubah bentuk ke bentuk lain yang bukan energi mekanik, dan biasanya bentuk ini tidak diinginkan.

A. Gaya, Tekanan dan Kerja

1. Gaya (poros).

Gaya merupakan massa dikalikan dengan percepatan ber arti

$$F = m \cdot a. \quad (1. 1)$$

m = massa benda (kg)

a = percepatan benda (m/dt^2)

Jadi

$$F = m(\text{kg}) \times a(\text{m}/\text{dt}^2)$$

$$F = N$$

2. Tekanan (pressure).

Tekanan adalah gaya yang bekerja setiap satuan luas permukaan.

Berarti

$$P = \frac{F}{A} \quad (1. 2)$$

F = gaya yang menekan (g)

A = luas permukaan (m^2)

Jadi satuan tekanan

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

Tekanan atmosfer standart adalah 1,01325 bar = 0,76 m Hg.

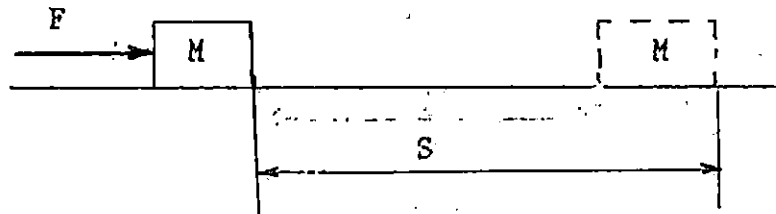
Biasanya tekanan standart ditulis 1 bar = $10^5 N/m^2$
= $10^5 Pa$.

3. Kerja (Work)

Kerja adalah gaya dikalikan dengan jalan yang ditempuh.

Misalkan sebuah benda didorong dengan sebuah (F) seper-

ti gambar 1.1. Akibat dorongan gaya tadi sehingga benda berpindah sejauh (S).



Gambar 1.1. Gambaran timbulnya usaha

Berarti kerja yang dilakukan oleh benda adalah gaya dikalikan jarak perpindahan (jalan).

Atau

$$w = F \cdot S \quad (1.3)$$

F = gaya yang bekerja (N)

S = jarak perpindahan yang sejajar dengan arah gaya (m)

Jadi

$$\begin{aligned} W &= F \text{ (N)} \cdot S \text{ (m)} \\ &= F \cdot S \cdot \text{N} \cdot \text{m} = F \cdot S \text{ Joule} \end{aligned}$$

B. Temperatur dan Panas.

1. Temperatur.

Energi kinetik dari suatu molekul yang bergetar dari suatu zat ternyata dapat disentuh. Pengalasan ini menunjukkan adanya derajat panas yang dinamakan temperatur (suhu). Jadi temperatur adalah ukuran energi

kinetik rata-rata yang dimiliki oleh semua molekul suatu zat. Zat yang panas (bertemperatur tinggi) lebih banyak mengandung tenaga kinetik tiap molekul dari zat yang dingin. Temperatur dapat dikatakan potensial, misalnya pada zat cair diberi skala ukuran temperatur yaitu termometer. Jika termometer dipanaskan, maka air raksa yang berada didalamnya akan memuai. Berarti temperatur bertambah, tenaga potensial juga ikut bertambah. Jadi energi potensial dari suatu benda dapat diukur dari tinggi skala temperaturnya.

Suatu benda yang bertemperatur rendah cenderung jarak molekulnya semakin rapat, yang dapat mengakibatkan terjadinya penyusutan, dan bila temperatur dinaikan molekul zat cenderung memisah satu sama lainnya, yang disebut dengan peristiwa pemuaian, dengan demikian perubahan temperatur dapat diukur dengan penyusutan atau pemuaian.

2. Panas

Dulu orang mengatakan, bahwa panas adalah kalori yang merupakan zat alir yang tidak tampak yang mengisi ruangan-ruangan diantara molekul suatu zat. Panas selalu mengalir dari benda yang panas ke benda yang dingin bila disentuh.

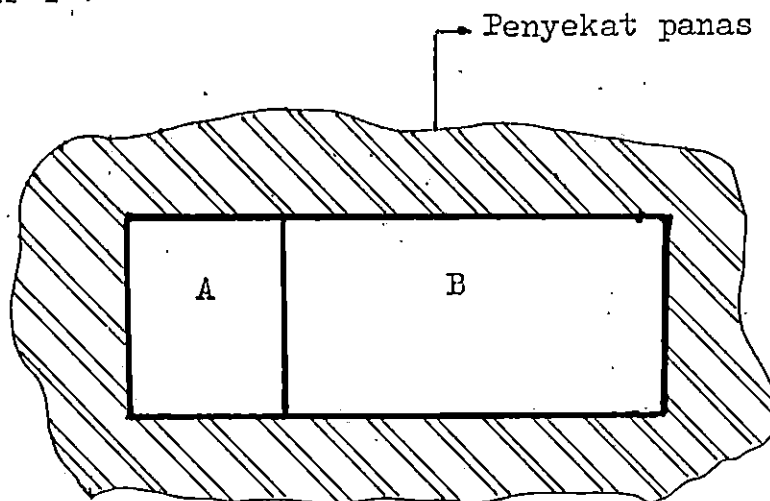
Count Rumport seorang Insinyur tidak setuju dengan pendapat itu, Ia menyatakan bahwa panas adalah tenaga.

Teori panas moderen menyatakan bahwa panas adalah tenaga mekanik. Internal energi suatu benda merupakan

tenaga getaran molekul-molekul benda itu sendiri. Bila suatu benda dipanaskan, maka molekulnya bergetar kuat, hal ini menyebabkan terjadinya pemuaian yang digambarkan dengan kenaikan suhu. Getaran molekul semakin kuat, bila panas yang dipindahkan semakin besar. Teori ini lambat laun dapat diterima setelah James Prescott Joule melakukan percobaan yang membuktikan bahwa :

Panas = kerja

Sebagai ilustrasi tentang panas perhatikan gambar 1 :



Gambar 1.2. Gambaran perpindahan panas

Bila benda A dengan temperatur 20°C , dihubungkan dengan benda B 21°C , maka akan terjadi perpindahan panas dari B ke A sama temperatur A dan B sama (seimbang). Bila temperatur A dan B sudah sama, maka tidak akan terjadi lagi perpindahan panas antara keduanya, sehingga benda itu dikatakan dalam keadaan thermal

seimbang. Panas hanya dapat dirasakan selama proses perpindahan berlangsung, oleh karena itu merupakan energi yang tidak kekal. Karena energi panas bergerak dari B ke A, maka ada reduksi energi pada dasarnya yang dimiliki B dan peningkatan energi A. Energi suatu benda merupakan fungsi dari temperatur. Janganlah dikelirukan dengan panas. Panas tidak pernah dikandung oleh suatu benda atau dimiliki oleh suatu benda.

C. Daya dan System.

1. Daya (Power).

Daya adalah kerja yang dilakukan tiap detik.

Jadi

$$P = \frac{W}{t} \quad (1.4)$$

W = kerja (joule)

t = lamanya waktu berlangsungnya kerja (detik)

$$P = \frac{W}{t} \frac{\text{joule}}{\text{dt}}$$

$$P = \frac{W}{t} \text{ watt}$$

$$P = \frac{F \cdot S}{t} \left(\frac{\text{Nm}}{\text{dt}} \right) \quad \frac{S}{t} = V \text{ (kecepatan)}$$

$$P = F \cdot V \text{ watt}$$

F = Gaya yang bekerja (N)

S = Jarak perpindahan yang diukur sejajar dengan arah gaya (m)

t = Lamanya waktu perpindahan (dt).

Untuk tenaga listrik, Daya = Ampere x volt

$$I = A \times V \quad (1.5)$$

Atau

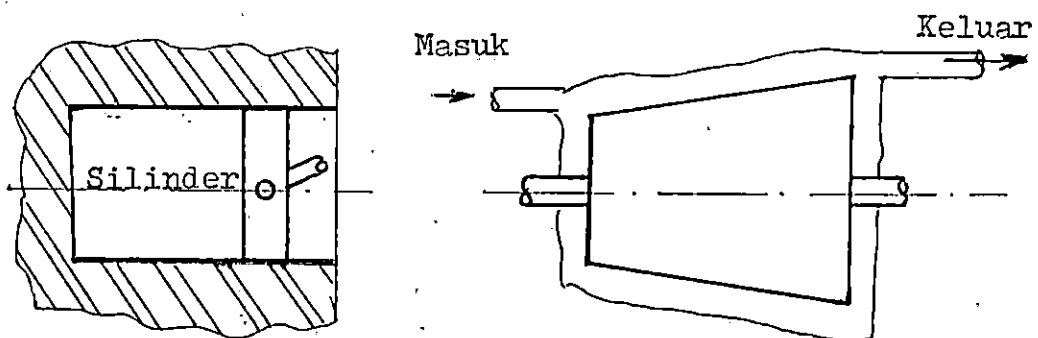
$$1 \text{ watt} = 1 \text{ ampere} = 1 \text{ volt}$$

A = kuat arus (ampere)

V = tegangan (volt)

2. System

System dapat didefenisikan sebagai suatu susunan dari benda-benda dalam batasan tertentu dan dapat diidentifikasi. Batasan tersebut tidak harus infleksible. Misalnya cairan atau gas yang berada dalam suatu silinder mesin yang sedang berjalan dalam suatu langkah ekspansi, dapat didefenisikan sebagai suatu system yang batasnya adalah dinding silinder dan piston. Bila piston bergerak didalam silinder, maka batasannya juga bergerak, perhatikan gambar 1.3.



(a) Tertutup

(b) Terbuka

Gambar 1.3. System

System seperti ini dikenal dengan system tertutup, sedangkan system terbuka adalah bila terdapat perpindahan sejumlah massa dari batasan, misalnya fluida dalam suatu turbin air. Air tersebut keluar dari turbin pindah ke tempat lain. Hal inilah yang dinamakan system terbuka yang batasannya diperlihatkan dalam gambar 1.3. Di dalam buku ini hanya akan diterangkan system tertutup saja.

D. Dymensi (Satuan)

Dewasa ini dikenal 3 macam satuan yang dipakai diantaranya : satuan matrik, satuan british dan satuan System Internasional (SI). Satuan SI ditetapkan pada tahun 1960. Di dalam buku ini satuan yang akan dipakai adalah satuan System Internasional.

Adapun unit (satuan) dan symbol yang dipakai dalam SI unit adalah seperti Tabel I.1. (Anwari 1978 ; 18).

Tabel I.1. BESARAN DAN SATUAN

Besaran (symbol)	Satuan (lambang)
Panjang (L)	Meter (m)
Massa (m)	Kilogram (kg)
Waktu (t)	Detik (dt), Menit (mt)
Temperatur biasa (t)	Derajat celsius ($^{\circ}\text{C}$)
Temperatur mutlak (T)	Derajat Kelvin ($^{\circ}\text{K}$)
Molekul benda (mol)	Mole (mol)
Luas (A)	Meter persegi (m^2)
Volume (V)	Meter kubik (m^3)
Massa jenis (ρ)	Kilogram permeterkubik ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
Momen Inersia (I)	Kilogram meter persegi (kgm^2)
Gaya, Berat (F,B)	Newton (N)
Momen Puntir (Mpt)	Newton meter (Nm)

Besaran (symbol)	Satuan (lambang)
Energi (E) Kerja (W) Jumlah panas (Q)	Joule (J) Joule = Newton meter
Daya (P) Tekanan (p) Tegangan (\mathcal{J}) Hantaran panas (k) Entropy (hi) Panas Jenis (C)	Watt (w), $J/dt = W$ Pascal (Pa), (N/m^2) $Pa = N/m^2$ watt permeter Kelvin (W/mK) Joule per Kelvin (J/K) Joule per kilogram Kelvin (J/kgK)

Menurut Rayner Joel (1974 : 709), kelipatan yang dipakai pada SI seperti pada tabel I.2.

TABEL I.2. KELIPATAN DAN SIMBOL

Nama	Symbol	Kelipatan	Penulisan disingkat
Terra	T	1 000 000 000 000	10^{12}
Giga	G	1 000 000 000	10^9
Mega	M	1 000 000	10^6
kilo	k	1 000	10^3
hekto	h	1 00	10^2
deka	da	1 0	10^1
Dymensi yang bersangkutan (N, J, kg, Watt, dan sebagainya)			
desi	d	0,1	10^{-1}
senti	c	0,01	10^{-2}
milli	m	0,001	10^{-3}
mikro	u	0,000 001	10^{-6}
nana	n	0,000 000 001	10^{-9}
piko	p	0,000 000 000 001	10^{-12}
fento	f	0,000 000 000 000 001	10^{-15}
atto	a	0,000 000 000 000 000 001	10^{-18}

Untuk merubah dari satu system satuan ke system lainnya, misalnya satuan British ke satuan System Internasional untuk dymensi yang sama (panjang, kepanjang), maka

harus dikali atau dibagi dengan bilangan yang dinamakan angka konversi (perubah). Pada Tabel I.3. diuraikan angka konversi satuan British ke satuan SI. (Anwari 1978 . 34)

TABEL I.3. ANGKA KONVERSI

Konversi dari	ke	Dikali dengan
(1)	(2)	(3)
<u>Panjang</u>		
Feet (ft)	m	0,3048
Inch (in)	mm	25,4
Mikri inch (u in)	u	0,0254
Milo	km	1,609
<u>Luas</u>		
Square inch (sq in)	mm ²	645,2
Square inch (sq in)	cm ²	6,452
Square inch (sq in)	m ²	0,000 645
Square feet (sq ft)	m ²	0,082 90
Acres (are)	ha	0,4047
<u>Volume</u>		
Cubic inch (cu in)	mm ³	16 387
(cu in)	cm ³	16,387
(cu in)	m ³	0,000 016 39
Cubic feet (cu ft)	m ³	0,028 32
Quarte (US)	l (liter)	0,9464
Gallon (US)	l (liter)	3,785
<u>Massa</u>		
Pounds (lb)	kg	0,453 59
<u>Gaya Berat</u>		
Pounds gaya (lb)	N (Newton)	4,448
Kilogram gaya (kg)	N	9,81
<u>Tekanan, Tegangan</u>		
Pounds/Sq inch (psi)	Pa (Pascal)	6 895
psi	kPa	6,895
psi	MPa	0,006 895
kg/m ²	Pa	9,807
Barometer (bar)	kPa	100
(bar)	Pa	100 000
Millibar (mbar)	Pa	100

Konversi dari	ke	Dikali dengan
(1)	(2)	(3)
<u>Energi, Kerja</u>		
British Thermal Uni (BTU)	Joule (J)	1 055
Foot pound force (Epf)	J	1,356
Calori (cal)	J	4,186 8
<u>Daya (Power)</u>		
BTU/h (h=jam)	watt	0,293 1
BTU/dt	watt	1 055
Horse power ((HP)(TK)	kwatt	0,746
<u>Massa Jenis</u>		
Pounds massa/cu ft (lb/cu ft)	kg/m ³	16,018
<u>Debet (Volume aliran rata-rata)</u>		
Cu ft/menit	m ³ /mt	0,028 32
Gallon (US)/menit	l/mt	3,785
<u>Debet (Massa aliran rata-rata)</u>		
lb/menit	kg/menit	0.453 6
<u>Energi/Luas waktu</u>		
BTU/sq ft second	W/m ²	11 348
BTU/sq ft hour	W/m ²	3.1525
<u>Thermal Conductivity</u>		
BTU inch/hour feet °F	W/mK	0,1442
<u>Thermal Concuctance</u>		
BTU/hour feet. °F	W/m ² K	5,678
<u>Energi Specifik, Panas Laten</u>		
BTU/lb	J/kg	2326
<u>Panas Specifik, Entropy Specifik</u>		
BTU/lb °K	J/kg K	4184
<u>Unggun</u>		
cu ³	yard ³	0,000 001 308
cu ³	Gallon (US)	0,000 264 2
atmosfir standart	bar	1,013 25
atmosfir standart	cm Hg (°)	76
Barrel (US)	Gallon (US)	31,5
Barrel (US)	N m ³	0,119 24

BAB II

HUKUM I THERMODINAMIKA

A. Konservasi Energi.

Konsep energi dan hypothesis yang mengatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan, dirusak dan dimusnahkan. Hal ini dikembangkan oleh para ahli dewasa ini, yang dikenal dengan hukum konservasi energi atau Hukum Kekekalan Energi. Hukum pertama thermodynamika, hanya suatu pernyataan prinsip umum yang utama tentang energi panas dan energi mekanik.

Bila pada suatu system, tidak dapat menghasilkan energi sendiri, maka supaya terjadi proses pada system tersebut, harus disuplay energi dari sumber lain, dengan demikian sesuai dengan prinsip konservasi energi bahwa : kerja yang dilakukan oleh suatu system harus sama dengan energi yang diterimanya. Pada suatu system yang mengalami syclus thermodynamika akan berlaku kaedah : Panas yang disuplay oleh sekelilingnya akan sama dengan kerja yang dilakukan terhadap sekelilingnya dengan demikian dapat ditulis sebagai berikut :

$$\text{Panas} = \text{kerja}$$

atau

$$dQ = dW \quad (2. 1)$$

Contoh soal 2.1.

Sebuah turbin uap yang menghasilkan tenaga sebesar 10^3 kw. Panas yang disuplay untuk pembuat uap di dalam

ketel 2800 kJ/kg uap. Panas yang diambil oleh air pendingin di dalam kondensor 2100 kJ/kg uap. Tenaga yang dibutuhkan untuk memompakan cairan kembali ke ketel sebesar 5 kw. Hitunglah banyak uap yang mengalir mengitari proses dalam kg/detik.

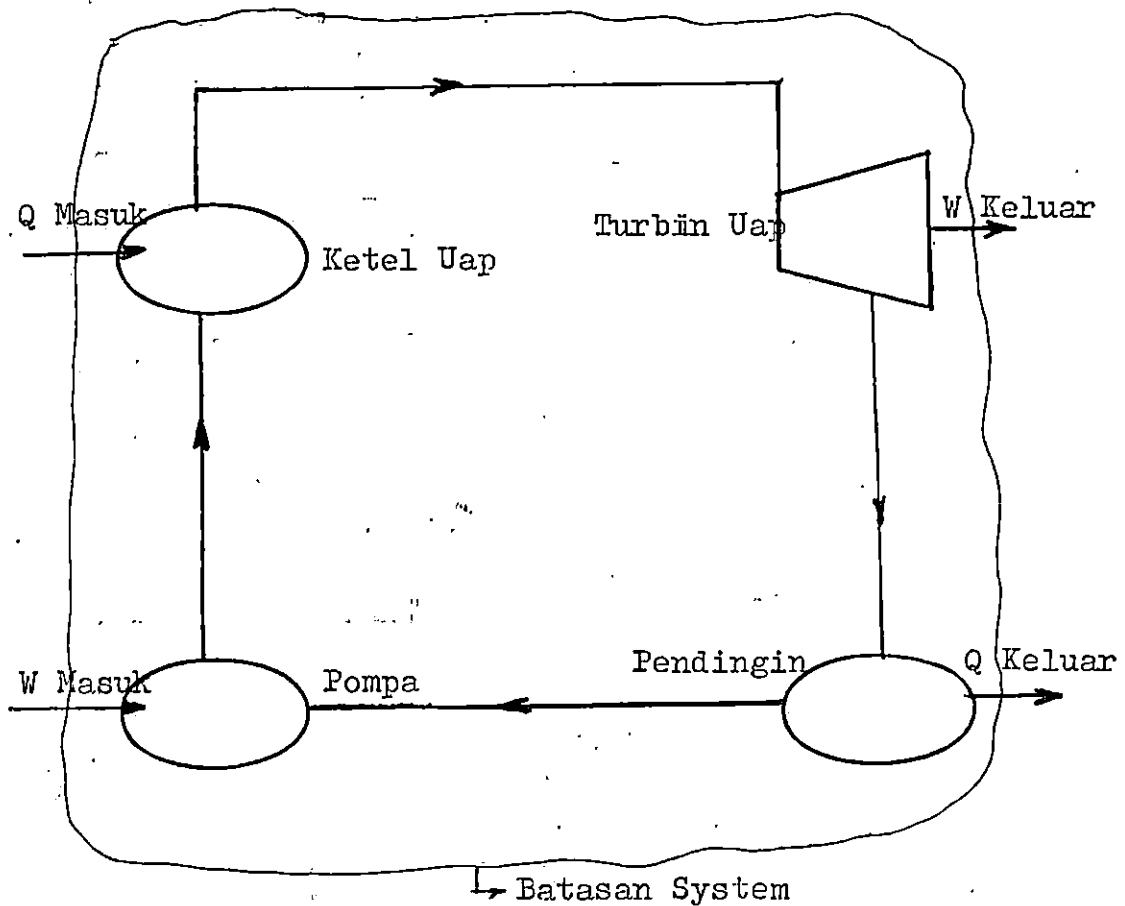
Jawab :

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

dimisalkan uap yang mengalir m kg/dt

$$dQ = 700 \text{ kJ/kg} \cdot m \text{ kg/dt}$$

$$dQ = 700 \cdot m \text{ kJ/dt.}$$



Gambar 2.1. Syclus panas pada turbin uap

$$dW = 1000 - 5 = 995 \text{ kw} = 995 \text{ kJ/dt}$$

$$dQ = dW$$

$$700 \cdot m = 995$$

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

Jadi banyaknya uap yang mengalir mengitari syclus adalah :

$$m = 1,421 \text{ kg/dt.}$$

B. Persamaan Non Aliran (Non Flow Equation).

Di dalam suatu syclus energi intrinsik naik (dasar) akan jelas terlihat dalam suatu sirkulasi panas yang dirubah menjadi kerja, yang mana panas yang diberikan kerja yang dilakukan. Pernyataan ini tepat untuk suatu syclus yang sempurna, dimana energi intrinsik awal sama dengan energi intrinsik akhir dari suatu proses. Dalam suatu proses ternyata energi intrinsik suatu system pada akhirnya lebih besar dari energi intrinsik awalnya. Perbedaan ini terdapat pada panas yang disuplay dan kerja yang dihasilkan.

Non aliran maksudnya tidak ada pengaliran, baik masuk maupun keluar dari system (tempatnya), selama proses berlangsung. Di dalam suatu silinder motor, pada saat proses pembakaran terjadi, tidak ada fluida masuk ataupun keluar dari silinder, maka permukaannya dimasukkan persamaan non aliran.

Suatu fluida yang terkurung dalam suatu system mempunyai energi intrinsik yang dikenal dengan symbol u.

Energi itu tergantung pada temperatur, tekanan dan jenis fluida. Bila temperatur dinaikan energi intrinsik akan ikut bertambah besar dan bila temperatur diturunkan menjadi rendah tenaga dalam akan besar, dan bila tekanan tinggi tenaga dalam akan mengecil.

Tenaga dalam (intern energi) dari sekelompok fluida dengan massa m adalah :

$$U = m \cdot u \text{ kJ} \quad (2. 2)$$

Bila internal energi dari suatu interval proses adalah :

$$U = U_2 = U_1$$

maka :

Internal energi yang diperoleh adalah panas yang diberikan dikurangi dengan kerja yang dilakukan.

atau

$$U_2 - U_1 = dQ - dW$$

$$U_2 - U_1 = Q - W \text{ (dikenal dengan persamaan non aliran)}$$

$$Q = (U_2 - U_1) + W \quad (2. 3)$$

atau

$$Q = (u_2 - u_1) + W \quad (2. 4)$$

$$dQ = du + dW \quad (2. 5)$$

Persamaan 2.2, 2.3, 2.4, dan 2.5 reversible (dapat dibalik) atau irrevesible (tidak dapat dibalik). Untuk proses non aliran dapat dibalik berlaku persamaan :

$$W = \int_1^2 p dv \quad (2. 6)$$

$$dW = p \, dv$$

$$dQ = du + p \, dv \quad (2.7)$$

$$Q = (u_2 - u_1) + \int_1^2 p \cdot dv \quad (2.8)$$

Persamaan 2.7 dan 2.8 hanya dapat dipakai untuk proses non aliran dapat dibalik secara ideal.

Contoh soal :

Untuk melakukan langkah kompresi suatu motor bakar diperlukan tenaga sebesar 90 kJ/kg. Air pendingin menyerap panas selama langkah kompresi 45 kJ/kg. Hitunglah perubahan tenaga dalam yang dialami fluida, apakah dimasukan atau dikeluarkan.

Jawab :

$$Q = -45 \text{ kJ/kg} \quad (- = \text{menunjukkan panas dikeluarkan})$$

$$W = -90 \text{ kJ/kg} \quad (- = \text{menunjukkan kerja dimasukkan})$$

$$Q = (u_2 - u_1) + W$$

$$-45 = (u_2 - u_1) - 90$$

$$u_2 - u_1 = 45 \text{ kJ/kg} \quad (\text{dimasukkan})$$

Jadi perubahan tenaga dalam adalah 45 kJ/kg dimasukkan.

Contoh soal 2.3.

Di dalam sebuah silinder motor udara dikompresi dengan tenaga dalam 420 kJ/kg pada awal langkah kompresi, dan 200 kJ/kg setelah ekspansi. Hitunglah jumlah panas yang mengalir keluar atau masuk ke dalam silinder, bila kerja yang dihasilkan selama ekspansi 100 kJ/kg.

Jawab :

$$\begin{aligned} Q &= (u_2 - u_1) + W \\ &= (200 - 420) + 100 \\ &= - 120 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Berarti panas dikeluarkan sebesar 120 kJ/kg.

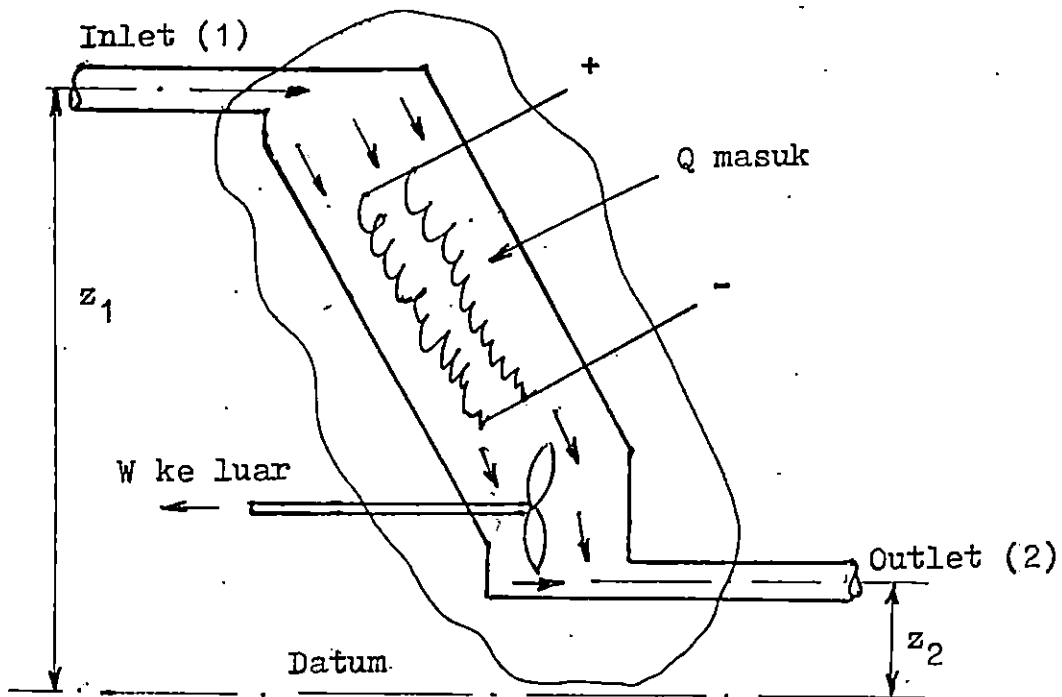
C. Persamaan Aliran (flow equation).

Persamaan aliran maksudnya proses terjadi, pada saat terjadinya pengaliran fluida baik keluar maupun ke dalam system. Bila 1 kg fluida dengan internal energi u , mengalir dengan kecepatan C dan tinggi dari datum level adalah Z , maka jumlah energi yang dikandung (dibawa) oleh fluida tersebut tiap satuan massa menurut Eastop, Thomas D, (1978 ; 23). adalah :

Tenaga dalam + Tenaga kecepatan + Tenaga potensial.
atau

$$u + \left(\frac{C^2}{2} \right) + Zg \quad (2. 9)$$

Di dalam prakteknya fluida yang mengalir melalui sebuah mesin atau instrumen lainnya kecepatannya dianggap konstan (tetap). Aliran dengan kecepatan konstan inilah yang dinamakan steady flow (aliran tenang). 1 kg fluida yang mengalir secara steady flow melalui sebuah mesin yang merupakan sebuah system terbuka seperti gambar 2.2. Seksi masuk dinamakan inlet dan seksi keluar dinamakan out let. Fluida yang mengalir secara steady flow tersebut akan memberikan panas sebesar Q tiap kg fluida kepada system,



Gambar 2.2. System terbuka.

dan tiap kg fluida akan melakukan atau membutuhkan kerja di dalam system selama melalui pesawat.

Supaya 1 kg fluida tersebut dapat mengalir melalui suatu system, harus ditekan dengan suatu energi dari luar. Perhatikan gambar 2.3. dimisalkan panjang elemen fluida yang akan ditekan adalah L , luas penampang inlet (alat masuk) A_1 , maka energi yang dibutuhkan untuk menekan fluida tersebut :

= tekanan x luas penampang x panjang elemen fluida

$$= (P_1 \cdot A_1) L$$

Jadi $A_1 \cdot L = \text{Volume } (V_1)$

$$= P_1 \cdot V_1$$

Berarti energi yang dibutuhkan untuk menekan fluida pada seksi inlet (sisi masuk) adalah : tekanan x volume. Jadi energi yang dibutuhkan dalam menekan 1 kg fluida pada inlet adalah :

$$= P_1 \cdot v_1 \quad (2.10)$$

sedangkan energi yang dibutuhkan pada out let (sisi keluar) adalah :

$$= P_2 \cdot v_2 \quad (2.11)$$

Energi yang dibutuhkan diatas adalah energi tiap satuan masa fluida, tentu :

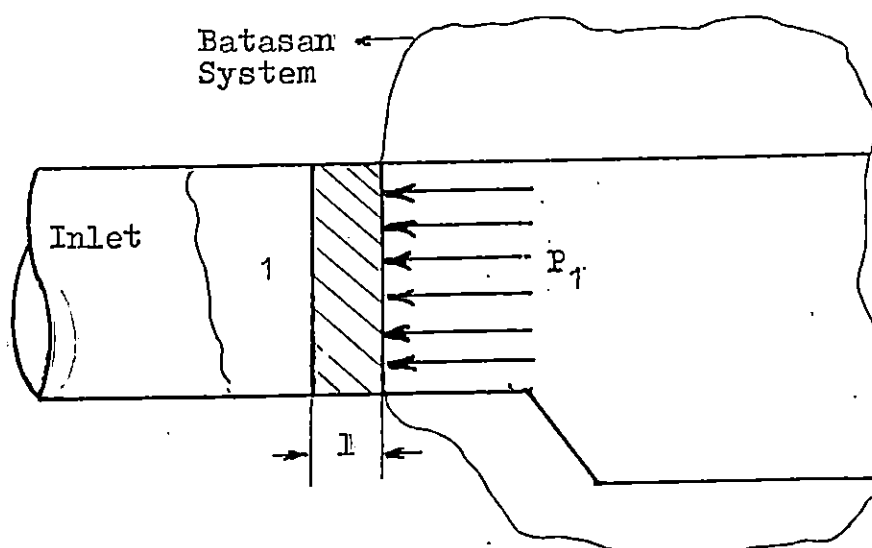
P_1 = tekanan fluida pada inlet.

P_2 = tekanan fluida pada out let.

v_1 = volume jenis fluida pada inlet

v_2 = volume jenis fluida pada out let.

Volume jenis adalah volume fluida tersebut setiap satuan massa.



Gambar 2.3. Fluida dalam inlet

Energi total yang harus dimiliki oleh suatu fluida saat akan memasuki inlet adalah :

= tenaga dalam + tenaga kinetik + tenaga potensial + tenaga tekanan + panas yang dibawanya.

Tenaga dalam pada inlet = u_1

Tenaga kinetik pada inlet = C_1^2

Tenaga potensial pada inlet = $Z_1 \cdot g$

Jarak suatu inlet ke garis tertentu = Z_1

Grafitasi bumi = g .

Tenaga tekanan pada inlet = $P_1 \cdot v_1$

Panas yang dibawa fluida pada inlet = Q

Jumlah energi yang dituliskan di atas dapat ditulis sebagai berikut :

$$= u_1 + \frac{C_1^2}{2} + Z_1 \cdot g + P_1 \cdot v_1 + Q \quad (2.12)$$

Energi total yang harus dimiliki oleh suatu fluida pada saat meninggalkan outlet (sisi keluar) adalah :

= tenaga dalam outlet + tenaga kinetik pada outlet + tenaga potensial pada outlet + tenaga tekanan pada outlet + kerja yang dilakukan fluida sebelum keluar ke outlet.

Tenaga dalam outlet = u_2

Tenaga kinetik outlet = C_2^2

Tenaga potensial outlet = $Z_2 \cdot g$

Jarak sumbu outlet ke garis tertentu yang sama dengan $Z_1 = Z_2$

Grafitasi bumi = g .

Tenaga tekanan pada out let = $P_2 \cdot v_2$

Kerja yang dilakukan fluida sebelum keluar ke out

let = W

Pernyataan di atas dapat ditulis sebagai berikut :

$$= u_2 + \frac{C_2^2}{2} + Z_2 \cdot g + P_2 \cdot v_2 + W \quad (2.13)$$

Menurut hukum kekekalan energi, bahwa tidak ada tenaga yang hilang didalam suatu proses, melainkan berubah kebentuk lain, maka energi total pada inlet harus sama dengan energi total yang keluar pada outlet. Jadi persamaan 2.12. harus sama dengan persamaan 2.13, sehingga didapat hubungan sebagai berikut :

$$u_1 + \frac{C_1^2}{2} + Z_1 \cdot g + P_1 \cdot v_1 + Q = u_2 + \frac{C_2^2}{2} + Z_2 \cdot g + P_2 \cdot v_2 + W$$

Jumlah tenaga dalam (intrinsik) dengan tenaga tekanan dinamakan enthalpy (h), yaitu :

$$h = u + p \cdot v \quad (2.14)$$

Berarti enthalpy sangat dipengaruhi oleh tenaga dalam, energi (tenaga) tekanan, volume spesifik dan temperatur.

Jika inlet dan out let sama tinggi (horizontal) tentu :

$$Z_1 \cdot g = Z_2 \cdot g \quad (2.15)$$

Substitusikan persamaan 2.14 dan 2.15 ke dalam persamaan gabungan 2.12 dan 2.13 sehingga didapat :

$$h_1 + \frac{C_1^2}{2} + Q = h_2 + \frac{C_2^2}{2} + W \quad (2.16)$$

Persamaan 2.16 dinamakan persamaan energi aliran steady.

Enthalpy fluida dengan massa m adalah :

$$H = m \cdot h \quad (2.17)$$

Pada aliran steady massa fluida yang mengalir disetiap titik selalu sama, jadi :

$$m = \frac{C \cdot A}{v} \quad (2.18)$$

Persamaan 2.18 dinamakan persamaan kontinuitas massa.

dimana :

C = kecepatan aliran

A = luas penampang yang dilalui fluida

v = volume spesifik

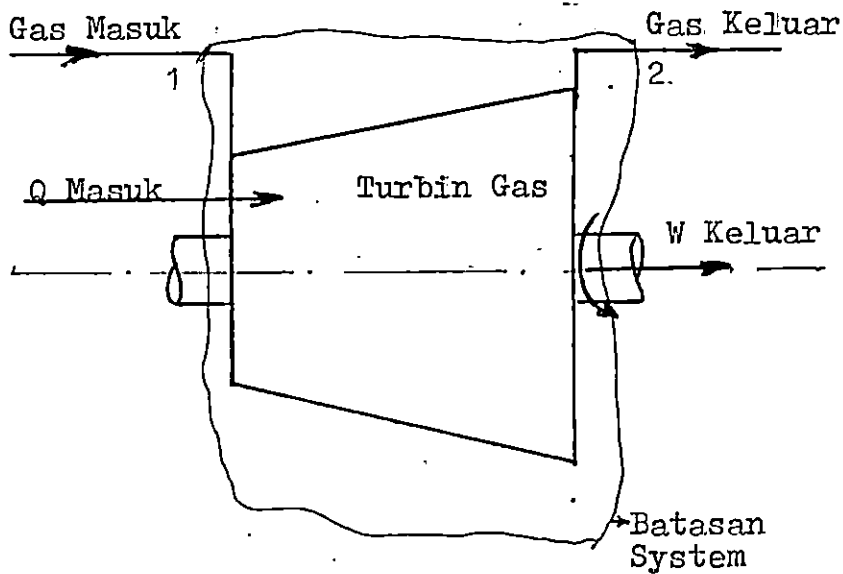
m = massa aliran rata-rata.

Persamaan 2.18 juga dapat ditulis sebagai berikut :

$$m = \frac{C_1 \cdot A_1}{v_1} = \frac{C_2 \cdot A_2}{v_2} = \dots = \frac{C_n \cdot A_n}{v_n}$$

Contoh soal 2.4.

Suatu unit turbin gas menerima gas 17 kg/dt, dan tenaga yang dihasilkan turbin 14 Mwatt. Enthalpy pada inlet 1200 kJ/kg dan pada outlet 350 kJ/kg. Kecepatan gas pada inlet 60 m/dt, sedangkan pada outlet 150 m/dt. Hitunglah jumlah panas rata-rata yang diserap oleh turbin, jika volume spesifik gas pada inlet 0,5 m³/kg. Skematika turbin seperti gambar 2.4.



Gambar 2.4. Turbin gas

Jawab :

Energi kinetik pada inlet :

$$\frac{C_1^2}{2} = \frac{60^2}{2} \quad \frac{\text{m}^2}{\text{dt}^2} = 1800 \quad \frac{\text{Nm}}{\text{kg}} = 1,8 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

satuan

$$\frac{\text{m}^2}{\text{dt}^2} = \frac{\text{m}}{\text{dt}^2} \times \frac{\text{kg}}{\text{kg}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{dt}^2} \times \frac{\text{m}}{\text{kg}} = \frac{\text{Nm}}{\text{kg}}$$

Energi kinetik pada out let =

$$\frac{C_2^2}{2} = \frac{150^2}{2} = 11,25 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$W = \frac{14\,000}{17} = 823,50 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_1 + \frac{C_1^2}{2} + Q = h_2 + \frac{C_2^2}{2} + W$$

$$1200 + 1,8 Q = 360 + 11,25 + 823,5$$

$$Q = - 7,02 \text{ kJ/kg.}$$

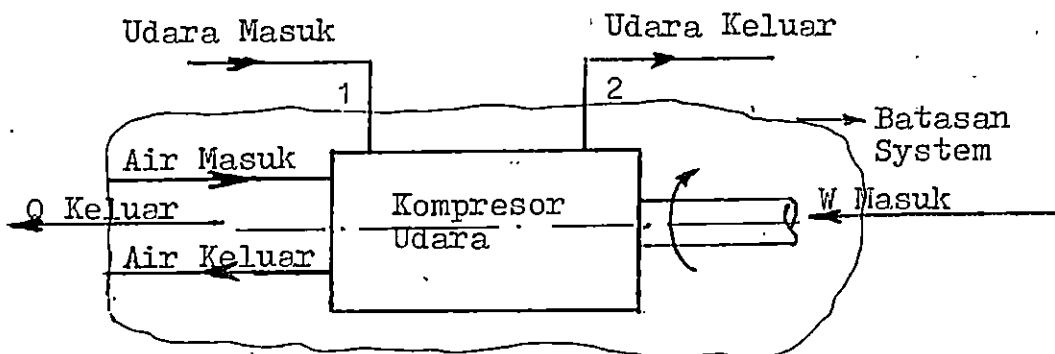
Jadi panas yang diserap oleh turbin adalah 7,02 kJ/kg
119,3 kW.

Luas inlet dapat dicari sebagai berikut :

$$m = \frac{C \cdot A}{v} \cdot A = \frac{v \cdot m}{C} = \frac{17,05}{60} = 0,142 \text{ m}^2$$

Contoh soal 2.5.

Udara mengalir secara steady dengan massa aliran rata-rata 0,45 kg/dt, melalui sebuah kompresor dengan data sebagai berikut : Pada inlet kecepatan 6 m/dt , tekanan 1 bar, volume spesifik 0,85 m³ /kg, dan pada out let, kecepatan 4,5 m/dt, tekanan 6,9 bar, volume spesifik 0,16 m³ /kg. Internal energi pada inlet 88 kJ/kg lebih kecil dari pada out let. Air pendingin pada jaket penyerap panas dari udara rata-rata 99 kJ/dt. Hitung daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor, luas in let dan out let. Kompresor dipasang horizontal ($Z_1 = Z_2$) seperti gambar 2.5.



Gambar 2.5. Kompresor

Jawab :

Panas yang hilang dalam kompresor equivalen dengan panas yang hilang diserap air pendingin.

$$\frac{C_1^2}{2} = \frac{6^2}{2} = 18 \text{ J/kg.}$$

$$\frac{C_2^2}{2} = \frac{4,5^2}{2} = 10,1 \text{ J/kg.}$$

$$P_1 \cdot v_1 = 1 \cdot 10^5 \times 0,85 = 85.000 \text{ J/kg.}$$

$$P_2 \cdot v_2 = 6,9 \cdot 10^5 \times 0,16 = 110.400 \text{ J/kg.}$$

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

Panas yang diserap :

$$= 59 \text{ kJ/dt} = \frac{59}{0,4} = 147,5 \text{ kJ/kg.}$$

$$W = (u_2 - u_1) + (P_1 \cdot v_1 - P_2 \cdot v_2) + \left(\frac{C_1^2}{2} - \frac{C_2^2}{2} \right) + Q$$

$$= - 88 + 85 - 110,4 + 0,018 - 0,0101 - 147,50$$

$$W = - 260,8 \text{ kJ/kg.}$$

Jadi daya yang dibutuhkan untuk menggerakan kompresor adalah :

$$= 260,8 \times 0,4 = 104,4 \text{ kW}$$

Luas inlet :

$$A_1 = \frac{m \cdot v_1}{C_1} = \frac{0,4 \times 0,16}{6} = 0,057 \text{ m}^2$$

Luas out let :

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

Soal-soal.

1. Sebuah kompresor melakukan kompresi pada internal energi dan 50 kJ diserap oleh air pendingin tiap kg udara. Tentukanlah kerja yang dibutuhkan untuk langkah kompresi tiap kg pada kompresor tersebut.
2. Pada langkah kompresor sebuah mesin gas, kerja yang dibutuhkan oleh gas dan piston 70 kJ/kg. Panas yang diserap air pendingin 42 kJ/kg. Tentukanlah perubahan tenaga dalam.
3. Sejumlah massa gas dengan internal energi 1.500 kJ, terletak dalam sebuah silinder dengan isolasi sempurna. Gas dikompresi sampai tenaga dalam 1.400 kJ. Tentukanlah kerja yang dilakukan gas.

BAB III

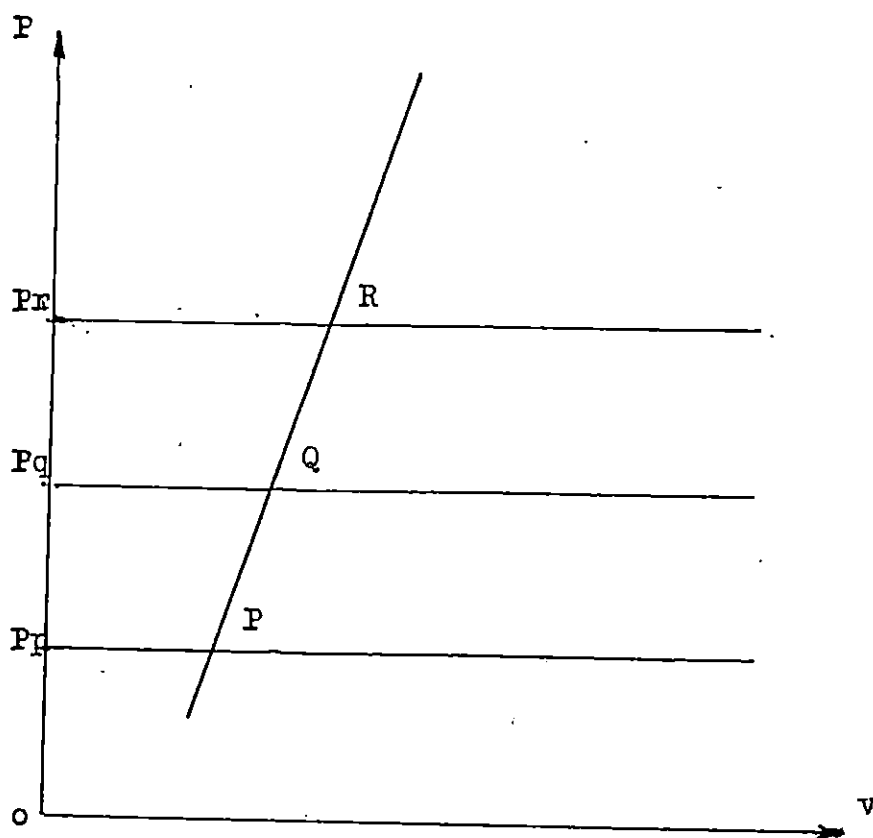
FLUIDA KERJA

Sekelompok fluida yang berada dalam suatu system tertentu dapat dikatakan sebagai fluida kerja, dan terletak diantara 2 sifat keadaan yang berbeda dari fluida tersebut. Keadaan tersebut dinamakan keadaan thermodynamika. Dalam system thermodynamika fluida kerja dapat berubah bentuknya dari cair ke uap atau sebaliknya. Karena zat dapat terjadi ke dalam salah satu fase (ujud) di atas, yang sangat tergantung pada keseimbangan tekanan atmosfer dan temperatur. Sebagai contoh : Oksigen dan Nitrogen dikenal berbentuk gas H_2O dikenal sebagai cairan (uap). Air raksa dikenal sebagai zat cair. Zat-zat ini dapat saja terjadi dalam fase yang berbeda. Oksigen dan Nitrogen dapat menjadi cairan, H_2O dapat menjadi gas yang temperatur tinggi. Air raksa dapat menjadi uap dan dapat pula menjadi gas. Perubahan ujud seperti di atas dapat terjadi karena keseimbangan antara tekanan dan temperatur.

A. Cair, Uap dan Gas

Jika diperhatikan diagram $p - v$ (tekanan - volume), dari beberapa zat. Fase padat tidak begitu penting dalam teknik thermodynamika, tetapi fase tersebut akan lebih menarik oleh seorang ahli logam atau physicist. Bila suatu zat cair dipanaskan pada suatu tekanan konstan sampai temperatur tertentu, maka pada zat cair tersebut akan terjadi gelembung uap yang ingin melepaskan diri dari kumpulan zat cairnya. Peristiwa tersebut dinamakan peris-

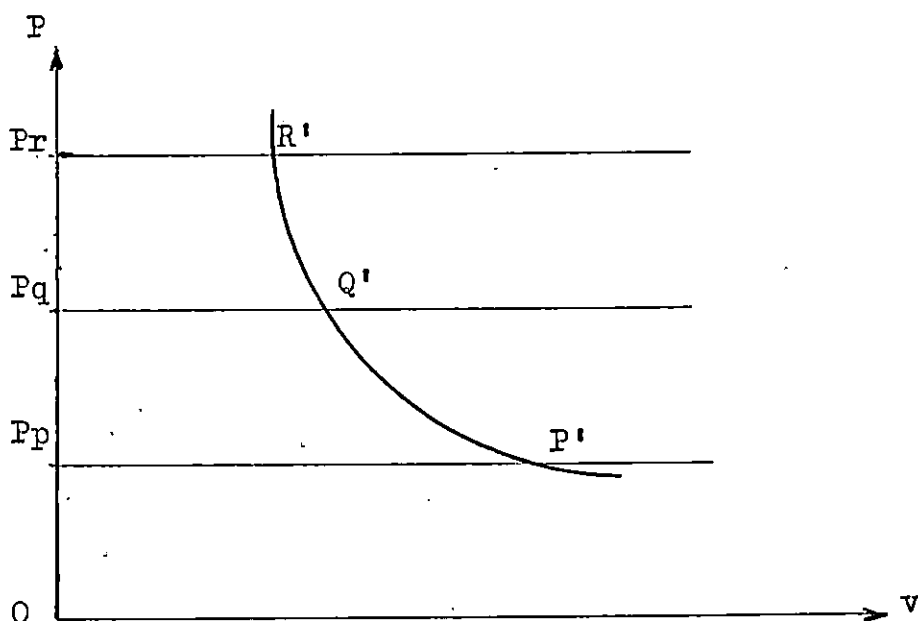
tiwa menguap (mendidih). Penguapan tersebut akan terjadi pada temperatur yang lebih tinggi. Disini juga dapat ditentukan untuk zat cair yang sama bahwa : 1 kg zat cair yang mendidih pada tekanan yang lebih tinggi, lebih besar volumenya dari volume zat cair yang mendidih pada tekanan rendah. Jika percobaan penguapan ini dilakukan berulang kali, dengan perbedaan tekanan tertentu, maka rangkaian titik-titik penguapan akan tergambar pada diagram P-V, berbentuk garis miring. Sebagai mana ditunjukkan pada gambar 3.1. dibawah ini :



Gambar 3.1. Diagram P-V untuk awal penguapan pada tekanan yang berbeda-beda.

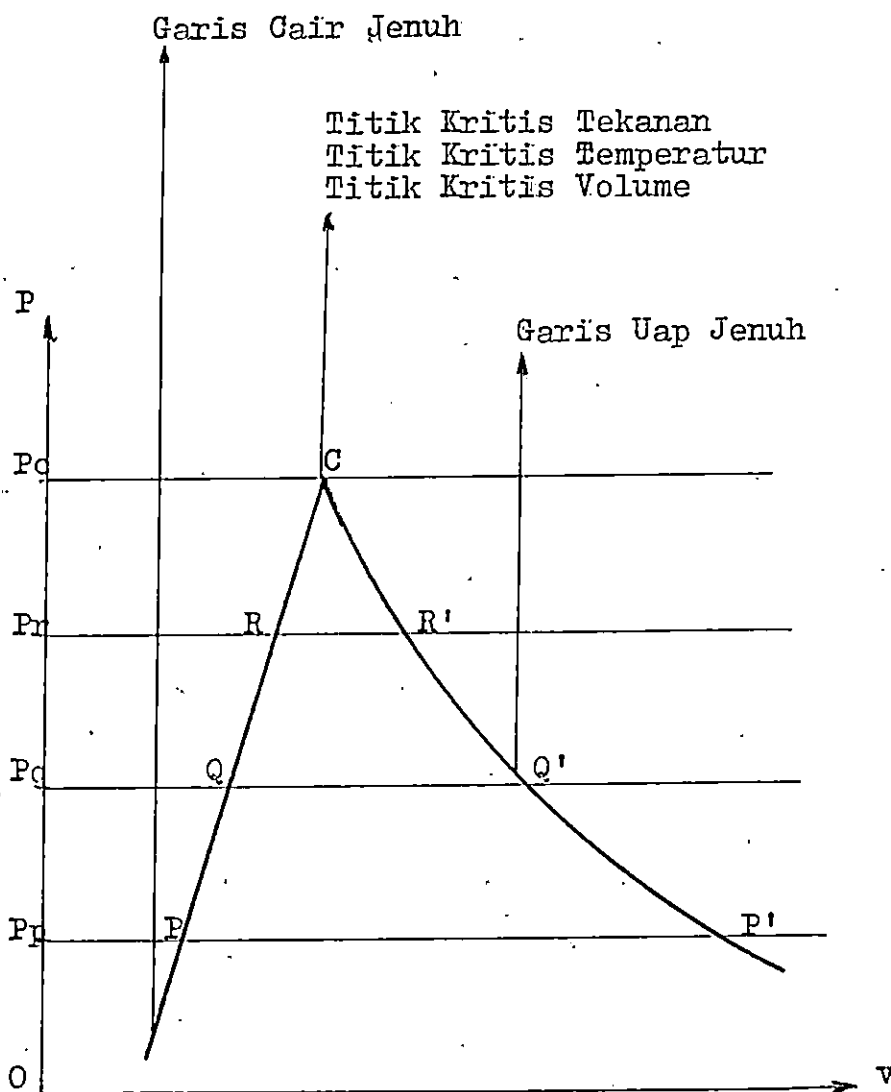
Titik F, Q dan R menggambarkan titik didih zat cair yang mana pada tekanan P_p , P_q dan P_r yang makin lama makin tinggi.

Bila zat cair pada titik didihnya dipanaskan terus pada tekanan konstan, maka tambahan panas yang diberikan setelah mencapai titik didihnya digunakan untuk merubah fase dari cair ke uap. Selama perubahan fase tekanan dan temperatur tetap. Panas yang diberikan itu dinamakan panas laten penguapan. Banyaknya panas laten tersebut dapat diketahui dengan pengurangan tekanan tertinggi terhadap tekanan terendah. Uap pada masing-masing tekanan tersebut juga mempunyai volume spesifik tertentu. Hal ini ditentukan oleh titik penguapan sempurna (titik pada saat seluruh cairan sudah habis menguap). Titik tersebut adalah P' , Q' dan R' yang diterangkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2. Diagram P-V untuk akhir penguapan pada tekanan yang berbeda-beda.

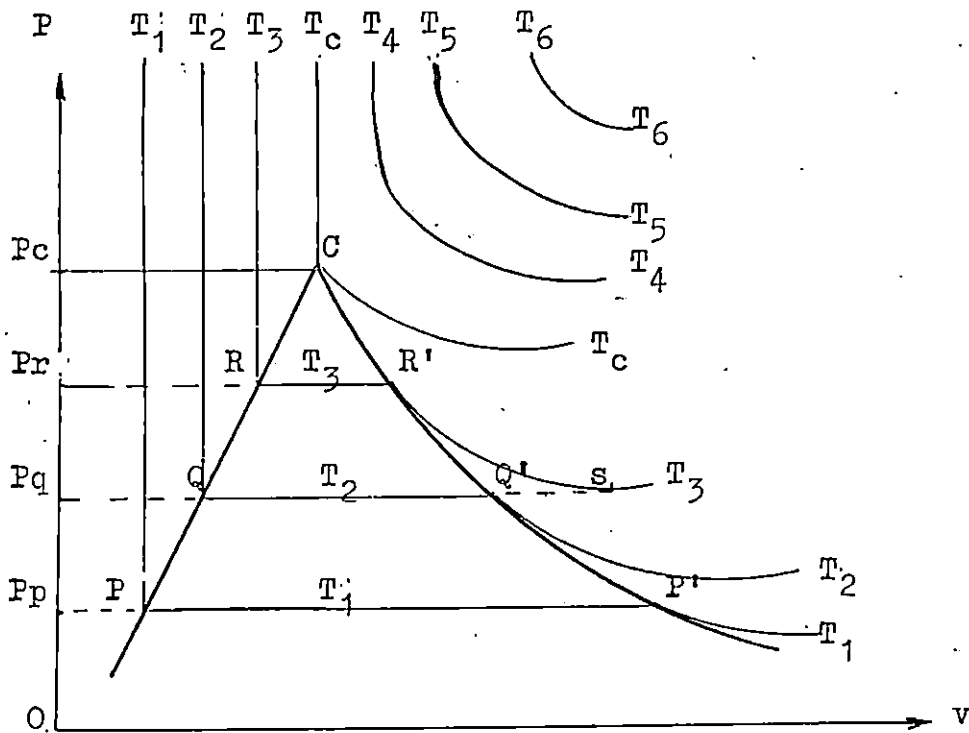
Bila 2 curve (gambar 3.1 dan 3.2), digabung dan diperpanjang ke tekanan yang lebih tinggi, maka akan membentuk sebuah curva dan kedua curva tersebut akan bertemu pada suatu titik yang dinamakan titik kritis tekanan, titik kritis temperatur, titik kritis volume. Keadaan pada titik tersebut dinamakan : temperatur kritis, tekanan kritis dan volume kritis. Pada titik kritis panas latent penguapan sama dengan nol (0). Lihat gambar 3.3.



Gambar 3.3. Diagram P-V untuk penguapan.

Oleh karena panas latent sama dengan nol, maka zat yang berada di antara dua curva, terdiri dari campuran antara cairan dan uap kering yang dikenal dengan nama uap basah (wet vapour). Keadaan jenuh (naturaltion state) dapat dinyatakan sebagai keadaan terjadinya perubahan fase tanpa merubah tekanan dan temperatur. Pada gambar 3.3 ditunjukkan dengan garis cair jenuh (naturated liquid line) yang melalui titik P, Q dan R, juga P', Q' dan R' yang membatasi keadaan cair dengan uap merupakan keadaan jenuh. Urutan titik tersebut dihubungkan (P', Q' dan R') dinamakan garis uap jenuh (naturalted vapour line). Disini perkataan jenuh digunakan untuk menunjukkan energi jenuh. Sebagai contoh dengan penambahan energi sedikit saja pada keadaan jenuh tersebut akan terjadi penguapan, dimana sebagian zat cair berubah menjadi uap, sebagian mungkin bertahan berbentuk cair atau berubah menjadi uap basah, juga zat yang berada pada garis uap jenuh, bila didinginkan sedikit sifat-sifat cairnya mulai tampak dan uap jenuh akan berubah menjadi uap basah. Uap jenuh (naturated vapour) biasanya disebut kering jenuh (dry naturated). Istilah ini dipakai untuk menyatakan bahwa tidak ada zat cair pada keadaan ini yang mempertahankan uap.

Garis temperatur tetap dinamakan Isothermal yang ditunjukkan pada gambar 3.4. Garis temperatur pada daerah (cair liquid), vertikal karena semakin tinggi tekanan, maka temperatur semakin tinggi. Sedangkan pada daerah antara garis cair jenuh dan garis uap jenuh horizontal, karena temperatur tetap pada masa penguapan (panas laten),



Gambar 3.4. Garis temperatur pada diagram P-V.

yaitu pada garis PP' , QQ' dan RR' . Keadaan ini dinamakan temperatur jenuh untuk masing-masing tekanan jenuh. Pada tekanan P_p , temperatur jenuhnya T_1 , tekanan jenuh P_q temperaturnya T_2 , tekanan P_r temperatur jenuhnya T_3 . Garis temperatur kritis T_c melalui puncak bangun grafik, yaitu pada titik kritis C .

Bila uap kering jenuh dipanaskan pada tekanan tetap maka temperatur akan naik dan menjadi panas lanjut. Perbedaan antara temperatur aktual uap panas lanjut dengan temperatur jenuh pada tekanan uap dinamakan derajat panas lanjut (degree of superheat). Misalkan uap pada titik S (gambar 3.4), panas lanjut pada P_q dan T_3 derajat panas lanjutnya adalah $T_3 - T_2$.

P dan P', Q dan Q', R dan R' temperatur dan tekanan tidak berdiri sendiri, dia akan konstan untuk kenaikan harga v. Sebagai contoh zat pada Pq dan T₂ (gambar 3.4), akan menjadi cair jenuh, uap basah atau uap kering jenuh. Keadaan ini tidak dapat dikatakan dalam satu bentuk ujud (bentuk) dari spesifik volume yang terjadi, karena dia terdiri dari campuran, Kondisi atau jumlah dari uap basah sering ditentukan oleh :

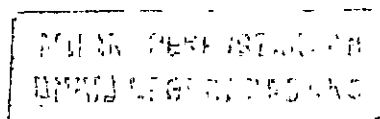
$$\text{faktor kekeringan (x)}. \quad (3.1)$$

Faktor kekeringan (Dryness fraction), (x) adalah jumlah massa uap dalam 1 kg campuran uap dan air (uap basah). Sedangkan faktor kebasahan (wetness fraction) adalah jumlah massa cairan didalam 1 kg campuran. Jadi faktor kebasahan adalah :

$$fk = 1 - x \quad (3.2)$$

Untuk uap kering jenuh zat dan untuk cair jenuh $x = 0$. Perbedaan antara gas dan uap panas lanjut tidak begitu kaku (rigid). Tetapi pada derajat yang sangat tinggi garis isothermal uap panas lanjut pada diagram P-V, berubah menjadi hyperbola seperti P - V konstan. Sebagai contoh garis Isothermal T₆ (gambar 3.4) hampir berbentuk hyperbola. Pada idealnya zat pada saat itu dinamakan gas sempurna (perfect gas) menurut Eastop, Thomas D, (1978 : 45). persamaannya adalah :

$$\frac{P \cdot V}{T} = \text{konstan} \quad (3.3)$$



Ini dapat dilihat pada garis temperatur konstan mengikuti hukum hyperbolic dengan persamaan $P.V/T = \text{tetap}$. Semua zat bisa berubah menjadi gas sempurna pada temperatur panas lanjut sangat tinggi. Zat yang berbentuk das seperti oksigen, nitrogen, hydrogen dan sebagainya, panas lanjut sangat tinggi terletak pada keadaan atmosfer normal. Misalnya temperatur kritis oksigen -119°C , nitrogen -147°C dan hydrogen -240°C . Zat dalam keadaan normal bisa berbentuk uap, temperaturnya akan naik sebelum dia berubah menjadi gas sempurna. Seperti temperatur kritis Amoniak 130°C , Sulfur dioksida = 157°C dan uap air $374,15^{\circ}\text{C}$.

Fluida kerja yang menjadi masalah praktis dalam permesinan (engineering) adalah sama diantara zat yang dapat digolongkan ke dalam gas campuran dan mana yang tidak dapat dikatakan gas sempurna. Sebagai contoh kita akan sulit membedakan mana yang dikatakan gas sempurna dan mana yang tidak seperti zat, uap air, uap refrigerant, misalnya amonia freon, methil clorida dan sebagainya. Maka untuk membedakannya adalah : apabila zat tersebut dapat mengikuti persamaan gas sempurna, bisa digolongkan ke dalam gas sempurna, apabila gas tersebut tidak dapat mengikuti persamaan gas sempurna tidak dapat digolongkan ke dalam gas sempurna.

B. Penggunaan Tabel Uap.

Tabel yang digunakan disini adalah untuk beberapa zat, yang dalam keadaan normal, berada dalam bentuk uap, seperti uap air, amoniak, freon dan sebagainya. Pada buku

ini dicontohkan pemakaian tabel uap yang dibuat oleh May hew dan Rogers yang cocok untuk mahasiswa. Tetapi untuk tabel lain cara yang dibebankan di sini juga bisa digunakan. Dalam buku ini yang akan diterangkan adalah hanya cara menggunakan (membaca) tabel uap, bukan membeberkan bagaimana mendapatkan tabel uap, dan juga bukan menguraikan tabel uap itu sendiri. Maka dari itu untuk lebih lengkapnya pembaca harus mencari tabel uap lain (tabel seperti tersebut di atas). Pada prinsipnya tabel May hew dan Rogers membicarakan semua uap, tetapi beberapa sifat amoniak, dan freon 12 tidak diberikannya.

1. Sifat-sifat keadaan jenuh.

Tekanan jenuh dan hubungannya dengan temperatur jenuh dari uap ditabulasikan (dipaparkan) pada lajur di tabel III. 1. (tabel pertama). Interval tekanan bergerak dari 0,006112 bar sampai 221,2 bar. Volume spesifik (v), tenaga dalam (u), enthalpy (h), dan entropy (s) juga ditabulasikan untuk uap kering jenuh pada tiap-tiap tekanan dan hubungannya dengan temperatur jenuh (t_s)¹ (Eastop, Thomas D 1978 : 35)..

TABEL III.1 SYMBOL DAN NOTASI TABEL UAP.

P	t_s	v_g	u_f	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
0,3472		4,694	302	2472	302	2338	2630	0,980	6,745	7,725

Pada tabel III. I. dapat dibaca sebagai berikut :
sebagai contoh pembacaan untuk tekanan (p) = 0,34 bar,
didapat :

- temperatur jenuh (t_g) = 72°C.
- volume spesifik uap kering jenuh (v_g) = 4,649 m³/kg
- tenaga dalam uap kering jenuh (u_g) = 2472 kJ/kg.
- enthalpy uap kering jenuh (h_g) = 2630 kJ/kg.

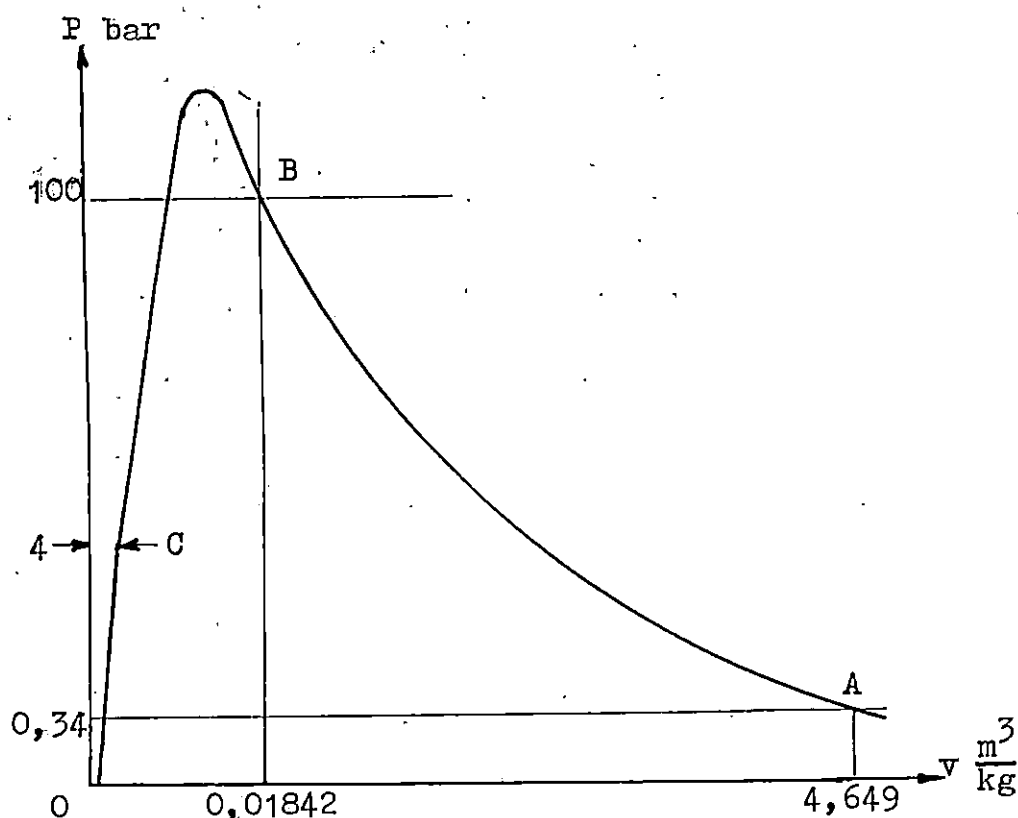
Uap pada keadaan di atas ditunjukkan oleh titik dalam gambar 3.5. Pada titik uap kering jenuh dengan tekanan (p) = 100 bar dan temperatur jenuh (t_s) 311°C, mempunyai :

- volume spesifik (v_g) = 0,01802 m³/kg.
- tenaga dalam (u_g) = 2545 kJ/kg.
- enthalpy (h_g) = 2725 kJ/kg.

Tenaga dalam, enthalpy dan entropy dari keadaan cair jenuh juga ditabulasikan dengan notasi huruf f. Sebagai contoh pembacaan : uap pada tekanan 4 bar dan hubungannya dengan temperatur jenuh (t_s) = 143,6°C, air jenuh mempunyai

- tenaga dalam (u_f) = 605 kJ/kg.
- enthalpy (h_f) = 605 kJ/kg.

Keadaan ini ditunjukkan dengan titik C pada gambar 3,5. Volume spesifik air jenuh biasanya ditabulasikan pada tabel terpisah, ini biasanya diabaikan, karena sangat kecil sekali dibandingkan dengan volume spesifik uap kering jenuh dan variasi temperaturnya juga sangat kecil sekali. Garis cair jenuh pada diagram P-V, sangat dekat sekali dengan garis axis tekanan, dibandingkan dengan lebar puncak dari grafik pada gambar 3.5. Pada tabel dapat dilihat untuk interval temperatur yang besar harga v_f sangat kecil sekali.



Gambar 3.5. Hubungan tabel uap dengan diagram P-V

Misalkan untuk temperatur $0,01^{\circ}\text{C}$ harga :

$$v_f = 0,0011 \text{ m}^3/\text{kg}$$

dan untuk temperatur 160°C harga :

$$v_f = 0,0011 \text{ m}^3/\text{kg}$$

serta untuk temperatur kritis $374,15^{\circ}\text{C}$ harga :

$$v_f = 0,00317 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Perubahan enthalpy dari h_f ke h_g diberi symbol h_{fg} . bila air jenuh berubah menjadi uap kering jenuh dari persamaan 2.4 didapat :

$$Q = (u_2 - u_1) + W$$

akan menjadi

$$Q = (u_g - u_f) + W \quad (3.5)$$

W ditunjukkan dengan luas daerah di bawah garis horizontal pada diagram P-V, yaitu :

$$W = (V_g - V_f) p \quad (3.6)$$

jadi $Q = (u_g - u_f) + p (V_g - V_f)$

$$Q = (u_g + pV_g) - (u_f + pV_f).$$

dari persamaan 2.14.

$$h = u + p.v$$

di dapat :

$$Q = h_g - h_f = h_{fg} \quad (3.7)$$

Panas yang dibutuhkan untuk merubah cair jenuh ke uap kering jenuh disamakan panas latent. Panas latent dalam tabel uap dilambangkan dengan h_{fg} . Sebagai contoh tenaga dalam untuk cair jenuh pada tiga titik = 0, temperatur 0,01°C, tekanan 0,006112 bar dan volume spesifik $v_f = 0,0010002 \text{ m}^3/\text{kg}$, maka,

$$h = u + p.v$$

$$= 0 + \frac{0,0010002 \cdot 0,006112 \cdot 10^5}{10^3}$$

$$h = 6,112 \cdot 10^{-4} \text{ kJ/kg.}$$

Hasil ini terlalu kecil dan dianggap nol untuk enthalpy di bawah 0,01°C.

Dengan catatan bahwa pada bagian lain interval tekanan yang ditabulasikan pada tabel pertama, tekanan 221,2 bar adalah tekanan kritis. Temperatur 374,15°C adalah temperatur kritis dan panas latent h_{fg} adalah nol.

2. Sifat-sifat uap basah.

Uap basah adalah zat yang terdiri dari campuran antara cairan dan uap kering. Jadi jumlah volume uap basah (volume campuran) adalah volume cairan ditambah dengan volume uap kering, dengan demikian volume spesifik uap basah didapat sebagai berikut :

$$v = \frac{\text{volume uap kering} + \text{volume cairan}}{\text{total massa uap basah}}$$

$$v = \frac{V_f + V_g}{m} \quad (3.8)$$

Untuk 1 kg uap basah terdiri dari x kg uap kering, dan (1-x) kg cairan, x adalah faktor kekeringan jadi :

$$v = v_f (1-x) + v_g \cdot x \quad (3.9)$$

Volume cairan biasanya sangat kecil sekali, bila dibandingkan dengan volume uap kering jenuh. Kebanyakan di dalam pemecahan masalah, harga V_g dianggap sama dengan nol. Maka volume spesifik uap basah adalah :

$$v = x v_g \quad (3.10)$$

Enthalpy uap basah dapat dihitung dengan cara penjumlahan enthalpy cairan dengan enthalpy uap kering sehingga didapat hubungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} h &= (1-x) h_f + x \cdot h_g \\ &= h_f + x(h_g - h_f) \\ h &= h_f + x \cdot h_{fg} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Interval energi dari uap basah dapat diperoleh dengan menjumlahkan tenaga dalam cairan dengan tenaga dalam uap kering, sehingga didapat sebagai berikut :

$$u = (1-x) u_f + x \cdot u_g \quad (3.12)$$

$$u = u_f + x(u_g - u_f) \quad (3.13)$$

Persamaan 3.13 dapat diubah ke dalam bentuk persamaan 3.11. Tetapi persamaan 3.12 dan 3.13 lebih baik digunakan, karena u_g dan u_f ada dalam tabel, dan perbedaannya tidak ada di dalam tabel.

Contoh soal 3.1.

Dapatkan volume spesifik, enthalpy dan tenaga dalam dari uap basah pada tekanan 18 bar, faktor kekeringan 0,9. Dalam tabel dapat dibaca untuk $p = 18$ bar didapat:

$$v_g = 0,1104 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

$$h_f = 885 \text{ kJ/kg}.$$

$$h_{fg} = 1912 \text{ kJ/kg}.$$

$$u_f = 883 \text{ kJ/kg}.$$

$$u_g = 2598 \text{ kJ/kg}.$$

Jawab :

$$v = x \cdot v_g$$

$$= 0,9 \cdot 0,1104 = 0,0994 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

$$h = h_f + x \cdot h_{fg}$$

$$= 885 + 0,9 \cdot 1912 = 2605,8 \text{ kJ/kg}.$$

$$u = (1-x) u_f + x \cdot u_g$$

$$= (1 - 0,9) 883 + 0,9 \cdot 2598 = 2426,5 \text{ kJ/kg}.$$

Contoh soal 3.2.

Dapatkan faktor kekeringan (x), volume spesifik dan tenaga dalam dari uap pada tekanan 7 bar dan enthalpy = 2600 kJ/kg. Uap harus dalam keadaan basah.

Jawab :

Dari tabel dapat dibaca data sebagai berikut :

$$h_f = 697 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{fg} = 2067 \text{ kJ/kg.}$$

$$v_g = 0,2728 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_f = 696 \text{ kJ/kg.}$$

$$u_g = 2575 \text{ kJ/kg.}$$

Jawab :

$$h = h_f + x \cdot h_{fg}$$

$$2600 = 697 + x \cdot 2067$$

$$x = \frac{2600 - 697}{2067} = 0,921.$$

$$v = x \cdot v_g = 0,921 \cdot 0,2728$$

$$v = 0,2515 \text{ m}^3/\text{kg.}$$

$$u = (1 - 0,921) 696 + 0,921 \cdot 2573$$

$$u = 2420 \text{ kJ/kg.}$$

3. Sifat-sifat Uap Panas Lanjut.

Uap dalam daerah panas lanjut suhu dan tekanan bersifat bebas. Apabila suhu dan tekanan dinaikan, kemudian keadaan dibatasi dan segala sifat yang lainnya dapat diperoleh. Sebagai contoh : Uap pada tekanan 2

bar dan suhu 200°C , dipanas lanjut, hingga mencapai temperatur jenuhnya pada tekanan tetap 2 bar yaitu $120,2^{\circ}\text{C}$. Bila temperatur $120,2^{\circ}\text{C}$ lebih kecil dari temperatur aktualnya (sebelumnya). Uap dalam keadaan ini mempunyai perbedaan panas sebesar $200 - 120,2 = 79,8^{\circ}\text{C}$. Tabel dari sifat-sifat uap panas lanjut bergerak dari tekanan 0,006112 bar sampai tekanan kritis 221,2 bar. Pada tabel tambahan dari tekanan super kritis sampai 1000 bar. Tiap-tiap tekanan terdapat interval suhu sampai kepada derajat panas lanjut yang sangat tinggi. Nilai volume spesifik, tenaga dalam, enthalpy dan entropy ditabulasikan pada masing-masing tekanan temperatur. Diatas tekanan ini tenaga dalam tidak terdapat pada tabel. Untuk referensi temperatur jenuh disisipkan pada tanda kurung dibawah masing-masing tekanan pada tabel uap panas lanjut, dan harga v_g , u_g , h_g dan s_g yang diberikan dapat dilihat berurut kebawah pada masing-masing temperatur. Menurut Eastop, Thomas D (1978 : 40), tabel uap panas lanjut seperti tabel III.2.

TABEL III.2 TABEL UAP PANAS LANJUT

P (ts)	t	250	300	350	400	500
20 (212,4)	v_g	0,1115	0,1255	0,1396	0,1511	0,1756
	u_g	2681	2774	2861	2946	3116
	h_g	2904	3025	3138	3248	3467
	s_g	6,547	6,768	6,957	7,126	7,431

Tabel uap panas lanjut di atas dapat dibaca, pada tekanan 20 bar, untuk suhu 400°C , didapat volume jenis adalah $0,1511 \text{ m}^3/\text{kg}$, tenaga dalam 2946 kJ/kg , enthalpy 3248 kJ/kg , dan entropy $7,126 \text{ kJ/kg}$.

Untuk tekanan di atas 70 bar tenaga dalam diperoleh dengan menggunakan persamaan 2.14. Sebagai contoh, Uap pada tekanan 80 bar, suhu 400°C , mempunyai enthalpy, $h = 3139 \text{ kJ/kg}$ dan volume spesifik $v = 3,428 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{kg}$, karena itu di dapat :

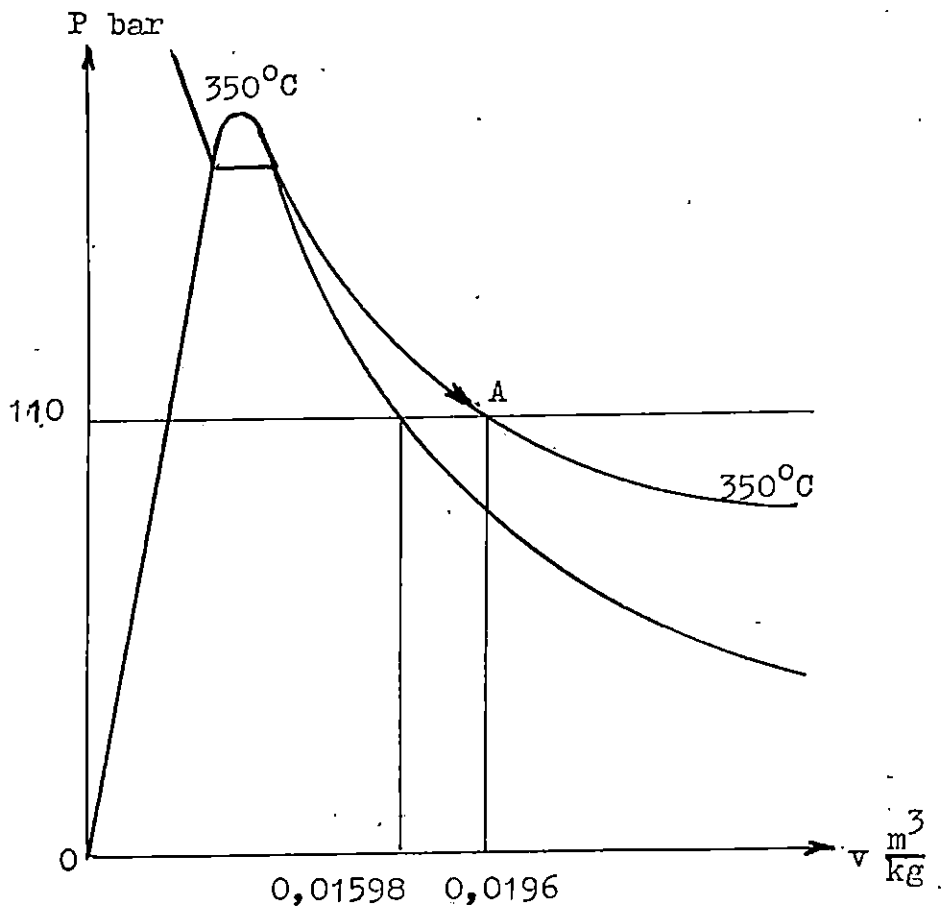
$$u = h - p.v = 3139 - \frac{80 \cdot 10^5 \cdot 0,03428}{10^3} = 2964,8 \text{ kJ/kg.}$$

Contoh soal 3.3.

Uap pada tekanan 110 bar mempunyai volume spesifik $0,0196 \text{ m}^3/\text{kg}$. Hitunglah temperatur, enthalpy dan tenaga dalam dari uap tersebut.

Langkah pertama dalam menyelesaikan masalah ini adalah : pertama sekali yang paling penting ialah menentukan apakah uap dalam keadaan basah, jenuh atau panas lanjut pada tekanan 110 bar, didapat $v = 0,01598 \text{ m}^3/\text{kg}$, ini lebih kecil dibanding volume spesifik yang ada, yaitu $0,0196 \text{ m}^3/\text{kg}$ dan karena itu uap adalah panas lanjut. Keadaan uap ditunjukkan oleh titik A pada gambar 3.6.

Dari tabel uap panas lanjut, untuk tekanan 110 bar volume spesifik $0,0196 \text{ m}^3/\text{kg}$, pada temperatur 350°C . Karena itu proses ini adalah Isothermal sebagaimana ditunjukkan oleh titik A pada gambar 3.6.



Gambar 3.6. Diagram P-V untuk menentukan keadaan uap.

Perbedaan panas lanjut dalam hal ini adalah = $350 - 318 = 32$ °C. Dari tabel enthalpy h didapat 2889 kJ/kg.

Selanjutnya digunakan persamaan 2.14 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 u &= h - p.v = 2889 - \frac{110 \cdot 10^5 \cdot 0,0196}{10^3} \\
 &= 2889 - 215,9 \\
 &= 2673,4 \text{ kJ/kg.}
 \end{aligned}$$

Contoh soal 3.4.

Uap pada tekanan mempunyai tekanan 150 bar, mempunyai enthalpy 3309 kJ/kg. Hitunglah temperatur, volume spesifik dan tenaga dalam.

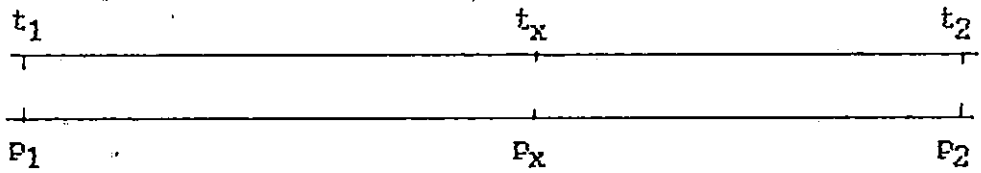
Pada tekanan 150 bar, dari tabel uap didapat $h_g = 2611$ kJ/kg. Hal ini lebih kecil dari enthalpy yang ada yaitu 3309 kJ/kg. Dan karena itu uap adalah panas lanjut pada tekanan 150 bar, $h = 3309$ kJ/kg, pada 500°C . Volume spesifik $v = 0,02078$ m³/kg. Gunakan persamaan 2.14 didapat :

$$\begin{aligned} u &= h - p.v \\ &= 3309 - \frac{150 \cdot 10^5 \cdot 0,02078}{10^3} \\ &= 2997,3 \text{ kJ/kg.} \end{aligned}$$

4. Interpolasi

Bagi sifat-sifat gas yang tidak ada didalam tabel harus diinterpolasikan diantara nilai-nilai yang ada pada tabel. Interpolasi maksudnya menentukan nilai dari suatu keadaan (suhu) antara 2 buah nilai yang ada dalam tabel. Dengan Interpolasi nilai di luar nilai yang ada pada tabel dapat juga ditentukan, baik lebih besar dari nilai tabel ataupun lebih kecil.

Untuk menentukan harga diantara 2 harga yang telah diketahui, sering disebut menentukan harga tengah adalah sebagai berikut (perhatikan gambar 3.7.) Data yang ada dalam tabel adalah :



Gambar 3.7. Interpolasi tengah.

t_1 = temperatur kecil.

t_2 = temperatur besar.

p_1 = tekanan kecil.

p_2 = tekanan besar.

p_x = tekanan antara p_1 dan p_2 .

t_x = temperatur yang akan ditentukan.

Kedua variabel ini bergerak searah, dari nilai kecil ke nilai besar. Dalam hal ini yang akan ditentukan adalah t_x pada tekanan p_x , dimana t_x terletak diantara t_1 dan t_2 .

Maka untuk menghitung harga t_x dapat digunakan rumus sebagai berikut :

$$t_x = \text{temperatur kecil} + \frac{\text{interval tekanan 1 ke } x \text{ (interval suhu 1-2)}}{\text{interval tekanan 1 ke 2}}$$

atau

$$t_x = t_1 + \frac{(p_x - p_1)}{p_2 - p_1} (t_2 - t_1) \quad (3.14)$$

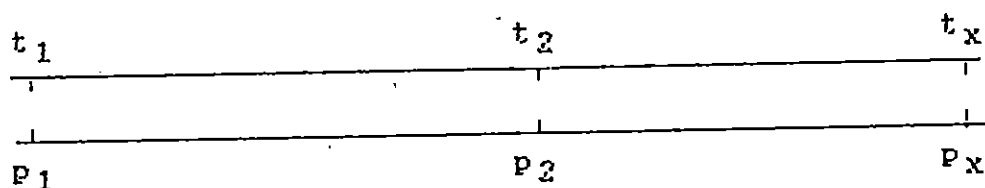
Rumus 3.14 adalah menghitung harga t_x dari bawah (dari nilai terkecil). Harga t_x juga dapat dihitung dari nilai tertinggi dengan rumus sebagai berikut (perhatikan gambar 3.7):

$$t_x = \text{suhu besar} - \frac{(\text{int. tek. } x \text{ ke } 2)}{(\text{int. tek. } 1 \text{ ke } 2)} (\text{int. suhu } 1 \text{ ke } 2)$$

atau

$$t_x = t_2 - \frac{(P_2 - P_x)}{(P_2 - P_1)} (t_2 - t_1) \quad (3.15)$$

Jika kita ingin mengetahui suatu nilai yang lebih besar dari nilai yang ada dalam tabel, di dalam ini dinamakan interpolasi atas dapat dihitung sebagai berikut dan perhatikan gambar 3.8.



Gambar 3.8. Interpolasi atas.

dimana :

t_1 = suhu dibawah suhu tertinggi dalam tabel.

t_2 = suhu tertinggi yang ada pada tabel.

P_1 = tekanan pada titik t_1 .

P_2 = tekanan pada titik t_2 .

P_x = tekanan diluar nilai tabel yang diketahui.

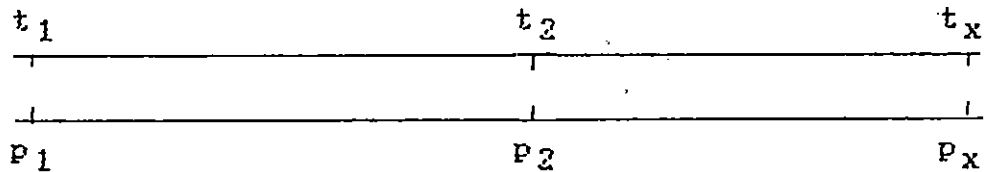
t_x = suhu pada titik P_x yang akan ditentukan.

$$t_x = \text{suhu tertinggi} - \frac{(\text{int. tek. } 2 \text{ ke } x)}{(\text{int. tek. } 1 \text{ ke } 2)} (\text{int. suhu } 1 \text{ ke } 2)$$

atau

$$t_x = t_2 - \frac{(P_x - P_2)}{(P_2 - P_1)} (t_2 - t_1) \quad (3.16)$$

Jika kita ingin mengetahui suatu harga di bawah harga dalam tabel maka dapat ditentukan dengan rumus Interpolasi bawah, seperti di bawah ini dan perhatikan gambar 3.9 ;



Gambar 3.9. Interpolasi bawah.

t_x = suhu yang akan ditentukan.

t_1 = suhu terendah yang ada dalam tabel.

P_1 = tekanan pada titik t (terendah).

t_2 = suhu di atas temperatur terendah.

P_2 = tekanan pada titik t_2 .

P_x = tekanan pada titik t_x (diketahui).

$$t_x = \text{suhu terendah} - \frac{(\text{int.tek.x ke 1})}{(\text{int.tek.1 ke 2})} (\text{int.suhu 1 ke 2})$$

atau

$$t_x = t_1 - \frac{(P_1 - P_x)}{(P_2 - P_1)} (t_2 - t_1) \quad (3.17)$$

Penggunaan interpolasi di atas baik interpolasi tengah atau maupun bawah, salah satu syarat penggunaannya adalah grafik (garis) perubahan kedua nilai yang dipakai harus lurus. Untuk menentukan nilai-nilai lain dapat digunakan cara diatas.

Contoh soal 3.5.

Dari suatu tabel didapat harga sebagai berikut :
 untuk tekanan 9 bar mempunyai :

$$\text{suhu} = 175,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{enthalpy} = 2774 \text{ kJ/kg.}$$

$$\text{tenaga dalam} = 2581 \text{ kJ/kg.}$$

Untuk tekanan 10 bar mempunyai :

$$\text{suhu} = 179,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{enthalpy} = 2778 \text{ kJ/kg.}$$

$$\text{tenaga dalam} = 2584 \text{ kJ/kg.}$$

Tentukanlah harga suhu, enthalpy dan tenaga dalam pada tekanan 9,8 bar.

Jawab :

Temperatur,

$$t_x = t_1 + \frac{(p_x - p_1)}{p_2 - p_1} (t_2 - t_1)$$

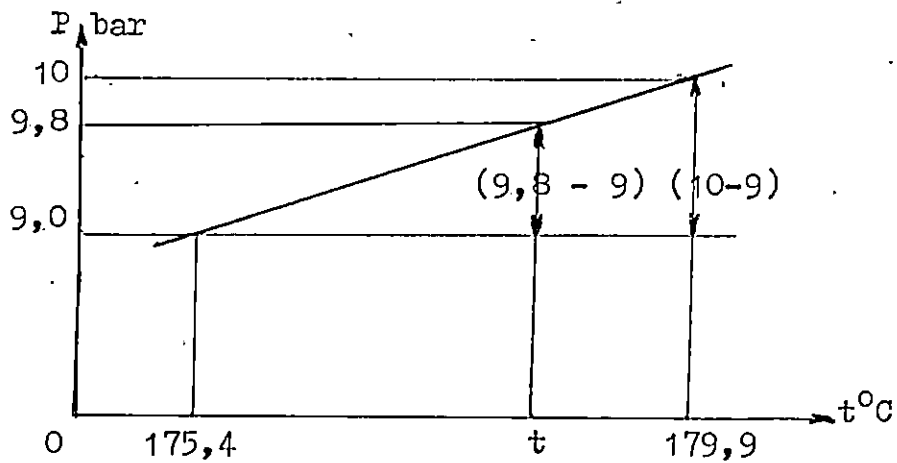
atau

$$t_{9,8} = t_9 + \frac{(p_{9,8} - p_9)}{p_{10} - p_9} (t_{10} - t_9)$$

$$= 175,4 + \frac{(9,8 - 9)}{(10 - 9)} (179,9 - 175,4)$$

$$t_{9,8} = 175,4 + 0,8 \cdot 4,5 = 179 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Jadi temperatur pada tekanan 9,8 bar adalah 179°C,
 perhatikan gambar 3.10.

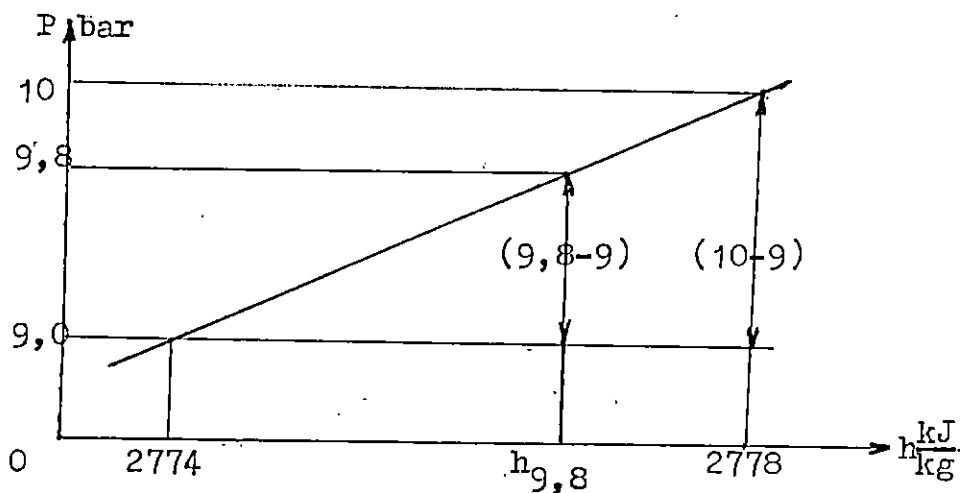


Gambar 3.10. Interpolasi temperatur terhadap tekanan.

Untuk menghitung enthalpy pada tekanan 9,8 bar, dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 h_{9,8} &= h_9 + \frac{(P_{9,8} - P_9)}{(P_{10} - P_9)} (h_{10} - h_9) \\
 &= 2774 + 0,8 (2778 - 2774) \\
 &= 2777,2 \text{ kJ/kg.}
 \end{aligned}$$

Jadi enthalpy pada tekanan 9,8 bar adalah 2777,2 kJ/kg, perhatikan gambar 3.11.

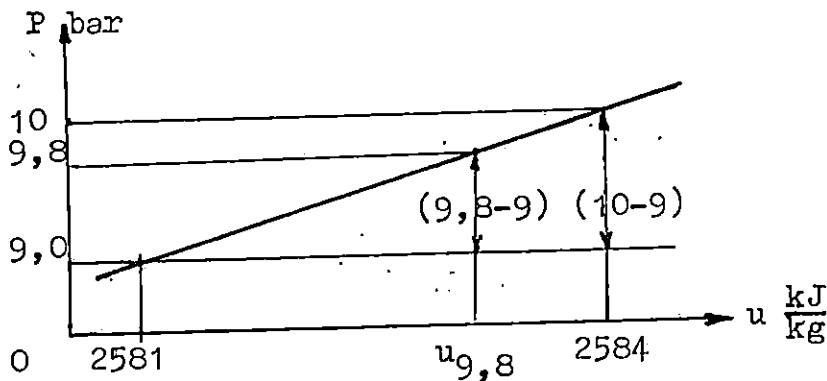


Gambar 3.11. Interpolasi temperatur terhadap tekanan.

Untuk menghitung tenaga dalam pada tekanan 9,8 bar dapat ditentukan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 u_{9,8} &= u_9 + \frac{(P_{9,8} - P_9)}{(P_{10} - P_9)} (u_{10} - u_9) \\
 &= 2581 + 0,8 (2584 - 2581) \\
 &= 2583,4 \text{ kJ/kg.}
 \end{aligned}$$

Berarti tenaga dalam pada tekanan 9,8 bar adalah 2583,4 kJ/kg, perhatikan gambar 3.12.



Gambar 3.12. Interpolasi tenaga dalam terhadap tekanan.

Contoh soal 3.4.

Uap pada tekanan 5 bar dan temperatur 320°C. Uap dipanas lanjutkan pada tekanan 5 bar dan temperatur 151,8°C. Tentukanlah volume spesifik dan enthalpy.

Jawab :

Untuk menjawab pertanyaan ini, harus dilihat temperatur di atas 320°C dan 350°C. Kemudian dilihat volume spesifik dan enthalpy untuk kedua temperatur tersebut dan didapat harganya sebagai berikut :

untuk suhu 300°C , harga

$$v_g = 0,0226 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

$$h_g = 3065 \text{ kJ/kg}.$$

untuk suhu 350°C harganya,

$$v_g = 0,5701 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

$$h_g = 3168 \text{ kJ/kg}.$$

Volume spesifik adalah :

$$\begin{aligned} v &= v_{300} + \frac{(t_{320} - t_{300})}{(t_{350} - t_{300})} (v_{350} - v_{300}) \\ &= 0,5226 + \frac{(320 - 300)}{(350 - 300)} (0,5701 - 0,5226) \\ &= 0,5226 + 0,4 (0,5701 - 0,5226) \\ &= 0,5416 \text{ m}^3/\text{kg}. \end{aligned}$$

Enthalpy didapat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} h &= h_{300} + 0,4 (h_{350} - h_{300}) \\ &= 3065 + 0,4 (3168 - 3065) \\ &= 3106,2 \text{ kJ/kg}. \end{aligned}$$

Contoh soal 3.7.

Tentukanlah enthalpy uap panas lanjut pada tekanan 18,5 bar dan suhu 432°C . Interpolasikanlah antara tekanan 15 bar dan 20 bar, serta suhu 400°C dan 450°C . Data lain dapat dilihat pada tabel III. 3.

TABEL III. 3. INTERPOLASI GANDA.

p	t	400	432	450
15	h	3256	(1)	3364
18,5	h	-	(3)	-
20	h	3248	(2)	3357

Jawab :

$$(1). h = 3256 + \frac{32}{50} (3364 - 3256) = 3325,1 \text{ kJ/kg.}$$

$$(2). h = 3248 + \frac{32}{50} (3357 - 3248) = 3317,8 \text{ kJ/kg.}$$

(1) dan (2) diinterpolasikan dari temperatur tetapi untuk (3) diinterpolasikan terhadap tekanan.

$$(3). h = 3325,1 \frac{(18,5 - 15)}{(20 - 15)} (3357,8 - 3325,1)$$

$$h = 3325,1 - 0,7 \cdot 7,3 = 3320 \text{ kJ/kg.}$$

Contoh soal 3.8

Sketlah diagram P-V (tekanan - volume) dari uap dan berikan tanda pada titik tertentu dengan data

sebagai berikut :

a). p = 20 bar

t = 250°C

b). t = 212,4°C

v = 0,08957 m³/kg.

c). p = 10 bar

h = 2650 kJ/kg.

d). p = 5 bar

h = 3166 kJ/kg.

Jawab :

Titik A,

Pada tekanan 20 bar suhu jenuh adalah $212,4^{\circ}\text{C}$, karena itu uap adalah panas lanjut pada suhu 250°C . Kemudian dari tabel uap didapat $v = 0,1115 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Titik B,

Pada suhu $212,4^{\circ}\text{C}$, tekanan jenuh 20 bar dan $v_g = 0,09857 \text{ m}^3/\text{kg}$. Karena itu uap mestinya sering jenuh apabila $v = v_g$.

Titik C,

Pada tekanan 10 bar, $h_g = 2778 \text{ kJ/kg}$, karena itu uap adalah basah, sebab $h = 2650 \text{ kJ/kg}$. Bila uap basah, maka suhu jenuhnya $t = 179,9^{\circ}\text{C}$ pada tekanan 10 bar. Faktor kekeringan dapat dicari sebagai berikut :

$$h = h_f + x \cdot h_{fg}$$

$$x = \frac{2650 - 763}{2015}$$

h_f dan h_{fg} dilihat dari tabel uap.

$$x = 0,937.$$

Volume spesifik dapat dihitung sebagai berikut :

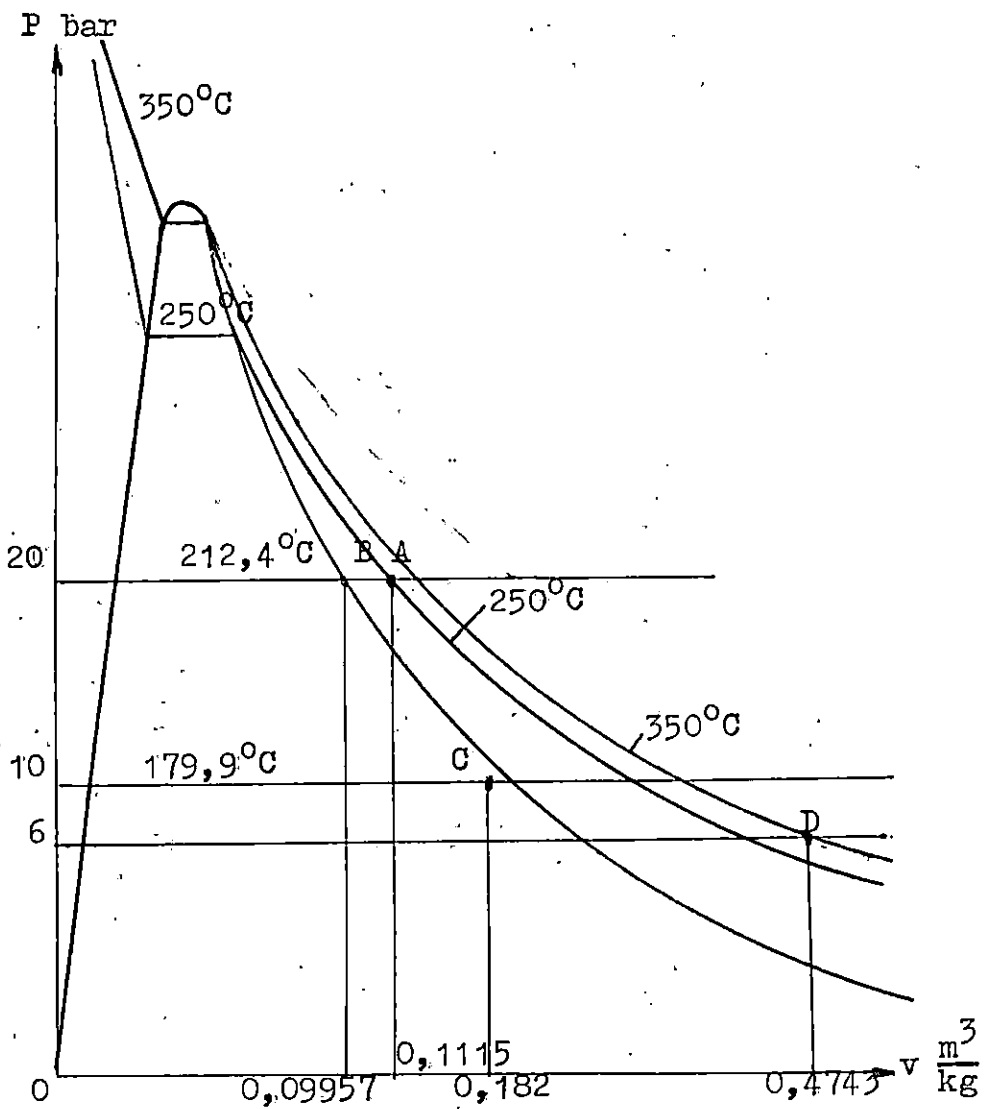
$$v = x \cdot v_g$$

v_g dapat dilihat pada tabel uap.

$$v = 0,937 \cdot 0,1944 = 0,182 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Titik D,

Pada tekanan 6 bar $h_g = 2757$ kJ/kg. Karena itu uap dalam keadaan panas lanjut. Ini diketahui bahwa $h = 3166$ kJ/kg. Untuk $h = 3166$ kJ/kg temperaturnya 350 C dan volume spesifiknya $0,4743$ m³/kg.



Gambar 3.13. Hubungan keadaan uap dengan diagram P-V

Titik A, B, C, dan D sudah dapat ditentukan pada diagram P-V sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.13.

Untuk menentukan tenaga dalam dari masing-masing keadaan adalah sebagai berikut :

a). Uap panas lanjut pada tekanan 20 bar, suhu = 250°C dari tabel $u = 2681$ kJ/kg.

b). Uap kering jenuh pada tekanan 20 bar, $u = u_g = 2600$ kJ/kg.

c). Uap basah pada tekanan 10 bar dengan $x = 0,937$.

$$u = (1 - x) u_f + x \cdot u_g \\ = (1 - 0,937) 762 + 0,937 \cdot 2584 = 2470 \text{ kJ/kg.}$$

d). Uap panas lanjut pada tekanan 6 bar, suhu 350°C didapat $u = 2881$ kJ/kg.

C. Gas Sempurna dan Panas Jenis Gas.

1. Karakteristik Persamaan Keadaan.

Pada suhu yang melewati suhu kritis dari zat cair, dan juga pada tekanan yang sangat rendah, uap yang berasal dari zat cair cenderung mengikuti persamaan :

$$\frac{P \cdot V}{T} = \text{konstant} = R \quad (3.18)$$

Tidak ada pada kenyataannya, yang mengikuti hukum ini dengan kaku, tetapi banyak gas-gas yang mengarah kesana, gas-gas yang mengikuti persamaan (3.18) dinamakan gas sempurna, dan persamaannya disebut karakteristik persamaan keadaan dari gas sempurna. Konstanta R disebut konstanta gas, satuan dari R adalah Nm/kg K

atau kJ/kg K. Tiap-tiap gas sempurna mempunyai konstanta gas yang berbeda. Karakteristik ini biasanya dituliskan.

$$p \cdot v = R \cdot T, \text{ tiap } m \text{ kg massa} \quad (3.19)$$

atau $\boxed{\quad}$

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T. \text{ untuk } m \text{ kg massa} \quad (3.20)$$

Bentuk lain dari karakteristik persamaan dapat ditelusuri dengan menggunakan kilogram-mol sebagai satuan. Kilo gram mol didefinisikan sebagai banyaknya gas yang sama dengan M kg dari gas itu sendiri, dimana M adalah berat molekul gas (apabila berat oksigen adalah 32, maka 1 kg mol oksigen setara dengan 32 kg oksigen). Dari definisi kilo gram molekul, untuk m kg gas kita mendapatkan hubungan :

$$m = n \cdot M \text{ (dimana } n \text{ adalah nomor molekul)} \quad (3.21)$$

Catatan :

Bila standar massa adalah kg, kilogram - mol harus ditulis hanya "mol".

Substitusikan persamaan (3.21) ke dalam persamaan (3.20) didapat :

$$p \cdot V = n \cdot M \cdot R \cdot T$$

$$M \cdot R = \frac{p \cdot V}{n \cdot T} \quad (3.22)$$

Hypothesa Avogadro menyatakan bahwa volume 1 mol dari beberapa gas sama dengan volume 1 mol gas yang lain bila gas-gas tersebut berada pada suhu dan tekanan yang sama. Sebab harga v/n sama untuk semua jenis gas,

pada harga p dan T yang sama pula. Besarnya harga pV/nT merupakan konstanta untuk semua jenis gas. Konstanta ini disebut "Konstanta Umum Gas" dan diberi symbol R_0 ,

$$M \cdot R = R_0 = \frac{pV}{nT} \quad (3.23)$$

atau,

$$pV = n R_0 T$$

Apabila

$$M \cdot R = R_0$$

$$R = \frac{R_0}{M} \quad (3.24)$$

R adalah konstanta masing-masing gas.

R_0 adalah konstanta gas umum.

M adalah berat molekul gas.

Perubahan telah menunjukkan bahwa volume 1 mol beberapa jenis gas sempurna pada tekanan 1 bar dan 0°C adalah $22,71 \text{ m}^3$. Karena itu harga R_0 pada persamaan (3.23) dapat ditentukan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} R_0 &= \frac{pV}{nT} = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 22,71}{1 \cdot 273,15} \\ &= 8314,3 \text{ J/mol K} \\ &= 8,3143 \text{ kJ/mol K} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Harga $8,3143 \text{ kJ/mol K}$ adalah harga konstanta gas umum.

Konstanta untuk beberapa jenis gas dapat ditentukan bila berat molekulnya diketahui. Sebagai

contoh untuk oksigen berat molekul 32, maka konstanta gas oksigen :

$$R_{ok} = \frac{R_o}{M} = \frac{8314,3}{32} = 2598,8 \text{ J/kg K.}$$

Berarti konstanta gas oksigen 2598,8 J/kg K.

Contoh Soal 3.9.

Sebuah tabung dengan volume $0,2 \text{ m}^3$, berisi Nitrogen dengan tekanan 1,013 bar, dan suhu 15°C . Jika $0,2 \text{ kg}$ Nitrogen dimasukkan lagi ke dalam tabung tersebut. Hitunglah tekanan sekarang, apabila temperaturnya dikembalikan kepada temperatur semula. Berat molekul gas Nitrogen 28, dan dianggap sebagai gas sempurna.

Jawab :

Konstanta gas Nitrogen,

$$R_{Nit} = \frac{R_o}{M} = \frac{8314}{28} = 296,9 \text{ J/kg K.}$$

Massa gas keadaan pertama,

$$P_1 V_1 = m_1 R T_1$$

$$m_1 = \frac{P_1 V_1}{R T_1} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \cdot 0,2}{296,9 \cdot 288} = 0,237 \text{ kg}$$

Massa keadaan kedua adalah,

$$m_2 = 0,2 + 0,237 = 0,437 \text{ kg.}$$

$$V_2 = V_1 \text{ (Volume tabung tidak dirubah).}$$

$$T_2 = T_1 \text{ (temperatur dikembalikan).}$$

Jadi

$$P_2 = \frac{m_2 R T_2}{V_2} = \frac{0,437 \cdot 296,9 \cdot 288 \cdot 10^{-5}}{0,2}$$

$$P_2 = 1,87 \text{ bar.}$$

Contoh soal 3.10.

0,01 kg gas sempurna menempati sebuah tempat dengan volume 0,003 m³, pada tekanan 7 bar dan temperatur 131°C. Hitunglah berat molekul gas, bila gas tersebut diekspansi sampai tekanan 1 bar dan volume akhir 0,02 m³. Tentukan juga temperatur akhir.

Jawab :

Konstanta gas,

$$R = \frac{P_1 \cdot V_1}{m \cdot T_1} = \frac{7 \cdot 10^5 \cdot 0,003}{0,01 \cdot (131 + 273)}$$

$$= 520 \text{ J/kg K.}$$

Berat molekul,

$$M = \frac{R_0}{R} = \frac{8314}{520} = 16.$$

Temperatur akhir,

$$T_2 = \frac{P_2 \cdot v_2}{M \cdot R} = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 0,02}{0,01 \cdot 520}$$

$$= 384,5^\circ\text{K.}$$

Suhu akhir adalah $384,5^\circ - 273 = 111,5^\circ\text{C}$.

2. Panas Jenis

Panas jenis zat padat atau zat cair didefinisikan sebagai jumlah panas (kalor) yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur zat sebesar 1 derajat setiap satu satuan massa. Untuk jumlah yang kecil berlaku rumus :

$$dQ = m \cdot C \cdot dt \quad (3.26)$$

dimana,

m = massa benda

dt = pertambahan suhu

C = panas jenis benda

Pada gas banyak sekali cara yang dapat dilakukan untuk menambah panas diantara dua suhu yang berbeda, sehingga panas jenis tak terhingga macamnya, namun demikian panas jenis gas hanya dijelaskan untuk dua keadaan saja ; yaitu panas jenis untuk volume tetap (c_v) dan panas jenis untuk tekanan tetap (c_p). Panas jenis untuk volume tetap adalah jumlah panas (kalor) yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur zat 1 derajat setiap satu satuan massa pada volume tidak berubah (tetap). Sesuai dengan definisi di atas dan rumus (3.26) maka,

$$c_v = \frac{dQ}{m \cdot dt} \quad (3.27)$$

Panas jenis pada tekanan tetap adalah jumlah panas (kalor) yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur zat

satu derajat setiap satu satuan massa pada tekanan tidak berubah (tetap). Definisi di atas hanya terbatas untuk proses tak reversible (dapat dibalik). Proses tak reversible menyebabkan perubahan temperatur tidak bisa dibedakan dengan perubahan-perubahan yang disebabkan oleh panas reversible dan kuantitas kerja. Sesuai pula dengan rumus (3.26) serta definisi di atas maka harga :

$$c_p = \frac{dQ}{m \cdot dt} \quad (3.28)$$

Untuk gas ideal harga c_v dan c_p tetap pada setiap tekanan dan suhu. Integrasikan persamaan (3.27) dan (3.28) didapat hubungan sebagai berikut :

$$c_v = \frac{Q}{m \cdot (T_2 - T_1)} \quad (3.27a)$$

dan

$$c_p = \frac{Q}{m \cdot (T_2 - T_1)} \quad (3.28a)$$

Pada gas sejati harga c_v dan c_p berbeda suhunya, tapi untuk memudahkan dalam pemaksaan diambil harga rata-rata.

Menurut J. Hannah, M.J. Hiller, (1977 ; 263), panas jenis gas pada tekanan dan volume tetap, untuk beberapa gas adalah seperti tabel III. 4 :

TABEL III.4. PANAS JENIS GAS.

G a s	Panas jenis (kJ/kg ⁰ C)	
	Tekanan tetap(cp)	volume tetap(cv)
Udara	1,00	0,72
Nitrogen	1,04	0,74
Oksigen	0,82	0,66
Hydrogen	14,20	10,10
Karbon dioksida	0,85	0,63
Karbon monoksida	1,04	0,74

3. Hukum Joule.

Hukum Joule menetapkan bahwa energi dalam gas ideal, adalah fungsi dari temperatur mutlak, dengan rumus sebagai berikut :

$$u = f (T) \quad (3.29)$$

Untuk lebih jelasnya ambilah 1 kg gas ideal yang dipanaskan pada volume tetap, maka dari persamaan 2.5.

$$dQ = du + dW,$$

Jika volumenya tetap, maka kerja akan sama dengan nol ($W=0$) dengan demikian,

$$dQ = du \quad (3.40)$$

Pada volume tetap didapat rumus,

$$dQ = cv dT$$

tentu

$$dQ = du = c_v dT$$

Jika diintegrasikan didapat,

$$u = c_v T + K \quad (K = \text{Konstanta}) \quad (3.41)$$

Berarti menurut hukum Joule, perubahan tenaga dalam berbanding lurus terhadap temperatur mutlak. Energi dalam bisa dibuat nol untuk semua temperatur. Berdasarkan persamaan (3.29), maka untuk gas ideal, didapat $u = 0$, bila $T = 0$, sehingga dengan demikian harga K juga sama dengan nol. Energi dalam gas ideal adalah :

$$u = C_v \cdot T \quad (3.30)$$

Bila semua gas m , maka Energi dalam :

$$u = m \cdot C_v \cdot T \quad (3.30a)$$

Dari persamaan (3.30a) didapat perubahan Energi dalam :

$$u_2 - u_1 = m \cdot C_v (T_2 - T_1) \quad (3.31)$$

Perubahan Energi dalam harus memenuhi persamaan (3.31), baik proses dapat dibalik atau tidak dapat dibalik.

4. Hubungan Antara Panas Jenis

Bila gas ideal dipanaskan dari temperatur mutlak T_1 ke T_2 , dari persamaan (2.4) persamaan (3.31) menjadi:

$$u_2 - u_1 = m \cdot C_v (T_2 - T_1) + W.$$

Untuk proses tekanan tetap, volume berubah, maka kerja fluida dapat dihitung dengan rumus :

$$W = p (V_2 - V_1) \quad (3.32)$$

Maka menurut persamaan gas ideal ($PV = mRT$), untuk 2 titik, didapat :

$$W = m \cdot R (T_2 - T_1)$$

dengan demikian (persamaan 2.4) :

$$Q = m \cdot C_v (T_2 - T_1) + W$$

akan menjadi :

$$Q = m \cdot C_v (T_2 - T_1) + m \cdot R (T_2 - T_1)$$

atau,

$$Q = m (C_v + R)(T_2 - T_1) \quad (3.33)$$

Tetapi untuk proses tekanan tetap berlaku persamaan :

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.34)$$

Persamaan (3.33) sama dengan persamaan (3.34)

$$m (C_v + R)(T_2 - T_1) = m \cdot C_p (T_2 - T_1)$$

sehingga didapat,

$$C_v + R = C_p \quad (3.35)$$

5. Perubahan Enthalpy Gas Ideal.

Enthalpy gas ideal adalah $h = m + pv$, pada gas

ideal berlaku persamaan $pV = RT$, sedangkan menurut hukum Joule didapat $u = C_v \cdot T$. Bila harga u dan pV disubstitusikan ke persamaan enthalpy, maka didapat :

$$h = C_v \cdot T + RT = (C_v + R) T \quad (3.36)$$

Bila persamaan (3.35) disubstitusikan ke persamaan (3.36) akan didapat enthalpy gas sebagai berikut :

$$h = C_p \cdot T \quad (3.37)$$

$$\text{Jika massa } m, \text{ maka } H = m \cdot C_p \cdot T. \quad (3.38)$$

Jika $u = 0$, pada $T = 0$, maka $h = 0$ pada $T = 0$.

6. Perbandingan Panas Jenis.

Perbandingan panas jenis pada tekanan tetap dengan panas jenis pada volume tetap dilambangkan dengan γ (δ), yaitu :

$$\delta = \frac{C_p}{C_v} \quad (3.39)$$

Bila $C_p - C_v = R$ (persamaan 3.35), dengan demikian jelas bahwa C_p selalu lebih besar dari harga C_v untuk gas ideal, sebagai akibatnya $C_p/C_v = \delta$ selalu lebih besar dari satu. Dapat ditambahkan bahwa harga berkisar sekitar 1,4 untuk gas-gas diatomic seperti Carbon Monoksida (CO), Hydrogen (H_2), Nitrogen (N_2) dan O_2 .

Untuk gas-gas monatomic seperti Argon (A) dan Helium (He), harga δ terletak sekitar 1,6. Untuk gas-

gas triatomik seperti Carbon dioksida (CO_2) dan sulfur dioksida (SO_2) terletak sekitar 1,3. Sedangkan harga untuk beberapa hydrocarbon lebih rendah lagi, misalnya Etana ($\text{C}_2 \text{H}_6$), $\delta = 1,22$, dan Iso butana ($\text{C}_4 \text{H}_{10}$) $\delta = 1,11$.

Beberapa bentuk hubungan antara C_p , C_v , R dan dapat dilihat pada uraian berikut ini : dari persamaan (3.35) :

$C_p - C_v = R$, dibagi dengan C_v didapat :

$$\frac{C_p}{C_v} - 1 = \frac{R}{C_v}$$

$$\frac{C_p}{C_v} = \delta$$

$$\delta - 1 = \frac{R}{C_v}$$

atau

$$C_v = \frac{R}{(\delta - 1)} \quad (3.40)$$

Dari persamaan (3.39) :

$C_p = \delta \cdot C_v$ substitusikan persamaan (3.40),
didapat :

$$C_p = \frac{\delta \cdot R}{(\delta - 1)}$$

Contoh soal 3.11.

Suatu gas ideal mempunyai panas jenis sebagai berikut : $C_p = 0,846 \text{ kJ/kg K}$ dan $C_v = 0,667 \text{ kJ/kg K}$. Tentukanlah konstanta gas dan berat molekulnya.

Jawab :

$$R = C_p - C_v$$

$$= 0,846 - 0,657 = 0,189 \text{ kJ/kg K}$$

atau

$$R = 189 \text{ N m/kg K}$$

$$R = \frac{R_0}{M}, \quad M = 8314/189 = 44.$$

Contoh soal 3.12.

Gas ideal mempunyai berat molekul 26, dan γ (δ) = 1,26. Hitunglah jumlah kalor yang dihasilkan gas itu :

- Jika gas menempati bejana, yang bertekanan 3 bar dan suhu 315°C , serta didinginkan sampai tekanan 1,5 bar.
- Jika gas dialirkan dari pipa bersuhu 280°C , dan secara kontinue diteruskan ke pipa lain yang bersuhu 20°C . Perubahan kecepatan gas dalam pipa diabaikan.

Jawab :

$$R = \frac{R_0}{M} = \frac{8314}{26} = 319,8 \text{ N m/kg K}$$

$$C_v = \frac{R}{(\delta - 1)} = \frac{319,8}{10^3 (1,26 - 1)} = 1,229 \text{ kJ/kg K.}$$

$$C_p = 1,26 \cdot 1,229 = 1,548 \text{ kJ/kg K.}$$

$$a. T_1 = 315 + 273 = 588^\circ\text{K.}$$

$$T_2 = T_1 \frac{P_2}{P_1} = 588 \frac{1,5}{3} = 294 \text{ K}$$

Panas (Q) = $C_v (T_2 - T_1)$, volume tetap

$$1,229 (588 - 294) = 361 \text{ kJ/kg K}$$

$$b. Q = C_p (T_1 - T_2)$$

$$= 1,548 (280 - 20) = 403 \text{ kJ/kg}$$

Soal-soal.

1. Isi sebuah bejana $0,03 \text{ m}^3$, mengandung uap jenuh kering bertekanan 17 bar. Hitunglah massa dan enthalpy uap tersebut.
2. Uap pada tekanan 7 bar, temperatur 250°C , memasuki saluran pipa dan mengalir pada tekanan konstan. Jika uap menyerap panas terus menerus kepada sekelilingnya, pada temperatur berapakah, mulai ada tetesan air pada uap tersebut. Hitung juga jumlah panas yang terbuang, jika perubahan kecepatan uap diabaikan.
3. $0,05 \text{ kg}$ uap pada 15 bar dimasukkan dalam suatu bejana dengan volume $0,0076 \text{ m}^3$. Berapakan temperatur uap, jika

- bejana dingin pada suhu berapakah uap akan kering sepenuhnya. Pendinginan akan berlangsung sampai tekanan 11 bar. Hitunglah faktor kekeringan akhir dari uap, dan panas yang terbuang dari bagian pertama dan terakhir.
4. Berat molekul CO_2 adalah 44, dalam eksperimen nilai δ didapat 1,3. Kita beranggapan CO_2 adalah gas sempurna. Hitunglah konstanta gas CO_2 serta panas jenis pada tekanan tetap dan volume tetap.
 5. Hitung energi dalam dan enthalpy dari 1 kg udara berisi $0,05 \text{ m}^3$ gas pada 20 bar. Jika energi dalam ditambah 120 kJ/kg. sebahagian udara ditekan menjadi 50 bar. Hitunglah volume baru yang terisi oleh 1 kg gas.
 6. O_2 pada 200 bar disimpan dalam bejana baja pada temperatur 20°C . Kapasitas bejana adalah $0,04 \text{ m}^3$. O_2 adalah gas sempurna. Hitunglah massa O_2 yang dapat disimpan dalam bejana. Bejana menggunakan sumbat lebur, yang mana akan meleleh jika temperatur dinaikan tinggi sekali. Pada temperatur berapakan sumbat harus meleleh, jika tekanan maksimum 240 bar, berat molekul O_2 adalah 32.

BAB IV

PROSES YANG DAPAT DIBALIK DAN TIDAK DAPAT DIBALIK

Proses yang dapat dibalik (reversible proses) maksudnya adalah suatu perubahan keadaan yang terjadi pada gas seperti perubahan suhu, tekanan, volume, ujud dan lain-lainnya, kemudian perubahan keadaan yang telah terjadi tersebut dapat balik, kembali kepada keadaan semula. Proses ini biasanya terjadi pada zat cair (air). Air yang telah menjadi uap berarti suhu, tekanan, volume serta ujud sudah berubah, kemudian dengan pendinginan, uap tadi dapat kembali menjadi air dengan keadaan yang sama dengan keadaan semula.

Proses yang tidak dapat dibalik (irreversible proses), maksudnya adalah suatu perubahan keadaan yang terjadi pada suatu jenis zat cair (minyak bensin), suhu, tekanan, ujud, volume, berubah akibat pembakaran, kemudian perubahan yang telah terjadi tersebut tidak dapat kembali seperti semula. Gas bekas pembakaran yang terjadi tidak dapat dirubah kembali menjadi minyak bensin.

Dua macam keadaan yang berbeda tersebut akan diuraikan dibawah ini.

A. Proses Non Aliran Dapat Dibalik

Proses non aliran dapat dibalik maksudnya perubahan keadaan dapat kembali seperti semula, tetapi tidak ada fluida yang masuk atau keluar dari systemnya. Proses ini dapat terjadi pada beberapa keadaan sebagai berikut :

1. Perubahan keadaan pada volume tetap (Isovolume).

Isovolume maksudnya tekanan dan temperatur berubah, tetapi volume tetap, maka menurut persamaan gas ideal ;

$$\frac{P \cdot V}{T} = \text{konstanta}$$

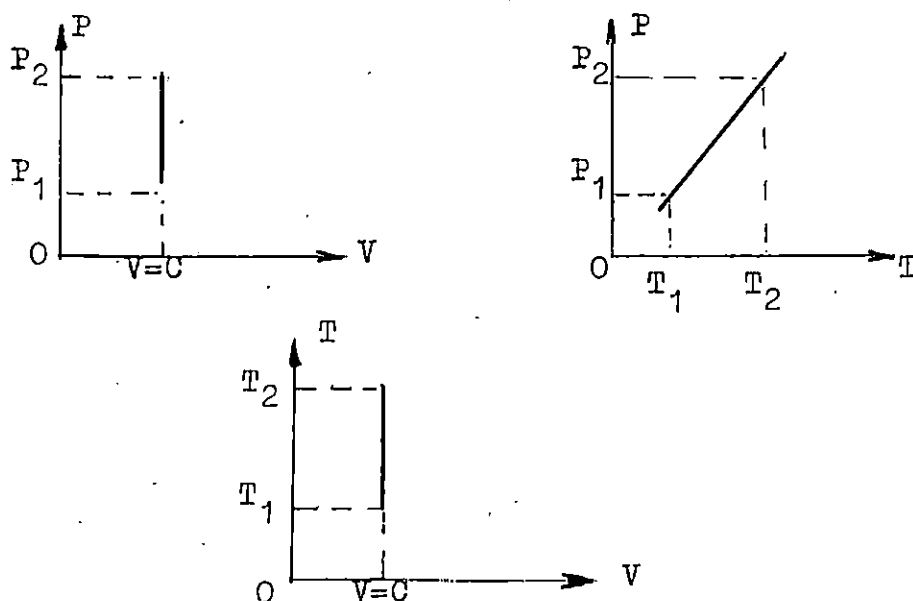
akan didapat hubungan sebagai berikut :

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} ; V_1 = V_2$$

berarti,

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

Hubungan temperatur, tekanan dan volume dapat dilihat pada gambar 4.1. di bawah ini.



Gambar 4.1. Diagram P - V, P - T dan V - T untuk Isovolum.

Kerja yang dilakukan (dibutuhkan) dalam Isovolum adalah :

$W = p \int dv$; perubahan volume (dv) adalah nol.
berarti kerja = nol.

Maka untuk persamaan energi non flow :

$$Q = (u_2 - u_1) + W$$

didapat :

$$Q = (u_2 - u_1).$$

sedangkan jumlah panas yang diberikan volume proses berlangsung :

$$Q = m \cdot C_v (T_2 - T_1),$$

sehingga didapat hubungan sebagai berikut :

$$(u_2 - u_1) = m \cdot C_v (T_2 - T_1) \quad (4.2)$$

Contoh soal 4.1.

0,06 m³ volume gas oksigen terletak di dalam silinder dengan tekanan 1,38 bar dan temperatur 21°C. Hitunglah jumlah panas yang harus diberikan supaya suhunya naik sampai 93°C, dan tekanan akhir dari proses. Data lain, massa mol oksigen 32, $C_v = 986$ kJ/kg K. Proses berlangsung pada volume tetap.

Jawab :

$$R = \frac{R_0}{M} = \frac{8,314}{32} = 0,26 \text{ kJ/kg K.}$$

$$m = \frac{P_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{1,38 \cdot 10^5 \cdot 0,06}{0,26 \cdot (273 + 21)} = 0,1082 \text{ kg.}$$

Jumlah panas yang diberikan :

$$\begin{aligned} Q &= m \cdot C_v (T_2 - T_1) \\ &= 0,1082 \cdot 0,988 (366 - 294) = 7,69 \text{ kJ.} \end{aligned}$$

Tekanan akhir :

$$P_2 = \frac{T_2}{T_1} \cdot P_1 = \frac{366}{294} \cdot 1,38 = 1,72 \text{ bar.}$$

2. Perubahan keadaan pada tekanan tetap (Isobaric)

Isobaric maksudnya suhu dan volume berubah, tetapi tekanan tetap. Menurut persamaan gas ideal untuk isobaric ($p_1 = p_2$), maka didapat hubungan sebagai berikut :

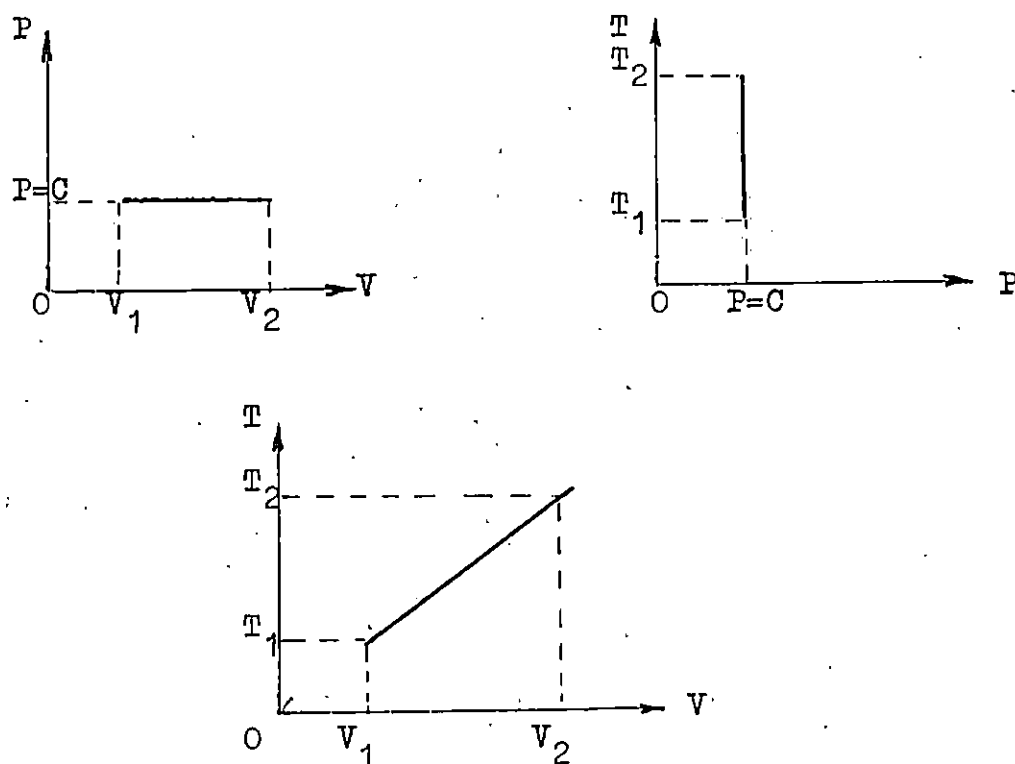
$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} ; P_1 = P_2$$

maka,

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (4.3)$$

Misalkan m kg gas bertemperatur T_1 , volume V_1 , terletak di dalam sebuah silinder, lengkap dengan piston, pada tekanan tetap. Setelah diberikan energi panas, temperatur naik sampai T_2 . Selama pemberian panas gas melaku-

kan ekspansi pada tekanan tetap, serta menekan piston, yang mengakibatkan volume berubah menjadi V_2 (lihat gambar 4.2).



Gambar 4.2. Diagram P - V, P - T dan V - T untuk Isobaric.

Dengan demikian energi panas yang diberikan tadi dirubah menjadi kerja luar, yang terbukti dengan gerakan piston dari V_1 ke V_2 . Besar kerja tersebut adalah :

$$W = p \int_{V_1}^{V_2} dV = p(V_2 - V_1) \quad (4.4)$$

Jumlah panas yang diberikan adalah :

$$Q = m \cdot C_p (T_2 - T_1) \quad (4.5)$$

Dari persamaan :

$$Q = (u_2 - u_1) + W$$

setelah disubstitusikan harga W , akan didapat hubungan sebagai berikut :

$$Q = (u_2 - u_1) + p (V_2 - V_1)$$

$$= (u_2 + PV_2) - (u_1 + PV_1)$$

$$u + PV = h \text{ (enthalpy)}$$

Sehingga didapat hubungan sebagai berikut :

$$Q = h_2 - h_1 \quad (4.6)$$

untuk m massa gas maka panas yang diberikan adalah :

$$Q = H_2 - H_1 \quad (4.7)$$

Contoh soal 4.2.

0,05 kg fluida dipanaskan pada $p = 2$ bar (tetap), sampai mencapai volume $0,0658 \text{ m}^3$. Hitunglah jumlah panas yang disuplay dan kerja yang dilakukan, jika :

- Fluida terdiri dari uap jenuh pada awalnya.
- Fluida terdiri dari udara dengan temperatur awal 130°C .

Jawab :

- Uap pada mulanya terdiri dari uap kering jenuh pada tekanan 2 bar, didapat :

$$h_1 = h_g \text{ pada } 2 \text{ bar} = 2707 \text{ kJ/kg.}$$

Volume spesifik uap pada titik akhir untuk tekanan 2 bar di dapat :

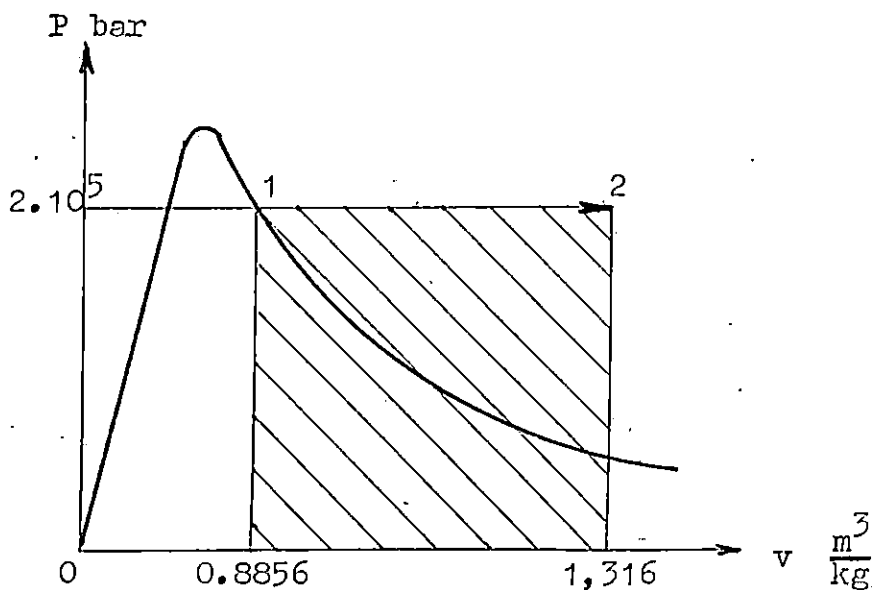
$$v_2 = \frac{0,0658}{0,05} = 1,316 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Kemudian uap dipanaskan lanjut pada akhirnya. Dari tabel uap panas lanjut pada tekanan 2 bar dan volume spesifik 1,316 m³/kg serta temperatur uap pada 300°C dan enthalpy $h_2 = 3072 \text{ kJ/kg}$.

Dengan demikian didapatkan :

$$\begin{aligned} Q &= H_2 - H_1 = m (h_2 - h_1) \\ &= 0,05 (3072 - 2707) \\ &= 18,25 \text{ kJ}. \end{aligned}$$

Berarti jumlah panas yang dibutuhkan adalah 18,25 kJ. Prosesnya diperlihatkan pada diagram PV pada gambar 4.3.



Gambar 4.3. Diagram P - V Isobaric.

Kerja yang dilakukan adalah :

Volume pada tekanan 2 bar adalah :

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

$$= 2 \cdot 10^5 (1,316 - 0,8856) \text{ Nm/kg.}$$

Sedangkan kerja total yang dilakukan oleh m kg massa adalah :

$$W = 0,05 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,4304 = 4,304 \text{ kJ.}$$

b. Temperatur pada keadaan 2 adalah :

$$T_2 = \frac{P_2 \cdot V_2}{m \cdot R} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 0,0658}{0,05 \cdot 0,287 \cdot 10^3}$$

$$= 917^\circ \text{K.}$$

Panas yang dibutuhkan untuk menekan gas ideal pada keadaan konstan adalah :

$$Q = m \cdot C_p (T_2 - T_1)$$

$$= 0,05 \cdot 1,005 (917 - 403)$$

$$= 25,83 \text{ kJ.}$$

Prosesnya dapat dilihat pada gambar 4.4.

Kerja yang dilakukan (pada daerah yang diarsir) adalah

$$W = P (V_2 - V_1) \text{ N m/kg.}$$

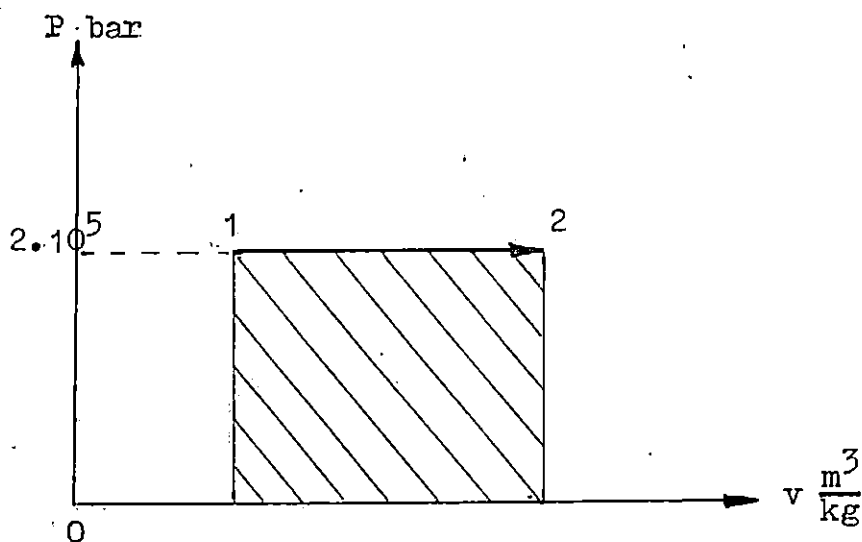
$$P(V_2 - V_1) = R(T_2 - T_1)$$

$$W = 0,287 (917 - 403) \text{ N m/kg.}$$

Kerja yang dilakukan untuk m kg massa gas adalah :

$$W = 0,05 \cdot 0,287 \cdot 514$$

$$= 7,38 \text{ kJ.}$$



Gambar 4.4. Diagram P - V Isobaric gas ideal.

3. Perubahan keadaan pada temperatur tetap (Isothermal).

Isothermal adalah tekanan dan temperatur berubah, tetapi temperatur berubah. Perubahan ini bisa terjadi dengan pemberian tenaga dari luar. Menurut persamaan gas ideal:

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} \quad T_1 = T_2$$

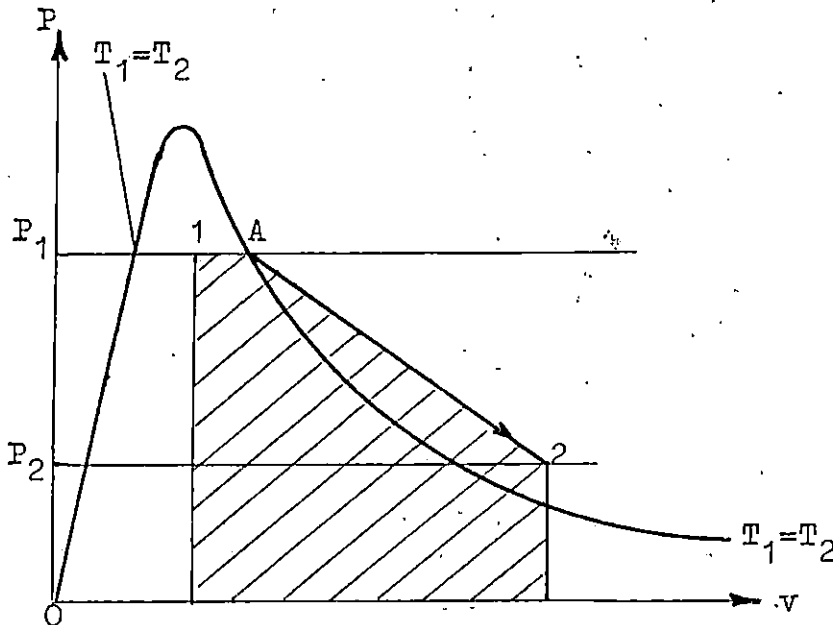
maka :

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \quad (4.8)$$

Hubungan antara P - V (diagram P - V) dapat dilihat pada gambar 4.5.

Misalkan pada sebuah silinder berisi m kg massa gas bertekanan P_1 , dan volume V_1 serta temperatur T_1 , dengan pemberian tenaga dari luar, maka V_1 berubah menjadi V_2 , tekanan akhir berubah menjadi P_2 , sedangkan temperatur tetap, maka kerja yang diberikan adalah sebagai berikut ;

$$W = P_1 \cdot V_1 \cdot \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (4.9)$$



Gambar 4.5. Diagram P - V Isothermal.

Menurut persamaan energi non aliran ,

$$Q - W = u_2 - u_1$$

$Q - W = 0$ (perubahan tenaga dalam sama dengan 0 karena perubahan temperatur nol).

maka

$$\begin{aligned}
 Q = W &= P_1 \cdot V_1 \cdot \ln \left[\frac{V_2}{V_1} \right] \\
 Q = W &= P_1 \cdot V_1 \cdot \ln \left[\frac{P_1}{P_2} \right] \\
 Q = W &= P_2 \cdot V_2 \cdot \ln \left[\frac{V_2}{V_1} \right] \\
 Q = W &= P_2 \cdot V_2 \cdot \ln \left[\frac{P_1}{P_2} \right].
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

Contoh soal 4.3.

0,056 m³ gas bertekanan 1,38 bar dikompresi secara isothermal ke volume 0,014 m³. Hitunglah energi yang dibutuhkan untuk mengkompresi tersebut, serta tekanan akhirnya.

Jawab :

$$P_2 = \frac{V_1}{V_2} \cdot P_1 = \frac{0,056}{0,014} \cdot 1,38 = 5,52 \text{ bar.}$$

$$\begin{aligned}
 W &= P_1 \cdot V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \\
 &= 1,38 \cdot 10^5 \cdot 0,056 \cdot \ln \frac{0,014}{0,056} = -10,7 \text{ kJ.}
 \end{aligned}$$

B. Proses Non Aliran Adiabatik yang Dapat Dibalik.

Proses adiabatik adalah suatu proses dimana kalor yang berpindah dari atau ke fluida selama proses sama

dengan nol. Proses adiabatik tersebut bisa di balik bisa tidak. Pada bagian ini akan dijelaskan proses adiabatik yang dapat di balik saja. Dari defenisi di atas tentu $Q = 0$. Jika disubstitusikan kedalam persamaan 2.5 akan didapat sebagai berikut :

$$Q = (u_2 - u_1) + W$$

$$0 = (u_2 - u_1) + W$$

Berarti kerja yang dilakukan untuk proses adiabatik adalah:

$$W = (u_1 - u_2) \text{ (kerja luar sama dengan tenaga dalam)} \quad (4.11)$$

Persamaan (4.11) berlaku untuk seluruh proses adiabatik baik yang dapat dibalik ataupun yang tidak dapat dibalik. Pada ekspansi adiabatik, kerja yang dilakukan merupakan pengurangan dari energi dalam. Sebaliknya dalam kompresi adiabatik, semua kerja yang dilakukan terhadap fluida merupakan penambahan energi dalam dari fluida itu sendiri. Pada proses adiabatik sangat diperlukan sekali, dinding thermal sempurna sebagai penyekat panas. Untuk uap yang mengalami proses adiabatik yang dapat dibalik, kerjanya dapat dihitung dengan menggunakan rumus (4.11), dan tentukan harga u_1 , dan u_2 dari tabel. Dengan tujuan menyederhanaan keadaan 2, perlu dijelaskan bahwa proses yang berlangsung adalah adiabatik dapat dibalik. Pada proses yang demikian entropy (S), berharga konstan. Kenyataan ini

dapat digunakan untuk menjelaskan keadaan 2.

Untuk gas ideal, hukum yang berlaku dalam menentukan hubungan P dan V , pada proses adiabatik dapat dibalik adalah bentuk differensial dari persamaan 2.5. yakni :

$$dQ = du + dW$$

karena $dW = p dV$ pada proses dapat dibalik.

maka,

$$dQ = du + p dV = 0 \quad (\text{karena } Q = 0 \text{ untuk adiabatik)} \quad (4.12)$$

Substitusikan harga $pV = RT$ ke persamaan (4.12), di dapat hubungan sebagai berikut :

$$du + \frac{RT}{V} \cdot dV = 0$$

$$du = C_v \cdot dT$$

Jadi,

$$C_v \cdot dT + \frac{RT}{V} \cdot dV = 0$$

Agar dapat diintegral semua suku dibagi dengan T , sehingga didapat :

$$C_v \cdot \frac{dT}{T} + \frac{R \cdot dV}{V} = 0$$

atau,

$$C_v \log_e T + R \log_e V = \text{konstan.} \quad (4.13)$$

$$T = \frac{PV}{R}$$

Setelah disubstitusikan dan dibagi dengan C_v , sehingga didapat hubungan sebagai berikut :

$$\log_e \frac{P V}{R} + \frac{R}{C_v} \log_e V = \text{konstan}$$

$$C_v = \frac{R}{\delta - 1} ; \frac{R}{C_v} = \delta - 1.$$

$$\log_e \frac{P V}{R} + (\delta - 1) \log_e V = \text{konstan}$$

$$\log_e \frac{P V}{R} + \log_e V^{\delta-1} = \text{konstan}$$

Jadi,

$$\log_e \frac{P V^{\delta} - 1}{R} = \text{konstan}$$

Berarti

$$\log_e \frac{P V^{\delta}}{R} = \text{konstan (C)}$$

$$P V^{\delta} = C \quad (4.14)$$

Karena itu kita telah mendapatkan hubungan yang sederhana

antara P dan V untuk tiap gas ideal yang mengalami proses adiabatik dapat dibalik. Tiap gas ideal mempunyai harga δ tersendiri.

Dengan menggunakan kaedah $PV = RT$, hubungan antara T dan V serta T dan P dapat ditentukan.

$$P = \frac{RT}{V}$$

Substitusikan ke persamaan (4.14) didapat :

$$\frac{RT}{V} \cdot V^\delta = C$$

$$T \cdot V^{\delta - 1} = C \quad (4.15)$$

Juga $V = RT/P$, dengan mensubstitusikan kepersamaan (4.14), didapat,

$$P \left(\frac{RT}{P} \right)^\delta = C$$

atau,

$$\frac{T}{P (\delta - 1)^\delta} = C \quad (4.16)$$

Oleh karena itu untuk proses adiabatik dapat di balik gas ideal antara titik 1 dan 2 dapat ditulis, persamaan (4.14), menjadi

$$P_1 V_1^\delta = P_2 \cdot V_2^\delta$$

Persamaan (4.15) menjadi,

$$T_1 V_1^{\delta-1} = T_2 V_2^{\delta-1}$$

Persamaan (4.16) menjadi,

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\delta-1}{\delta}}$$

Kerja yang dilakukan pada proses adiabatik untuk tiap kg gas ideal adalah :

$$W = (u_1 - u_2).$$

Sedangkan untuk 1 kg gas ideal adalah :

$$u_2 - u_1 = C_v (T_2 - T_1)$$

$$W = C_v (T_1 - T_2).$$

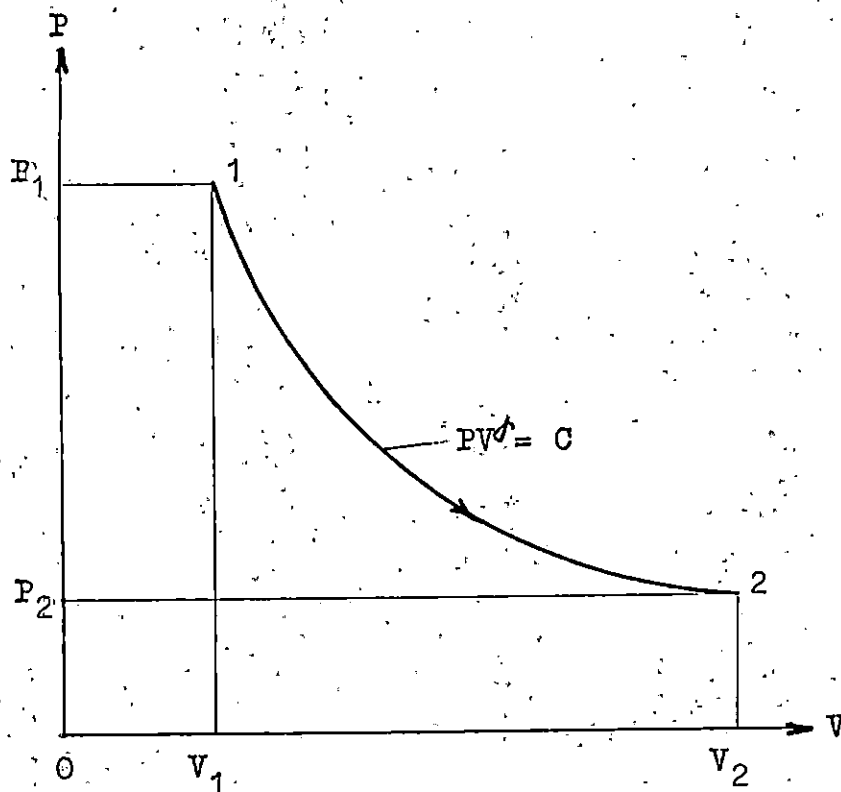
Substitusikan harga $C_v = R/\delta - 1$ didapat,

$$W = \frac{R (T_1 - T_2)}{(\delta - 1)} \quad (4.17)$$

Substitusikan pula harga $P V = RT$ ke persamaan (4.17) didapat

$$W = \frac{P_1 V_1 - P_2 V_2}{\delta - 1} \quad (4.18)$$

Diagram P V proses adiabatik dapat dilihat pada gambar (4.6) dibawah ini :



Gambar 4.6. Diagram P - V proses adiabatik.

Contoh soal 4.4.

1 kg uap pada $p = 100$ bar dan $t = 375^\circ\text{C}$, ditekan secara adiabatik dapat dibalik dalam tabung berdinding thermal sempurna dibelakang piston, sampai tekanan 38 bar. Uap tersebut menjadi kering jenuh. Hitunglah kerja yang dilakukan uap itu.

Jawab :

Dari tabel untuk tekanan 100 bar dan suhu 375°C dapat dibaca data :

$$h_1 = 3017 \text{ kJ/kg dan } V_1 = 0,02453 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{maka } u_1 = h_1 - PV$$

$$= 3017 - \frac{100 \cdot 10^5 \cdot 0,02453}{10^3} = 2771,7 \text{ kJ/kg.}$$

Jadi $u_2 = u_g$ pada tekanan 38 bar didapat 2602 kJ/kg.

Dinding thermal sempurna maka proses yang berlangsung adalah adiabatik, maka kerja yang dilakukan :

$$W = u_1 - u_2 = 2771,7 - 2608 = 169,7 \text{ kJ/kg.}$$

C. Proses Polytropik

Menurut Tayner Joel, (1974 ; 67), proses polytropik maksudnya perubahan keadaan yang terjadi pada gas, tetapi panas jenis (C) tetap. Dalam praktek banyak terjadi proses yang mendekati hukum reversible atau $PV^n = C$. Dimana n = konstan.

Gas ideal dan uap memenuhi hukum reversible banyak proses tak spontan. Dari persamaan 2.6. kerja untuk proses reversible kita dapatkan :

$$W = \int P dV$$

Untuk proses polytropik $PV^n = C$, maka $P = C/V^n$

Persamaan (2.6) menjadi:

$$W = C \int_{v_1}^{v_2} \frac{dV}{V^n} = C \left(\frac{V^{-n+1}}{-n+1} \right)$$

$$W = C \left(\frac{V_2^{-n+1} - V_1^{-n+1}}{-n+1} \right)$$

$$W = C \left(\frac{V_1^{1-n} - V_2^{1-n}}{n-1} \right) \quad C = P V^n$$

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

$$\text{Kerja (W)} = \frac{P_1 V_1 - P_2 V_2}{n-1} \quad (4.19)$$

Persamaan (4.19) dapat digunakan untuk menghitung kerja fluida yang mengalami proses polytropik reversible, sehingga hubungan antara tekanan dan volume, tekanan dan temperatur, serta volume dan temperatur dapat ditulis sebagai berikut dan secara prinsip sama dengan proses adiabatik reversible.

Hubungan tekanan dan volume pada titik satu dan dua :

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^n \quad (4.20)$$

Hubungan temperatur dan tekanan pada titik 1 dan 2 :

$$P V^n = C$$

$$P = \frac{RT}{V}$$

$$\frac{RT}{V} \cdot V^n = C$$

$$V = \frac{RT}{P}$$

Jadi

$$\frac{T_2}{T_1} \left(\frac{P_2^{n-1}}{P_1} \right) \quad (4.21)$$

Sedangkan hubungan temperatur dan volume adalah sebagai berikut :

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2^{n-1}}{V_1} \right) \quad (4.22)$$

Dalam penggunaan rumus diatas yaitu (4.20) dan (4.22) sama sekali tidak dapat digunakan untuk uap yang mengalami proses polytropik, sebab persamaan karakteristiknya adalah $PV = RT$, yang digunakan untuk menurunkan persamaan-persamaan di atas yang hanya berlaku untuk gas ideal.

Untuk gas ideal yang melakukan ekspansi secara polytropik, kadang kala lebih tepat untuk menjelaskan kerja yang dilakukan dengan melihat perbedaan temperatur. Dengan demikian rumus (4.19), dapat ditulis sebagai berikut :

$$W = \frac{R (T_1 - T_2)}{n - 1} \quad (4.23)$$

dengan mensubstitusikan $PV = RT$

Jika untuk massa gas m :

$$W = \frac{m \cdot R (T_1 - T_2)}{n - 1} \quad (4.24)$$

Dengan menggunakan persamaan energi non aliran, panas yang mengalir selama proses polytropik dapat diketahui jumlahnya, yaitu :

$$\begin{aligned} Q &= (u_2 - u_1) + W \\ &= C_v (T_2 - T_1) + \frac{R (T_1 - T_2)}{n - 1} \\ &= \frac{R (T_1 - T_2)}{n - 1} - C_v (T_1 - T_2) \end{aligned}$$

Substitusikan harga $C_v = \frac{R}{(\delta - 1)}$ didapat :

$$Q = \frac{R}{(n - 1)} (T_1 - T_2) - \frac{R}{(\delta - 1)} (T_1 - T_2)$$

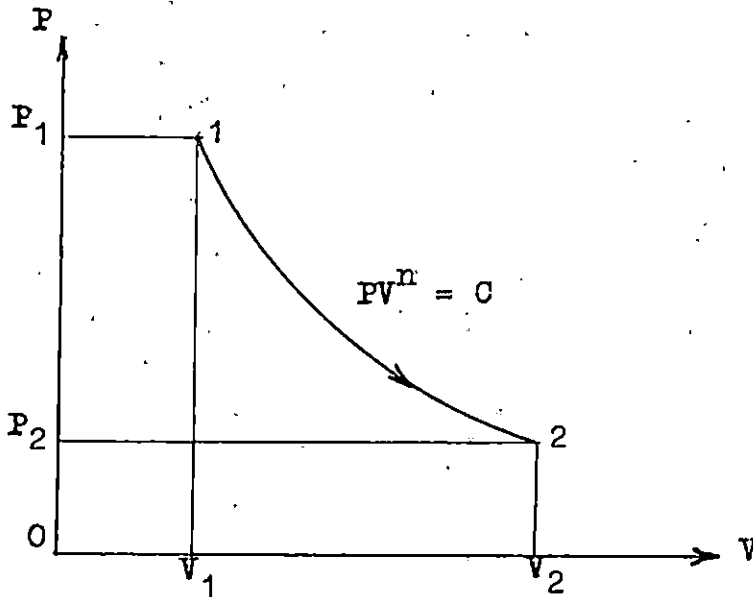
Sehingga di dapat :

$$Q = \left(\frac{\delta - n}{\delta - 1} \right) \frac{R (T_1 - T_2)}{n - 1} \quad (4.25)$$

atau

$$Q = \left(\frac{\delta - n}{\delta - 1} \right) W \quad (4.26)$$

Diagram PV untuk proses polytropik dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4.7. Diagram P - V untuk proses polytropik.

Dalam proses polutropik indek n , hanya bergantung kepada jumlah panas dan kerja yang dilakukan selama proses. Berbagai proses yang telah diperbincangkan sebelumnya, merupakan kasus khusus dari proses polytropik gas ideal. Menurut Eastop Thomas D, (1978 ; 80) jika :

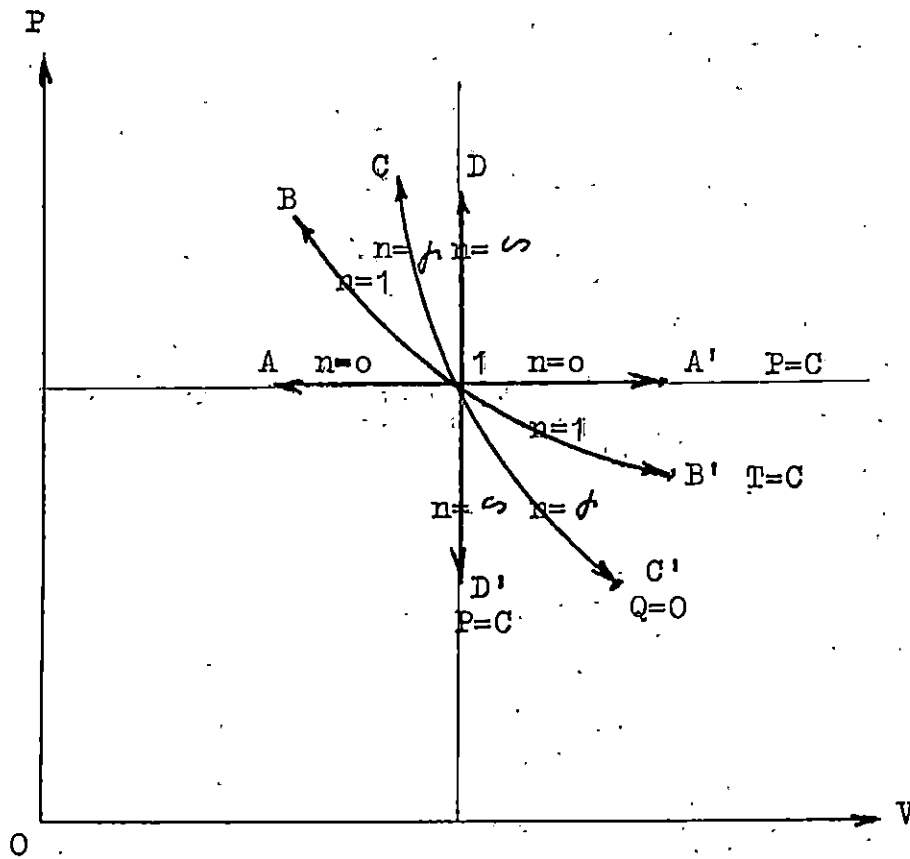
$n = 0$, $pV^0 = C$, sehingga $P = C$.

$n = \infty$, $PV = C$, sehingga $P^{1/\infty} \cdot V = C$ akibatnya $V = C$.

$n = 1$, $PV = C$, sehingga $T = C$.

$n = \delta$, $PV^\delta = C$, adalah proses adiabatik reversible.

Hal ini digambarkan pada diagram PV proses polytropik untuk beberapa keadaan n (gambar 4.8).



Gambar 4.8. Diagram P V proses polytropik, untuk beberapa keadaan n .

Keadaan 1 ke keadaan A adalah pendinginan tekanan tetap ($n = 0$).

Keadaan 1 ke keadaan B adalah kompresi isothermal ($n=1$).

Keadaan 1 ke keadaan C adalah kompresi adiabatik reversible ($n = \infty$).

Keadaan 1 ke keadaan D adalah pemanasan volume konstan ($n = \infty$).

Sama halnya dengan keadaan 1 ke A' adalah persamaan tekanan konstan; 1 ke B' ekspansi isothermal; 1 ke C' ekspansi adiabatik reversible; 1 ke D' pendinginan tekanan tetap, perlu diketahui, jika δ (gamma) selalu besar dari 1, maka proses 1 - C, harus berada antara proses 1 - B dan 1 - D, demikian juga proses 1 - C', berada antara 1 - B' dan 1 - D'. Untuk uap generalisasi seperti di atas tidak dapat dilakukan.

Suatu proses penting untuk uap akan dijelaskan di sini, uap dapat mengalami proses seperti menurut hukum $PV = \text{konstan}$. Dalam masalah ini, persamaan karakteristik $PV = RT$, tak berlaku untuk uap, maka proses yang terjadi tidak isothermal, namun untuk mengetahui keadaan akhir proses dapat digunakan tabel uap.

Contoh soal 4.5.

1 kg gas ideal ditekan pada 1,1 bar dan suhu 27°C , menurut hukum $PV^{1,3} = C$ menjadi 6,6 bar. Hitunglah jumlah panas yang mengalir dari dan ke dinding silinder.

Jika :

- Gas itu etana (BM = 30) dengan $C_p = 1,75 \text{ kJ/kg K}$.
- Gas itu argon (BM = 40) dengan $C_p = 0,515 \text{ kJ/kg K}$.

Jawab :

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$= 300 \left(\frac{6,6}{1,1} \right)^{1,3-1/1,3}$$

$$= 453,6^{\circ}\text{K.}$$

$$\text{a. } R = \frac{8,314}{30} = 0,277 \text{ kJ/kg K.}$$

$$C_v = C_p - R = 1,75 - 0,277 = 1,473 \text{ kJ/kg K.}$$

$$\text{Gamma } (\delta) = \frac{C_p}{C_v} = \frac{1,75}{1,473} = 1,88$$

$$W = \frac{R(T_1 - T_2)}{n - 1} = \frac{0,277 (300 - 453,6)}{1,3 - 1}$$

$$W = -141,8 \text{ kJ/kg.}$$

Panas yang dibutuhkan :

$$Q = \left(\frac{\delta - n}{\delta - 1} \right) W = \left(\frac{1,88 - 1,3}{1,88 - 1} \right) - 141,8 = 84,5 \text{ kJ/kg.}$$

$$\text{b. } R = \frac{8,314}{40} = 0,208 \text{ kJ/kg K.}$$

$$C_v = C_p - R = 0,515 - 0,208 = 0,307 \text{ kJ/kg K.}$$

$$\text{Gamma } (\delta) = \frac{0,515}{0,307} = 1,678$$

$$\text{Kerja } (W) = \frac{R (T_1 - T_2)}{n - 1} = \frac{0,208 (300 - 453,6)}{1,3 - 1}$$

$$= - 106,5 \text{ kJ/kg.}$$

$$\text{Panas (Q)} = \frac{\delta - n}{\delta - 1} W = \left(\frac{1,678 - 1,3}{1,678 - 1} \right) - 106,5$$

$$= - 59,4 \text{ kJ/kg.}$$

Jadi panas yang diberikan 59,4 kJ/kg.

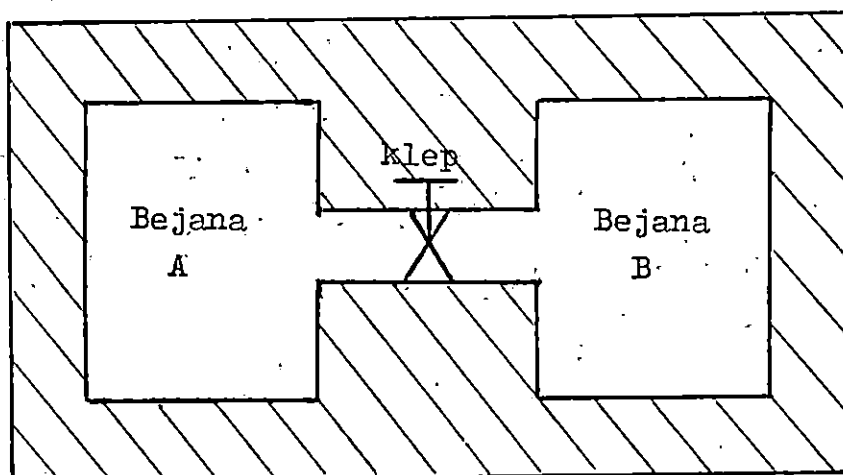
D. Proses yang Tidak-Dapat Dibalik (Irreversible)

Kriteria penentuan reversibilititas, sudah dijelaskan pada uraian terdahulu dan persamasannya sudah dituliskan pada bab IV. Dimana persamaan itu dapat digunakan, jika proses tersebut benar-benar memenuhi kriteria reversibilititas, dengan pendekatan seteliti mungkin. Pada proses di mana fluida terdapat dalam satuan silinder yang berada di belakang piston pengaruh gesekan dapat diabaikan. Selanjutnya untuk memenuhi kriteria (C), kalor haruslah tidak pernah berpindah ke atau dari system sampai batas selisih temperatur dapat dicapai. Hal ini mungkin dapat terjadi pada proses isothermal saja, yakni jika selama proses, suhu system berubah terus menerus, disamping itu agar kriteria (C) terpenuhi dibutuhkan pula suhu pendinginan atau pemanasan yang berada ditengah-tengah suhu system. Dalam teori cara untuk mencapai reversibilititas dapat disebutkan dengan sudah, tapi dalam praktek hal itu sulit dilakukan, bahkan mendekatipun jarang terjadi, jika keadaan irreversible kita terima, sebenarnya kita masih bisa mendapatkan proses reversible secara isothermal. Berarti

system mengalami proses bolak balik, sedangkan di luar system tidak terjadi proses irreversible. Sebagian besar proses yang terjadi dalam silinder di belakang piston dapat dianggap reversible secara isothermal. Beberapa proses tidak bisa dianggap reversible secara isothermal.

1. Ekspansi Bebas.

Proses ini telah disinggung pada uraian yang lalu, yang mana kerja yang dilakukan fluida sangat ditentukan oleh harga integral $p \, dV$. Ambillah 2 bejana A dan B (gambar 4.9).



Gambar 4.9. Ekspansi bebas

Kedua bejana dihubungkan oleh sebuah pipa yang berkatup X, dan berdinding thermal sempurna sebagai penyekat. Bejana A berisi fluida dengan tekanan yang diketahui, sedangkan bejana B benar-benar kosong. Kalau katup X dibuka, fluida yang berada dalam A akan mengalir dengan

cepat ke dalam bejana B. Sehingga tekanan kedua bejana akan sama dan lebih rendah dari tekanan awal. Proses inilah yang disebut ekspansi tak tertahan atau bebas. Proses ini adalah irreversible. Fluida mengalir secara terus menerus kesatu atau selama proses. Panas berpindah sebesar :

$$Q = (u_2 - u_1) + W$$

diantara keadaan akhir dan keadaan awal.

Dalam proses ini tidak ada panas yang berpindah ke atau dari fluida, juga tidak ada kerja yang dilakukan selama penyekat tidak bergerak. Akibatnya proses ini adiabatik irreversible, sehingga;

$$Q = 0 ; W = 0$$

Jadi

$$u_2 - u_1 = 0 \text{ atau } u_2 = u_1.$$

Artinya dalam ekspansi bebas energi dalam diawal proses sama dengan energi dalam di akhir proses. Untuk gas ideal

$$u = C_v T.$$

Maka pada ekspansi bebas untuk gas ideal berlaku ;

$$C_v T_1 = C_v T_2, \text{ sehingga } T_1 = T_2.$$

Dengan demikian suhu awal sama dengan suhu akhir untuk gas ideal yang mengalami ekspansi bebas.

Contoh soal 4.6.

Udara bertekanan 20 bar terdapat di dalam bejana dengan volume 1 m^3 . Katup X dibuka dan udara berekspansi untuk mengisi bejana A dan B. Dengan menganggap volume kedua bejana sama. Hitunglah tekanan akhir udara itu.

Jawab :

Dalam ekspansi bebas gas ideal berlaku $T_1 = T_2$. Sekarang V_2 adalah volume gabungan yaitu :

$$V_2 = V_A + V_B = 1 + 1 = 2 \text{ m}^3.$$

$$V_1 = 1 \text{ m}^3.$$

$$\text{Maka } P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_2} = 20 \cdot 0,5 = 10 \text{ bar.}$$

Soal-soal :

1. $0,085 \text{ m}^3$ gas ideal dimampatkan sampai volume $0,034 \text{ m}^3$. Tekanan awal 1 bar dan tekanan akhir 9 bar, $C_v = 0,0724 \text{ kJ/kg K}$, $C_v = 1,02 \text{ kJ/kg K}$. Setelah diamati, suhu naik menjadi 146°K . Hitunglah konstanta gas R, massa gas akhir, serta energi dalam.
2. 1 kg gas Ni (BM = 28) dimampatkan secara reversible dan isothermal dari tekanan 1,01 bar, suhu 20°C pada tekanan 4,2 bar. Hitunglah kerja dan jumlah panas yang dipindahkan selama proses berlangsung.

3. Sebuah silinder berisi $0,28 \text{ m}^3$ gas sempurna pada tekanan absolut $1,035 \text{ bar}$ dan temperatur 29°C . Gas tersebut ditekan mengikuti proses $PV^{1,3} = C$ sampai volume $0,028 \text{ m}^3$. Tenaga panas diberikan pada tekanan tetap sampai volume $0,056 \text{ m}^3$. Hitunglah:
- Suhu dan tekanan akhir masing-masing proses.
 - Perubahan tenaga dalam.
 - Kerja yang dipindahkan masing-masing proses, jika $C_p = 1,06$ dan $C_v = 0,75 \text{ kJ/kg K}$.
4. Selama proses non aliran $0,042 \text{ m}^3$ pada tekanan absolut $= 0,3 \text{ bar}$ dan suhu 316°C . Diekspansi sampai volume $0,168 \text{ m}^3$, jika $C_p = 1,005$ dan $C_v = 0,718 \text{ kJ/kg K}$. Hitunglah energi yang dipindahkan, serta temperatur akhir, jika proses :
- Isothermal.
 - Adiabatik.
5. Selama proses polytropik non aliran gas dengan volume $0,182 \text{ m}^3$, tekanan absolut $1,035 \text{ bar}$ dan suhu 27°C , ditekan sampai suhu 282°C , dan tekanan $12,4 \text{ bar}$, jika $C_p = 1,005$ dan $C_v = 0,175 \text{ kJ/kg K}$. Tentukanlah :
- Harga indeks kompresi.
 - Kerja yang dipindahkan.
 - Perubahan internal energi.
 - Tenaga panas yang dipindahkan.

DAFTAR . KEPUSTAKAAN

Anwari, Ir. Sistim Satuan Internasional (SI), Jakarta Departemen Pendidikan dan Kebudayaan. 1978. Jilid I.

Eastop, Thomas D. Applied Thermodynamics for Engineering Technologists. New York, Longman Publishing. 1978.

J. Hannah & M. J. Hiller. Mechanical Engineering Science. London. Pitman Publishing. 1977.

Rayner Joel. Basic Engineering Thermodynamics in SI Units. New York. Longman Publishing. 1974.