

TERMODINAMIKA TEKNIK

(Buku Teks Untuk Mahasiswa Teknik)

Volume I



EDISI 2023

UNIVERSITAS DARMA PERSADA – JAKARTA

ASY'ARI DARYUS

TERMODINAMIKA TEKNIK

(Buku Teks Untuk Mahasiswa Teknik)

VOLUME I

Disusun Oleh:

ASY'ARI DARYUS

2023

UNIVERSITAS DARMA PERSADA

JAKARTA

TERMODINAMIKA TEKNIK

(Buku Teks Untuk Mahasiswa Teknik)

VOLUME 1

Edisi tahun 2023

Penulis: Asy'ari Daryus

Buku ini khusus digunakan di lingkungan
Universitas Darma Persada

Dikeluarkan di Jakarta oleh:
Universitas Darma Persada

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim.

Untuk memenuhi buku pegangan dalam perkuliahan, terutama yang menggunakan bahasa Indonesia dalam bidang teknik, maka kali ini penulis menyempatkan diri untuk ikut membuat sebuah buku/diktat yang bisa digunakan oleh mahasiswa teknik, terutama mahasiswa jurusan teknik mesin.

Buku ini disesuaikan dengan kebutuhan perkuliahan di Universitas Darma Persada dimana diprntunjukkan untuk mata kuliah termodinamika teknik. Buku ini merupakan penyempurnaan dari buku/diktat sebelumnya, dimana telah dilakukan beberapa perbaikan dan penambahan isi.

Perlu ditekankan bahwa buku ini belum merupakan referensi lengkap dari pelajaran Termodinamika Teknik, sehingga mahasiswa perlu untuk membaca buku-buku referensi lain untuk melengkapi pengetahuannya tentang materi buku ini.

Akhir kata, mudah-mudahan buku ini bisa menjadi penuntun bagi mahasiswa dan memberikan manfaat sebagaimana yang diharapkan. Tak lupa penulis mengucapkan banyak-banyak terima-kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dalam penyelesaian pembuatan buku ini.

Jakarta, Oktober 2023

Asy'ari Daryus

DAFTAR ISI

1 Pendahuluan 1

- 1.1. Hukum Gerak 1
 - 1.1.1 Hukum Pertama Newton 1
 - 1.1.2 Hukum Kedua Newton 1
 - 1.1.3 Massa dan Berat 2
 - 1.1.4 Hukum Ketiga Newton Tentang Gerak 39
- 1.2 Kerja 3
- 1.3 Daya 3
- 1.4 Energi 4
- 1.5 Tekanan 4
- 1.6 Temperatur 5
 - 1.6.1 Pengukuran Temperatur 5
 - 1.6.2 Temperatur Absolut 6
- 1.7 Kalor 6
 - 1.7.1 Ekuivalen Mekanik dan Kalor 7
 - 1.7.2 Kalor Spesifik 7
 - 1.7.3 Kapasitas Kalor 8
- 1.8 Sistem Termodinamika 8
 - 1.8.1 Klasifikasi Sistem Termodinamika 9
 - 1.8.2 Sifat-sifat Sistem 10
 - 1.8.3 Klasifikasi Sifat-sifat Sistem 10
- 1.9 Keseimbangan Termal 11
- 1.10 Hukum Termodinamika 11
 - 1.10.1 Hukum Termodinamika ke-nol 11
 - 1.10.2 Hukum Termodinamika Ke-satu 12
 - 1.10.3 Hukum Termodinamika Ke-dua 12

2 Sifat-sifat Gas Sempurna 15

- 2.1 Hukum Gas Sempurna 15
 - 2.1.1 Hukum Boyle 15
 - 2.1.2 Hukum Charles 16
 - 2.1.3 Hukum Gay-Lussac 17
- 2.2 Persamaan Umum Gas 17
- 2.3 Hukum Joule 18
- 2.4 Persamaan Karakteristik Gas 18
- 2.5 Hukum Avogadro 21
- 2.6 Konstanta Gas Universal atau Konstanta Molar 22
- 2.7 Kalor Spesifik Gas 22

- 2.7.1 Kalor Spesifik pada Volume Konstan 23
- 2.7.2 Kalor Spesifik pada Tekanan Konstan 24
- 2.7.3 Hubungan Antar Kalor Spesifik 25
- 2.7.4 Rasio Kalor Spesifik 26
- 2.8 Enthalpi 28

3 Proses Termodinamika Gas Sempurna 33

- 3.1 Proses Volume Konstan 34
- 3.2 Proses Tekanan Konstan 35
- 3.3 Proses Hiperbolik 38
- 3.4 Proses Isothermal (Proses Temperatur Konstan) 38
- 3.5 Proses Adiabatik atau Proses Isentropik 42
- 3.6 Proses Politropik 49
 - 3.6.1 Kerja yang Diserap atau Dihasilkan Selama Proses Politropik 50
 - 3.6.2 Laju Penyerapan atau Pelepasan Kalor per Satuan Volume 51
 - 3.6.3 Indeks Politropik, n 52
- 3.7 Proses Ekspansi Bebas 54
- 3.8 Proses Throttling 54
- 3.9 Hukum Umum Ekspansi dan Kompresi 55

4. Entropi Gas Sempurna 59

- 4.1 Hubungan Kalor Dengan Entropi 59
- 4.2 Persamaan Umum Perubahan Entropi Gas Sempurna 60
 - 4.2.1 Dalam Volume dan Temperatur Absolut 61
 - 4.2.2 Dalam Tekanan dan Temperatur Absolut 61
 - 4.2.3 Dalam Tekanan dan Volume 62
- 4.3 Perubahan Entropi Gas Sempurna Pada Berbagai Proses Termodinamika 63

- 4.3.1 Perubahan Entropi Pada Proses Volume Konstan 63
 - 4.3.2 Perubahan Entropi Pada Proses Tekanan Konstan 64
 - 4.3.3 Perubahan Entropi Pada Proses Temperatur Konstan 65
 - 4.3.4 Perubahan Entropi Pada Proses Politropik ($pV^n = \text{konstan}$) 67
 - 4.3.5 Perubahan Entropi Selama Proses Adiabatik (Proses Isentropik) 68
 - 4.4 Metode Pendekatan Untuk Penyerapan Kalor 69
 - 4.5 Mesin Kalor dan Pompa Kalor 72
 - 4.5.1 Mesin Kalor 73
 - 4.5.2 Pompa Kalor 75
- 5 Siklus Udara Termodinamika 93**
- 5.1 Asumsi-asumsi Pada Siklus Termodinamika 80
 - 5.2 Klasifikasi Siklus Termodinamika 80
 - 5.2.1 Siklus Reversibel 80
 - 5.2.2 Siklus Ireversibel 81
 - 5.3 Reversibilitas Proses Termodinamika 81
 - 5.4 Hubungan Antara Siklus dan Mesin 82
 - 5.5 Kerja Mesin Ideal 82
 - 5.6 Istilah-istilah Penting pada Siklus Termodinamika 83
 - 5.7 Efisiensi Siklus 84
 - 5.8 Jenis-jenis Siklus Termodinamika 85
 - 5.8.1 Siklus Carnot 85
 - 5.8.2 Siklus Stirling 92
 - 5.8.3 Siklus Ericsson 95
 - 5.8.4 Siklus Joule 98
 - 5.8.5 Siklus Otto 102
 - 5.8.6 Siklus Diesel 105
 - 5.8.7 Siklus Pembakaran Dual 110
- 6 Sifat-sifat Zat Murni 119**
- 6.1 Perubahan Fasa Zat Murni, Persamaan Clayperon 121
 - 6.2 Tekanan Uap dan Kalor Laten 124
 - 6.3 Sifat-sifat Sistem Dua Fasa 125
 - 6.4 Ekspansivitas Volume dan Kompresibilitas Isothermal Bahan Padat dan Cair 126
- 6.5 Kapasitas Kalor Bahan Padat dan Cair 127
 - 6.6 Kapasitas Kalor Gas 129
- 7 Pembentukan dan Sifat-sifat Uap Air 133**
- 7.1 Pembentukan Uap Air Pada Tekanan Konstan 133
 - 7.2 Istilah-istilah Penting 135
 - 7.3 Tabel Uap dan Penggunaannya 139
 - 7.4 Uap Panas Lanjut 143
 - 7.5 Kerja Luar Selama Proses Penguapan 145
 - 7.6 Energi Dalam Uap 146
- 8 Entropi Uap Air 153**
- 8.1 Entropi Air 153
 - 8.2 Kenaikan Entropi Selama Proses Penguapan 154
 - 8.3 Entropi Uap Basah dan Uap Kering 154
 - 8.4 Entropi Uap Panas Lanjut 155
 - 8.5 Diagram Temperatur-Entropi ($T-s$) Untuk Air dan Uap 157
 - 8.6 Garis Isotermal Pada Diagram $T-s$ 158
 - 8.7 Garis Adiabatik Pada Diagram $T-s$ 159
 - 8.8 Diagram Enthalpi-Entropi ($h-s$) Untuk Air-Uap atau Grafik Mollier 160
 - 8.9 Garis Fraksi Kekeringan Pada Diagram $h-s$ 160
 - 8.10 Garis Isotermal Pada Diagram $h-s$ 161
 - 8.11 Garis Tekanan Konstan Pada Diagram $h-s$ 162
 - 8.12 Garis Volume Konstan Pada Diagram $h-s$ 162
 - 8.13 Garis Adiabatik Pada Diagram $h-s$ 163
 - 8.14 Garis Throttle Pada Diagram $h-s$ 164
- 9 Prose Termodinamika Uap Air 167**
- 9.1 Proses Volume Konstan 167
 - 9.2 Proses Tekanan Konstan 170
 - 9.3 Proses Isotermal 173
 - 9.4 Proses Hiperbolik 174
 - 9.5 Proses Politropik 177

9.6 Proses Adiabatik atau Proses Isentropik
181

9.7 Proses Throttle (Proses Kalor Konstan)
184

10 Siklus Uap Termodinamika 189

10.1 Siklus Carnot Dengan Uap Air Sebagai
Fluida Kerja 189

10.2 Siklus Rankine 193

10.3 Siklus Rankine Dengan Penguapan
Tidak Sempurna 199

10.4 Siklus Rankine Dengan Sistem Panas
Lanjut 202

Daftar Pustaka 205

Lampiran 207

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Hukum Gerak

Newton telah merumuskan tiga hukum tentang gerak, dimana merupakan dasar asumsi untuk sebuah sistem dinamis. Ketiga hukum tentang gerak ini dikenal sebagai:

1. Hukum pertama Newton tentang gerak.
2. Hukum kedua Newton tentang gerak.
3. Hukum ketiga Newton tentang gerak.

1.1.1 Hukum Pertama Newton

Hukum pertama Newton tentang gerak berbunyi: *Setiap benda akan tetap diam atau bergerak secara teratur dalam sebuah garis lurus, kecuali ada gaya yang bekerja padanya.*

1.1.2 Hukum Kedua Newton

Hukum kedua Newton tentang gerak berbunyi: *Laju perubahan momentum secara langsung berbanding lurus dengan gaya yang bekerja dan terjadi pada arah yang sama dengan arah gaya yang bekerja.*

Misalkan sebuah gaya bekerja pada sebuah benda yang membuat benda itu bergerak. Apabila:

m = massa benda

F = gaya yang bekerja

u_0 = kecepatan awal benda

u_t = kecepatan akhir benda

t = waktu benda tersebut merubah kecepataannya dari u ke v dalam detik.

Menurut hukum kedua Newton tentang gerak:

$$F \propto \frac{mu_t - mu_0}{t} \propto \frac{m(u_t - u_0)}{t} \quad (1.1)$$

$$F \propto ma = kma \quad (1.2)$$

dimana a = percepatan = $(u_t - u_0)/t$; k = konstanta.

1.1.3 Massa dan Berat

a. Massa

Massa adalah jumlah materi yang terkandung pada suatu benda, dan tidak berubah karena perubahan posisinya di permukaan bumi. Massa benda diukur dengan perbandingan langsung dengan massa standar dengan menggunakan timbangan.

b. Berat

Berat adalah jumlah tarikan, dari bumi terhadap suatu benda. Karena besar tarikan berubah karena perbedaan jarak benda terhadap pusat bumi, maka berat benda juga akan berubah karena perubahan posisinya di permukaan bumi. Jadi jelas bahwa berat adalah sebuah *gaya*.

Besar tarikan bumi dalam satuan Metriks, pada level permukaan laut dan lintang 45° , telah diambil sebagai satu satuan gaya dan disebut satu kilogram gaya. Sayangnya satuannya sama dengan satuan massa.

Pada satuan CGS, satuan gaya adalah dyne. Satu dyne didefinisikan sebagai gaya, ketika bekerja pada massa satu gram, akan menghasilkan percepatan sebesar 1 cm/sec^2 pada arah gaya yang bekerja tersebut.

Dalam satuan MKS atau SI, satuan gaya disebut Newton (disingkat N). Satu Newton didefinisikan sebagai gaya, ketika bekerja pada massa satu kilogram, akan menghasilkan percepatan 1 m/sec^2 pada arah gaya tersebut.

Satuan Absolut dan Gravitasi dari Gaya

Jika sebuah benda massa 1 kg bergerak dengan percepatan $9,81 \text{ m/sec}^2$, maka gaya yang bekerja pada benda tersebut adalah $9,81 \text{ N}$. Kita tahu bahwa massa 1 kg

yang mengalami tarikan bumi dengan percepatan $9,81 \text{ m/sec}^2$ adalah 1 kg-berat. Sehingga:

$$1 \text{ kg-berat (1 kgf)} = 9,81 \text{ N}$$

dengan cara yang sama:

$$1 \text{ gm-berat} = 981 \text{ dyne}$$

Satuan gaya adalah kg-berat dan gm-berat (biasanya ditulis hanya kg dan gm) disebut *gravitasi* atau *satuan ahli teknik tentang gaya*, sedangkan Newton dan dyne disebut *satuan absolut* atau *satuan saintifik gaya*.

1.1.4 Hukum Ketiga Newton Tentang Gerak

Hukum Newton ketiga tentang gerak berbunyi berbunyi: “*setiap aksi, selalu ada reaksi yang sama besarnya dan berlawanan arah*”.

1.2 Kerja (Work)

Jika sebuah gaya bekerja pada sebuah benda dan benda mengalami perpindahan, dikatakan bahwa telah dilakukan kerja. Contohnya, jika sebuah gaya F bekerja pada sebuah benda sehingga menghasilkan perpindahan x pada arah gaya, kemudian kerja yang dilakukan oleh gaya:

$$W = F \cdot x \quad (1.3)$$

Satuan kerja bergantung pada satuan gaya dan perpindahan. Pada sistem MKS, satuan kerja adalah kilogram-meter (kg-m). Dalam sistem SI, satuan kerja adalah Newton-meter (N-m atau Joule).

1.3 Daya (Power)

Daya (*power*) adalah laju kerja atau kerja per satuan waktu. Daya adalah pengukuran kinerja suatu mesin, misalnya: sebuah mesin melakukan sejumlah kerja dalam satu detik akan dua kali lebih bertenaga dari pada mesin yang mengerjakan kerja yang sama dalam dua detik. Secara matematik Daya:

$$\text{Daya} = \frac{\text{Kerja yang dilakukan}}{\text{Waktu yang digunakan}} \quad (1.4)$$

Dalam sistem Metrik, satuan daya adalah *daya kuda* yang sama dengan 4500 kg-m per menit atau 75 kg-m per detik. Dalam sistem SI, satuan daya adalah Watt, yaitu sama dengan 1 N-m/s atau 1 J/s atau 1 Watt. Umumnya satuan daya yang lebih besar digunakan kilowatt (kW) yaitu sama dengan 1000 W.

1.4 Energi

Energi didefinisikan sebagai *kapasitas untuk melakukan kerja*. Energi dijumpai dalam berbagai bentuk, yaitu: mekanik, listrik, kimia, panas, cahaya dsb. Energi mekanik terdiri dari:

1. Energi potensial.
2. Energi kinetik.

Energi potensial dipunyai oleh benda untuk melakukan kerja karena *letaknya*, sedangkan energi kinetik ada karena *massa* dan *kecepatan*.

Hukum Kekekalan Energi

Hukum kekekalan energi berbunyi: “*energi tidak bisa dibuat atau dimusnahkan, namun bisa dirubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya*”.

1.5 Tekanan

Tekanan didefinisikan sebagai gaya per satuan luas. Satuan tekanan bergantung pada satuan gaya dan luas. Pada sistem MKS, satuan tekanan yang digunakan adalah kg/cm^2 dan kg/m^2 . Kadang-kadang tekanan digunakan dengan satuan *atmosfir* dan ditulis dengan *ata*. Dimana 1 ata = 1 kg/cm^2 .

Pada sistem SI, satuan tekanan yang digunakan adalah N/mm^2 , N/m^2 , kN/m^2 , MN/m^2 dsb. Tetapi kadang-kadang satuan tekanan yang lebih besar (bar) digunakan dimana:

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

Kadang-kadang tekanan dinyatakan dengan satuan lain yang disebut Pa (Pascal) dan kPa, dimana:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 \text{ dan } 1 \text{ kPa} = 1 \text{ kN/m}^2$$

Tekanan Gauge dan Tekanan Mutlak

Semua pengukur tekanan (*pressure gauge*) akan membaca perbedaan antara tekanan aktual pada suatu sistem dengan tekanan atmosfer. Bacaan yang diperoleh dari pengukur tekanan dikenal sebagai *tekanan gauge*, sedangkan tekanan mutlak disebut tekanan absolut. Secara matematik ditulis dengan:

$$\text{Tekanan absolut} = \text{Tekanan gauge} + \text{Tekanan atmosfer.}$$

Harga tekanan atmosfer diambil $1,033 \text{ kg/cm}^2$ atau 101.325 Pa atau $1,01325 \text{ bar}$ absolut pada permukaan laut.

1.6 Temperatur

Temperatur adalah istilah yang penting dan didefinisikan sebagai derajat panas atau tingkat intensitas panas suatu benda. Benda yang panas disebut mempunyai temperatur yang lebih tinggi, sedangkan benda dingin mempunyai temperatur yang lebih rendah.

1.6.1 Pengukuran Temperatur

Temperatur suatu benda diukur dengan termometer. Berikut ini adalah dua skala yang umum digunakan dalam mengukur temperatur suatu benda yaitu:

1. Skala Centigrade atau Celsius; dan
2. Skala Fahrenheit.

Masing-masing skala ini didasarkan atas dua titik tetap yang dikenal dengan titik beku air atau *titik es*, dan titik didih air atau *titik uap*.

1. Skala Celsius

Skala ini umumnya digunakan oleh ahli teknik dan ilmuwan. Titik beku air pada skala ini ditandai dengan nol, dan titik didih air ditandai dengan 100. Jarak antara titik ini dibagi dengan 100 sehingga tiap satu jarak/garis skala adalah satu derajat celsius (ditulis dengan $^{\circ}\text{C}$).

2. Skala Fahrenheit

Pada skala ini, titik beku air ditandai dengan 32 dan titik didih ditandai dengan 212. Jarak antaranya dibagi 180 dan setiap jarak/garis skala mewakili satu derajat Fahrenheit (ditulis dengan $^{\circ}\text{F}$).

Hubungan antara skala Centigrade dengan Fahrenheit diberikan oleh rumus:

$$\frac{^{\circ}\text{C}}{100} = \frac{^{\circ}\text{F} - 32}{180} \quad (1.5)$$

1.6.2 Temperatur Absolut

Jika harga temperatur digunakan dalam persamaan yang berhubungan dengan hukum-hukum fundamental, maka harga temperatur yang digunakan sebagai rujukan adalah nol sebenarnya atau nol mutlak.

Temperatur nol mutlak/absolut diambil pada harga -273°C atau -460°F . Temperatur yang diukur dari nol absolut ini disebut dengan temperatur mutlak. Skala celsius mutlak disebut dengan derajat Kelvin (disingkat dengan K); sehingga:

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273$$

Skala absolut Fahrenheit disebut derajat Rankine (disingkat dengan $^{\circ}\text{R}$); dan dirumuskan dengan:

$$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 460$$

1.7 Kalor

Jumlah panas/kalor diukur berdasarkan kuantitas untuk menaikkan temperatur dari massa air yang diketahui sebesar temperatur tertentu. Satuan-satuan berikut ini biasanya digunakan untuk mengukur jumlah kalor:

1. Calori

1 Calori adalah jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan temperatur satu gram air sebesar 1°C . Satuan yang lebih besar dari calori adalah kilocalori (kcal), yaitu jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan temperatur satu kilogram air sebesar 1°C .

Catatan : 1 kilocalori (kcal) = 1000 calori

2. Satuan kalor centigrade

Secara singkat ditulis C.H.U. (*Centigrade Heat Unit*), adalah jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan temperatur satu pound air sebesar 1°C . Kita tahu bahwa:

1 pound = 453,6 gram

sehingga : 1 C.H.U = 453,6 kalori

3. British Thermal Unit

Atau disingkat dengan B.Th.U. atau B.T.U., adalah jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan temperatur satu pound air sebesar 1 °F.

Catatan : 1. Satuan kalori kadang-kadang disebut gram kalori (gm-cal) dan satuan kalor centigrade disebut pound kalori.

2. Pada sistem MKS, satuan kalor digunakan kalori atau kilocalori (ditulis cal atau kcal). Secara matematik, kalor yang diperlukan untuk menaikkan m kg air sebesar T derajat kelvin jika kalor spesifik adalah C (dalam kcal/kg °K):

$$Q = m C T \text{ kcal}$$

3. Pada sistem SI, satuan kalor digunakan joule atau kilojoule (ditulis J atau kJ). Secara matematik, kalor yang diperlukan untuk menaikkan m kg air sebesar T derajat kelvin jika kalor spesifik adalah C (dalam kJ/kg °K):

$$Q = m C T \text{ kJ}$$

1.7.1 Ekvivalen Mekanik dari kalor

Kalor dan energi mekanik bisa saling berpindah. Dari eksperimen diketahui bahwa terdapat hubungan antara satuan kalor dan satuan kerja. Pada sistem SI, satuan kerja dan kalor adalah sama, yaitu Joule atau kiloJoule, sehingga kita bisa secara langsung mengkonversikan satuan kalor ke satuan kerja dan sebaliknya.

Pada sistem MKS, satuan kalor adalah cal (atau kcal) dan kerja adalah kg-m. Hubungan antara satuan kalor dan satuan kerja dituliskan dengan **J** (diambil dari nama Joule) dan dikenal sebagai ekivalen Joule atau ekivalen mekanik kalor, dimana:

$$1 \text{ kcal} = 427 \text{ kg-m}$$

1.7.2 Kalor Spesifik

Kalor spesifik atau kapasitas kalor suatu zat secara luas didefinisikan sebagai jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan temperatur satu satuan massa suatu zat sebesar 1°. Biasanya dinotasikan dengan C . Jika m kg suatu zat dengan kalor spesifik C diperlukan untuk menaikkan temperatur sebesar t° C, maka:

$$\text{Kalor yang diperlukan} = m.C.t \quad \text{kcal} \quad (1.6)$$

Nilai rata-rata kalor spesifik beberapa zat diberikan oleh Tabel 1.1.

1.7.3 Kapasitas Kalor

Kapasitas kalor sebuah zat bisa didefinisikan sebagai kalor yang diperlukan untuk menaikkan seluruh massa zat sebesar 1° . Secara matematik:

$$\text{Kapasitas kalor} = m.C \quad \text{kalori} \quad (1.7)$$

dimana m adalah massa zat dalam gram, C adalah kalor spesifik zat.

Tabel 1.1. Harga kalor spesifik beberapa zat.

<i>Padatan</i>	<i>Kalor Spesifik</i>	<i>Cairan</i>	<i>Kalor Spesifik</i>	<i>Gas pada tekanan atmosfer</i>	<i>Kalor spesifik</i>
Baja	0,117	Air	1,000	Udara	0,237
Tembaga	0,097	Es	0,594	Karbon Dioksida	0,198
Seng	0,093	Uap	0,500	Nitrogen	0,241
Mercury	0,033	Minyak Bensin	0,434	Oksigen	0,221
Batubara	0,241	Alkohol	0,600		
Arang	0,200	Minyak parafin	0,511		

1.8 Sistem Termodinamika

Sistem termodinamika secara luas bisa didefinisikan sebagai luas atau ruang tertentu dimana proses termodinamika terjadi. Atau adalah suatu daerah dimana perhatian kita difokuskan dalam mempelajari proses termodinamika. Sedikit observasi akan memperlihatkan bahwa sistem termodinamika mempunyai batas sistem, dan segala sesuatu yang ada di luar batas sistem disebut lingkungan. Batas sistem ini bisa saja berupa batas tetap seperti pada tangki yang berisi gas yang terkompresi, atau batas bergerak seperti yang dijumpai pada sejumlah volume cairan di dalam saluran pipa.

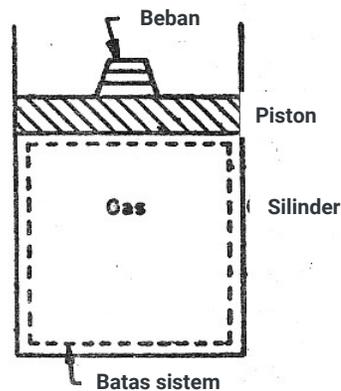
1.8.1 Klasifikasi Sistem Termodinamika

Sistem termodinamika bisa diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok:

1. Sistem tertutup;
2. Sistem terbuka; dan
3. Sistem terisolasi.

1. Sistem tertutup.

Merupakan sistem dimana massa sistem tetap dan identitas batas sistem ditentukan oleh ruang zat yang menempatinya. Sistem tertutup ditunjukkan oleh Gambar 1.1. Gas di dalam silinder dianggap sebagai suatu sistem. Jika panas diberikan ke silinder dari sumber luar, temperatur gas akan naik dan piston bergerak ke atas.



Gambar 1.1. Sistem termodinamika tertutup.

Ketika piston naik, batas sistem bergerak. Dengan kata lain, panas dan kerja melewati batas sistem selama proses, tetapi tidak ada terjadi penambahan atau pengurangan massa zat.

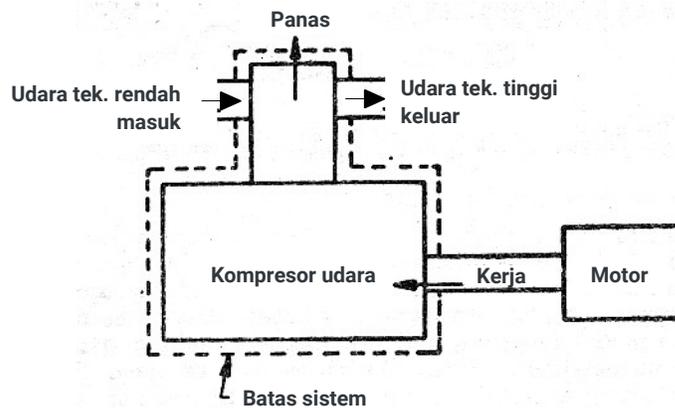
2. Sistem terbuka

Pada sistem ini, zat melewati batas sistem. Panas dan kerja bisa juga melewati batas sistem. Gambar 1.2 menunjukkan diagram sebuah kompresor udara yang menggambarkan sistem terbuka ini.

Zat yang melewati batas sistem adalah udara bertekanan rendah (L.P) yang memasuki kompresor dan udara bertekanan tinggi (H.P) yang meninggalkan kompresor. Kerja melewati batas sistem melalui poros penggerak dan panas ditransfer melewati batas sistem melalui dinding silinder.

3. Sistem terisolasi

Adalah sebuah sistem yang sama sekali tidak dipengaruhi oleh lingkungannya. Sistem ini massanya tetap dan tidak ada panas atau kerja yang melewati batas sistem.



Gambar 1.2. Sistem termodinamika terbuka.

1.8.2 Sifat-sifat Sistem

Keadaan sistem bisa diidentifikasi atau diterangkan dengan besaran yang bisa diobservasi seperti volume, temperatur, tekanan, kerapatan dan sebagainya. Semua besaran yang mengidentifikasi keadaan sistem disebut sifat-sifat sistem.

1.8.3 Klasifikasi Sifat-sifat Sistem

Sifat-sifat termodinamika bisa dibagi atas dua kelompok umum, yaitu

1. Sifat ekstensif, dan
2. Sifat intensif.

1. Sifat ekstensif

Parameter sistem dapat dibagi ke dalam beberapa bagian. Bila harga parameter dari keseluruhan sistem merupakan jumlah dari harga komponen-komponen

individunya di sistem tersebut, maka parameter tersebut disebut mempunyai *sifat ekstensif*. Contohnya, volume total, massa total, dan energi total sistem adalah sifat-sifat ekstensif.

2. Sifat intensif

Perhatikan bahwa temperatur sistem bukanlah jumlah dari temperatur-temperatur bagian sistem. Begitu juga dengan tekanan dan kerapatan sistem. Sifat-sifat seperti temperatur, tekanan dan kerapatan ini disebut *sifat intensif*, dimana harganya bukanlah jumlah dari komponen-komponennya.

1.9 Kesetimbangan Termal

Misalkan dua benda yang berasal dari material yang sama atau berbeda, yang satu panas, dan lainnya dingin. Ketika benda ini ditemukan, benda yang panas menjadi lebih dingin dan benda yang dingin menjadi lebih panas. Jika kedua benda ini dibiarkan bersinggungan untuk beberapa lama, akan tercapai keadaan dimana tidak ada perubahan yang bisa diamati terhadap sifat-sifat kedua benda tersebut. Keadaan ini disebut keadaan kesetimbangan termal, dan kedua benda akan mempunyai temperatur yang sama.

1.10 Hukum Termodinamika

Berikut ini ada tiga hukum termodinamika yang penting untuk diketahui:

1. Hukum termodinamika ke-nol,
2. Hukum termodinamika ke-satu dan
3. Hukum termodinamika ke-dua.

1.10.1 Hukum Termodinamika ke-Nol

Hukum ini berbunyi: “*Jika dua benda berada dalam kondisi kesetimbangan termal dengan benda ketiga, maka benda-benda tersebut berada dalam kesetimbangan termal satu sama lainnya*”.

1.10.2 Hukum Termodinamika ke-Satu

Hukum ini berbunyi: “*Kalor dan kerja mekanik adalah bisa saling tukar*”. Sesuai dengan hukum ini, maka sejumlah kerja mekanik dibutuhkan untuk menghasilkan

sejumlah kalor, dan sebaliknya.

Hukum ini bisa juga dinyatakan sebagai: “*Energi tidak bisa dibuat atau dimusnahkan, namun bisa dirubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya*”. Sesuai dengan hukum ini, energi yang diberikan oleh *kalor* mesti sama dengan *kerja eksternal yang dilakukan*, ditambah dengan *perolehan energi dalam* karena kenaikan temperatur.

Secara matematik:

$$Q = \Delta U + W \quad (1.8)$$

dimana Q adalah kalor yang dipindahkan, ΔU adalah perubahan energi dalam dan W adalah kerja yang dilakukan dalam satuan kalor

Persamaan di atas bisa juga ditulis dalam bentuk diferensial:

$$dQ = dU + dW \quad (1.9)$$

1.10.3 Hukum Termodinamika Ke-Dua

Hukum ini berbunyi: “*Ada batas tertentu dari jumlah energi mekanik, yang diperoleh dari sejumlah energi panas*”.

Hukum termodinamika ini telah dinyatakan oleh Claussius dalam bentuk yang sedikit berbeda: “*adalah tidak mungkin bagi mesin yang bekerja sendiri bekerja dalam proses siklik, untuk mentransfer panas dari benda dengan temperatur lebih rendah ke benda dengan temperatur yang lebih tinggi, tanpa adanya bantuan pihak luar*”. Atau dengan kata lain, panas tidak bisa mengalir dengan sendirinya dari benda dingin ke benda panas tanpa bantuan pihak eksternal.

Hukum ini juga dinyatakan oleh Kelvin-Planck sebagai: “*adalah tidak mungkin membuat mesin yang bekerja dalam proses siklik yang tujuannya untuk mengkonversi energi panas ke energi kerja*”. Dengan kata lain, tidak ada mesin panas sebenarnya, bekerja dalam proses siklik, bisa merubah energi panas yang diberikan menjadi kerja mekanik. Artinya terjadi penurunan energi dalam proses menghasilkan kerja mekanik dari panas. Berdasarkan pernyataan ini, hukum kedua termodinamika kadang-kadang disebut sebagai hukum *degradasi energi*.

Soal-soal

1. Coba anda sebutkan mengenai hukum pertama, kedua dan ketiga Newton.
2. Jelaskan perbedaan antara massa dan berat.
3. Jelaskan perbedaan anatar Kerja, Daya dan Energi.
4. Jelaskan perbedaan antara tejanan *gauge* dan tekanan mutlak.
5. Sebutkan klasifikasi sistem termodinamika, dan jelaskan.
6. Apa yang dimaksud dengan sifat ekstensif dan intensif dari sistem termodinamika.
7. Coba anda jelaskan pengertian dari hukum termodinamika ke-nol, ke-satu dan ke-dua.
8. Apa yang dimaksud dengan kesetimbangan termal.

“Barangsiapa yang menginginkan (kebahagiaan) dunia, maka hendaknya dengan ilmu. Dan barangsiapa yang menginginkan (kebahagiaan) akhirat, maka hendaknya dengan ilmu. Barangsiapa yang menginginkan keduanya, maka hendaklah dengan ilmu.” (Imam Syafe'i)

BAB II

SIFAT-SIFAT GAS SEMPURNA

Gas sempurna (atau gas ideal) bisa didefinisikan sebagai suatu keadaan zat, yang penguapannya dari kondisi cair berlangsung sempurna. Oksigen, nitrogen, hidrogen dan udara, pada batas temperatur tertentu, bisa juga disebut sebagai gas sempurna.

2.1 Hukum Gas Sempurna

Sifat fisik gas dikontrol oleh tiga variabel berikut:

1. Tekanan yang digunakan oleh gas,
2. Volume yang ditempati oleh gas,
3. Temperatur gas.

Sifat-sifat gas sempurna, yang mengalami perubahan pada variabel-variabel yang disebutkan di atas, akan mengikuti hukum-hukum berikut (diperoleh dari eksperimen):

1. Hukum Boyle,
2. Hukum Charles, dan
3. Hukum Gay-Lussac.

2.1.1 Hukum Boyle

Hukum ini diformulasikan oleh Robert Boyle pada tahun 1662. Hukum ini berbunyi, "*Tekanan mutlak suatu massa dari gas sempurna berubah secara berbanding terbalik terhadap volumenya, jika temperaturnya tetap*". Secara matematik bisa ditulis:

$$p \propto \frac{1}{V} \quad \text{atau} \quad pV = \text{konstan} \quad (2.1)$$

Bentuk yang lebih berguna dari persamaan di atas adalah:

$$p_1V_1 = p_2V_2 = p_3V_3 = \dots = \text{konstan} \quad (2.2)$$

dimana p adalah tekanan, dan V adalah volume. Notasi 1, 2 dan 3 mengacu kepada kondisi yang berbeda.

2.1.2 Hukum Charles

Hukum ini dirumuskan oleh warga negara Perancis bernama Jacques A.C. Charles pada tahun 1787. Hukum ini dinyatakan dalam dua bentuk:

1. "*Volume suatu massa gas sempurna berubah dengan berbanding langsung dengan temperatur mutlak, jika tekanan mutlaknya konstan*". Secara matematik:

$$V \propto T \quad \text{atau} \quad V/T = \text{konstan} \quad (2.3)$$

atau:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3} = \dots = \text{konstan} \quad (2.4)$$

dimana T adalah temperatur. Notasi 1, 2 dan 3 mengacu kepada kondisi yang berbeda.

2. "*Semua gas sempurna akan mengalami perubahan volume sebesar 1/273 dari volume awalnya pada 0° C untuk setiap perubahan temperatur sebesar 1° C, jika tekanan konstan*".

Misalkan, V_0 = volume massa gas pada 0° C, dan

V_t = volume massa gas yang sama pada t ° C

maka, sesuai dengan pernyataan di atas,

$$V_t = V_0 + \frac{1}{273} V_0 \cdot t = V_0 \left(\frac{273+t}{273} \right) = V_0 \frac{T}{T_0} \quad (2.5)$$

atau:

$$\frac{V_t}{T} = \frac{V_0}{T_0} \quad (2.6)$$

dimana T adalah temperatur mutlak dari t ° C, T_0 adalah temperatur mutlak dari 0° C.

Terlihat bahwa volume gas akan mengalami penurunan sebesar 1/273 dari volume

awalnya pada setiap penurunan temperatur 1° C. Maka pada temperatur -273° C, volume gas akan nol.¹ Temperatur pada volume gas nol disebut *temperatur nol mutlak*.

2.1.3 Hukum Gay-Lussac

Hukum ini berbunyi: "Tekanan mutlak dari suatu massa gas sempurna berubah berbanding langsung dengan temperatur, jika volumenya konstan". Secara matematik:

$$p \propto T \text{ atau } p/T = \text{konstan} \quad (2.7)$$

atau:
$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3} = \dots = \text{konstan} \quad (2.8)$$

dimana notasi 1, 2 dan 3 mengacu kepada kondisi yang berbeda.

2.2 Persamaan Umum Gas

Pada bagian sebelumnya, telah dibicarakan tentang hukum gas dimana memberikan kita hubungan antara dua variabel, ketika variabel ketiga konstan. Dalam kondisi sebenarnya, ketiga variabel yaitu: tekanan, volume dan temperatur, berubah secara bersamaan. Untuk menyatakan kondisi ini, kedua hukum Boyle dan Charles digabung, dan memberikan *persamaan gas umum*.

Berdasarkan hukum Boyle:

$$p \propto \frac{1}{V} \quad (2.9)$$

atau:
$$V \propto \frac{1}{p} \quad (2.10)$$

Dan berdasarkan hukum Charles:

$$V \propto T \quad (2.11)$$

Terlihat bahwa

$$V \propto \frac{T}{p} \quad (2.12)$$

¹ Ini secara teoritis. Nilai pastinya adalah $-273,16^{\circ}$ C. Tetapi untuk praktisnya, nilainya diambil -273° C saja.

sehingga: $pV \propto T$ atau $pV = cT$ (2.13)

dimana c adalah konstanta, yang harganya tergantung pada massa dan sifat dari gas yang bersangkutan.

Bentuk yang lebih berguna dari persamaan di atas adalah:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_3 V_3}{T_3} = \dots = \text{konstan} \quad (2.14)$$

dimana notasi 1, 2 dan 3 mengacu kepada kondisi yang berbeda.

2.3 Hukum Joule

Hukum Boyle berbunyi: "Perubahan energi dalam dari gas sempurna berbanding langsung dengan temperatur." Secara matematik ditulis:

$$dU \propto dT; dU = m \cdot C \cdot dT \quad (2.15)$$

dimana m adalah massa gas dan C adalah kalor/panas spesifik.

2.4 Persamaan Karakteristik Gas

Persamaan karakteristik gas adalah modifikasi dari persamaan gas umum. Jika volume (V) pada persamaan gas umum dinyatakan dalam per 1 kg gas (disebut dengan volume spesifik, dan dilambangkan dengan v) maka konstanta c (pada persamaan gas umum) bisa diwakili dengan konstanta lain R (pada persamaan karakteristik gas). Sehingga persamaan gas umum bisa ditulis ulang sebagai:

$$p \cdot v = RT \quad (2.16)$$

disini R disebut konstanta gas karakteristik atau secara sederhana disebut konstanta gas.

Untuk sembarang massa m kg, persamaan gas karakteristik menjadi:

$$m \cdot p \cdot v = mRT \quad (2.17)$$

$$p \cdot V = mRT \quad (\text{karena } m \cdot v = V) \quad (2.18)$$

Catatan:

1. Satuan konstanta gas (R) bisa diperoleh sebagai berikut:

$$R = \text{Nm/kg.K} = \text{J/kg K} \quad (\text{karena: Nm} = \text{J})$$

dimana tekanan dalam N/m^2 .

2. Pada satuan MKS, satuan konstanta gas (R) adalah:

$$R = \frac{pV}{mT} = \frac{\text{kg/m}^2 \times \text{m}^3}{\text{kg} \times \text{K}} = \text{kg m per kg K} \quad (\text{kg.m/kg.K})$$

3. Harga konstanta gas (R) berbeda untuk gas yang berbeda. Harganya pada udara atmosfer adalah 287 J/kg.K atau $0,287 \text{ kJ/kg.K}$, atau $29,27 \text{ kgm/kg.K}$.
4. Persamaan $pV = mRT$ bisa juga dinyatakan dalam bentuk lain, yaitu:

$$p = \frac{m}{V} RT = \rho RT \quad (\text{karena } m/V = \rho) \quad (2.19)$$

dimana ρ adalah kerapatan gas atau massa jenis.

Contoh Soal 2.1:

Suatu gas menempati suatu ruang dengan volume sebesar $0,105 \text{ m}^3$ pada temperatur 20°C dan tekanan $1,5 \text{ bar}$. Carilah temperatur akhir gas, jika gas tersebut dikompresi hingga tekanan $7,5 \text{ bar}$ dan menempati volume $0,04 \text{ m}^3$.

Jawab:

Diketahui:

$$\text{Volume awal, } V_1 = 0,105 \text{ m}^3$$

$$\text{Temperatur awal, } T_1 = 20^\circ \text{C} = 20^\circ + 273 = 293 \text{ K}$$

$$\text{Tekanan awal, } p_1 = 1,5 \text{ bar} = 1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$\text{Tekanan akhir, } p_2 = 7,5 \text{ bar} = 7,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$\text{Volume akhir, } V_2 = 0,04 \text{ m}^3$$

Jika $T_2 =$ temperatur akhir, maka:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

$$1,5 \times 10^5 \times 0,105 / 293 = 7,5 \times 10^5 \times 0,04 / T_2$$

$$T_2 = \frac{7,5 \times 10^5 \times 0,04 \times 293}{1,5 \times 10^5 \times 0,105} = 558,1 \text{ K}$$

$$= 558,1 - 273 = 285,1^\circ \text{C}$$

Contoh Soal 2.2:

Carilah massa gas yang menempati volume $5,6 \text{ m}^3$ pada tekanan 7 bar dan suhu 200°C . Ambil harga $R = 0,287 \text{ kJ/kg-K}$

Jawab:

Diketahui $V = 5,6 \text{ m}^3$; $p = 7 \text{ bar} = 7 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $T = 200^\circ \text{C} = 200^\circ + 273 = 473 \text{ K}$; $R = 0,287 \text{ kJ/kg-K} = 287 \text{ J/kg-K}$

Sehingga:

$$pV = mRT$$

$$m = pV / RT = (7 \times 10^5 \times 5,6) / (287 \times 473)$$

$$= 28,87 \text{ kg}$$

Contoh soal 2.3:

Carilah volume yang ditempati oleh 2 kg gas ideal pada 120 kPa dan 300°K . Asumsikan harga konstanta gas yang sesuai.

Jawab:

Diketahui:

$$m = 2 \text{ kg}$$

$$p = 120 \text{ kPa} = 120 \times 10^3 \text{ Pa} = 120 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

$$T = 300 \text{ K}$$

Konstanta gas, $R = 287 \text{ J/kg-K}$

Maka:

$$pV = mRT$$

$$120 \times 10^3 V = 2 \times 287 \times 300 = 172,2 \times 10^3$$

$$V = 1,435 \text{ m}^3$$

2.5 Hukum Avogadro

Hukum Avogadro berbunyi: "volume yang sama dari gas-gas, pada temperatur dan tekanan yang sama, mengandung jumlah molekul yang sama".

Maka, sesuai dengan hukum Avogadro, 1 m³ oksigen (O₂) akan mempunyai jumlah molekul yang sama dengan 1 m³ hidrogen (H₂) jika temperatur dan tekanannya sama. Pembuktian menunjukkan bahwa karena berat molekul hidrogen adalah 2 dan oksigen adalah 32, sehingga molekul oksigen mempunyai berat 32/2 = 16 kali berat molekul hidrogen. Karena 1 m³ kedua gas ini mempunyai jumlah molekul yang sama, dan berat molekul oksigen 16 kali dari berat molekul hidrogen, kerapatan (atau berat spesifik) oksigen adalah 16 kali dari kerapatan hidrogen. Maka, hukum Avogadro menunjukkan bahwa kerapatan dua gas berbanding lurus dengan berat molekulnya, jika gas berada pada temperatur dan tekanan yang sama.

Berat spesifik oksigen pada *Normal Temperature and Pressure* (disingkat N.T.P) yaitu pada 0° C dan 1,0332 kg/cm² absolut adalah 1,429 kg/m³.

Sehingga volume spesifik oksigen (pada 1 kg) pada NTP:

$$v = \frac{1}{1,429} \text{ m}^3/\text{kg}$$

dan volume 32 kg (atau 1 kg molekul, 1 kg mol) :

$$v = \frac{1}{1,429} \times 32 = 22,4 \text{ m}^3$$

Dengan cara yang sama bisa dibuktikan bahwa volume 1 kg mol sembarang gas pada NTP adalah 22,4 m³. Harga berat molekul dari beberapa gas diberikan oleh Tabel 2.1.

Catatan: 1 gm mol (berat molekul dinyatakan dalam gm) dari semua gas akan menempati volume 22,4 liter (dm³) pada NTP.

Tabel 2.1. Berat molekul beberapa gas.

No.	Gas	Berat molekul	No.	Gas	Berat Molekul
1.	Hidrogen (H ₂)	2	5.	Karbon dioksida (CO ₂)	44
2.	Oksigen (O ₂)	32	6.	Metana (CH ₄)	16
3.	Nitrogen (N ₂)	28	7.	Asetilen (C ₂ H ₂)	26
4.	Karbon monoksida (CO)	28	8.	Sulfur dioksida (SO ₂)	64

2.6 Konstanta Gas Universal atau Konstanta Molar

Konstanta gas universal atau konstanta molar dari gas (biasanya dilambangkan dengan R_u) adalah produk konstanta gas dan berat molekul gas. Secara matematik:

$$R_u = M R \quad (2.20)$$

Dimana M adalah berat molekul gas yang dinyatakan dengan gm (yaitu gm-mol) atau kg (yaitu kg-mol), R adalah konstanta gas

Secara umum, jika M_1, M_2, M_3 dst, adalah berat molekul dari gas yang berbeda dan R_1, R_2, R_3 dst, masing-masing adalah konstanta gas tersebut, maka:

$$M_1 R_1 = M_2 R_2 = M_3 R_3 \dots = R_u \quad (2.21)$$

Catatan: 1. Harga R_u sama untuk semua gas.

2. Harganya adalah 8314 J/kg-mol/K dalam SI atau 848 kg-m/kg-mol/K dalam MKS.

3. Persamaan karakteristik gas (yaitu: $pV = RT$) bisa ditulis dalam bentuk berat molekul yaitu:

$$pV = MRT \quad (2.22)$$

2.7 Kalor Spesifik Gas

Kalor spesafik suatu zat secara umum didefinisikan sebagai jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan temperatur per satuan massanya sebesar 1^o C. Semua cairan dan padatan hanya mempunyai satu harga kalor spesifik. Tetapi gas bisa mempunyai banyak nilai kalor spesifik. (antara nol sampai tak berhingga) tergantung pada kondisi dimana ia dipanaskan. Dua kalor spesifik berikut adalah yang penting di

dalam termodinamika:

1. Kalor spesifik pada volume konstan,
2. Kalor spesifik pada tekanan konstan.

2.7.1 Kalor Spesifik pada Volume Konstan

Adalah jumlah panas yang diperlukan untuk menaikkan temperatur satu satuan massa gas sebesar 1°C , jika dipanaskan pada volume konstan. Umumnya dilambangkan dengan C_v atau K_v .

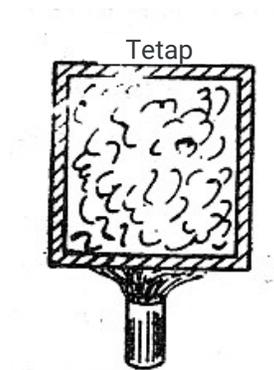
Misalkan sebuah gas diisikan pada sebuah kotak dengan tutup yang tetap seperti ditunjukkan gambar. Jika sekarang kotak dipanaskan, maka temperatur dan tekanan gas dalam kotak akan naik. Karena tutup kotak tetap, maka volume gas tidak berubah.

Kalor total yang diberikan ke gas pada volume tetap adalah:

$Q = \text{massa} \times \text{kalor spesifik pada vol. konstan} \times \text{kenaikan temperatur}$

$$Q = m.C_v (T_2 - T_1) = m.C_v \Delta T \quad (2.23)$$

dimana m adalah massa gas, T_1 adalah temperatur awal gas dan T_2 adalah temperatur akhir gas



Gb. 2.1. Kalor diberikan pada volume tetap.

Ketika gas dipanaskan pada volume konstan, tidak ada kerja yang dilakukan. Semua energi kalor digunakan untuk menaikkan temperatur dan tekanan gas. Dengan kata lain, semua kalor yang diberikan ada pada gas, dan menaikkan energi dalam gas.

2.7.2 Kalor Spesifik pada Tekanan Konstan

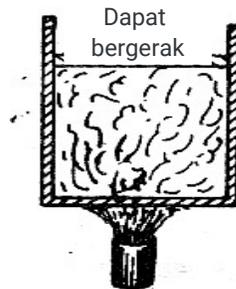
Kalor spesifik pada tekanan konstan adalah jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan temperatur satu satuan massa gas sebesar 1°C , jika dipanaskan pada tekanan konstan. Biasanya dilambangkan dengan C_p atau K_p .

Misalkan sebuah gas diisikan pada sebuah kotak dengan tutup yang bergerak seperti ditunjukkan gambar 2.2. Jika sekarang kotak dipanaskan, maka temperatur dan tekanan gas dalam kotak akan naik. Karena tutup kotak bisa bergerak, maka ia akan naik ke atas, untuk mengatasi kenaikan tekanan.

Kalor total yang diberikan ke gas pada tekanan tetap adalah:

$$Q = m.C_p (T_2 - T_1) = m.C_p .\Delta T \quad (2.24)$$

dimana m adalah massa gas, T_1 adalah temperatur awal gas dan T_2 adalah temperatur akhir gas.



Gb.2.2. Kalor diberikan pada tekanan tetap.

Jika gas dipanaskan pada tekanan konstan, kalor yang diberikan ke gas dimanfaatkan untuk dua hal berikut:

1. Untuk menaikkan temperatur gas. Kalor ini berada pada gas, dan mengakibatkan kenaikan energi dalam. Secara matematis, bagian kalor ini dirumuskan:

$$Q_1 = m.C_v.(T_2 - T_1) \quad (\text{Joule})$$

2. Untuk melakukan kerja luar/eksternal selama ekspansi. Secara matematis, ditulis:

$$Q_2 = W = p(V_2 - V_1) = p. \Delta V \quad (\text{Joule}) \quad (2.25)$$

Kerja dirumuskan juga dengan:

$$W = mRT_2 - mRT_1 = mR(T_2 - T_1)$$

Sehingga persamaan di atas menjadi:

$$Q_2 = p(V_2 - V_1) = mR(T_2 - T_1) \quad (2.26)$$

Terlihat bahwa kalor spesifik pada tekanan konstan lebih tinggi dari pada kalor spesifik pada volume konstan.

Catatan:

Dalam satuan MKS, kerja adalah:

$$W = \frac{p(V_2 - V_1)}{J} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{J} \quad (\text{kcal})$$

dimana J adalah ekivalen Joule ($J = 427$), yaitu konversi dari kg.m ke kcal ($1 \text{ kcal} = 427 \text{ kg-m}$).

2.7.3 Hubungan Antar Kalor Spesifik

Misalkan sebuah kotak dipanaskan pada tekanan konstan. Dengan notasi sebagai berikut:

m = massa gas

T_1 = temperatur mutlak awal gas

T_2 = temperatur absolut akhir gas

V_1 = volume awal gas

V_2 = volume akhir gas

C_p = kalor spesifik pada tekanan konstan

C_v = kalor spesifik pada volume konstan

p = tekanan konstan

Kalor yang diberikan ke gas pada tekanan konstan:

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

Kalor yang digunakan untuk kerja luar:

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

dan kenaikan energi dalam:

$$\Delta U = m C_v (T_2 - T_1) \quad \dots \text{(ii)}$$

Sementara: $Q = W + \Delta U \quad \dots \text{(iii)}$

Sehingga: $m C_p (T_2 - T_1) = p(V_2 - V_1) + m C_v (T_2 - T_1) \quad \dots \text{(iv)}$

Dengan menggunakan persamaan gas ($pV = mRT$), maka:

$$pv_1 = mRT_1$$

$$pV_2 = mRT_2$$

$$p (V_2 - V_1) = mR (T_2 - T_1)$$

Substitusikan harga $p(V_2 - V_1)$ pada persamaan (iv):

$$m.C_p (T_2 - T_1) = mR (T_2 - T_1) + m.C_v (T_2 - T_1)$$

$$\square C_p = R + C_v \quad \dots \text{(v)}$$

atau $C_p - C_v = R \quad (2.27)$

Persamaan di atas dapat ditulis dengan:

$$C_v (\gamma - 1) = R \quad (\text{dimana } \gamma = C_p/C_v)$$

$$C_v = \frac{R}{\gamma - 1} \quad (2.28)$$

Catatan: Terlihat bahwa konstanta gas adalah sama dengan perbedaan nilai kedua kalor spesifik.

2.7.4 Rasio Kalor Spesifik

Rasio dua kalor spesifik (yaitu C_p/C_v) dari gas adalah konstanta penting di dalam termodinamika dan dilambangkan dengan γ . Rasio ini dikenal juga dengan indeks adiabatik. Karena C_p selalu lebih besar dari C_v , harga γ selalu lebih besar dari satu.

Seperti telah ditulis sebelumnya bahwa:

$$C_p = R + C_v$$

$$\frac{C_p}{c_v} = \frac{R}{C_v} + 1$$

$$\gamma = \frac{R}{C_v} + 1 \tag{2.27}$$

Harga C_v dan C_p untuk beberapa gas pada temperatur antara 15^0 sampai 20^0 diberikan oleh Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Harga kalor spesifik dan indek adiabatik berbagai gas.

No.	Nama gas	C_n		C_v		$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$
		Satuan MKS kcal/kg.K	Satuan SI kJ/kg.K	Satuan MKS kcal/kg.K	Satuan SI kJ/kg.K	
1.	Udara	0,240	1,005	0,172	0,720	1,40
2.	Karbon dioksida (CO ₂)	0,202	0,846	0,157	0,657	1,29
3.	Oksigen (O ₂)	0,218	0,913	0,156	0,653	1,39
4.	Nitrogen (N ₂)	0,249	1,043	0,178	0,745	1,40
5.	Amonia (NH ₃)	0,520	2,177	0,404	1,692	1,29
6.	Karbon monoksida (CO)	0,250	1,047	0,179	0,749	1,40
7.	Hidrogen (H ₂)	3,405	14,257	2,420	10,133	1,40
8.	Argon (A)	0,125	0,523	0,075	0,314	1,67
9.	Helium (He)	1,250	5,234	0,753	3,153	1,66
10.	Metana (CH ₄)	0,518	2,169	0,394	1,650	1,31

Contoh soal 2.4:

Satu kg gas sempurna menempati volume sebesar $0,85 \text{ m}^3$ pada 15^0 C dan tekanan konstan 1 bar. Pertama-tama gas dipanaskan pada volume konstan dan kemudian pada tekanan konstan. Carilah kalor spesifik gas pada volume konstan dan tekanan konstan. Ambil $\gamma = 1,4$.

Jawab:

Diketahui: $m = 1 \text{ kg}$; $V = 0,85 \text{ m}^3$; $T = 15^0 \text{ C} = 15^0 + 273 = 288 \text{ K}$; $p = 1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $\gamma = 1,4$.

Kalor spesifik gas pada volume konstan:

$$pV = mRT$$

$$(1 \times 10^5) \times 0,85 = 1 \times R \times 288$$

$$R = 295 \text{ J/kg} \cdot \text{K} = 0,295 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$C_v = R / (\gamma - 1)$$

$$= 0,295 / (1,4 - 1) = 0,738 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Kalor spesifik gas pada tekanan konstan:

$$\gamma = C_p / C_v$$

$$C_p = \gamma \cdot C_v = 1,4 C_v = 1,4 \times 0,738 = 1,033 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

2.8 Enthalpi

Enthalpi adalah fungsi termodinamika khusus yang diperkenalkan untuk kemudahan. Fungsi tersebut yang paling sederhana adalah enthalpi, H , dan didefinisikan dengan:

$$H = U + pV \quad (2.28)$$

Jika terjadi perubahan pada sistem, perubahan enthalpi:

$$dH = dU + d(pV) \quad (2.29)$$

Contoh soal 2.5:

Satu kg gas ideal dipanaskan dari $18,3^\circ \text{C}$ ke $93,4^\circ \text{C}$. Diasumsikan $R = 263,6 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ dan $\gamma = 1,18$ untuk gas, carilah: (i) kalor spesifik, (ii) perubahan energi dalam, dan (iii) perubahan enthalpi.

Jawab:

Diketahui: $m = 1 \text{ kg}$; $T_1 = 18,3^\circ \text{C} = 18,3^\circ + 273 = 291,3 \text{ K}$; $T_2 = 93,4^\circ \text{C} = 93,4^\circ + 273 = 366,4 \text{ K}$; $R = 263,6 \text{ J/kg} \cdot \text{K} = 0,2636 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; $\gamma = C_p / C_v = 1,18$

(i) Kalor spesifik:

$$C_v = R / (\gamma - 1)$$

$$= 0,2636 / (1,18 - 1) = 1,464$$

$$C_p = \gamma \cdot C_v = 1,18 \times 1,464 = 1,727$$

(ii) Perubahan energi dalam:

$$\begin{aligned}\Delta U &= m \cdot C_v \cdot (T_2 - T_1) \\ &= 1 \times 1,464 (366,4 - 291,3) \\ &= 109,95 \text{ kJ}\end{aligned}$$

(iii) Perubahan enthalpi:

$$\begin{aligned}H &= m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \\ &= 1 \times 1,727 (366,4 - 291,3) \\ &= 129,69 \text{ kJ}\end{aligned}$$

Contoh soal 2.6:

Suatu gas dengan massa 0,186 kg mempunyai tekanan, volume, dan temperatur awal masing-masingnya adalah 275 kN/m²; 0,09 m³; dan 185^o C dikompresi pada tekanan konstan sampai temperatur 15^o C. Hitunglah jumlah kalor yang dipindahkan dan kerja yang dilakukan selama proses. Ambil harga $R = 290 \text{ J/kg-K}$ dan $C_p = 1,005 \text{ kJ/kg-K}$.

Jawab:

Diketahui: $m = 0,186 \text{ kg}$; $p_1 = 275 \text{ kN/m}^2 = 275 \times 10^3 \text{ N/m}^2$; $V_1 = 0,09 \text{ m}^3$; $T_1 = 185^{\circ} \text{ C} = 185^{\circ} + 273 = 458 \text{ K}$; $T_2 = 15^{\circ} \text{ C} = 15^{\circ} + 273 = 288 \text{ K}$; $R = 290 \text{ J/kg-K}$; $C_p = 1,005 \text{ kJ/kg-K}$.

➤ Jumlah kalor yang dipindahkan:

$$\begin{aligned}Q &= m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \\ &= 0,186 \times 1,005 (268 - 488) \\ &= - 31,78 \text{ kJ}\end{aligned}$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa kalor telah dipindahkan dari gas selama proses.

➤ Kerja yang dilakukan selama proses:

Karena proses terjadi pada tekanan konstan, maka digunakan hukum Charles:

$$V_2 = \frac{V_1 \times T_2}{T_1}$$

$$= (0,09458 \times 288) / 458 = 0,057 \text{ m}^3$$

Maka kerja yang dilakukan:

$$\begin{aligned} W &= p (V_2 - V_1) \\ &= 275 \times 10^3 (0,057 - 0,09) \\ &= -9075 \text{ J} = -9,075 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa kerja dilakukan/diberikan kepada gas.

Contoh soal 2.7:

Sebuah bejana berukuran $2,5 \text{ m}^3$ berisikan 1 kg-mol gas N_2 pada 100° C . (i) hitunglah volume spesifik dan tekanan gas. (ii) jika gas didinginkan hingga temperatur 30° C , hitunglah tekanan akhir, perubahan energi dalam spesifik dan enthalpi spesifik.

Jawab:

Diketahui: $V = 2,5 \text{ m}^3$; $M = 1 \text{ kg-mol}$; $T_1 = 100^\circ \text{ C} = 100^\circ + 273 = 373 \text{ K}$; $T_2 = 30^\circ \text{ C} = 30^\circ + 273 = 303 \text{ K}$;

➤ Volume spesifik gas

Berat molekul gas nitrogen adalah 28. Volume spesifik gas nitrogen adalah:

$$\begin{aligned} v &= \text{volume} / \text{berat molekul} = 2,5 / 28 \text{ m}^3/\text{kg} \\ &= 0,089 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

➤ Tekanan gas

$$pV = MR T$$

$$p_1 \times 2,5 = 8314 \times 373 = 31,01 \times 10^5 \quad (MR = 8314)$$

$$p_1 = 12,4 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 12,4 \text{ bar}$$

➤ Tekanan akhir gas

$$p_1 V_1 / T_1 = p_2 V_2 / T_2$$

$$p_2 = (p_1 / T_1) \times T_2 = (12,4 / 373) \times 303 \quad \dots \text{ (karena } V_1 = V_2)$$

$$= 10,07 \text{ bar}$$

➤ Perubahan energi dalam spesifik

Diasumsikan $C_p/C_v = 1,4 = \gamma$

$$R = R_u M = 8314/28 = 296,9 \text{ J/kg-K}$$

$$= 0,2969 \text{ kJ/kg-K}$$

$$C_v = R/(\gamma - 1)$$

$$= 0,2969/(1,4 - 1) = 0,674$$

$$C_p = C_v \cdot \gamma$$

$$= 0,674 \times 1,4 = 0,944$$

Perubahan energi dalam spesifik:

$$\Delta u = C_v (T_2 - T_1)$$

$$= 0,674 \times (303 - 373)$$

$$= -47,18 \text{ kJ/kg}$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa energi dalam spesifik menurun setelah gas didinginkan.

➤ Perubahan enthalpi spesifik

$$h = C_p (T_2 - T_1)$$

$$= 0,944 \times (303 - 373)$$

$$= -66,08 \text{ kJ/kg}$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa enthalpi spesifik menurun setelah gas didinginkan.

Soal-soal

1. Carilah tekanan akhir suatu gas jika 2 m³ gas pada tekanan 6 kg/cm² dipanaskan pada temperatur konstan. Volume akhir gas adalah 6 m³. (jawaban: 2 kg/cm²).
2. Sejumlah udara didinginkan pada tekanan konstan dari 27^o C ke 7^o C. Jika volume awal udara adalah 0,15 m³, carilah berapa banyak penurunan volumenya. (jawaban: 0,1 m³).
3. Gas pada temperatur 333^o C dan 20 kg/cm² mempunyai volume 0,06 m³. Gas diekspansikan hingga volumenya menjadi 0,54 m³. Carilah tekanan akhir gas jika temperatur gas setelah ekspansi adalah 30^o C. (jawaban: 1,11 kg/cm²)
4. Suatu gas pada temperatur 20^o C dan tekanan 1,5 bar menempati volume 0,105 m³. Jika gas dikompresi hingga tekanan 7,5 bar dan volume 0,04 m³, berapakah temperatur akhir gas? (jawaban: 285^o C)
5. Sebuah tabung silinder berisi 3 kg udara pada tekanan 300 kg/cm² dan temperatur 27^o C. Carilah volume udara yang ditempati oleh gas. Ambil harga R untuk udara 29,27 kg-m/kg^oK. (jawaban: 0,0087 m³)
6. 1,5 kg gas ideal pada 8,4 kg/cm² dan 87^o C dipindahkan ke tabung silinder. Carilah volume gas tersebut jika konstanta gas 20. (jawaban: 0,166 m³)
7. Sebuah bejana dengan kapasitas 5 m³ berisikan 20 kg gas ideal yang mempunyai berat molekul 25. Jika temperatur gas 15^o C, carilah tekanan gas. (jawaban: 3,9 kg/cm²).
8. Sejumlah gas menempati 0,15 m³ pada temperatur 20^o C dan tekanan 1,2 kg/cm². Jika gas mempunyai massa 200 gram, hitunglah (i) harga konstanta gas, (ii) berat molekul gas. (jawaban: 30,7 kg-m/kg^oK, 1,2 kg/cm²)
9. Sebuah gas ideal berekspansi dari 4 kg/cm² dan 0,04 m³ ke 1,2 kg/cm² dan 0,1 m³. Temperatur turun selama proses sebesar 146^o C. Jika harga C_p dan C_v masing-masingnya adalah 0,244 dan 0,173, carilah perubahan energi dalam. (jawaban: 2,27 kcal)
10. Sejumlah gas menempati volume sebesar 0,14 m³ pada 12,6 kg/cm² dan 100^o C. Hitunglah perubahan energi dalam gas jika gas dipanaskan ke temperatur 300^o C. Ambil harga $C_p = 0,24$ dan $C_v = 0,17$. (jawaban: 53,7 kcal)

BAB III

PROSES TERMODINAMIKA GAS SEMPURNA

Proses pemanasan dan ekspansi gas secara umum bisa didefinisikan sebagai *proses termodinamika*. Dari pengamatan, aliran energi akan mengakibatkan perubahan pada berbagai sifat gas, seperti tekanan, volume, temperatur, energi spesifik, enthalpi spesifik, dsb. Proses termodinamika bisa terjadi dalam berbagai kondisi; proses-proses berikut adalah beberapa dari proses termodinamika yang penting.

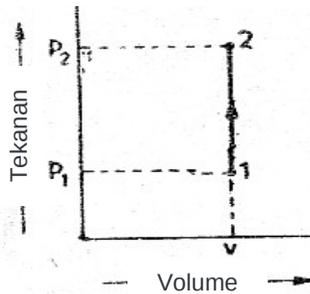
1. Proses volume konstan.
2. Proses tekanan konstan.
3. Proses hiperbolik.
4. Proses isothermal (proses temperatur konstan).
5. Proses adiabatik atau proses isentropik.
6. Proses politropik.
7. Proses ekspansi bebas.
8. Proses *Throttling*.

- Catatan:**
1. Proses yang disebutkan di atas juga bisa diaplikasikan pada proses pendinginan dan kompresi gas. Pendinginan merupakan pemanasan negatif, dan kompresi adalah ekspansi negatif.
 2. Dalam proses termodinamika, salah satu hal yang ingin diketahui adalah mencari jumlah kerja yang dilakukan selama proses.

3.1 Proses Volume Konstan

Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa gas yang dipanaskan pada volume konstan, temperatur dan tekanannya akan naik. Karena tidak ada perubahan volume, maka tidak ada kerja yang dilakukan oleh gas.

Semua panas yang diberikan disimpan di dalam molekul gas dalam bentuk energi dalam. Perlu di catat bahwa proses ini sesuai dengan hukum Gay Lussac.



Gambar 3.1. Proses volume konstan.

Seandainya ada m kg gas yang dipanaskan pada volume konstan dari temperatur awal T_1 ke temperatur akhir T_2 , dimana proses ini ditunjukkan oleh diagram p - v pada gambar 3.1, maka:

$$Q = \Delta U + W$$

$$Q = \Delta U \quad (\text{karena } W = 0)$$

Persamaan energi dalam adalah:

$$\Delta U = m \cdot C_v (T_2 - T_1) \quad (3.1)$$

Jadi kalor yang diberikan:

$$Q = \Delta U = m \cdot C_v (T_2 - T_1) \quad (3.2)$$

Contoh Soal 3.1:

Suatu gas menempati ruang sebesar $0,3 \text{ m}^3$ pada tekanan 2 bar dan temperatur 77°C . Gas dipanaskan pada volume konstan hingga tekanan 7 bar. Carilah: (i) temperatur pada akhir proses, (ii) massa gas, dan (iii) perubahan energi dalam selama proses. Asumsikan $C_p = 1,0$; $C_v = 0,71$.

Jawab:

Diketahui: $V_1 = 0,3 \text{ m}^3$; $p_1 = 2 \text{ bar} = 2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $T_1 = 77^\circ \text{ C} = 77^\circ + 273 = 350 \text{ K}$; $p_2 = 7 \text{ bar} = 7 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $C_p = 1,0$; $C_v = 0,71$

(i) Temperatur pada akhir proses

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

$$T_2 = \frac{p_2}{p_1} \times T_1 = \frac{7 \times 10^5}{2 \times 10^5} \times 350^\circ \text{ K}$$

$$= 1225 \text{ K} = 952^\circ \text{ C}$$

(ii) Massa gas

$$p_1 V_1 = mRT_1$$

$$R = C_p - C_v = 1,0 - 0,71$$

$$= 0,29 \text{ kJ/kg-K} = 290 \text{ J/kg-K}$$

$$m = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{(2 \times 10^5) \times 0,3}{290 \times 350} \text{ kg}$$

$$= 0,591 \text{ kg}$$

(iii) Perubahan energi dalam selama proses

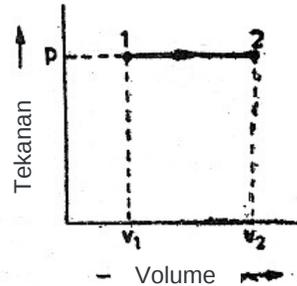
$$\Delta U = m \cdot C_v (T_2 - T_1)$$

$$= 0,591 \times 0,71 (1225 - 350)$$

$$= 367,16 \text{ kJ}$$

3.2 Proses Tekanan Konstan

Ketika gas dipanaskan pada tekanan konstan, temperatur dan volumenya akan meningkat. Kalor yang diberikan dimanfaatkan untuk menaikkan energi dalam gas, dan juga untuk melakukan kerja luar. Perlu dicatat bahwa proses ini mengikuti hukum Charles.



Gambar 3.2. Proses tekanan konstan.

Seandainya ada m kg gas yang dipanaskan pada tekanan konstan dari temperatur awal T_1 ke temperatur akhir T_2 , seperti yang ditunjukkan oleh diagram p - v pada gambar 3.2. maka kalor yang diberikan ke gas pada tekanan konstan adalah:

$$Q = m.C_p (T_2 - T_1) \quad (3.3)$$

Kenaikan energi dalam adalah:

$$\Delta U = m.C_v (T_2 - T_1) \quad (3.4)$$

Dan kerja yang dilakukan selama proses:

$$W = \text{luas daerah di bawah garis 1-2}$$

$$W = p(V_2 - V_1) \quad (3.5)$$

$$= pV_2 - pV_1 = mRT_2 - mRT_1$$

$$= mR (T_2 - T_1) \quad (3.6)$$

Catatan: Jika gas didinginkan pada tekanan konstan, maka proses berupa kompresi. Pada proses pendinginan, temperatur dan volume berkurang dan kerja dikatakan "dilakukan pada gas". Dalam hal ini, kalor yang dilepaskan oleh gas:

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

Penurunan energi dalam adalah:

$$\Delta U = m.C_v (T_1 - T_2)$$

Dan kerja yang dilakukan pada gas:

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

$$W = p(V_2 - V_1) = pV_2 - pV_1 = mR(T_2 - T_1)$$

Contoh Soal 3.2:

Harga kalor spesifik pada tekanan konstan dan volume konstan masing-masingnya adalah 0,98 dan 0,73 kJ/kg-K. Carilah harga konstanta gas karakteristik (R) dan rasio kalor spesifik (γ) gas.

Selanjutnya jika 1 kg gas ini dipanaskan pada tekanan konstan dari 25^o C hingga 200^o C, perkirakanlah kalor yang ditambahkan, kerja ideal dan perubahan energi dalam. Hitung juga tekanan awal dan volume akhir jika volume awal 2 m³.

Jawab:

Diketahui: $C_p = 0,98$ kJ/kg-K; $C_v = 0,73$ kJ/kg-K; $T_1 = 25^{\circ} \text{C} = 25^{\circ} + 273 = 298 \text{ K}$; $T_2 = 200^{\circ} \text{C} = 200^{\circ} + 273 = 473 \text{ K}$; $V_1 = 2 \text{ m}^3$; $m = 1 \text{ kg}$.

➤ Konstanta karakteristik gas:

$$R = C_p - C_v$$

$$R = 0,98 - 0,73 = 0,25 \text{ kJ/kg-K}$$

➤ Rasio Kalor Spesifik:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{0,98}{0,73} = 1,342$$

➤ Kalor yang ditambahkan pada gas:

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

$$= 1 \times 0,98 (473 - 298) = 171,5 \text{ kJ}$$

➤ Kerja ideal yang dilakukan gas:

$$W = mR (T_2 - T_1)$$

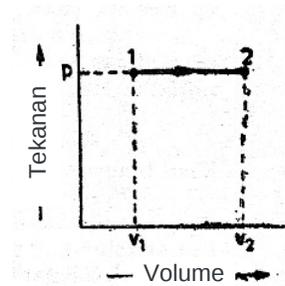
$$= 1 \times 0,25 (473 - 298)$$

$$= 43,75 \text{ kJ}$$

➤ Perubahan Energi Dalam:

$$\Delta U = m \cdot C_v (T_2 - T_1)$$

$$= 1 \times 0,73 (473 - 298)$$



$$= 127,75 \text{ kJ}$$

➤ Tekanan awal gas:

$$p_1 V_1 = mRT_1$$

$$p_1 \times 2 = 1 \times (0,25 \times 10^3) \times 298$$

$$= 74500$$

$$p_1 = 74500/2 = 37250 \text{ N/m}^2$$

➤ Volume akhir gas

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$V_2 = \frac{T_2}{T_1} \times V_1 = \frac{473}{298} \times 2 = 3,17 \text{ m}^3$$

3.3 Proses Hiperbolik

Proses hiperbolik adalah sebuah proses dimana gas dipanaskan atau diekspansikan sedemikian sehingga hasil kali tekanan dan volumenya (yaitu $p \times v$) tetap konstan. Proses hiperbolik mengikuti hukum Boyle yaitu $pV = \text{konstan}$. Jika kita menggambar grafik tekanan dan volume selama proses, akan didapatkan hiperbola kotak. Hal ini terjadi hanya pada kasus secara teoritis, dan tidak terlalu penting dari tinjauan termodinamika. Aplikasi praktisnya adalah proses isothermal, yang akan dijelaskan berikut ini.

3.4 Proses Isothermal (Proses Temperatur Konstan)

Proses isothermal adalah suatu proses dimana temperatur zat tetap konstan selama ekspansi atau kompresi. Proses ini disebut juga dengan proses *temperatur konstan*. Pada proses isothermal berlaku:

1. tidak ada perubahan temperatur, dan
2. tidak ada perubahan energi dalam.

Sehingga:

$$Q = \Delta U + W$$

$$Q = 0 + W \quad (\text{karena } \Delta U = 0)$$

$$Q = W$$

Sehingga selama proses ekspansi thermal:

Kalor yang ditambahkan = Kerja yang dilakukan oleh gas

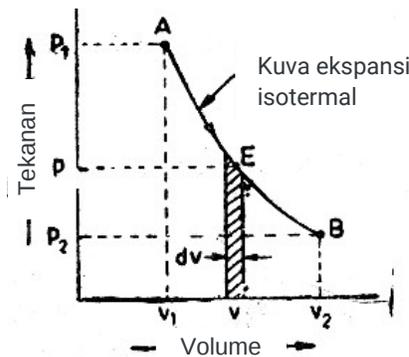
Dengan cara yang sama, selama kompresi isothermal:

Kalor yang dikeluarkan = Kerja yang dilakukan pada gas

Proses isothermal ini mengikuti hukum Boyle, sehingga untuk gas sempurna persamaannya adalah $pV = \text{konstan}$.

Kerja Yang Dilakukan Selama Ekspansi Isothermal

Misalkan sejumlah gas sempurna diekspansikan secara isothermal, seperti yang ditunjukkan oleh garis AB pada gambar 3.3.



Gambar 3.3. Proses isothermal.

Jika: $V_1 =$ volume awal gas

$p_1 =$ tekanan awal gas

$V_2 =$ Volume akhir gas

$p_2 =$ tekanan akhir gas

Ambillah sebuah titik E pada kurva AB . p dan v adalah tekanan dan volume pada titik ini. Misalkan ada peningkatan sejumlah kecil volume sebesar dv . Perubahan ini sangat kecil, sehingga tekanan selama perubahan ini diasumsikan tetap. Kita tahu bahwa kerja selama perubahan ini adalah:

$$dW = \text{Luas daerah pada daerah yang diarsir.}$$

$$= p \cdot dV$$

Total kerja yang dilakukan selama ekspansi dari A ke B bisa dicari dengan mengintegrasikan persamaan di atas dengan batas V_1 ke V_2 sehingga:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV \quad (i)$$

Karena ekspansi adalah isothermal ($pV = C$), sehingga:

$$pV = p_1V_1$$

$$p = p_1V_1/V$$

Substitusi harga p ini ke persamaan (i),

$$W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{p_1V_1}{V} dV = p_1V_1 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$W = p_1V_1 [\ln]_{V_1}^{V_2} = p_1V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (3.7)$$

atau
$$W = p_1V_1 \ln r \quad (3.8)$$

dimana: $r = \frac{V_2}{V_1}$ dan dikenal dengan rasio ekspansi.

Diketahui bahwa: $p_1V_1 = mRT$

Maka kerja yang dilakukan:

$$W = mRT \ln \frac{V_2}{V_1} = mRT \ln r \quad (3.9)$$

Karena $p_1V_1 = p_2V_2$ maka $\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$

Maka kerja yang dilakukan:

$$W = p_1V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (3.10)$$

- Catatan:** 1. Rasio ekspansi, $r = \frac{\text{Volume pada akhir ekspansi}}{\text{Volume pada awal ekspansi}}$
2. Rasio kompresi, $r = \frac{\text{Volume pada awal ekspansi}}{\text{Volume pada akhir ekspansi}}$

Contoh Soal 3.3:

0,1 m³ udara pada tekanan 1,5 bar berekspansi secara isotermal hingga volumenya menjadi 0,5 m³. Hitunglah tekanan akhir gas dan kalor yang disuplai selama proses.

Jawab

Diketahui: $V_1 = 0,1 \text{ m}^3$; $p_1 = 1,5 \text{ bar} = 1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $V_2 = 0,5 \text{ m}^3$

➤ Tekanan akhir gas:

$$p_2 = \frac{p_1 V_1}{V_2} = \frac{(1,5 \times 10^5) \times 0,1}{0,5} = 0,3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$= 0,3 \text{ bar}$$

➤ Kalor yang disuplai selama proses:

$$\text{Rasio ekspansi: } r = \frac{V_2}{V_1} = \frac{0,5}{0,1} = 5$$

Kerja:

$$W = p_1 V_1 \ln r$$

$$= (1,5 \times 10^5) \times 0,1 \ln (5)$$

$$= 24\,115 \text{ Nm} = 24,115 \text{ kJ}$$

Pada proses isotermal, kalor yang disuplai sama dengan kerja yang dilakukan, maka:

$$Q = W = 24,115 \text{ kJ}$$

3.5 Proses Adiabatik atau Proses Isentropik²

Sebuah proses dimana zat kerja tidak menerima atau memberikan kalor ke lingkungannya selama ekspansi atau kompresi disebut *proses adiabatik*. Ini bisa terjadi apabila zat kerja terisolasi secara termal. Dengan kata lain pada proses adiabatik terjadi:

1. Tidak ada kalor yang masuk atau keluar dari gas,
2. Temperatur gas berubah ketika kerja dilakukan dengan perubahan energi dalam,
3. Perubahan energi dalam sama dengan kerja mekanik yang dilakukan.

Berdasarkan hukum termodinamika 1:

$$Q = \Delta U + W$$

$$0 = \Delta U + W$$

atau

$$\Delta U = -W$$

Tanda minus menunjukkan bahwa untuk kenaikan energi dalam, kerja mesti dilakukan pada gas dan sebaliknya.

Misalkan sejumlah gas sempurna diekspansikan secara adiabatik seperti ditunjukkan oleh gambar 3.4.

Jika V_1 = volume awal gas

p_1 = tekanan awal gas

V_2 = volume akhir gas

p_2 = tekanan akhir gas

Kerja yang dilakukan selama perubahan ini (gambar 3.4):

$$dW = p.dV$$

Apabila temperatur turun sebesar dT , maka penurunan energi dalam adalah:

² Proses adiabatik tanpa gesekan dikenal dengan proses isentropik.

$$dU = m.C_v.dT$$

karena:

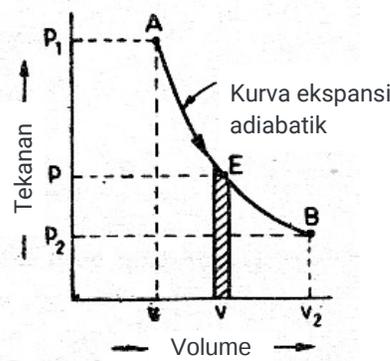
$$dU + dW = 0$$

maka:

$$m.C_v.dT + p.dV = 0$$

$$m.C_v.dT = -p.dV \tag{i}$$

karena $pv = mRT$.



Gambar 3.4. Proses adiabatik.

Dengan mendiferensialkan persamaan ini, diperoleh:

$$p.dV + V.dp = mR.dT \tag{ii}$$

Sementara:

$$R = (C_p - C_v)$$

Dengan mensubstitusikan harga R ke persamaan (ii),

$$p.dV + V.dp = m(C_p - C_v) dT$$

$$m(C_p - C_v) dT = p.dV + V.dp \tag{iii}$$

Bagi persamaan (iii) dengan (i)

$$\frac{m(C_p - C_v) dT}{m.C_v.dT} = \frac{p.dV + V.dp}{-p.dV}$$

$$\frac{C_p - C_v}{C_v} = -1 - \left(\frac{V}{p} \times \frac{dp}{p} \right)$$

atau
$$\frac{C_p}{C_v} - 1 = -1 - \left(\frac{V}{dp} \times \frac{dp}{p} \right)$$

diperoleh
$$y = - \left(\frac{V}{dp} \times \frac{dp}{p} \right) \quad \frac{C_p}{C_v} = y$$

$$\square \quad y \times \frac{dV}{V} = - \frac{dp}{p}$$

$$y \frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = 0$$

Dengan mengintegrasikan kedua sisi persamaan:

$$y \cdot \ln V + \ln p = \text{konstan}$$

atau
$$\ln pV^y = \ln C$$

$$pV^y = C \quad (3.11)$$

atau
$$p_1 V_1^y = p_2 V_2^y = \dots = C \quad (3.12)$$

Persamaan di atas bisa juga dinyatakan dalam bentuk berikut:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^y \quad (3.13)$$

Dengan menggunakan persamaan umum gas, dapat diturunkan persamaan lainnya, dan hasilnya adalah:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{y-1} \quad (3.14)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{y-1}{y}} \quad (3.15)$$

Kerja selama kenaikan volume gas:

$$dW = p \cdot dV$$

Total kerja selama ekspansi dari A dan B dicari dengan mengintegrasikan persamaan di atas dengan batas v_1 ke v_2 . Sehingga:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV \tag{vii}$$

Proses ekspansi adiabatik gas mengikuti persamaan:

$$pV^\gamma = p_1V_1^\gamma$$

$$p = \frac{p_1 V_1^\gamma}{V^\gamma}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan ini ke persamaan (vii),

$$\begin{aligned} W &= \int_{V_1}^{V_2} \frac{p_1 V_1^\gamma}{V^\gamma} dV = p_1 V_1^\gamma \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^\gamma} \\ &= p_1 V_1^\gamma \left[\frac{V^{-\gamma+1}}{-\gamma+1} \right]_{V_1}^{V_2} \\ &= \frac{p_1 V_1^\gamma}{1-\gamma} [V_2^{1-\gamma} - V_1^{1-\gamma}] \\ &= \frac{p_1 V_1^\gamma \cdot V_2^{1-\gamma} - p_1 V_1^\gamma \cdot V_1^{1-\gamma}}{1-\gamma} \end{aligned}$$

karena : $p_1V_1^\gamma = p_2V_2^\gamma$

$$W = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1-\gamma} \tag{3.16}$$

atau $W = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{\gamma-1}$... untuk ekspansi (3.17)

dan $W = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{\gamma-1}$... untuk kompresi (3.18)

Catatan: Persamaan di atas untuk kerja yang dilakukan bisa juga dinyatakan dengan:

(a) Kita tahu bahwa: $p_1V_1 = mRT_1$ dan $p_2V_2 = mRT_2$

Dengan mensubstitusikan harga-harga ini ke persamaan untuk ekspansi,

$$W = \frac{mR(T_1 - T_2)}{\gamma-1} \quad \dots \text{ untuk ekspansi} \tag{3.19}$$

$$W = \frac{mR(T_2 - T_1)}{\gamma - 1} \quad \dots \text{ untuk kompresi} \quad (3.20)$$

(b) Kerja yang dilakukan selama ekspansi adalah:

$$W = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \frac{p_2 V_2}{p_1 V_1} \right] \quad (3.21)$$

$$W = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[1 - \frac{p_2 V_2}{p_1 V_1} \right] \quad (\text{karena } p_1 V_1 = mRT_1) \quad (3.22)$$

Contoh Soal 3.4:

0,45 kg udara pada 178,9^o C berekspansi secara adiabatik hingga 3 kali volume awal. Dan temperaturnya turun ke 15,6^o C. Kerja selama ekspansi adalah 53.000 Nm. Hitunglah harga kalor spesifik pada tekanan dan volume konstan.

Jawab:

Diketahui: $m = 0,45 \text{ kg}$; $T_1 = 178,9^{\circ} \text{ C} = 178,9^{\circ} + 273 = 451,9 \text{ K}$; $V_2 = 3 \times \text{volume awal} = 3V_1$; $T_2 = 15,6^{\circ} \text{ C} = 15,6^{\circ} + 273 = 288,6 \text{ K}$; $W = 53.000 \text{ Nm}$.

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

$$\frac{451,9}{288,6} = \left(\frac{3V_1}{V_1} \right)^{\gamma - 1} = 3^{\gamma - 1}$$

$$3^{\gamma - 1} = 1,566$$

$$\log (3^{\gamma - 1}) = \log 1,566$$

$$(\gamma - 1) \log 3 = \log 1,566$$

$$\gamma - 1 = \frac{\log 1,566}{\log 3} = 0,41$$

$$\gamma = 1,41$$

Dengan menggunakan persamaan:

$$W = \frac{mR(T_1 - T_2)}{\gamma - 1}$$

$$53000 = \frac{0,45 \times R(451,9 - 288,6)}{1,41 - 1}$$

$$= 179,2 R$$

$$R = 53000/179,2 = 295,76 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$= 0,296 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

Sehingga:

$$C_p - C_v = R$$

$$1,41 C_v - C_v = 0,296 \quad \dots \text{ karena } \gamma = C_p/C_v = 1,41 ; C_p = 1,41 C_v$$

$$0,41 C_v = 0,296$$

$$C_v = 0,296/0,41 = 0,722$$

dan $C_p = 1,41 C_v = 1,41 \times 0,722$

$$= 1,018$$

Contoh Soal 3.5:

Sebuah sistem berisikan $0,15 \text{ m}^3$ gas dengan tekanan $3,8 \text{ bar}$ dan temperatur 150°C . Gas diekspansikan secara adiabatik hingga tekanan $1,0 \text{ bar}$. Gas kemudian dipanaskan pada tekanan konstan hingga enthalpinya naik sebesar 70 kJ . Carilah kerja ideal yang dilakukan oleh gas. Ambil harga $C_p = 1,0$ dan $C_v = 0,714$.

Jawab:

Diketahui: $V_1 = 0,15 \text{ m}^3$; $p_1 = 3,8 \text{ bar} = 3,8 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $T_1 = 150^\circ \text{C} = 150^\circ + 273 = 423 \text{ K}$; $p_2 = 1,0 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

Kenaikan enthalpi setelah gas dipanaskan pada tekanan konstan: $H = 70 \text{ kJ}$

$$C_p = 1,0$$

$$C_v = 0,714$$

➤ Indeks adiabatik:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{1}{0,714} = 1,4$$

➤ Proses adiabatik:

$$m = \frac{p_1 V_1}{R T_1} = \frac{3,8 \times 10^5 \times 0,15}{287 \times 423} = 0,47 \text{ kg}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{423}{T_2} = \left(\frac{3,8 \times 10^5}{1,0 \times 10^5} \right)^{(1,4-1)/1,4} = 3,8^{0,286} = 1,465$$

$$T_2 = 288,7 \text{ K}$$

Dan :

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

$$\frac{0,15}{V_2} = \left(\frac{1,0 \times 10^5}{3,8 \times 10^5} \right)^{1/1,4} = 0,385$$

$$V_2 = 0,39 \text{ m}^3$$

➤ Proses tekanan konstan.

Kenaikan enthalpi:

$$H = m \cdot C_p (T_3 - T_2)$$

$$70 = 0,47 \times 1 \times (T_3 - 288,7)$$

$$T_3 = 437,6^0 \text{ K}$$

dan: $\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3}$

$$V_3 = \frac{V_2}{T_2} \times T_3 = \frac{0,39}{288,7} \times 437,6 = 0,59 \text{ m}^3$$

➤ Kerja pada proses adiabatik:

$$W_1 = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{\gamma - 1}$$

$$= \frac{(3,8 \times 10^5 \times 0,15) - (1,0 \times 10^5 \times 0,39)}{1,4 - 1} = 45.000 \text{ kJ}$$

- Kerja pada proses tekanan konstan:

$$\begin{aligned} W_2 &= p_2 (V_3 - V_2) \\ &= 1,0 \times 10^5 (0,59 - 0,39) \\ &= 20.000 \text{ kJ} \end{aligned}$$

- Kerja total ideal yang dilakukan gas:

$$\begin{aligned} W &= W_1 + W_2 \\ &= 45.000 + 20.000 = 65.000 \text{ kJ} \end{aligned}$$

3.6 Proses Politropik

Proses Politropik dikenal juga sebagai hukum umum untuk ekspansi dan kompresi gas, dan diberikan oleh persamaan:

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

Dimana n adalah indeks politropik, yang harganya dari nol hingga tak berhingga, bergantung pada bagaimana terjadinya ekspansi atau kompresi.

Berbagai persamaan untuk proses politropik bisa dilakukan dengan merubah indek γ menjadi n pada proses adiabatik.

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{n-1} \quad \text{dan} \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (3.23)$$

dengan cara yang sama:

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.24)$$

Selanjutnya, persamaan untuk kerja yang dilakukan selama proses politropik bisa dilakukan dengan merubah indeks γ dengan n pada persamaan kerja untuk proses adiabatik.

3.6.1 Kerja yang Diserap atau Dihasilkan Selama Proses Politropik

Ketika gas sempurna diekspansikan atau dikompresikan sesuai dengan proses politropik ($pV^n = \text{konstan}$), sebagian kalor selalu diserap atau dilepas antara gas dengan lingkungan melalui dinding silinder mesin.

Misalkan sejumlah gas sempurna diekspansikan secara politropik. Bila:

m = massa gas

p_1 = tekanan awal gas

V_1 = volume awal gas

T_1 = temperatur awal gas

p_2, V_2, T_2 = variabel yang sama untuk kondisi akhir gas.

Kerja yang dilakukan gas selama proses politropik:

$$W = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{(n-1)} = \frac{mR(T_1 - T_2)}{(n-1)} \quad (\text{Joule}) \quad (3.25)$$

Kenaikan energi dalam:

$$\Delta U = m.C_v(T_2 - T_1)$$

Berdasarkan persamaan energi umum:

$$Q = W + \Delta U = \frac{mR(T_1 - T_2)}{(n-1)} + m.C_v(T_2 - T_1)$$

Setelah diturunkan diperoleh:

$$Q = \frac{(\gamma - n)}{(\gamma - 1)} \times \frac{mR(T_1 - T_2)}{(n-1)} \quad (3.26)$$

Catatan: 1. Persamaan di atas dapat dinyatakan dengan:

(a). $Q = \frac{(\gamma - n)}{(\gamma - 1)} \times \text{kerja yang dilakukan}$

(b). $Q = \frac{(\gamma - n)}{(\gamma - 1)} \times \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{(n-1)}$

(c). $Q = \frac{(\gamma - n)}{n-1} \times m.C_v(T_1 - T_2)$

2. Persamaan di atas memberikan harga kalor, yang dilewatkan ke gas melalui dinding silinder ketika gas berekspansi. Ini terjadi jika harga n lebih kecil dari harga γ . Jika n lebih besar dari γ , maka kalor dilepaskan oleh gas.
3. Dengan cara yang sama, selama kompresi, kerja yang dilakukan akan negatif, yaitu kerja diberikan ke gas. Dan kalor akan dilepaskan oleh gas. Ini terjadi hanya jika n lebih kecil dari harga γ .
4. Persamaan untuk kerja yang dilakukan bisa juga ditulis dengan:

$$W = \frac{p_1 V_1 (1 - r^{n-1})}{n-1}$$

dimana $\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n$ dan $\frac{p_2 V_2}{p_1 V_1} = r^n \times \frac{1}{r} = r^{n-1}$

5. Untuk sistem MKS, persamaan kerja adalah:

$$W = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{J(n-1)} = \frac{mR(T_1 - T_2)}{J(n-1)} \quad (\text{kcal})$$

$$W = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{(n-1)} = \frac{mR(T_1 - T_2)}{(n-1)} \quad (\text{kg.m})$$

3.6.2 Laju Penyerapan atau Pelepasan Kalor per Satuan Volume

Dari proses politropik:

$$Q = \frac{(\gamma - n)}{(\gamma - 1)} \times W$$

Jika dQ adalah sejumlah kecil kalor yang diserap atau dilepaskan selama perubahan kecil tekanan dan volume, maka:

$$dQ = \frac{(\gamma - n)}{(\gamma - 1)} \times p \cdot dV$$

Laju penyerapan atau pelepasan kalor per satuan volume:

$$\frac{dQ}{dV} = \frac{(\gamma - n)}{(\gamma - 1)} \times p \quad (3.27)$$

Dan laju penyerapan atau pelepasan kalor per detik:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dV} \times \frac{dV}{dt} = \frac{(\gamma - n)}{(\gamma - 1)} \times p \times \frac{dV}{dt} \quad (3.28)$$

dimana dV/dt adalah volume sapuan piston/detik.

3.6.3 Indeks Politropik, n

Pada proses politropik:

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n$$

Dengan menjadikan logaritmik di kedua sisi persamaan:

$$\log p_1 + n \log V_1 = \log p_2 + n \log V_2$$

Atau:
$$n \log V_1 - n \log V_2 = \log p_2 - \log p_1$$

$$n (\log V_1 - \log V_2) = \log p_2 - \log p_1$$

$$n \log \left(\frac{V_1}{V_2} \right) = \log \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

$$n = \frac{\log \left(\frac{p_2}{p_1} \right)}{\log \left(\frac{V_1}{V_2} \right)} \quad (3.29)$$

Catatan: Dengan cara yang sama, kita bisa mencari indeks adiabatik:

$$\gamma = \frac{\log \left(\frac{p_2}{p_1} \right)}{\log \left(\frac{V_1}{V_2} \right)} \quad (3.30)$$

Contoh soal 3.6:

Gas pada tekanan 1,5 bar dan 20⁰ C pada suatu bejana tertutup dikompresi hingga tekanannya menjadi 10 bar. Temperatur gas naik menjadi 180⁰ C. Jika kompresi mengikuti persamaan $p.v^n = C$, carilah harga n .

Jawab:

Diketahui: $p_1 = 1,5$ bar; $T_1 = 20^\circ \text{ C} = 20^\circ + 273 = 293$ K; $p_2 = 10$ bar; $T_2 = 180^\circ \text{ C} = 180^\circ + 273 = 453$ K.

Dengan menggunakan persamaan:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n}$$

$$\log \frac{T_2}{T_1} = \frac{n-1}{n} \log \frac{p_2}{p_1}$$

$$\log \frac{453}{293} = \frac{n-1}{n} \log \frac{10}{1,5}$$

$$0,1892 = \frac{n-1}{n} (0,8239)$$

$$0,1892 n = 0,8239 n - 0,8239$$

$$n = 1,298$$

Contoh soal 3.7:

Sejumlah udara mempunyai volume $0,028 \text{ m}^3$ pada tekanan $1,25$ bar dan suhu 25° C . Gas dikompresi hingga volumenya menjadi $0,0042 \text{ m}^3$ sesuai dengan persamaan $p v^{1,3} = C$. Carilah temperatur akhir dan kerja yang dilakukan selama kompresi. Cari juga penurunan tekanan pada volume konstan untuk membawa gas kembali ke temperatur awal.

Jawab:

Diketahui: $V_1 = 0,028 \text{ m}^3$; $p_1 = 1,25$ bar = $1,25 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $T_1 = 25^\circ \text{ C} = 25^\circ + 273 = 298$ K; $V_2 = 0,0042 \text{ m}^3$; $n = 1,3$.

➤ Temperatur akhir:

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

$$\frac{298}{T_2} = \left(\frac{0,0042}{0,028} \right)^{(1,3-1)} = 0,5659$$

$$T_2 = 526,6 \text{ K} = 253,6^\circ \text{ C}$$

➤ Kerja yang dilakukan selama kompresi:

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

$$\frac{1,25}{p_2} = \left(\frac{0,0042}{0,028} \right)^{1,3} = 0,0849$$

$$p_2 = 14,72 \text{ bar} = 14,72 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$W = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{n-1}$$

$$= \frac{(14,72 \times 10^5 \times 0,0042) - (1,25 \times 10^5 \times 0,028)}{1,3-1} = 8.941,33 \text{ Nm}$$

$$= 8,941 \text{ kNm}$$

➤ Tekanan pada volume konstan

p_3 = tekanan yang diperlukan pada volume konstan untuk membawa udara kembali ke temperatur awal.

$$\frac{p_3}{T_3} = \frac{p_2}{T_2}$$

$$p_3 = \frac{p_2}{T_2} \times T_3 = \frac{14,72}{526,6} \times 298 = 8,33 \text{ bar}$$

3.7 Proses Ekspansi Bebas

Ekspansi bebas terjadi bila suatu fluida diperbolehkan berekspansi secara tiba-tiba ke dalam ruang vakum melalui *orifice* yang berdimensi besar. Pada proses ini, tidak ada kalor yang diberikan atau dilepaskan dan tidak ada kerja eksternal yang dilakukan. Sehingga total kalor pada fluida tetap. Jenis ekspansi ini disebut juga *ekspansi kalor total tetap*. Maka jelas, bahwa proses ekspansi bebas berlaku:

$$Q = 0, \quad W = 0 \quad \text{dan} \quad \Delta U = 0$$

3.8 Proses Throttling

Jika gas sempurna mengalami ekspansi ketika melewati lobang sempit, seperti

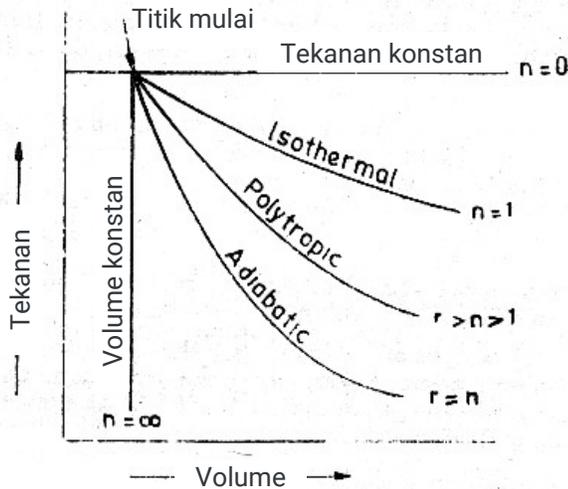
pipa kecil atau katup yang terbuka sedikit, proses ini disebut *proses throttling*. Selama proses ini tidak ada panas yang diberikan atau dilepaskan dan juga tidak ada kerja eksternal dilakukan. Pada proses ini juga tidak ada perubahan temperatur, sehingga kalor total fluida tetap.

Selama proses *throttling*, ekspansi gas sempurna berada pada kondisi kalor total yang konstan, dan mirip dengan proses ekspansi bebas. Karenanya pada proses *throttling* berlaku:

$$Q = 0, \quad W = 0 \quad \text{dan} \quad \Delta U = 0$$

3.9 Hukum Umum Ekspansi dan Kompresi

Hukum umum ekspansi dan kompresi gas sempurna adalah $pV^n = \text{konstan}$. Persamaan ini memberikan hubungan antara tekanan dan volume sejumlah gas. Harga n bergantung pada kondisi alami gas, dan kondisi dimana perubahan (yaitu: ekspansi atau kompresi) itu terjadi. Harga n berkisar dari nol hingga tak berhingga.



Gambar 3.4. Kurva untuk berbagai harga n .

Harga-harga berikut penting jika ditinjau dari sudut pandang termodinamika.

1. Jika $n = 0$, maka $pV^0 = \text{konstan}$, atau $p = \text{konstan}$, merupakan proses *tekanan konstan*.
2. Jika $n = 1$, maka $pV = \text{konstan}$, merupakan proses isothermal atau hiperbolik.

3. Jika n terletak antara 1 dan n , merupakan proses *politropik*.
4. Jika $n = \gamma$, atau $pV^\gamma = \text{konstan}$, merupakan proses adiabatik.
5. Jika $n = \infty$, atau $V = \text{konstan}$, merupakan proses volume konstan.

Soal-soal

1. Suatu gas mempunyai volume $0,14 \text{ m}^3$, tekanan $1,5 \text{ kg/cm}^2$ dan temperatur 100°C . Jika gas dikompresi pada tekanan konstan hingga volume menjadi $0,112 \text{ m}^3$, carilah:
 - a) Temperatur pada akhirkompresi.
 - b) Kerja yang diperlukan untuk mengkompresi gas
 - c) Penurunan energi dalam.
 - d) Kalor yang dilepaskan oleh gas.
2. Sejumlah udara mempunyai volume $0,4 \text{ m}^3$ pada tekanan 5 kg/cm^2 dan temperatur 80°C . Udara tersebut berekspansi di dalam sebuah silinder pada temperatur konstan hingga tekanan 1 kg/cm^2 . Carilah besarnya kerja yang dihasilkan udara selama langkah ekspansi.
3. $0,336 \text{ m}^3$ gas pada tekanan 10 kg/cm^2 dan temperatur 150°C berekspansi secara adiabatik hingga tekanannya 4 kg/cm^2 . Gas kemudian di kompresi secara isothermal ke volume awal. Carilah temperatur dan tekanan akhir gas. Cari juga perubahan energi dalam. Ambil $C_p = 0,238$ dan $C_v = 0,168$.
4. Sebuah mesin pembakaran dalam mempunyai dimensi sebagai berikut: diameter silinder 55 cm ; panjang langkah (*stroke*) 75 cm ; rasio kompresi $13,5$. Pada akhir langkah hisap tekanannya adalah $1,0 \text{ kg/cm}^2$ dan temperatur 43°C . Kompresi mengikuti persamaan $pv^{1,37} = C$. Carilah:
 - a) Tekanan dan temperatur pada akhir kompresi
 - b) Berat udara yang dihisap
 - c) Kerja selama langkah kompresi
 - d) Kalor yang dibuang selama kompresi.
 Ambil harga $C_p = 0,238$ dan $C_v = 0,169$.
5. Persamaan yang diperoleh dari kurva ekspansi pada indikator sebuah mesin gas adalah $pv^{1,3} = C$ dan rasio kalor spesifik campuran adalah $1,37$. Jika sapuan piston $2 \text{ m}^3/\text{min}$ ketika tekanan pada kurva ekspansi 14 kg/cm^2 abs, berapakah laju kalor yang diterima per detik pada kondisi ini.
6. Volume awal $0,18 \text{ kg}$ suatu gas adalah $0,15 \text{ m}^3$ pada temperatur 15°C dan tekanan 1 kg/cm^2 . Setelah kompresi adiabatik ke volume $0,056 \text{ m}^3$, didapat tekanan gas 4 kg/cm^2 . Carilah:
 - a) Konstanta gas.
 - b) Berat molekul gas.
 - c) Rasio kalor spesifik.
 - d) Dua kalor spesifik, satu pada tekanan konstan dan satu pada volume konstan.
 - e) Perubahan energi dalam.

7. Suatu gas ideal pada 30°C dan 1 bar di kompresi secara adiabatik dari 5 m^3 ke 1 m^3 . Carilah temperatur, tekanan, dan kerja yang dihasilkan. Ambil $\gamma = 1,4$.
8. Udara pada 15°C dan tekanan 1,05 bar, berekspansi secara adiabatik hingga tekanan 0,14 bar. Udara kemudian menerima kalor pada tekanan konstan hingga temperatur kembali 15°C , kemudian gas di kompresi secara adiabatik ke tekanan 1,05 bar abs dan di buang pada tekanan tersebut. Carilah temperatur gas buang dan kalor yang di buang di gas buang per satuan kerja yang dihasilkan.
9. Suatu gas dengan tekanan 10 bar berekspansi secara politropik hingga volumenya menjadi tiga kali volume semula. Tekanan turun ke 2 bar selama ekspansi. Carilah harga indeks politropok n dan jumlah kerja yang dihasilkan selama proses.
10. Sejumlah udara pada tekanan 0,98 bar dan temperatur 71°C di kompresi secara adiabatik hingga tekanan 6,86 bar. Kalor sebesar 460 kJ per kg udara sekarang ditambahkan pada volume konstan. Carilah:
 - a) Rasio kompresi.
 - b) Temperatur pada akhir kompresi.
 - c) Temperatur pada akhir penambahan kalor.

Ambil $C_p = 1,0$ dan $C_v = 0,714$

BAB IV

ENTROPI GAS SEMPURNA

Istilah entropi secara literatur berarti transformasi, dan diperkenalkan oleh **Clausius**. Entropi adalah sifat termodinamika yang penting dari suatu zat, dimana harganya akan meningkat ketika ada penambahan kalor dan menurun ketika terjadi pengurangan kalor pada sistem. Adalah sulit untuk mengukur entropi, tetapi akan mudah untuk mencari perubahan entropi dari suatu zat. Secara matematis entropi dirumuskan:

$$dQ = T.dS \quad \text{atau} \quad dS = \frac{dQ}{T} \quad (4.1)$$

dimana S adalah entropi, Q adalah kalor yang diserap/dilepaskan dan T adalah temperatur absolut.

Para ahli teknik dan ilmuwan menggunakan entropi untuk memberikan jawaban cepat terhadap permasalahan yang berkaitan dengan ekspansi adiabatik.

4.1 Hubungan Kalor Dengan Entropi

Misalkan pemanasan suatu zat ditunjukkan oleh kurva dari A ke B pada gambar 4.1, dimana sumbu-x merupakan entropi dan sumbu-y adalah temperatur mutlak. Grafik ini dikenal dengan diagram temperatur-entropi (T - s).

Kalor yang diberikan ke zat dirumuskan dengan:

$$dQ = T.dS$$

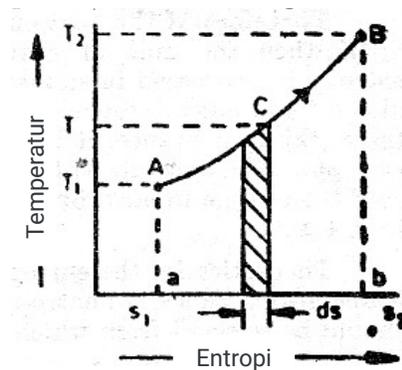
Dalam hal ini, $T.dS$ diwakili oleh daerah yang diarsir pada kurva selama terjadi

perubahan entropi. Maka luas daerah di bawah kurva AB bisa dicari dengan mengintegalkan persamaan (i), sehingga:

$$\int T.dS = \int dQ \quad (4.2)$$

atau:

$$dS = \frac{dQ}{T}$$



Gambar 4.1. Kurva Temperatur-Entropi.

maka:

$$\int_{s_1}^{s_2} dS = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dQ}{T} \quad (4.3)$$

Satuan entropi bergantung pada satuan kalor yang digunakan dan temperatur mutlak. Satuan entropi bisa kcal/kg-K atau kJ/kg-K.

4.2 Persamaan Umum Perubahan Entropi Gas Sempurna

Persamaan-persamaan entropi menggunakan notasi berikut ini:

m = massa gas

p_1 = tekanan awal gas

V_1 = volume awal gas

T_1 = temperatur awal gas

p_2, V_2, T_2 = harga yang bersesuaian untuk kondisi akhir gas

Persamaan perubahan entropi selama proses bisa dinyatakan dengan tiga cara

berikut ini.

4.2.1 Dalam Volume dan Temperature Absolut.

$$\begin{aligned} dQ &= dU + dW \\ &= m.C_v.dT + p.dV \end{aligned} \quad \dots (i)$$

dimana dT adalah perubahan kecil temperatur; dV adalah perubahan kecil volume.

Dengan membagi persamaan (i) dengan T diperoleh:

$$\frac{dQ}{T} = m.C_v.dT + \frac{p.dV}{T}$$

karena $pV = mRT$ atau $\frac{p}{T} = \frac{mR}{V}$ dan $\frac{dQ}{T} = dS$

$$\text{maka} \quad dS = m.C_v.\frac{dT}{T} + \frac{mR}{V}dV \quad \dots (ii)$$

Integralkan persamaan (ii) dengan batas yang tepat,

$$\begin{aligned} \int_{S_1}^{S_2} dS &= m.C_v \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} + mR \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} \\ [S]_{S_1}^{S_2} &= m.C_v [\ln T]_{T_1}^{T_2} + mR [\ln V]_{V_1}^{V_2} \end{aligned}$$

sehingga:

$$\begin{aligned} \Delta S = S_2 - S_1 &= m.C_v (\ln T_2 - \ln T_1) + m.R (\ln V_2 - \ln V_1) \\ &= m.C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + m.R \ln \frac{V_2}{V_1} \\ &= m \left(C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right) \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$= m \left(C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + (C_p - C_v) \ln \frac{V_2}{V_1} \right) \quad (4.5)$$

4.2.2 Dalam Tekanan dan Temperatur Absolut

Dengan menurunkan persamaan 4.4, diperoleh rumus perubahan entropi:

$$S_2 - S_1 = m \cdot C_p \ln \frac{T_2}{T_1} + m (C_p - C_v) \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (4.6)$$

4.2.3 Dalam Tekanan dan Volume

Dengan menurunkan persamaan 4.4, diperoleh:

$$S_2 - S_1 = m \left[C_v \ln \frac{p_2}{p_1} + C_p \ln \frac{V_2}{V_1} \right] \quad (4.7)$$

- Catatan:** 1. Perubahan entropi positif bila kalor diserap oleh gas dan ada kenaikan entropi.
2. Perubahan entropi negatif bila kalor dilepaskan dari gas dan ada penurunan entropi.

Contoh soal 4.1:

0,05 m³ udara pada tekanan 8 bar dan temperatur 280^o C berekspansi hingga volumenya 8 kali volume awal dan temperatur akhir setelah ekspansi adalah 25^o C. Hitunglah perubahan entropi udara selama proses. Asumsikan harga $C_p = 1,0$ dan $C_v = 0,72$.

Jawab:

Diketahui: $V_1 = 0,05 \text{ m}^3$; $p_1 = 8 \text{ bar} = 8 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $T_1 = 280^\circ \text{C} + 273 = 553 \text{ K}$; $V_2 = 8 V_1 = 8 \times 0,05 = 0,4 \text{ m}^3$; $T_2 = 25^\circ \text{C} + 273 = 298 \text{ K}$; $C_p = 1,0$; $C_v = 0,72$

$$\begin{aligned} R &= C_p - C_v \\ &= 1,0 - 0,72 = 0,28 \text{ kJ/kg-K} \\ &= 0,28 \times 10^3 \text{ J/kg-K} \end{aligned}$$

$$p_1 \cdot V_1 = mRT_1$$

$$m = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{8 \times 10^5 \times 0,05}{(0,28 \times 10^3) \times 553} = 0,258 \text{ kg}$$

➤ perubahan entropi:

$$S_2 - S_1 = m \left(C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + (C_p - C_v) \ln \frac{V_2}{V_1} \right)$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,258 \left[0,72 \ln \frac{298}{553} + (1,0 - 0,72) \ln \frac{0,4}{0,05} \right] \\
 &= 0,258 (-0,445 + 0,582) \\
 &= 0,035 \text{ satuan entropi}
 \end{aligned}$$

4.3 Perubahan Entropi Gas Sempurna Pada Berbagai Proses Termodinamika

4.3.1 Perubahan Entropi Pada Proses Volume Konstan

Misalkan sejumlah gas sempurna dipanaskan pada volume konstan. Proses ini digambarkan oleh kurva AB pada diagram T-S pada gambar 4.2.

Untuk perubahan kecil temperatur (dT),

$$dQ = m \cdot C_v \cdot dT$$

Dengan membagi kedua sisi persamaan dengan T sehingga:

$$\frac{dQ}{T} = m \cdot C_v \cdot \frac{dT}{T}$$

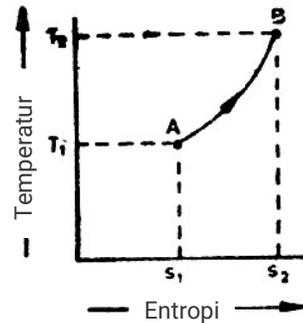
$$dS = m \cdot C_v \cdot \frac{dT}{T}$$

$$\int_{S_1}^{S_2} dS = m \cdot C_v \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T}$$

$$S_2 - S_1 = m \cdot C_v \ln \frac{T_2}{T_1} \tag{4.8}$$

Persamaan di atas bisa dinyatakan dalam variabel tekanan.

$$S_2 - S_1 = m \cdot C_v \ln \frac{p_2}{p_1} \tag{4.9}$$



Gambar 4.2. Kurva T-S pada proses volume konstan

Contoh soal 4.2:

Hitunglah perubahan entropi 2 kg udara, jika udara dipanaskan pada volume konstan dari 1 bar ke 4 bar. Diasumsikan $C_v = 0,71$.

Jawab:

Diketahui: $m = 2 \text{ kg}$; $p_1 = 1 \text{ bar}$; $p_2 = 4 \text{ bar}$; $C_v = 0,71$

Perubahan entropi:

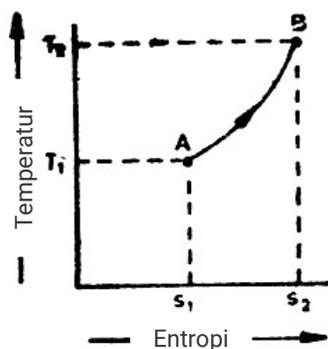
$$\begin{aligned} S_2 - S_1 &= m \cdot C_v \ln \frac{p_2}{p_1} \\ &= 2 \times 0,71 \ln \frac{4}{1} \\ &= 1,968 \text{ satuan entropi} \end{aligned}$$

4.3.2 Perubahan Entropi Pada Proses Tekanan Konstan

Misalkan sejumlah gas sempurna dipanaskan pada tekanan konstan. Proses ini dilukiskan oleh kurva AB pada diagram T - S yang ditunjukkan gambar 4.3.

Perubahan entropi dirumuskan dengan:

$$S_2 - S_1 = m \cdot C_p \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (4.10)$$



Gambar 4.3. Kurva T - S selama proses tekanan konstan.

Dalam variabel volume.
$$S_2 - S_1 = m \cdot C_p \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (4.11)$$

Contoh soal 4.3:

0,5 kg gas ideal dipanaskan dari 100°C ke 300°C pada tekanan konstan 2,8 bar. Gas kemudian didinginkan ke 100°C pada volume konstan. Carilah perubahan entropi keseluruhan. Ambil $C_p = 1,0$ dan $C_v = 0,72$.

Jawab:

Diketahui: $m = 0,5\text{ kg}$; $T_1 = 100^{\circ}\text{C} + 273 = 373\text{ K}$; $T_2 = 300^{\circ}\text{C} + 273 = 573\text{ K}$; $p = 2,8\text{ bar} = 2,8 \times 10^5\text{ N/m}^2$; $T_3 = 100^{\circ}\text{C} + 273 = 373\text{ K}$; $C_p = 1,0$; $C_v = 0,72$

➤ Perubahan entropi pada pemanasan tekanan konstan

$$\begin{aligned} S_2 - S_1 &= m \cdot C_p \ln \frac{T_2}{T_1} \\ &= 0,5 \times 1,0 \ln \left(\frac{573}{373} \right) \\ &= 0,214 \text{ satuan entropi} \end{aligned}$$

➤ perubahan entropi pada pendinginan volume konstan

$$\begin{aligned} S_3 - S_2 &= m \cdot C_v \ln \frac{T_3}{T_2} \\ &= 0,5 \times 0,72 \ln \left(\frac{373}{573} \right) \\ &= -0,154 \text{ satuan entropi} \end{aligned}$$

➤ perubahan entropi keseluruhan

$$\begin{aligned} S_3 - S_1 &= (S_2 - S_1) + (S_3 - S_2) = 0,214 - 0,154 \\ &= 0,06 \text{ satuan entropi} \end{aligned}$$

4.3.3 Perubahan Entropi Pada Proses Temperatur Konstan

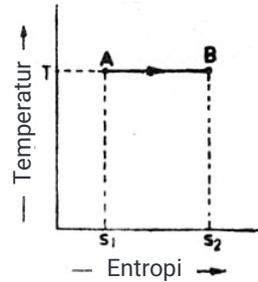
Misalkan sejumlah gas sempurna dipanaskan pada temperatur konstan. Proses ini dilukiskan oleh kurva AB pada diagram T - S yang ditunjukkan gambar 4.4.

Perubahan entropi dirumuskan:

$$S_2 - S_1 = m \cdot R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

atau:

$$S_2 - S_1 = m(C_p - C_v) \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (4.12)$$



Gambar 4.4. Kurva $T - s$ selama proses temperatur konstan.

Dalam variabel tekanan:

$$S_2 - S_1 = m(C_p - C_v) \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \quad (4.13)$$

Contoh soal 4.4:

Sejumlah gas ideal dipanaskan secara isothermal reversibel dari 1 bar dan 40°C ke 10 bar. Carilah kerja yang dilakukan per kg gas dan perubahan entropi per kg gas. Ambil $R = 287 \text{ J/kg K}$.

Jawab:

Diketahui: $p_1 = 1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $T_1 = 40^\circ \text{C} + 273 = 313 \text{ K}$; $p_2 = 10 \text{ bar} = 10 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.

➤ Kerja per kg gas

$$\begin{aligned} S_2 - S_1 &= m(C_p - C_v) \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \\ &= 1 \times 287 \times 313 \ln \left(\frac{1 \times 10^5}{10 \times 10^5} \right) \\ &= -206.600 \text{ J/kg} = -206,6 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

➤ Perubahan entropi per kg gas

$$S_2 - S_1 = \frac{\text{k calor yang diserap}}{\text{temperatur mutlak}} = \frac{Q}{T}$$

$$Q = W$$

$$S_2 - S_1 = \frac{-206,6}{313} = -0,66 \text{ satuan entropi}$$

4.3.4 Perubahan Entropi Pada Proses Politropik ($pv^n = \text{konstan}$)

Pada proses politropik, perubahan entropi dirumuskan:

$$S_2 - S_1 = \frac{\gamma - n}{\gamma - 1} \times mR \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (4.14)$$

atau

$$S_2 - S_1 = m(C_p - nC_v) \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (4.15)$$

Persamaan di atas bisa ditulis dalam temperatur dan tekanan mutlak.

$$S_2 - S_1 = mC_v \frac{\gamma - n}{n - 1} \ln \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \quad (4.16)$$

$$S_2 - S_1 = mC_v \frac{\gamma - n}{n} \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \quad (4.17)$$

Contoh Soal 4.5:

Gas ideal di kompresi sesuai dengan persamaan $pv^{1,25} = \text{konstan}$ dari tekanan awal 1 bar dan volume $0,9 \text{ m}^3$ ke volume akhir $0,6 \text{ m}^3$. Carilah tekanan akhir dan perubahan entropi per kg gas selama proses. Ambil harga $\gamma = 1,4$ dan $R = 287 \text{ J/kgK}$.

Jawab:

Diketahui: $n = 1,25$; $p_1 = 1 \text{ bar}$; $V_1 = 0,9 \text{ m}^3$; $V_2 = 0,6 \text{ m}^3$; $\gamma = 1,4$; $R = 287 \text{ J/kgK}$.

➤ Tekanan akhir gas

$$p_1 V_1^{1,25} = p_2 V_2^{1,25}$$

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{1,25} = 1 \times \left(\frac{0,9}{0,6} \right)^{1,25} = 1,66 \text{ bar}$$

➤ Perubahan entropi

$$\begin{aligned}
 S_2 - S_1 &= m \times \frac{\gamma - n}{\gamma - 1} \times R \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \\
 &= \frac{1 \times 1,4 - 1,25}{1,4 - 1} \times 287 \ln \left(\frac{0,6}{0,9} \right) \\
 &= -43,56 \text{ satuan entropi}
 \end{aligned}$$

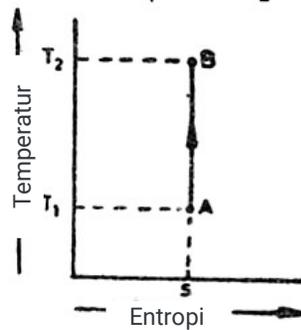
4.3.5 Perubahan Entropi Selama Proses Adiabatik (Proses Isentropik)

Pada proses adiabatik, tidak ada kalor yang memasuki atau meninggalkan gas. Secara matematik:

$$dQ = 0$$

sehingga:

$$dS = 0 \quad ; \text{ karena } dS = \frac{dQ}{T}$$



Gambar 4.5. kurva T - s selama proses adiabatik.

Atau dengan kata lain, perubahan entropi selama proses adiabatik adalah nol. Proses adiabatik pada grafik T - S ditunjukkan oleh garis vertikal AB pada gambar 4.5.

Karena entropi gas tetap selama ekspansi atau kompresi adiabatik pada gas, proses ini disebut *isentropik*.

Contoh soal 4.6:

Sebuah bejana terisolasi dengan kapasitas $0,568 \text{ m}^3$ berisikan oksigen dengan tekanan $2,0 \text{ bar}$. Gas diaduk hingga tekanannya berubah menjadi $2,4 \text{ bar}$. Carilah: (i) kalor yang dipindahkan, (ii) kerja output, dan (iii) perubahan entropi per kg. Ambil $C_v = 0,66 \text{ kJ/kg-K}$, $R = 0,26 \text{ kJ/kg-K}$.

Jawab:

Diketahui: $V = 0,568 \text{ m}^3$; $p_1 = 2,0 \text{ bar} = 2,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $p_2 = 2,4 \text{ bar} = 2,4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $C_v = 0,66$; $R = 0,26 \text{ J/kg-K}$.

(i) Kalor yang dipindahkan

Karena bejana terisolasi, maka prosesnya adalah adiabatik, karena itu tidak ada kalor yang dipindahkan.

(ii) Kerja output per kg

$$m = 1 \text{ kg}$$

$$p_1 V_1 = mRT_1$$

$$T_1 = \frac{p_1 V}{mR} = \frac{2,0 \times 10^5 \times 0,568}{1 \times (0,26 \times 10^3)} = 436,9 \text{ K}$$

$$T_2 = \frac{p_2 V}{mR} = \frac{2,4 \times 10^5 \times 0,568}{1 \times (0,26 \times 10^3)} = 524,3 \text{ K}$$

Perubahan energi dalam

$$\begin{aligned} \Delta U &= C_v (T_2 - T_1) = 0,66 (524,3 - 436,9) \\ &= 57,68 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Pada proses adiabatik, kerja output adalah perubahan energi dalam, sehingga:

$$W = \Delta U = 57,68 \text{ kJ}$$

(iii) Perubahan entropi per kg

Kita tahu bahwa pada proses adiabatik tidak ada pertukaran kalor, oleh sebab itu juga tidak ada perubahan entropi.

4.4 Metode Pendekatan Untuk Penyerapan Kalor

Misalkan 1 kg gas sempurna dipanaskan pada suatu proses. Proses ini ditunjukkan oleh kurva AB pada diagram $T-S$ seperti gambar 4.6.

Jika: T_1 = temperatur awal gas

T_2 = temperatur akhir gas

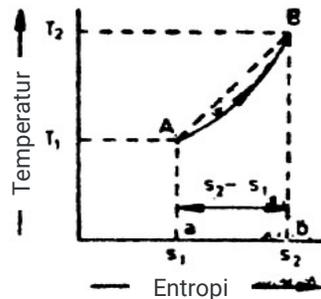
S_1 = entropi awal gas

S_2 = entropi akhir gas

Kalor yang diserap selama proses adalah sama dengan daerah di bawah kurva AB pada diagram T - s yaitu $ABba$. Misalkan AB adalah garis lurus (ditunjukkan oleh garis putus-putus), diperoleh:

Kalor yang diserap = Daerah $ABba$ = Alas \times tinggi rata-rata

$$Q = (S_2 - S_1) \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) \quad (4.18)$$



Gambar 4.6. Kalor yang diserap karena perubahan entropi.

Jadi, kalor yang diserap kira-kira sama dengan perubahan entropi dikalikan dengan temperatur mutlak rata-rata.

Catatan: Metode ini disebut metode pendekatan, karena kita mengambil garis AB sebagai sebuah garis lurus.

Contoh soal 4.7:

1 kg gas ideal di kompresi pada sebuah silinder sesuai dengan persamaan $pV^{1,3} = \text{konstan}$. Jika temperatur awal 100°C dan rasio kompresi 15, carilah perubahan entropi gas. Cari juga persentase kesalahan, jika entropi dihitung dengan metode pendekatan. Ambil $C_p = 1,0$ dan $C_v = 0,714$.

Jawab:

Diketahui: $m = 1\text{ kg}$; $n = 1,3$; $T_1 = 100^\circ + 273 = 373\text{ K}$; $V_1/V_2 = 15$; $C_p = 1,0$; $C_v = 0,714$.

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{1,0}{0,714} = 1,4$$

➤ Perubahan entropi

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

$$\frac{373}{T_2} = \left(\frac{1}{15} \right)^{1,4-1}$$

$$T_2 = 840 \text{ K}$$

$$S_2 - S_1 = m C_v \frac{\gamma - n}{n - 1} \ln \frac{T_1}{T_2}$$

$$= 1 \times 0,714 \times \frac{1,4 - 1,3}{1,3 - 1} \ln \frac{373}{840}$$

$$= -0,1929 \text{ satuan entropi}$$

Tanda negatif menunjukkan terjadinya penurunan entropi.

➤ Kalor yang ditransfer:

$$Q = \frac{\gamma - n}{n - 1} m C_v (T_1 - T_2)$$

$$= \frac{1,4 - 1,3}{1,3 - 1} \times 1 \times 0,714 (373 - 840)$$

$$= -111,15 \text{ kJ}$$

Tanda negatif menunjukkan adanya panas yang dikeluarkan.

Perpindahan kalor dengan metode pendekatan:

$$Q = (S_2 - S_1) \times \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right)$$

$$-111,15 = (S_2 - S_1) \left(\frac{373 + 840}{2} \right) = 606,5 (S_2 - S_1)$$

$$S_2 - S_1 = -0,1833$$

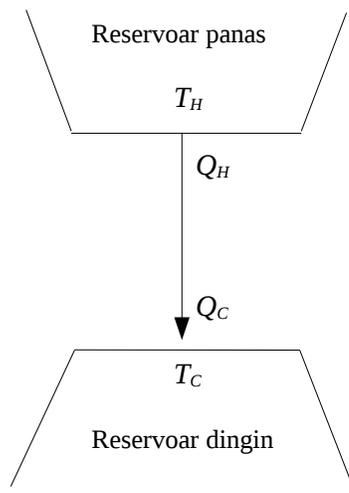
Tanda negatif menunjukkan adanya penurunan entropi

$$\text{Persentase kesalahan} = \frac{0,1929 - 0,1833}{0,1929} = 0,049 = 4,9 \%$$

4.5 Mesin Kalor dan Pompa Kalor

Sebuah reservoir panas adalah sebuah benda dengan kapasitas kalor yang tidak terbatas. Jika sejumlah kalor ditambahkan atau dikeluarkan dari reservoir panas, akan terjadi perubahan entropi terbatas pada temperatur konstan, dimana perubahan entropi:

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



Gambar 4.7. Aliran kalor dari reservoir lebih panas ke reservoir lebih dingin.

Misalkan sejumlah kalor Q berpindah dari satu reservoir ke reservoir lainnya, Besarnya kalor sama bagi kedua reservoir namun tandanya berbeda (Q_H dan Q_C berbeda tanda), untuk kalor yang ditambahkan ke reservoir tandanya positif dan kalor dikeluarkan dari reservoir tandanya negatif (Gambar 4.7). Sehingga:

$$Q_H = -Q_C$$

$$\Delta S_H = \frac{Q_H}{T_H} = \frac{-Q_C}{T_H} \quad \text{dan} \quad \Delta S_C = \frac{Q_C}{T_C}$$

$$\Delta S_{total} = \Delta S_H - \Delta S_C = \frac{-Q_C}{T_H} + \frac{Q_C}{T_C} = Q_C \left(\frac{T_H - T_C}{T_H T_C} \right)$$

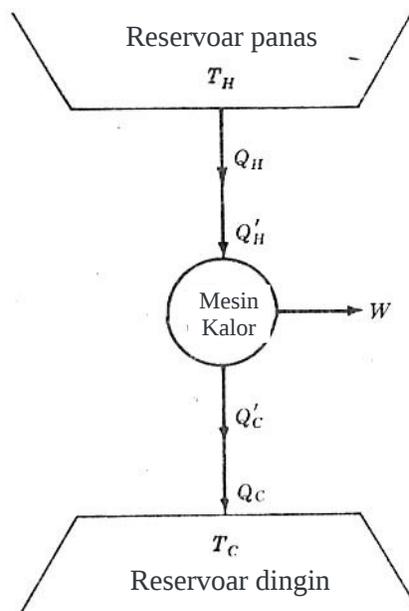
sesuai dengan hukum kedua termodinamika, Δs_{total} harus positif, maka:

$$Q_C(T_H - T_C) > 0$$

Sehingga $T_H > T_C$; maka Q_C harus positif, artinya kalor ditambahkan ke reservoir pada T_C . Jadi kalor harus mengalir dari reservoir temperatur yang lebih tinggi, T_H ke reservoir temperatur lebih rendah pada T_C .

4.5.1 Mesin Kalor

Mesin Kalor adalah: suatu alat atau piranti yang merubah kalor menjadi kerja.



Gambar 4.8. Mesin Kalor.

Perubahan entropi pada reservoir panas dan reservoir dingin:

$$\Delta S_H = \frac{Q_H}{T_H} \quad \text{dan} \quad \Delta S_C = \frac{Q_C}{T_C}$$

Sejumlah kalor yang sama diberikan ke mesin, tetapi tandanya berlawanan.

$$Q_H = -Q_H' \quad \text{dan} \quad Q_C = -Q_C'$$

Perubahan entropi total:

$$\Delta S_{total} = \Delta S_H + \Delta S_C + \Delta S_{mesin}$$

Karena mesin tidak berubah, bagian terakhir adalah nol, sehingga:

$$\Delta S_{total} = \frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_C}{T_C} \quad (4.18)$$

Dari hukum pertama termodinamika untuk mesin kalor:

$$\Delta U = Q - W$$

$$\Delta U_{mesin} = Q_H' + Q_C' - W$$

Karena mesin tidak berubah, maka $\Delta U_{mesin} = 0$, sehingga:

$$W = Q_H' + Q_C' = -Q_H - Q_C \quad (i)$$

Kombinasi (4.18) dan (i) :

$$W = -T_H \Delta S_{total} + Q_C \left(\frac{T_H}{T_C} - 1 \right) \quad (ii)$$

Pada proses reversibel, ΔS_{total} menjadi nol sehingga:

$$W = Q_C \left(\frac{T_H}{T_C} - 1 \right) \quad (iii)$$

Supaya W positif, maka Q_C mesti positif.

Kombinasi (i) dan (iii):

$$\frac{Q_C}{T_C} = \frac{-Q_H}{T_H}$$

$$\frac{W}{-Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

Karena Q_H adalah kalor yang keluar dari reservoir panas sehingga harganya adalah negatif, sehingga persamaan di atas ditulis tanpa tanda minus.

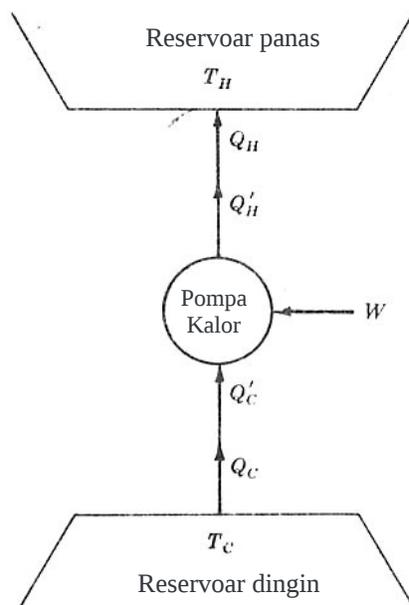
$$\frac{Q_C}{Q_H} = \frac{T_C}{T_H}$$

$$\frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (4.19)$$

Persamaan W/Q_H dikenal juga dengan Efisiensi termal (η) mesin kalor Carnot.

4.5.2 Pompa Kalor

Mesin kalor *reversible* bila dibalik kerjanya maka akan berfungsi sebagai **pompa kalor** atau **refrigerator**, yaitu mesin yang merubah kerja menjadi kalor, seperti yang ditunjukkan gambar 4.9.



Gambar 4.9. Pompa Kalor.

Rumus yang sudah disebutkan di atas berlaku juga untuk pompa kalor. Perbedaan terletak pada arah kalor yang dipindahkan, dan kerja diberikan daripada dihasilkan.

Kualitas penting dari pompa kalor atau refrigerator adalah rasio kalor yang dipindahkan dari temperatur rendah terhadap kerja yang diperlukan, Q_C/W . Rasio ini disebut *koefisien performansi* ($COP = \text{coefficient of performance}$) atau *rasio energi pendinginan*, ω . Secara matematik:

$$\omega = \frac{Q_C}{W} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (4.20)$$

Contoh soal 4.8:

Sebuah *freezer* dijaga pada temperatur 238 K pada musim panas dengan temperatur ambien 306 K. Untuk menjaga freezer pada 238 K, dipindahkan panas darinya dengan laju 1230 J/s. Berapakah koefisien performansi maksimum yang bisa diperoleh dan berapakah daya minimum yang mesti diberikan ke freezer.

Jawab:

Diketahui: $T_C = 238 \text{ K}$; $T_H = 306 \text{ K}$; $Q_C = 1230 \text{ J/s}$

➤ Koefisien performansi

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{T_C}{T_H - T_C} \\ &= \frac{238}{306 - 238} = 3,5 \end{aligned}$$

➤ Daya minimum yang diperlukan

$$W = \frac{Q_C}{\omega} = \frac{1230}{3,5} = 351,4 \text{ J/s atau } 351,4 \text{ W}$$

Kalor yang dilepaskan ke lingkungan pada T_H diberikan oleh hukum pertama, yaitu:

$$Q_H = W + Q_C = 351,4 + 1230 = 1581,4 \text{ W}$$

Soal-soal

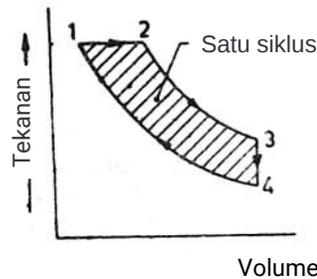
1. Sebuah bejana dengan kapasitas 2,5 m³ berisikan 1 kg-mol N₂ pada 100^o C. Jika gas didinginkan hingga temperatur 30^o C, hitunglah perubahan entropi spesifik.
2. Sebuah bejana dengan kapasitas 3 m³ berisikan udara pada tekanan 1,5 kg/cm² abs dan temperatur 25^o C. Udara tambahan di pompa ke sistem hingga tekanan naik hingga 30 kg/cm² abs dan temperatur meningkat hingga 60^o C. Carilah massa udara yang dipompa, dan nyatakan jumlahnya dalam volume pada tekanan 1 kg/cm² abs dan temperatur 25^o C.
3. Jika bejana dibiarkan mendingin hingga temperatur kembali ke 25^o C, hitunglah tekanan di dalam bejana. Carilah jumlah kalor yang ditransfer dan perubahan entropi gas selama proses pendinginan ini saja. Abaikan efek kapasitas panas di dalam bejana. Diasumsikan udara sebagai gas ideal.
4. Jika bejana dibiarkan mendingin hingga temperatur kembali ke 25^o C, hitunglah tekanan di dalam bejana. Carilah jumlah kalor yang ditransfer dan perubahan entropi gas selama proses pendinginan ini saja. Abaikan efek kapasitas panas di dalam bejana. Diasumsikan udara sebagai gas ideal.
5. Volume dengan volume tertentu pada 46^o C dan tekanan 6,5 bar berekspansi 4 kali dari volume awal, sesuai dengan persamaan $pv^{1,25} = konstan$. Carilah temperatur akhir gas dan perubahan entropi per kg gas dengan mengasumsikan $C_p = 1,0$ dan $C_v = 0,72$.
6. Udara dengan massa 9 kg dan tekanan 1,75 bar dan temperatur 13^o C dikompresi hingga 24,5 bar sesuai dengan persamaan $pv^{1,32} = konstan$, dan kemudian didinginkan pada volume konstan hingga 15^o C. Carilah:
 1. Volume dan temperatur pada akhir kompresi.
 2. Perubahan entropi selama kompresi dan selama proses pendinginan pada volume konstan.
7. Sebanyak 2 kg udara pada tekanan 2 bar dan temperatur 20^o C berekspansi ke tekanan 1 bar dan 103^o C. Hitunglah perubahan entropi dengan mengasumsikan harga $C_p = 1,0$ dan $R = 287 \text{ J/kg } ^\circ\text{K}$.
8. Hitunglah perubahan entropi jika 1 kg udara dipanaskan pada volume konstan dari 1 bar dan 27^o C ke tekanan 5 bar. Asumsikan harga $C_v = 0,17$ dan $R = 287 \text{ J/kg } ^\circ\text{K}$.
9. Hitunglah perubahan entropi jika 0,14 kg gas yang awalnya mempunyai temperatur 170^o C berekspansi dengan rasio volume 5,4 sesuai dengan persamaan $pv^{1,24} = konstan$. Ambil $\gamma = 1,4$ dan $R = 290 \text{ J/kg } ^\circ\text{K}$.

“Ilmu pengetahuan tanpa agama lumpuh, agama tanpa ilmu pengetahuan buta.”
(Albert Einstein)

BAB V

SIKLUS UDARA TERMODINAMIKA

Siklus termodinamika terdiri dari urutan operasi/proses termodinamika, yang berlangsung dengan urutan tertentu, dan kondisi awal diulangi pada akhir proses. Jika operasi atau proses dilukiskan pada diagram p - V , akan membentuk lintasan tertutup. Karena daerah dibawah setiap kurva merupakan kerja yang dilakukan, sehingga kerja netto dalam satu siklus diberikan oleh daerah yang ditutupi oleh lintasan, seperti ditunjukkan oleh gambar 5.1.



Gambar 5.1. Sebuah siklus termodinamika.

Pengetahuan mengenai siklus termodinamika adalah penting di dalam sistem pembangkit tenaga (seperti mesin bensin, diesel, turbin gas, dan lain lain). Mesin-mesin ini menggunakan campuran bahan bakar dan udara untuk operasinya. Karena massa bahan bakar yang digunakan sangat kecil bila dibandingkan dengan massa udara, sehingga campuran diasumsikan mengikuti sifat-sifat gas sempurna.

Catatan: Jika udara diasumsikan sebagai zat kerja di dalam silinder mesin, siklus disebut *siklus udara*.

5.1 Asumsi-asumsi Pada Siklus Termodinamika

Analisis pada semua siklus termodinamika (atau siklus udara) didasarkan atas asumsi-asumsi:

1. Gas di dalam silinder mesin adalah gas sempurna, yaitu mengikuti hukum gas dan kalor spesifik konstan;
2. Konstanta fisika gas di dalam silinder mesin adalah sama dengan udara pada temperatur biasa;
3. Semua proses kompresi dan ekspansi adalah adiabatik, dan terjadi tanpa adanya gesekan internal;
4. Panas diberikan dengan adanya kontak antara gas panas dengan silinder pada tempat tertentu selama proses. Dengan cara yang sama panas dibuang dengan adanya kontak antara gas dingin dengan silinder pada tempat tertentu;
5. Siklus dianggap tertutup, dan udara yang sama digunakan kembali untuk mengulangi siklus;
6. Tidak ada reaksi kimia terjadi di dalam silinder mesin.

5.2 Klasifikasi Siklus Termodinamika

Siklus termodinamika secara umum bisa diklasifikasikan ke dalam dua tipe, yaitu:

1. Siklus reversibel.
2. Siklus irreversibel.

5.2.1 Siklus Reversibel

Sebuah proses, dimana perubahan dalam arah sebaliknya, akan membalik proses seutuhnya, dikenal dengan *proses reversibel*. Sebagai contoh, jika selama proses termodinamika dari keadaan 1 ke 2, kerja yang dilakukan oleh gas adalah W_{1-2} , dan kalor yang diserap adalah Q_{1-2} . Sekarang jika kerja dilakukan pada gas sebesar W_{1-2} dan mengeluarkan kalor sebesar Q_{1-2} , kita akan membawa sistem kembali dari keadaan 2 ke 1, proses disebut reversibel.

Pada proses reversibel, seharusnya tidak ada kerugian panas karena gesekan, radiasi atau konduksi, dsb. Siklus akan reversibel jika semua proses yang membentuk siklus adalah reversibel. Maka pada siklus reversibel, kondisi awal dicapai kembali pada akhir siklus.

5.2.2 Siklus Ireversibel

Sebagaimana telah disebut di atas bahwa jika perubahan dalam arah sebaliknya, akan membalik proses seutuhnya disebut sebagai proses reversibel. Tetapi jika perubahan tidak membalik proses, maka disebut *proses ireversibel*. Pada proses ireversibel, terjadi kerugian panas karena gesekan, radiasi atau konduksi.

Pada kondisi di lapangan, sebagai besar proses adalah ireversibel. Penyebab utama ireversibel adalah: (1) gesekan mekanik dan fluida, (2) ekspansi tak tertahan, (3) terjadi perpindahan panas. Gesekan akan merubah kerja mekanik menjadi panas. Panas ini tidak bisa dirubah kembali dalam jumlah yang sama ke dalam kerja mekanik. Sehingga jika ada gesekan di dalam proses maka proses adalah ireversibel.

Sebuah siklus adalah ireversibel jika ada proses ireversibel pada proses-proses pada siklus tersebut. Maka pada siklus ireversibel, kondisi awal tidak didapati pada akhir siklus.

5.3 Reversibilitas Proses Termodinamika

1. Isothermal dan Adiabatik

Perlu dicatat bahwa proses atau siklus penuh adalah hal yang ideal. Dalam keadaan sebenarnya, operasi isothermal atau adiabatik lengkap tidak dicapai. Namun demikian keadaan ini bisa diperkirakan. Alasan dari hal tersebut adalah tidak mungkin mentransfer kalor pada temperatur konstan pada operasi isothermal. Lebih jauh, adalah tidak mungkin membuat silinder non-konduksi pada proses adiabatik. Pada keadaan sebenarnya, proses isothermal bisa dicapai jika proses begitu lambat sehingga kalor yang diserap atau dilepaskan pada laju dimana temperatur tetap konstan. Dengan cara yang sama, proses adiabatik bisa dicapai jika proses terjadi dengan sangat cepat sehingga tidak ada waktu bagi kalor untuk masuk atau meninggalkan gas.

Dengan pandangan tersebut, proses isothermal dan adiabatik dianggap sebagai proses reversibel.

2. Volume konstan, tekanan konstan dan pV^n konstan

Kita tahu bahwa temperatur benda panas, yang memberikan panas, tetap konstan selama proses, temperatur zat kerja akan bervariasi ketika proses berlangsung. Dalam pandangan ini, ketiga operasi di atas adalah ireversibel. Tetapi hal ini bisa dibuat mendekati reversibilitas dengan memanipulasi temperatur benda panas bervariasi

sehingga pada setiap tingkatan temperatur zat kerja tetap konstan.

Dalam hal ini, proses volume konstan, tekanan konstan dan pv^n konstan dianggap sebagai proses reversibel.

3. *Throttling*

Proses ini adalah ireversibel, karena selalu ada kerugian kalor karena gesekan ketika zat kerja melewati orifis yang sempit.

5.4 Hubungan antara Siklus dan Mesin

Dalam pelajaran teori mesin kalor, diasumsikan bahwa fluida kerja digunakan berulang-ulang di dalam silinder. Kita sebut bahwa fluida melakukan satu siklus ketika fluida tersebut melalui berbagai proses yang berbeda dan kembali ke keadaan awal.

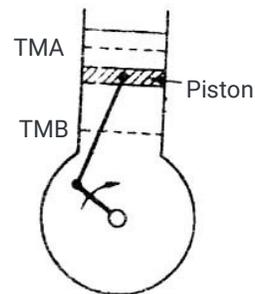
Namun fluida kerja pada mesin sebenarnya tidak mengalami siklus penuh, dan beroperasi pada siklus terbuka. Tetapi untuk kesederhaan analisis, kita mempelajarinya sebagai sebuah siklus tertutup (siklus ideal), dimana mendekati keadaan siklus terbuka.

5.5 Kerja Mesin Ideal

Mesin ideal bisa didefinisikan sebagai suatu peralatan yang menghasilkan kerja (yaitu tenaga) secara kontinyu dengan bantuan fluida kerja, dimana fluida kerja mengalami proses siklik. Hal ini dilakukan dengan bantuan piston dan silinder seperti ditunjukkan gambar 5.2.

Pada umumnya, susunan piston dan silinder sebuah mesin ideal disusun oleh siklus dari proses-proses berikut:

1. Udara di silinder dipanaskan dengan bantuan sumber eksternal yang akan menaikkan temperatur dan tekanan udara tersebut.
2. Udara berekspansi karena tekanan dan temperatur yang lebih tinggi. Sebagai hasilnya, kerja dihasilkan oleh gas.



Gambar 5.2. Mesin Ideal.

3. Udara kemudian membuang sebagian panas ke sumber eksternal. Kemudian udara kembali ke keadaan awal.
4. Udara kemudian di kompresi di dalam silinder. Untuk itu kerja dilakukan pada udara.

5.6 Istilah-istilah Penting pada Siklus Termodinamika

1. *Cylinder bore*

Diameter silinder, dimana piston bergerak, dikenal dengan istilah "cylinder bore".

2. Panjang langkah

Piston bergerak di dalam silinder karena rotasi engkol. Posisi paling atas disebut "titik mati atas" (TMA) dan posisi paling bawah disebut "titik mati bawah" (TMB). Jarak antara TMA dengan TMB disebut panjang langkah atau langkah/*stroke*.

3. Volume *Clarence* atau celah

Volume yang ditempati oleh fluida kerja, ketika piston mencapai titik mati atas disebut *volume clearance*. Biasanya ditulis dengan simbol (V_c).

4. Volume Langkah

Volume sapuan oleh piston ketika bergerak antara TMA dan TMB disebut volume sapuan, volume perpindahan atau volume langkah. Secara matematik volume sapuan:

$V_s = \text{luas penampang piston} \times \text{panjang langkah}$

$$V_s = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times l \quad (5.1)$$

dimana V_s adalah volume sapuan atau volume langkah, d adalah diameter piston dan l adalah panjang langkah.

5. Volume Silinder Penuh

Volume yang ditempati oleh fluida kerja ketika piston berada pada titik mati bawah disebut volume silinder penuh. Secara volume silinder penuh sama dengan jumlah volume *clearance* ditambah dengan volume sapuan.

6. Rasio Kompresi

Perbandingan volume silinder penuh terhadap volume clearance disebut rasio kompresi. Secara matematis:

$$r = \frac{V_s + V_c}{V_c} = 1 + \frac{V_s}{V_c} \quad (5.2)$$

dimana r adalah rasio kompresi dan V_c adalah volume clearance.

Catatan : Istilah ini juga disebut rasio ekspansi.

7. Tekanan Efektif Rata-rata

Pada kenyataannya, tekanan di dalam silinder berubah-ubah sesuai dengan posisi piston. Untuk memudahkan perhitungan, kita perlu tekanan efektif rata-rata, yang didefinisikan sebagai tekanan konstan yang bekerja pada piston selama langkah kerja, yang akan menghasilkan jumlah kerja yang sama, seperti yang dihasilkan oleh tekanan aktual yang bervariasi, yang dihasilkan selama siklus. Secara matematik, tekanan efektif rata-rata:

$$\text{tekanan efektif rata-rata} = \frac{\text{kerja yang dilakukan}}{\text{volume perpindahan}}$$

5.7 Efisiensi Siklus

Didefinisikan sebagai rasio kerja yang dilakukan terhadap kalor yang disuplai selama siklus. Secara matematik, efisiensi siklus:

$$\text{efisiensi} = \frac{\text{kerja yang dilakukan}}{\text{kalor yang diberikan}}$$

Karena kerja yang dilakukan selama satu siklus adalah sama dengan kalor yang diberikan dikurangi dengan kalor yang dilepaskan, efisiensi siklus bisa juga dinyatakan:

$$\text{efisiensi} = \frac{\text{kerja yang diberikan} - \text{kalor yang dilepaskan}}{\text{kalor yang diberikan}}$$

Catatan: 1. Efisiensi, seperti yang diberikan di atas, adalah efisiensi teoritis siklus. Karena itu disebut juga efisiensi termal teoritis.

2. Tidak memasukkan kerugian-kerugian yang ada pada keadaan sebenarnya ketika mesin sedang berjalan.
3. Untuk membandingkan efisiensi termodinamik siklus, udara diasumsikan sebagai zat kerja di dalam silinder mesin. Selanjutnya, udara diasumsikan mempunyai sifat gas sempurna. Efisiensi yang diperoleh disebut juga sebagai *efisiensi standar udara*. Atau disebut juga *efisiensi ideal*.

5.8 Jenis-jenis Siklus Termodinamika

Ada banyak siklus termodinamika, namun siklus-siklus berikut termasuk siklus penting yang akan dibahas lebih lanjut.

1. Siklus Carnot.
2. Siklus Stirling.
3. Siklus Ericsson.
4. Siklus Joule.
5. Siklus Otto.
6. Siklus Diesel.
7. Siklus pembakaran dual.

5.8.1 Siklus Carnot

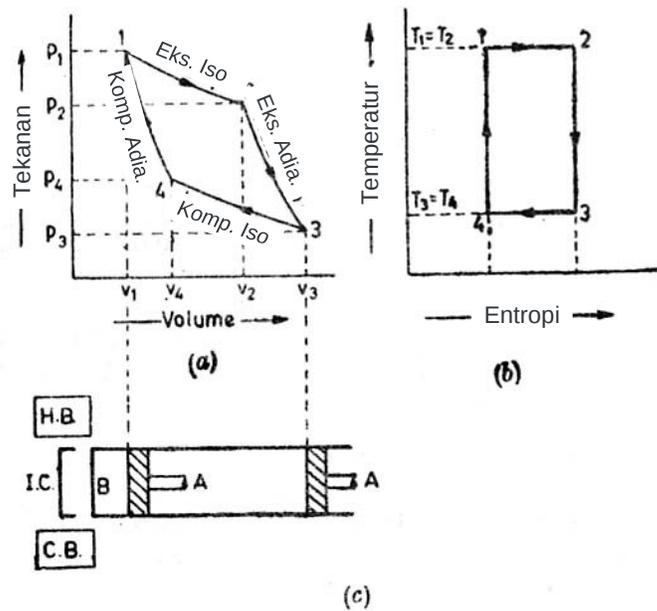
Siklus ini diperkenalkan pertama kali oleh Carnot, yang merupakan ilmuwan pertama yang menganalisis permasalahan efisiensi mesin kalor. Pada siklus Carnot, zat kerja melakukan operasi siklus yang terdiri dari dua proses isothermal dan dua proses adiabatik. Diagram p - V dan T - S dari siklus ditunjukkan gambar 5.3a dan b.

Mesin yang dibayangkan oleh Carnot mempunyai udara (yang dianggap mempunyai sifat seperti gas sempurna) sebagai zat kerja yang berada di dalam silinder dimana terdapat piston A yang bergerak tanpa gesekan. Dinding silinder dan piston adalah non-konduktor, tetapi dasar silinder B adalah konduktor dan ditutup oleh penutup terisolasi IC (*Isolated Cover*). Mesin diasumsikan bekerja diantara dua sumber dengan kapasitas yang tak terbatas, satu pada temperatur tinggi dan yang lainnya pada temperatur rendah.

Sekarang kita lihat empat proses siklus Carnot. Misalkan mesin berisi m kg udara pada kondisi awal yang ditunjukkan oleh titik 1 pada diagram p - V dan T - S . Pada titik ini, p_1 adalah tekanan, T_1 adalah temperatur dan V_1 adalah volume udara.

Proses Pertama

Sumber dengan temperatur tinggi *HB* (*hot body*) dipasangkan ke dasar silinder *B*. Udara akan berekspansi pada temperatur konstan T_1 , dari V_1 ke V_2 . Artinya, temperatur T_2 sama dengan T_1 . Ekspansi isotermal ditunjukkan oleh kurva 1-2 pada diagram p - V dan T - S pada gambar 5.3 (a) dan (b). Perlu dicatat bahwa kalor yang diberikan semuanya diserap oleh udara, dan dimanfaatkan untuk menghasilkan kerja luar.



Gambar 5.3. Siklus Carnot. (a). Diagram p - V . (b) Diagram T - S . (c) Piston dan silinder mesin.

Kalor yang diberikan = Kerja yang dilakukan pada ekspansi isotermal

$$Q_1 = p_1 V_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = mRT_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad ; \text{ karena } p_1 V_1 = mRT_1$$

$$Q_1 = mRT_1 \ln r \quad ; \text{ karena } r = \frac{V_2}{V_1} = \text{rasio ekspansi} \quad (5.3)$$

dimana Q kalor, p adalah tekanan, V adalah volume, m adalah massa, T adalah temperatur dan R adalah konstanta gas.

Proses kedua

Sumber panas diangkat dari dasar silinder *B* dan tutup *IC* tetap dipasang. Udara dibiarkan berekspansi secara adiabatik. Ekspansi adiabatik ditunjukkan oleh kurva 2-3 pada diagram *p-V* dan *T-S*. Temperatur udara turun dari T_2 ke T_3 . Karena tidak ada kalor yang diserap atau dilepaskan ke udara, maka penurunan energi dalam:

Penurunan energi dalam = kerja yang dilakukan oleh udara

$$\Delta U = \frac{p_2 V_2 - p_3 V_3}{\gamma - 1} = \frac{mRT_2 - mRT_3}{\gamma - 1} \quad ; \text{ karena } pV = mRT$$

$$\Delta U = \frac{mR(T_2 - T_3)}{\gamma - 1} \quad ; \text{ karena } T_1 = T_2 \quad (5.4)$$

dimana U adalah energi dalam dan γ adalah konstanta adiabatik.

Proses ketiga

Proses terjadi pada kurva 3-4 pada kurva. Pada proses ini penutup *IC* diangkat dari dasar silinder dan sumber dingin *CB* (*cold body*) dipasang. Udara dikompresi pada temperatur konstan T_3 dari V_3 ke V_4 . Terlihat bahwa selama proses ini, kalor yang dilepaskan ke sumber dingin sama dengan kerja yang dilakukan udara.

\therefore Kalor yang dilepaskan = Kerja yang dilakukan udara

$$Q_2 = p_3 V_3 \ln \left(\frac{V_3}{V_4} \right)$$

$$Q_2 = mRT_3 \ln \left(\frac{V_3}{V_4} \right) \quad ; \text{ karena } pV = mRT \quad (5.5)$$

$$Q_2 = mRT_3 \ln r \quad ; \text{ karena } r = \frac{V_3}{V_4} = \text{rasio ekspansi} \quad (5.6)$$

Catatan: rasio ekspansi dan kompresi harus sama, jika tidak sklus tidak akan tertutup.

Proses keempat

Proses ini terjadi pada kurva 4-1 pada kurva. Penutup *IC* pada dasar silinder *B* dipasang, dan udara akan mengalami kompresi secara adiabatik. Temperatur udara naik dari T_4 ke T_1 . Karena tidak ada kalor yang diserap atau dilepaskan oleh udara sehingga:

Kenaikan energi dalam = kerja yang dilakukan ke udara

$$\Delta U = \frac{p_1 V_1 - p_4 V_4}{\gamma - 1} = \frac{mRT_1 - mRT_4}{\gamma - 1} \quad (5.7)$$

$$\Delta U = \frac{mR(T_1 - T_3)}{\gamma - 1} \quad ; \text{ karena } T_3 = T_4 \quad (5.8)$$

Terlihat bahwa penurunan energi dalam selama ekspansi adiabatik 2-3 sama dengan kenaikan energi dalam selama kompresi adiabatik 4-1. Karena itu efek netto keseluruhan siklus adalah nol. Kerja yang dilakukan:

Kerja yang dilakukan = Kalor yang diberikan – Kalor yang dilepaskan

$$W = mRT_1 \ln r - mRT_3 \ln r$$

$$W = mR \ln r (T_1 - T_3) \quad (5.9)$$

dimana W adalah kerja. Efisiensi siklus, η :

$$\eta = \frac{\text{kerja yang dilakukan}}{\text{kalor yang diberikan}} = \frac{mR \ln r (T_1 - T_3)}{mRT_1 \ln r}$$

$$\eta = \frac{T_1 - T_3}{T_1} = 1 - \frac{T_3}{T_1} \quad (5.10)$$

Dari kompresi adiabatik:

$$\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_3} \right)^{\gamma - 1} = \left(\frac{1}{r} \right)^{\gamma - 1}$$

dan $\frac{V_3}{V_2} = r$ atau rasio kompresi adiabatik.

$$\square \quad \eta = 1 - \frac{T_3}{T_2} = 1 - \left(\frac{1}{r} \right)^{\gamma - 1} \quad (5.11)$$

Catatan:

1. Dari persamaan di atas, terlihat bahwa efisiensi siklus Carnot naik dengan naiknya T_1 atau turunnya T_3 . Dengan kata lain, kalor harus diambil dari temperatur yang setinggi mungkin dan dilepaskan ke temperatur yang serendah mungkin. Perlu dicatat bahwa efisiensi 100% hanya bisa dicapai hanya jika T_3 mencapai 0 mutlak, namun adalah tidak mungkin mencapai ini di dalam kondisi sebenarnya.

2. Perlu diketahui bahwa adalah tidak mungkin membuat mesin bekerja dengan siklus Carnot. Alasan sederhana untuk ini adalah bahwa ekspansi isothermal 1-2 harus dilakukan secepat mungkin supaya udara selalu mempunyai temperatur T_1 . Serupa dengan ini, kompresi isothermal 3-4 juga harus dilakukan dengan sangat lambat. Tetapi ekspansi adiabatik 2-3 dan kompresi 4-1 harus dilakukan secepat mungkin supaya tercapai kondisi adiabatik yang ideal. Namun pada keadaan nyata, perubahan kecepatan mesin yang drastis adalah tidak mungkin. Lebih jauh, adalah tidak mungkin secara sempurna menghilangkan gesekan antara komponen-komponen yang bergerak pada mesin dan juga menghilangkan kerugian-kerugian kalor karena konduksi, radiasi dan sebagainya. Jadi jelas bahwa adalah tidak mungkin untuk merealisasikan mesin Carnot ini. Namun bagaimanapun, mesin imajiner ini tetap digunakan sebagai pembandingan untuk mesin-mesin kalor lainnya.

Contoh soal 5.1:

Sebuah mesin Carnot, bekerja antara 650 K dan 310 K, menghasilkan kerja 150 kJ. Carilah (i) efisiensi termal, dan (ii) kalor yang ditambahkan selama proses.

Jawab:

Diketahui: $T_1 = 650 \text{ K}$; $T_3 = 310 \text{ K}$; $W = 150 \text{ kJ}$

- Efisiensi termal

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{T_1 - T_3}{T_1} \\ &= \frac{650 - 310}{650} = 0,523 = 52,3 \text{ \%}\end{aligned}$$

- Kalor yang ditambahkan selama proses

$$Q_1 = \frac{W}{\eta} = \frac{150}{0,523} = 286,8 \text{ kJ}$$

Contoh soal 5.2:

Sebuah siklus Carnot bekerja dengan rasio kompresi isentropik 5 dan rasio ekspansi isothermal 2. Volume udara pada permulaan ekspansi isothermal adalah $0,3 \text{ m}^3$. Jika temperatur dan tekanan maksimum dibatasi masing-masing dengan 550 K dan 21 bar, carilah:

1. Temperatur minimum siklus,

2. Efisiensi termal siklus,
3. Tekanan pada semua titik,
4. Perubahan entropi selama ekspansi isothermal,
5. Kerja yang dilakukan siklus, dan
6. Tekanan efektif rata-rata.

Ambil rasio kalor spesifik 1,4.

Jawab:

Diketahui:

Rasio kompresi isentropik:

$$\frac{V_4}{V_1} = \frac{V_3}{V_2} = 5$$

rasio ekspansi isothermal:

$$r = \frac{V_2}{V_1} = 2$$

$V_1 = 0,3 \text{ m}^3$; $V_2 = 2 \times V_1 = 2 \times 0,3 = 0,6 \text{ m}^3$; $V_3 = 5 \times 0,6 = 3,0 \text{ m}^3$; $T_1 = T_2 = 550 \text{ K}$;
 $p_1 = 21 \text{ bar} = 21 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $\gamma = 1,4$

1. Temperatur minimum siklus

$$\frac{T_1}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_1} \right)^{\gamma-1}$$

$$\frac{550}{T_4} = (5)^{1,4-1} = 1,904$$

$$T_4 = 289 \text{ K} = 16^\circ \text{ C}$$

2. Efisiensi termal siklus

$$\eta = \frac{T_1 - T_3}{T_1} = \frac{550 - 289}{550} = 0,475 = 47,5 \%$$

3. Tekanan pada setiap titik

Pada ekspansi isothermal 1-2:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

$$p_2 = p_1 \times \frac{V_1}{V_2} = 21 \times \frac{1}{2} = 10,5 \text{ bar}$$

Pada proses ekspansi isentropik 2-3:

$$\frac{p_3}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_3} \right)^\gamma$$

$$\frac{p_3}{10,5} = \left(\frac{1}{5} \right)^{1,4}$$

$$p_3 = 1,1 \text{ bar}$$

Pada proses kompresi isentropik 4-1:

$$\frac{p_4}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_4} \right)^\gamma$$

$$\frac{p_4}{21} = \left(\frac{1}{5} \right)^{1,4} = 0,1051$$

$$p_4 = 2,2 \text{ bar}$$

4. Perubahan entropi selama ekspansi isothermal

$$\begin{aligned} S_2 - S_1 &= \frac{p_1 V_1}{T_1} \ln r \\ &= \frac{(21 \times 10^5) \times 0,3}{550} \ln(2) = 793,97 \text{ J/K} \\ &= 793,97 \times 10^{-3} \text{ kJ/K} \end{aligned}$$

5. Kerja yang dilakukan siklus

Kalor yang ditambahkan selama siklus:

$$\begin{aligned} Q_1 &= T_1 (S_2 - S_1) = 550 \times 793,97 \times 10^{-3} \\ &= 436,68 \text{ kJ} \end{aligned}$$

dan kalor yang dikeluarkan selama siklus:

$$\begin{aligned} Q_2 &= T_3 (S_2 - S_1) = 289 \times 793,97 \times 10^{-3} \\ &= 229,46 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Kerja siklus:

$$\begin{aligned} W &= Q_1 - Q_2 = 436,68 - 229,46 \\ &= 207,22 \text{ kJ} \end{aligned}$$

6. Tekanan efektif rata-rata

$$\text{Volume langkah, } V_s = V_3 - V_1 = 3,0 - 0,3 = 2,7 \text{ m}^3$$

$$\text{Tekanan efektif rata-rata} = \frac{\text{kerja siklus}}{\text{volume langkah}}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{eff}} &= \frac{(207,22 \times 10^3)}{2,7} = 0,767 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \\ &= 0,767 \text{ bar} \end{aligned}$$

5.8.2 Siklus Stirling

Siklus ini ditemukan oleh Stirling, dimana terdiri dari dua proses isothermal dan dua proses volume konstan. Dua proses terakhir terjadi dengan bantuan sebuah *regenerator* untuk membuat siklus ini reversibel. Diagram p - V dan T - S siklus ini ditunjukkan oleh gambar 5.5.

Proses pertama

Proses terjadi pada kurva 1-2. Udara berekspansi secara isothermal, pada temperatur konstan T_1 dari V_1 ke V_2 . Kalor yang diberikan sumber eksternal diserap selama proses.

dimana ($r = V_2/V_1$, rasio ekspansi)

Proses kedua

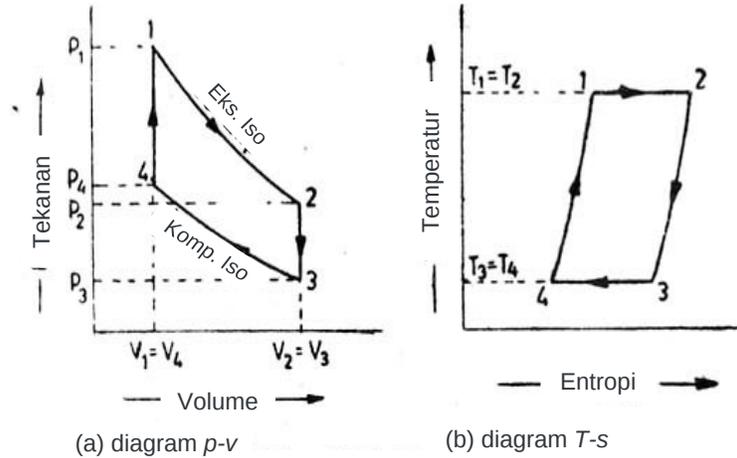
Proses terjadi pada kurva 2-3. Pada proses ini udara lewat melalui *regenerator* dan didinginkan pada volume konstan ke temperatur T_3 . Pada proses ini kalor dibuang ke generator.

Kalor yang diberikan = kerja yang dilakukan selama proses isothermal

$$Q_1 = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (5.12)$$

$$Q_1 = mRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \tag{5.13}$$

$$Q_1 = mRT_1 \ln r \tag{5.14}$$



Gambar 5.5. Siklus Stirling.

Kalor yang dilepaskan ke generator = $m C_v (T_2 - T_3)$

atau $Q_2 = m C_v (T_2 - T_3) \tag{5.15}$

Proses ketiga

Udara dikompresi secara isothermal di dalam silinder mesin dari V_3 ke V_4 . Proses ini digambarkan oleh kurva 3-4 pada diagram p - V dan T - S . Pada proses ini kalor dibuang oleh udara.

Kalor yang dilepaskan oleh udara:

$$Q_3 = p_3 v_3 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

$$Q_3 = mRT_3 \ln \frac{V_3}{V_4} \tag{5.16}$$

$$Q_3 = mRT_3 \ln r \tag{5.17}$$

dimana ($r = V_3/V_4$, rasio kompresi).

Proses keempat

Terakhir, udara dipanaskan pada volume konstan ke temperatur T_1 dengan melewati udara ke *regenerator* dalam arah yang berlawanan dengan proses 2-3. Pada proses ini kalor diserap oleh udara dari *regenerator* selama proses ini, yaitu proses 4-1.

Maka kalor yang diserap oleh udara:

$$Q_4 = m \cdot C_v (T_1 - T_4) = m \cdot C_v (T_1 - T_3) \quad (5.18)$$

dimana $T_3 = T_4$

Terlihat bahwa kalor yang dilepaskan ke regenerator selama proses 2-3 adalah sama dengan kalor yang diambil dari regenerator selama proses 4-1. jadi, tidak ada pertukaran kalor ke sistem selama proses-proses ini. Pertukaran kalor hanya terjadi selama dua proses isothermal.

Kerja yang dilakukan = Kalor yang disuplai – Kalor yang dibuang

$$\begin{aligned} W &= mRT_1 \ln r - mRT_3 \ln r \\ W &= mR \ln r (T_1 - T_3) \end{aligned} \quad (5.19)$$

dan efisiensi:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{Kerja yang dilakukan}}{\text{Kalor yang disuplai}} = \frac{mR \ln r (T_1 - T_3)}{mRT_1 \ln r} \\ \eta &= \frac{T_1 - T_3}{T_1} = 1 - \frac{T_3}{T_1} \end{aligned} \quad (5.20)$$

Catatan:

1. Efisiensi siklus Stirling adalah sama dengan siklus Carnot. Hal ini disebabkan oleh kenyataan bahwa siklus adalah reversibel, dan semua siklus reversibel mempunyai efisiensi yang sama.
2. Jika efisiensi *regenerator* adalah η_r , maka kalor yang diambil dari regenerator selama proses 4-1 adalah: $mC_v (T_1 - T_3)(1 - \eta_r)$. Dalam hal ini:

$$\eta = \frac{mR \ln r (T_1 - T_3)}{mRT_1 \ln r + mC_v (T_1 - T_3)(1 - \eta_r)}$$

$$= \frac{R \ln r (T_1 - T_3)}{RT_1 \ln r + C_v (T_1 - T_3) (1 - \eta_r)} \quad (5.21)$$

Contoh soal 5.3:

Sebuah mesin yang bekerja dengan siklus Stirling, mempunyai batas temperatur rendah sebesar 400°C . Batas tekanan maksimum dan minimum masing-masingnya adalah 12 bar dan 2 bar. Jika rasio ekspansi siklus adalah 3, carilah efisiensi ideal.

Jawab:

Diketahui: $T_3 = T_4 = 400^{\circ} + 273 = 673\text{ K}$; $p_1 = 12\text{ bar}$; $p_3 = 2\text{ bar}$; rasio ekspansi:
 $V_3 / V_4 = V_2 / V_1 = 3$

Pada proses isothermal ekspansi 1-2:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

$$p_2 = p_1 \times \frac{V_1}{V_2} = 12 \times \frac{1}{3} = 4\text{ bar}$$

Dengan cara yang sama pada proses kompresi isothermal 3-4:

$$p_4 = p_3 \times \frac{V_3}{V_4} = 2 \times 3 = 6\text{ bar}$$

Udara dipanaskan pada proses 4-1 pada tekanan konstan, maka:

$$T_1 = T_4 \times \frac{p_1}{p_4} = 673 \times \frac{12}{6} = 1346\text{ K}$$

Efisiensi:

$$\eta = 1 - \frac{T_3}{T_1} = 1 - \frac{673}{1346} = 0,5 = 50\%$$

5.8.3 Siklus Ericsson

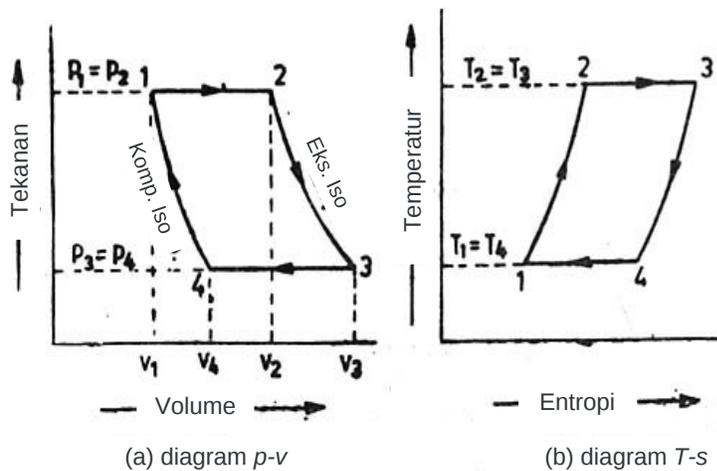
Siklus ini ditemukan oleh Ericsson, yang terdiri dari dua proses isothermal dan dua proses tekanan konstan. Diagram p - V dan T - S ditunjukkan oleh Gambar 5.6. Saat ini siklus Ericsson banyak digunakan dalam pembuatan turbin gas jenis siklus tertutup.

Proses pertama

Udara dipanaskan pada tekanan konstan dari temperatur awal T_1 ke temperatur T_2 , yang ditunjukkan oleh kurva 1-2 pada gambar 5.6.

Kalor yang diberikan ke udara:

$$Q_1 = m.C_p (T_2 - T_1) \quad (5.22)$$



Gambar 5.6. Siklus Ericsson.

Proses kedua

Udara dibiarkan berekspansi secara isothermal (yaitu pada temperatur konstan $T_2 = T_3$) dari volume awal V_2 ke V_3 yang ditunjukkan oleh kurva 2-3 pada gambar 5.6. Kerja pada ekspansi eksotermal memanfaatkan sebagian dari kalor yang diberikan pada tahap pertama.

Kalor yang dimanfaatkan selama ekspansi isothermal:

$$Q_2 = p_2 V_2 \ln (V_3/V_2)$$

$$Q_2 = mRT_2 \ln (V_3/V_2) = Q_2 = mRT_2 \ln r \quad (5.23)$$

dimana $r = V_3/V_2 =$ rasio ekspansi

Proses ketiga

Sekarang udara didinginkan pada tekanan konstan dari temperatur awal T_3 ke

temperatur T_4 yang ditunjukkan oleh kurva 3-4 pada gambar 5.6.

Kalor yang dilepaskan oleh udara:

$$Q_3 = m \cdot C_p (T_3 - T_4) \quad (5.24)$$

Proses keempat

Terakhir, udara di kompresi secara isothermal dari volume V_3 ke V_4 yang ditunjukkan oleh kurva 4-1 pada gambar 5.6. Pada proses ini sebagian kalor dibuang oleh udara untuk melakukan kerja pada udara.

Kalor yang dilepaskan selama kompresi isothermal:

$$Q_4 = p_4 V_4 \ln \frac{V_4}{V_1}$$

$$Q_4 = mRT_4 \ln \frac{V_4}{V_1}$$

$$Q_4 = mRT_4 \ln r \quad ; \text{ karena } \frac{V_4}{V_1} = r \text{ (rasio kompresi)} \quad (5.25)$$

Kalor diberikan selama proses 1-2 adalah sama dengan kalor yang dilepaskan selama proses 3-4 (karena $T_2 - T_1 = T_3 - T_4$).

Kerja yang dilakukan = kalor yang diberikan – kalor yang dilepaskan

$$W = mRT_2 \ln r - mRT_4 \ln r$$

$$W = mR \ln r (T_2 - T_4) \quad (5.26)$$

dan efisiensi:

$$\eta = \frac{\text{Kerja yang dilakukan}}{\text{Kalor yang diberikan}} = \frac{mR \ln r (T_2 - T_4)}{mRT_2 \ln r}$$

$$\eta = \frac{T_2 - T_4}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad (5.27)$$

Catatan: 1. Efisiensi siklus Ericsson adalah sama dengan efisiensi Carnot, yaitu:

$$\eta = 1 - \frac{\text{temperatur paling rendah}}{\text{temperatur paling tinggi}}$$

2. Jika efisiensi generator adalah η_r , maka kalor yang diambil dari generator selama proses 4-1 adalah: $mC_p (T_4 - T_2)(1 - \eta_r)$. Dalam hal ini:

$$\eta = \frac{mR \ln r (T_2 - T_4)}{mRT_2 \ln r + mC_p (T_4 - T_2)(1 - \eta_r)}$$

$$\eta = \frac{R \ln r (T_2 - T_4)}{RT_2 \ln r + C_p (T_4 - T_2)(1 - \eta_r)} \quad (5.28)$$

Contoh soal 5.4:

Sebuah mesin dengan siklus ericsson bekerja antara temperatur 45°C dan 230°C . Jika rasio ekspansi adalah 2, carilah:

- (i) kerja yang dilakukan per kg udara;
- (ii) efisiensi siklus.

Asumsikan $R = 0,29 \text{ kJ/kg-K}$

Jawab:

Diketahui: $T_2 = T_3 = 230^\circ + 273 = 503 \text{ K}$; $T_1 = T_4 = 45^\circ + 273 = 318 \text{ K}$; $r = 2$

(i) Kerja yang dilakukan per kg udara

$$\begin{aligned} W &= m.R \ln r (T_2 - T_4) \\ &= 1 \times 0,29 \times \ln 2 (503 - 318) \\ &= 37,19 \text{ kJ} \end{aligned}$$

(ii) Efisiensi siklus

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \frac{T_1}{T_3} \\ \eta &= 1 - \frac{318}{503} = 0,368 \text{ atau } 36,8 \% \end{aligned}$$

5.8.4 Siklus Joule

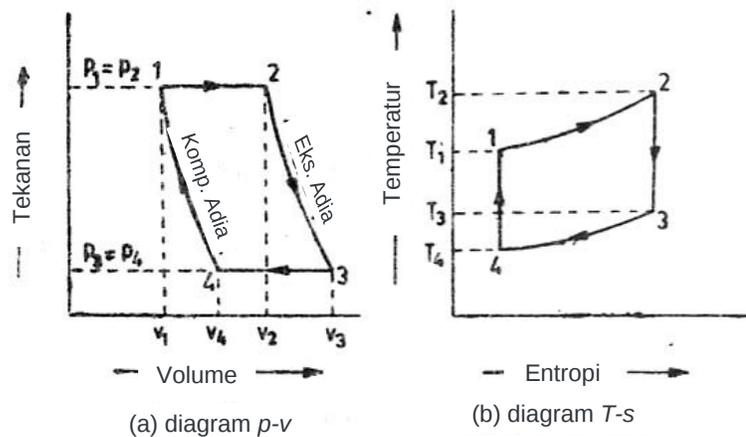
Siklus ini terdiri dari dua proses tekanan konstan dan dua proses adiabatik. Diagram p - V dan T - S ditunjukkan oleh gambar 5.7.

Proses pertama

Udara dipanaskan pada tekanan konstan dari temperatur awal T_1 ke temperatur T_2 , yang ditunjukkan oleh kurva 1-2 pada gambar 5.7.

Kalor yang diberikan ke udara:

$$Q_1 = m.C_p (T_2 - T_1) \tag{5.29}$$



Gambar 5.7. Siklus Joule.

Proses kedua

Udara dibiarkan berekspansi secara adiabatik dari V_2 ke V_3 yang ditunjukkan oleh kurva 2-3 pada gambar 5.7. Temperatur turun dari T_2 ke T_3 . Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dilepaskan oleh udara.

Proses ketiga

Sekarang udara didinginkan pada tekanan konstan dari temperatur awal T_3 ke temperatur T_4 yang ditunjukkan oleh kurva 3-4 pada gambar 5.7.

Kalor yang dilepaskan oleh udara:

$$Q_2 = m.C_p (T_3 - T_4) \tag{5.30}$$

Proses keempat

Udara sekarang dikompresikan secara adiabatik dari V_4 ke V_1 yang ditunjukkan oleh kurva 4-1 pada gambar 5.7. Temperatur naik dari T_4 ke T_1 . Tetap pada proses ini

tidak ada kalor yang diserap atau dilepaskan oleh udara.

Terlihat dari penjelasan di atas bahwa tidak terjadi pertukaran kalor selama dua proses adiabatik. Pertukaran kalor hanya terjadi selama proses tekanan konstan.

Kerja yang dilakukan = kalor yang diberikan – kalor yang dilepaskan

$$W = mC_p (T_2 - T_1) - mC_p (T_3 - T_4) \quad (5.31)$$

dan efisiensi siklus:

$$\eta = \frac{\text{kerja yang dilakukan}}{\text{kalor yang diberikan}} = \frac{mC_p(T_2 - T_1) - mC_p(T_3 - T_4)}{mC_p(T_2 - T_1)}$$

$$\eta = \frac{(T_2 - T_1) - (T_3 - T_4)}{(T_2 - T_1)}$$

Setelah diturunkan, diperoleh:

$$\eta = 1 - \frac{T_3}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_1} \quad (5.32)$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}} \quad (5.33)$$

dimana $r = \frac{V_3}{V_2} = \frac{V_4}{V_1}$ dan $\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} = \left(\frac{1}{r}\right)^{\gamma-1} = \frac{1}{(r)^{\gamma-1}}$

- Catatan** :
1. Efisiensi siklus Joule lebih rendah dari efisiensi siklus Carnot. Alasannya adalah bahwa semua kalor tidak diserap pada temperatur paling tinggi dan dibuang pada temperatur paling rendah.
 2. Siklus secara termodinamik tidak reversibel, sebab tidak ada *regenerator* untuk memberikan temperatur yang konstan selama pemanasan dan pendinginan pada tekanan konstan.
 3. Kebalikan siklus Joule disebut dengan siklus Bell-coleman, dan diterapkan pada refrigerator, dimana udara digunakan sebagai refrigeran.

Contoh soal 5.5:

Sebuah mesin bekerja mengikuti siklus Brayton/Joule dengan tekanan awal dan akhir masing-masingnya adalah 3 bar dan 1 bar. Jika temperatur sebelum kompresi

adiabatis 298 K dan sebelum ekspansi adiabatik adalah 923 K, carilah: (i) kalor yang diberikan per kg udara (ii) kalor yang dilepaskan per kg udara (iii) kerja yang dilakukan per kg udara, dan (iv) efisiensi mesin. Ambil nilai $C_p = 1,0$ dan $C_v = 0,715$.

Jawab:

Diketahui: $p_1 = p_2 = 3 \text{ bar} = 3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $p_3 = p_4 = 1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $T_4 = 298 \text{ K}$; $T_2 = 923 \text{ K}$; $C_p = 1,0$; $C_v = 0,715$

$$\text{Indeks adiabatik: } \gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{1}{0,715} = 1,4$$

(i) kalor yang diberikan per kg udara

$$\frac{T_1}{T_4} = \left(\frac{p_1}{p_4} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{3}{1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = (3)^{0,286} = 1,35$$

$$T_1 = T_4 \times 1,35 = 298 \times 1,35 = 402 \text{ K}$$

jadi kalor yang diberikan per kg udara:

$$\begin{aligned} Q_1 &= m \cdot C_p (T_2 - T_1) = 1 \times 1 (923 - 402) \\ &= 521 \text{ kJ} \end{aligned}$$

(ii) kalor yang dilepaskan per kg udara

$$\frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{p_2}{p_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{3}{1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = (3)^{0,286} = 1,35$$

$$T_3 = \frac{T_2}{1,35} = \frac{923}{1,35} = 684 \text{ K}$$

Kalor yang dilepaskan:

$$\begin{aligned} Q_2 &= m \cdot C_p (T_3 - T_4) = 1 \times 1 (684 - 298) \\ &= 386 \text{ kJ} \end{aligned}$$

(iii) kerja yang dilakukan per kg udara

$$W = Q_1 - Q_2 = 521 - 386 = 135 \text{ kJ}$$

(iv) efisiensi mesin

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{135}{521}$$

$$= 0,259 \text{ atau } 25,9 \%$$

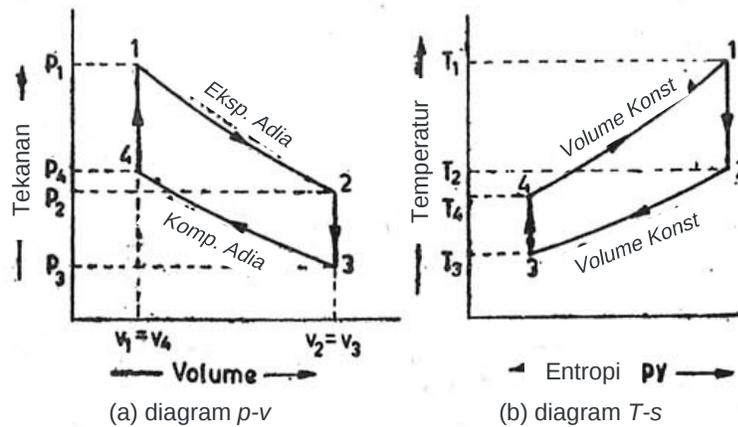
5.8.5 Siklus Otto

Mesin pertama yang sukses bekerja dengan siklus ini dibuat oleh A. Otto. Saat ini, banyak mesin berbahan bakar gas, bensin dan minyak lainnya berjalan berdasarkan siklus ini. Siklus ini dikenal juga sebagai siklus volume konstan, dikarenakan kalor diterima dan dibuang pada volume konstan.

Siklus Otto ideal terdiri dari dua proses volume konstan dan dua proses adiabatik, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 5.8.

Proses pertama

Udara diekspansikan secara adiabatik dari temperatur awal T_1 ke temperatur T_2 seperti ditunjukkan oleh kurva 1-2 pada gambar 5.8. Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dibuang oleh udara.



Gambar 5.8. Siklus Otto.

Proses kedua

Udara didinginkan pada volume konstan dari temperatur T_2 ke temperatur T_3 seperti yang ditunjukkan oleh kurva 2-3 pada gambar 5.8. Kalor yang dibuang oleh udara selama proses ini :

$$Q_2 = m.C_v(T_2 - T_3) \quad (5.34)$$

Proses ketiga

Udara dikompresikan secara adiabatik dari temperatur T_3 ke temperatur T_4 , seperti yang ditunjukkan oleh kurva 3-4 pada gambar 5.8. Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dilepaskan oleh udara.

Proses keempat

Udara sekarang dipanaskan pada volume konstan dari temperatur T_4 ke temperatur T_1 , seperti yang ditunjukkan oleh kurva 4-1 pada gambar 5.8. Kalor yang diserap selama proses:

$$Q_1 = m.C_v(T_1 - T_4) \quad (5.35)$$

Terlihat bahwa udara dibawa kembali ke kondisi tekanan, volume dan temperatur awal, sehingga menyudahi satu siklus.

KERJA yang dilakukan = kalor yang diserap – kalor yang dibuang

$$W = m.C_v(T_1 - T_4) - m.C_v(T_2 - T_3) \quad (5.36)$$

Efisiensi ideal atau efisiensi standar udara:

$$\eta = 1 - \left(\frac{T_3}{T_4} \right) = 1 - \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \quad (5.37)$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}} \quad (5.38)$$

dimana $r = \frac{V_3}{V_4} = \frac{V_2}{V_1}$ dan $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{1}{r} \right)^{\gamma-1}$

Catatan: 1. Rasio kompresi,

$$r = \frac{\text{Volume silinder total}}{\text{Volume celah}}$$

$$r = \frac{\text{Volume celah} + \text{Volume langkah}}{\text{Volume celah}}$$

$$\text{Volume celah} = \frac{\text{Volume langkah}}{r - 1}$$

2. Hubungan antara tekanan dan temperatur atau tekanan dan volume bisa diperoleh dari persamaan adiabatik, yaitu:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} ; \quad \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma} ; \quad \frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

Contoh soal 5.6:

Sebuah mesin yang bekerja mengikuti siklus ideal Otto, pada awal kompresi adiabatik mempunyai temperatur 25°C dan tekanan 1,5 bar. Carilah rasio kompresi, jika $\gamma = 1,4$ dan efisiensi termal = 48%. Cari juga temperatur dan tekanan pada akhir kompresi.

Jawab:

Diketahui: $T_3 = 25^{\circ} + 273 = 298\text{ K}$; $p_3 = 1,5\text{ bar}$; $\gamma = 1,4$; $\eta = 48\% = 0,48$

➤ Rasio kompresi

$$\eta = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}}$$

$$0,48 = 1 - \frac{1}{r^{1,4-1}} = 1 - \frac{1}{r^{0,4}}$$

$$\frac{1}{r^{0,4}} = 1 - 0,48 = 0,52$$

$$r^{0,4} = 1 / 0,52 = 1,923$$

$$r = (1,923)^{1/0,4} = (1,923)^{2,5} = 5,13$$

➤ Temperatur pada akhir kompresi

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{1}{r}\right)^{\gamma-1}$$

$$\frac{298}{T_4} = \left(\frac{1}{5,13}\right)^{1,4-1} = (0,195)^{0,4} = 0,52$$

$$T_4 = 573\text{ K} = 300^{\circ}\text{C}$$

➤ Tekanan pada akhir kompresi

$$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^\gamma = r^\gamma$$

$$\frac{p_4}{1,5} = (5,13)^{1,4} = 9,865$$

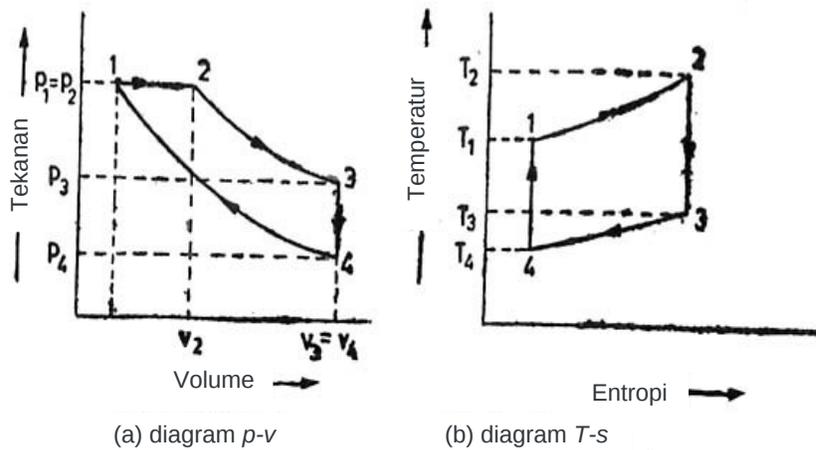
$$p_4 = 14,8 \text{ bar}$$

5.8.6 Siklus Diesel

Siklus ini ditemukan oleh Dr. Rudolph Diesel pada tahun 1893, dengan ide untuk mendapatkan efisiensi termal yang lebih tinggi dengan kompresi rasio tinggi. Ini adalah siklus penting dimana semua mesin diesel bekerja berdasarkan siklus ini. Dikenal juga sebagai siklus tekanan konstan sebab kalor diterima pada tekanan konstan.

Siklus diesel ideal terdiri dari dua proses adiabatik, sebuah proses tekanan konstan dan sebuah proses volume konstan. Proses ini ditunjukkan oleh diagram $p-v$ dan $T-s$ pada gambar 5.9.

Kempat proses akan dijelaskan berikut ini.



Gambar 5.9. Siklus Diesel.

Proses pertama

Udara dipanaskan pada tekanan konstan dari temperatur awal T_1 ke temperatur T_2 yang ditunjukkan oleh kurva 1-2 pada gambar 5.9.

Kalor yang diberikan ke udara:

$$Q_1 = m.C_p (T_2 - T_1) \quad (5.39)$$

Proses kedua

Udara diekspansikan secara adiabatik dari temperatur T_2 ke temperatur T_3 seperti yang ditunjukkan oleh kurva 2-3 pada gambar 5.9. Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dibuang oleh udara.

Proses ketiga

Sekarang udara didinginkan pada volume konstan dari temperatur T_3 ke temperatur T_4 , seperti yang ditunjukkan oleh kurva 3-4 pada gambar 5.9. Kalor yang dilepas oleh udara:

$$Q_2 = m.C_v (T_3 - T_4) \quad (5.40)$$

Proses keempat

Udara dikompresikan secara adiabatik dari temperatur T_4 ke temperatur T_1 , seperti yang ditunjukkan oleh kurva 4-1 pada gambar 5.9. Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dibuang oleh udara.

Terlihat bahwa udara dibawa kembali ke kondisi tekanan, volume dan temperatur awal, sehingga menyudahi satu siklus.

Kerja yang dilakukan = kalor yang diserap – kalor yang dibuang

$$W = m.C_p (T_2 - T_1) - m.C_v (T_3 - T_4) \quad (5.41)$$

Efisiensi ideal atau efisiensi standar udara:

$$\eta = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}} \left[\frac{\rho^\gamma - 1}{\gamma(\rho - 1)} \right] \quad (5.42)$$

dimana: $r =$ rasio kompresi : $r = \frac{V_4}{V_1}$

$\rho =$ rasio *cut-off* : $\rho = \frac{V_2}{V_1}$

- Catatan:** 1. Efisiensi siklus diesel ideal lebih rendah dari siklus Otto untuk rasio kompresi yang sama.
2. Efisiensi siklus diesel meningkat dengan menurunnya *cut-off* dan mendekati maksimum (sama dengan efisiensi siklus Otto) jika harga *cut-off* adalah nol, yaitu $\rho = 1$.

Contoh soal 5.7:

Sebuah mesin diesel dengan rasio kompresi 13 : 1 dan bahan bakar di putus (*cut-off*) pada 8% panjang langkah. Carilah efisiensi standar udara. Ambil nilai $\gamma = 1,4$.

Jawab:

Diketahui: $r = V_4 / V_1 = 13$; $V_2 = V_1 + 8\%$ volume langkah ; $\gamma = 1,4$;

Pertama-tama asumsikan volume celah, $V_1 = 1 \text{ m}^3$

Volume total (V_4): $V_4 / V_1 = 13$ maka $V_4 = 13 V_1 = 13 \times 1 = 13 \text{ m}^3$

Volume langkah = $V_4 - V_1 = 13 - 1 = 12 \text{ m}^3$

Maka volume *cut-off*, $V_2 = 1 + 0,08 \times 12 = 1,96 \text{ m}^3$

Rasio *cut-off* :

$$\rho = \frac{V_2}{V_1} = \frac{1,96}{1,0} = 1,96$$

Efisiensi:

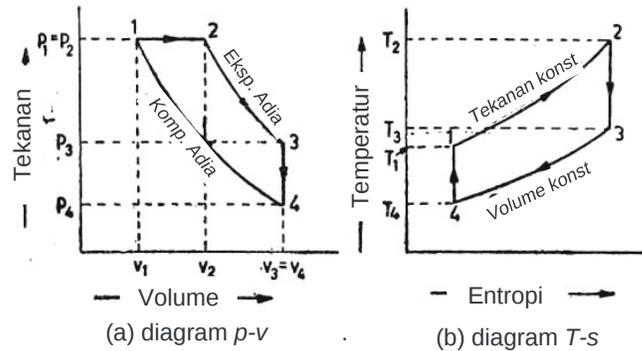
$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}} \left[\frac{\rho^\gamma - 1}{\gamma(\rho - 1)} \right] \\ &= 1 - \frac{1}{(13)^{1,4-1}} \left[\frac{(1,96)^{1,4} - 1}{1,4(1,96 - 1)} \right] = 1 - 0,417 \end{aligned}$$

$$= 0,583 \text{ atau } 58,3 \%$$

Contoh soal 5.8:

Sebuah mesin dengan siklus diesel ideal mempunyai rasio kompresi 16 dengan temperatur dan tekanan paling rendah masing-masingnya adalah 27°C dan 1 bar. Jika kalor ditambahkan selama siklus sebesar 500 kJ/kg udara, carilah (i) tekanan dan temperatur pada titik-titik penting, (ii) kerja yang dilakukan dalam siklus/kg, (iii) efisiensi termal siklus, dan (iv) tekanan efektif rata-rata.

Jawab:



Diketahui: $V_4 / V_1 = 16$; $T_4 = 27^{\circ} + 273 = 300 \text{ K}$; $p_4 = 1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $Q = 500 \text{ kJ/kg}$

(i) Tekanan dan temperatur di titik-titik penting

Pada titik 4:

$$p_4 V_4 = mRT_4$$

$$V_4 = \frac{mRT_4}{p_4} = \frac{1 \times 287 \times 300}{1 \times 10^5} = 0,861 \text{ m}^3$$

$$\text{dan } V_1 = \frac{V_4}{16} = \frac{0,861}{16} = 0,054 \text{ m}^3/\text{kg} \quad ; \text{ karena } V_4 / V_1 = 16$$

- Pada proses kompresi adiabatik (4-1):

$$\frac{p_1}{p_4} = \left(\frac{V_4}{V_1} \right)^{\gamma}$$

$$\frac{p_1}{1} = (16)^{1,4} = 48,5$$

$$p_1 = 48,5 \text{ bar}$$

$$\frac{T_1}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_1} \right)^{\gamma-1}$$

$$\frac{T_1}{300} = (16)^{1,4-1} = (16)^{0,4} = 3,03$$

$$T_1 = 909 \text{ K} = 636^{\circ} \text{ C}$$

- Pada proses tekanan konstan (1-2):

$$p_2 = p_1 = 48,5 \text{ bar}$$

$$Q_1 = m \cdot C_p (T_2 - T_1)$$

$$500 = 1 \times 1 (T_2 - 909)$$

$$T_2 = 1409 \text{ K} = 1136^{\circ} \text{ C}$$

$$V_2 = \frac{V_1}{T_1} \times T_2 = \frac{0,054}{909} \times 1409$$

$$= 0,084 \text{ m}^3$$

- Pada proses ekspansi adiabatik (2-3):

$$\frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^{\gamma-1}$$

$$\frac{1136}{T_3} = \left(\frac{0,861}{0,084} \right)^{1,4-1} = (10,25)^{0,4} = 2,537 \quad ; (V_3 = V_4)$$

$$T_3 = 1136 / 2,537 = 448 \text{ K} = 175^{\circ} \text{ C} \text{ (dibulatkan)}$$

$$\frac{p_2}{p_3} = \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^{\gamma}$$

$$\frac{48,5}{p_3} = \left(\frac{0,861}{0,084} \right)^{1,4} = 26$$

$$p_3 = 1,87 \text{ bar}$$

(ii) Kerja yang dilakukan siklus per kg

Kalor yang dilepaskan selama proses volume konstan (3-4):

$$\begin{aligned} Q_2 &= m \cdot C_v (T_3 - T_4) \\ &= 1 \times 0,714 (448 - 300) \\ &= 105,7 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Kerja yang dilakukan:

$$W = Q_1 - Q_2 = 500 - 105,7 = 394,3 \text{ kJ/kg}$$

(iii) Efisiensi termal siklus

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{394,3}{500} = 0,789 \text{ atau } 78,9 \%$$

(iv) Tekanan efektif rata-rata

Volume langkah siklus diesel:

$$V_s = V_4 - V_1 = 0,861 - 0,054 = 0,807 \text{ m}^3$$

Tekanan efektif rata-rata:

$$\begin{aligned} p_{eff} &= \frac{W}{V_s} ; (W = 394,3 \times 10^3 \text{ J/kg}) \\ p_{eff} &= \frac{394,3 \times 10^3}{0,807} = 4,9 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \text{ atau } 4,9 \text{ bar} \end{aligned}$$

5.8.7 Siklus Pembakaran Dual

Siklus ini adalah kombinasi dari siklus Otto dan Diesel. Siklus ini kadang-kadang disebut siklus semi-diesel, sebab mesin semi-diesel bekerja berdasarkan siklus ini. Pada siklus ini, kalor diserap sebagian pada volume konstan dan sebagian lagi pada tekanan konstan.

Siklus pembakaran dual terdiri dari dua buah proses adiabatik, dua proses volume konstan dan satu proses tekanan konstan. Proses ini ditunjukkan oleh gambar 5.10.

Proses pertama

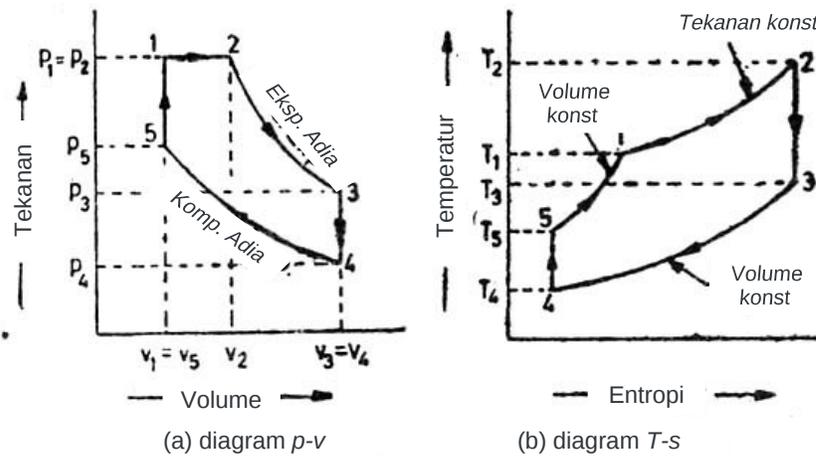
Udara dipanaskan pada tekanan konstan dari temperatur awal T_1 ke temperatur T_2 yang ditunjukkan oleh kurva 1-2 pada gambar 5.10.

Kalor yang diberikan ke udara:

$$Q_1 = m.C_p (T_2 - T_1) \tag{5.43}$$

Proses kedua

Udara diekspansikan secara adiabatik dari temperatur T_2 ke temperatur T_3 seperti yang ditunjukkan oleh kurva 2-3 pada gambar 5.10. Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dibuang oleh udara.



Gambar 5.10. Siklus Pembakaran Dual.

Proses ketiga

Sekarang udara didinginkan pada volume konstan dari temperatur T_3 ke temperatur T_4 , seperti yang ditunjukkan oleh kurva 3-4 pada gambar 5.10. Kalor yang dilepas oleh udara:

$$Q_2 = m.C_v (T_3 - T_4) \tag{5.44}$$

Proses keempat

Udara dikompresi secara adiabatik dari temperatur T_4 ke temperatur T_5 , seperti yang ditunjukkan oleh kurva 4-5 pada gambar 5.10. Pada proses ini tidak ada kalor

yang diserap atau dibuang oleh udara.

Proses kelima

Udara terakhir dipanaskan pada volume konstan dari temperatur T_5 ke temperatur T_1 , seperti ditunjukkan oleh kurva 5-1 pada gambar 5.10.

Kalor yang diserap oleh udara :

$$Q_3 = m.C_v (T_1 - T_5) \quad (5.45)$$

Terlihat bahwa udara dibawa kembali ke kondisi tekanan, volume dan temperatur awal, sehingga menyudahi satu siklus.

Kerja yang dilakukan = kalor yang diserap – kalor yang dibuang

$$W = [m.C_p(T_2 - T_1) + m.C_v(T_1 - T_5)] - m.C_v(T_3 - T_4) \quad (5.46)$$

Efisiensi ideal atau efisiensi standar udara:

$$\eta = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}} \left[\frac{\alpha \cdot \rho^\gamma - 1}{(\alpha - 1) + \gamma \alpha (\rho - 1)} \right] \quad (5.47)$$

dimana: $r =$ rasio kompresi $= \frac{V_4}{V_5} = \frac{V_3}{V_1}$

$\rho =$ rasio cut-off $= \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_2}{V_5}$

$\alpha =$ rasio ekspansi atau tekanan $= \frac{p_1}{p_5}$

Catatan: 1. Untuk siklus Otto, $\rho = 1$, maka efisiensi siklus:

$$\eta_{otto} = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}}$$

2. Untuk siklus diesel, $\alpha = 1$, maka efisiensi siklus:

$$\eta_{diesel} = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}} \left[\frac{\rho^\gamma - 1}{\gamma(\rho - 1)} \right]$$

3. Efisiensi siklus pembakaran dual lebih besar dari siklus diesel dan lebih kecil dari siklus Otto, untuk rasio kompresi yang sama.

Contoh soal 5.9:

Sebuah mesin yang bekerja mengikuti siklus dual ideal mempunyai volume langkah 10 liter udara dan rasio kompresi 16. Tekanan udara sebelum kompresi adiabatik adalah 1 bar dan temperatur 300 K. Jika kalor ditambahkan pada tekanan konstan 70 bar dan 5% volume langkah, carilah (i) rasio tekanan, (ii) rasio cut-off, (iii) massa udara pada silinder, (iv) kalor yang diberikan di setiap siklus, (v) kalor yang dilepaskan per siklus, (vi) kerja yang dilakukan persiklus, (vii) efisiensi termal siklus, dan (viii) tekanan efektif rata-rata. Ambil nilai $C_p = 1,0$ dan $C_v = 0,714$.

Jawab:

Diketahui:

Volume langkah: $V_s = V_4 - V_5 = 10 \text{ liter} = 0,01 \text{ m}^3$; $r = V_4 / V_5 = 16$; $V_4 = 16 V_5$

sehingga : $16 V_5 - V_5 = 10 \text{ liter}$

$$V_5 = 10 / 15 = 0,67 \text{ liter}$$

dan: $V_4 = 10 \text{ liter} + V_5 = 10 + 0,67 = 10,67 \text{ liter}$

$$= 0,01067 \text{ m}^3$$

$$p_4 = 1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$T_4 = 300 \text{ K}$$

$$p_1 = p_2 = 70 \text{ bar} = 70 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$C_p = 1,0 ; C_v = 0,71$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{1}{0,714} = 1,4$$

(i) Rasio tekanan, α :

$$\frac{p_5}{p_4} = \left(\frac{V_4}{V_5} \right)^\gamma = (16)^{1,4} = 48,5$$

$$p_5 = p_4 \times 48,5 = 1 \times 48,5 = 48,5 \text{ bar}$$

$$\text{dan } \alpha = \frac{p_1}{p_5} = \frac{70}{48,5} = 1,44$$

(ii) Rasio *cut-off*:

$$\begin{aligned}
 V_2 &= V_1 + 5\% \text{ (volume langkah) ; } \dots (V_1 = V_5) \\
 &= 0,67 + (0,05 \times 10) = 1,17 \text{ liter} \\
 \rho &= \frac{V_2}{V_1} = \frac{1,17}{0,67} = 1,75
 \end{aligned}$$

(iii) Massa udara dalam silinder

$$\begin{aligned}
 p_4 \cdot V_4 &= m \cdot R \cdot T_4 \\
 m &= \frac{p_4 \cdot V_4}{R \cdot T_4} = \frac{1 \times 10^5 \times 0,01067}{287 \times 300} \\
 &= 0,012 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

(iv) Kalor yang ditambahkan per siklus

Pada proses kompresi adiabatik (4-5):

$$\begin{aligned}
 \frac{T_5}{T_4} &= \left(\frac{V_4}{V_5} \right)^{\gamma-1} \\
 \frac{T_5}{300} &= (16)^{1,4-1} = 3,03 \\
 T_5 &= 300 \times 3,03 = 909 \text{ K}
 \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama untuk proses volume konstan (5-1):

$$\begin{aligned}
 \frac{p_5}{T_5} &= \frac{p_1}{T_1} \\
 T_1 &= \frac{T_5}{p_5} \times p_1 = \frac{909}{48,5} \times 70 = 1312 \text{ K}
 \end{aligned}$$

dan pada proses tekanan konstan (1-2):

$$\begin{aligned}
 \frac{V_1}{T_1} &= \frac{V_2}{T_2} \\
 T_2 &= \frac{T_1}{V_1} \times V_2 = \frac{1312}{0,67} \times 1,17 = 2291 \text{ K}
 \end{aligned}$$

Kalor yang ditambahkan selama proses tekanan konstan (1-2):

$$Q_1 = m \cdot C_p (T_2 - T_1)$$

$$= 0,012 \times 1,0 (2291 - 1312)$$

$$= 11,75 \text{ kJ}$$

dan kalor yang ditambahkan selama proses volume konstan (5-1):

$$Q_2 = m.C_v (T_1 - T_5)$$

$$= 0,012 \times 0,741 (1312 - 909)$$

$$= 3,45 \text{ kJ}$$

Total kalor yang ditambahkan per siklus:

$$Q = Q_1 + Q_2 = 11,75 + 3,45 = 15,20 \text{ kJ}$$

(v) Kalor yang dilepaskan per siklus

Pada proses ekspansi adiabatik (2-3):

$$\frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^{\gamma-1}$$

$$\frac{2291}{T_3} = \left(\frac{10,67}{1,17} \right)^{(1,4-1)} = 2,42$$

$$T_3 = 947 \text{ K}$$

sehingga kalor yang dilepaskan per siklus (selama proses volume konstan 3-4):

$$Q_3 = m.C_v (T_3 - T_4)$$

$$= 0,012 \times 0,714 (947 - 300)$$

$$= 5,54 \text{ kJ}$$

(vi) Kerja per siklus

$$W = Q - Q_3$$

$$= 15,20 - 5,54 = 9,66 \text{ kJ}$$

(vii) Efisiensi termal siklus

$$\eta = \frac{W}{Q} = \frac{9,66}{15,20} = 0,732 \text{ atau } 73,2 \%$$

(viii) Tekanan efektif rata-rata

Volume langkah siklus:

$$V_s = V_4 - V_5 = 10 \text{ liter} = 10 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Tekanan efektif rata-rata:

$$p_{eff} = \frac{W}{V_s} \quad ; (W = 9,66 \times 10^3 \text{ J})$$

$$\begin{aligned} p_{eff} &= \frac{9,66 \times 10^3}{10 \times 10^{-3}} = 0,966 \times 10^6 \text{ N/m}^2 \\ &= 9,66 \text{ bar} \end{aligned}$$

Soal-soal

1. Carilah efisiensi sebuah mesin Carnot, dimana temperatur panas dan dinginnya masing-masing adalah 154°C dan 15°C . (jawaban: 84%)
2. Carilah efisiensi dari siklus regeneratif Stirling yang bekerja pada batas temperatur 427°C dan 77°C . Rasio ekspansi isothermal atau kompresi isothermal adalah 4. (jawaban: 58,6%)
3. Sebuah turbin gas yang bekerja mengikuti siklus Joule menerima udara pada tekanan 1 kg/cm^2 dan temperatur 15°C . Udara dikompresi hingga tekanan 5 kg/cm^2 dan kemudian dipanaskan pada tekanan konstan hingga temperatur 800°C . Udara panas kemudian mengalami ekspansi di turbin dan tekanannya kembali ke 1 kg/cm^2 . Carilah kerja yang dilakukan per kg udara dan efisiensi turbin. Diasumsikan $\gamma = 1,4$ dan $C_p = 0,24$. (jawaban: 58,2 kcal; 37%)
4. Sebuah mesin siklus Otto ideal, proses ekspansi dan kompresinya adalah adiabatik. Tekanan dan temperatur pada permulaan kompresi masing-masing adalah 1 kg/cm^2 dan 35°C . Tekanan pada akhir kompresi adalah 8 kg/cm^2 abs dan akhir pembakaran adalah 20 kg/cm^2 abs. Jika volume pada awal kompresi adalah $0,03\text{ m}^3$, carilah efisiensi siklus Otto. (jawaban: 45,4%)
5. Jika sebuah mesin bekerja mengikuti siklus Otto mempunyai silinder dengan diameter $17,8\text{ cm}$ dan langkah $30,5\text{ cm}$. Jika volume celah 2210 cm^3 , carilah efisiensi ideal siklus. (jawaban: 44,8%)
6. Mesin berbahan bakar minyak beroperasi pada siklus tekanan konstan mempunyai rasio kompresi $15 : 1$ dan *cut off* bahan bakar terjadi pada $1/7$ volume langkah. Hitunglah efisiensi siklus. Ambil $\gamma = 1,4$. (jawaban: 56%)
7. Rasio kompresi mesin diesel adalah 14 dan rasio *cut off* adalah 6% dari panjang langkah. Carilah efisiensi standar udara mesin. (jawaban: 60,5%)
8. Sebuah mesin dengan bahan bakar cair beroperasi mengikuti siklus pembakaran dual, mempunyai data berikut:
 - Tekanan pada awal kompresi : $0,97\text{ kg/cm}^2$
 - Temperatur pada awal kompresi : 55°C
 - Rasio tekanan : 1,5
 - Rasio *cut-off* : 1,6
 - Rasio kompresi : 11
 - Rasio kalor spesifik, $g = 1,4$
 Carilah temperatur pada akhir setiap proses dan efisiensi mesin.

(jawaban: 583°C ; 1011°C ; 1782°C ; 682°C ; 58,4%)

“Kekuatan suatu negeri sama sekali tidak terletak pada besar atau kecilnya jumlah penduduk dan luas-sempit negerinya, tetapi pada nilainya dalam menguasai ilmu pengetahuan.” (Pramoedya Ananta Toer)

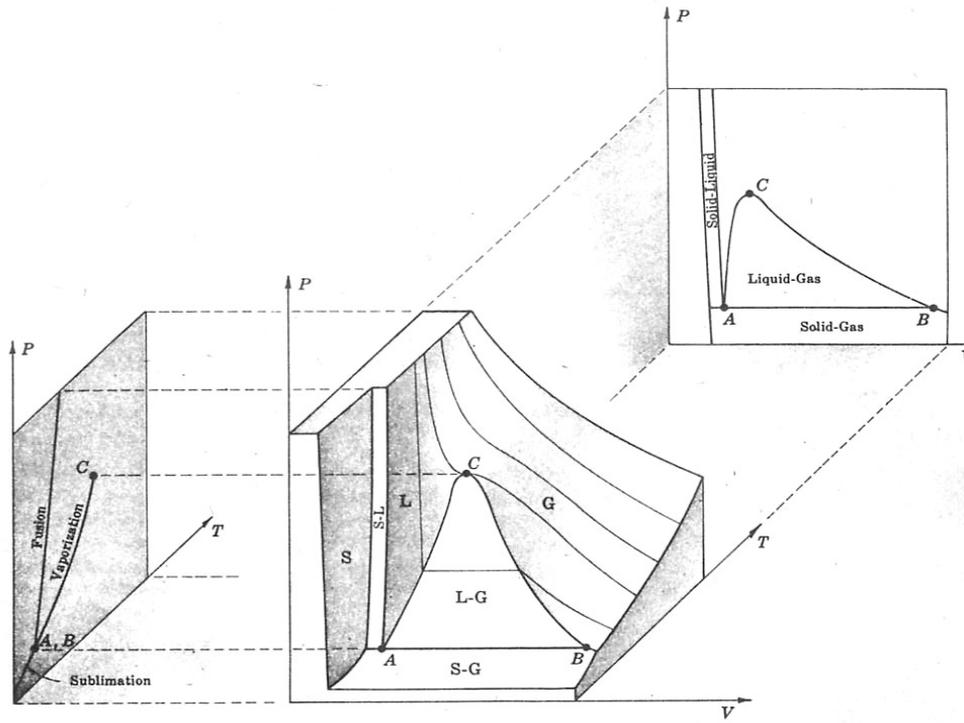
BAB VI

SIFAT-SIFAT ZAT MURNI

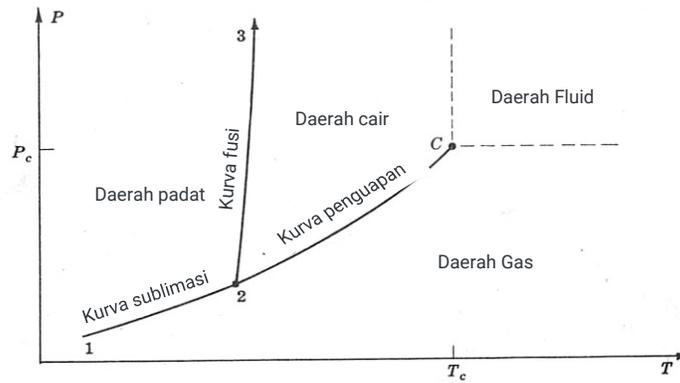
Hubungan antara volume spesifik atau volume molar terhadap temperatur dan tekanan untuk zat murni dalam keadaan kesetimbangan ditunjukkan dengan permukaan tiga dimensi seperti terlihat pada Gambar 6.1.

Bidang yang ditandai dengan S, L dan G berturut-turut mewakili daerah padat, cair dan gas pada diagram. Daerah yang tidak diarsir merupakan daerah kesetimbangan dua fasa, dan ada tiga daerah seperti ini yaitu: padat-gas (S-G), padat-cair (S-L) dan cair-gas (L-G). Garis tebal yang melewati titik A dan B menandai perpotongan daerah dua fasa, dan merupakan garis tiga fasa dimana terdapat fasa padat, cair dan gas dalam keadaan kesetimbangan tiga fasa. Sesuai dengan hukum fasa, sistem ini mempunyai derajat kebebasan nol, fasa ini ada pada satu temperatur dan satu tekanan. Karena itu, proyeksi garis ini pada bidang PT merupakan sebuah titik (ditunjukkan di kiri diagram utama), dan disebut *triple point*.

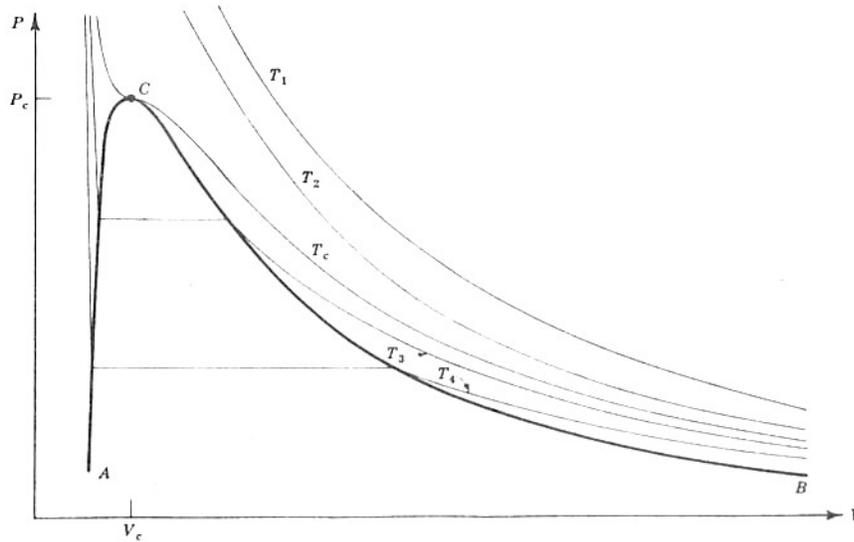
Proyeksi parameter P-T pada gambar 6.1, ditunjukkan oleh gambar 6.2 dengan skala yang lebih besar, dan daerah cair dan gas pada proyeksi P-V ditunjukkan lebih detil oleh gambar 6.3. Garis pada gambar 6.2 merupakan garis batas fasa. Kurva fusi (garis 2-3) biasanya mempunyai kemiringan positif, tetapi untuk beberapa zat (seperti air) kurva ini mempunyai kemiringan negatif. Kurva 1-2 dan 2-C masing-masing garis merupakan tekanan uap untuk padat dan cair. Titik C adalah titik kritis, yang merupakan titik tekanan dan temperatur tertinggi bagi gas dan cairan berada dalam kesetimbangan. Zat yang berada di atas titik kritis T_c dan tekanan di atas tekanan kritis p_c disebut sebagai *fluid* karena tidak akan bisa menjadi cair dengan menurunkan temperatur pada p konstan atau menguap dengan menurunkan tekanan pada T konstan.



Gambar 6.1. Diagram p - V - T untuk zat murni.



Gambar 6.2. Diagram p - T zat murni.



Gambar 6.3. Diagram p - V .

Kurva primer pada gambar 6.3, memberikan hubungan tekanan-volume bagi cairan jenuh (A ke C) dan uap jenuh (C ke B). Daerah di bawah kurva ACB merupakan daerah dua fasa dimana cairan jenuh dan uap jenuh berada pada kesetimbangan. Titik C adalah titik kritis, dimana mempunyai koordinat p_c dan V_c .

6.1 Perubahan Fasa Zat Murni, Persamaan Clayperon

Perubahan fasa terjadi apabila zat berubah dari suatu keadaan ke keadaan lain apabila melewati salah satu kurva pada gambar 6.2. Terlihat bahwa perubahan fasa untuk zat murni terjadi pada temperatur atau tekanan konstan. Nilai **Fungsi Gibbs** pada perubahan fasa tidak berubah seperti pada pencairan, penguapan, sublimasi atau transformasi alotropi yang terjadi pada T dan p konstan.

Sehingga fungsi Gibbs bisa dirumuskan:

$$(dG^t)_{T,P} = 0$$

dimana: G = fungsi Gibbs.

Bila dua fasa α dan β yang menempati ruang yang sama, maka fungsi Gibbs-nya

adalah: $G^\alpha = G^\beta$. Sehingga:

$$dG^\alpha = dG^\beta \quad (i)$$

Persamaan fungsi Gibbs adalah:

$$dG = -SdT + Vdp \quad (6.1)$$

Dimana T adalah temperatur, S adalah entropi, V adalah volume dan p adalah tekanan. Dengan mensubstitusikan persamaan 6.1 ke (i):

$$-S^\alpha dT + V^\alpha dp = -S^\beta dT + V^\beta dp \quad \text{atau} \quad \frac{dp}{dT} = \frac{S^\beta - S^\alpha}{V^\beta - V^\alpha}$$

Karena tekanan di dalam persamaan ini selalu tekanan jenuh pada batas fasa, kita tulis p^{sat} (sat = *saturated* = jenuh) untuk p . Selanjutnya $S^\beta - S^\alpha$ dan $V^\beta - V^\alpha$ merupakan perubahan sifat zat pada transisi fasa, dan umumnya bisa ditulis dengan $\Delta S^{\alpha\beta}$ dan $\Delta V^{\alpha\beta}$, sehingga:

$$\frac{dp^{sat}}{dT} = \frac{\Delta S^{\alpha\beta}}{\Delta V^{\alpha\beta}} \quad (ii)$$

Transisi fasa yang terjadi pada T dan p konstan memerlukan pertukaran kalor antara zat dengan lingkungannya. Jika pertukaran ini terjadi reversibel, kalor ini disebut sebagai *kalor laten* dan harganya sama dengan perubahan enthalpi, atau:

$$\Delta Q = \Delta H^{\alpha\beta} = T \cdot \Delta S^{\alpha\beta} \quad (6.2)$$

Sehingga:

$$\frac{dp^{sat}}{dT} = \frac{\Delta H^{\alpha\beta}}{T \Delta V^{\alpha\beta}} \quad (\text{persamaan Clayperon}) \quad (6.3)$$

dimana H adalah enthalpi. Persamaan ini berlaku pada perubahan semua perubahan fasa pada zat murni dan berkaitan dengan kemiringan kurva pada diagram p - T .

Catatan: 1. Notasi ini yang banyak digunakan oleh ahli teknik misalnya yang terdapat pada *tabel uap*, yaitu tabel yang berisikan sifat-sifat termodinamik dari air. Notasi yang digunakan berupa *subscript* daripada *superscript*, untuk menandai fasa jenuh dan subscript ganda tanpa tanda Δ untuk menyatakan perubahan fasa.

s = padat jenuh

f = cairan jenuh

g = uap atau gas jenuh

- sf = fusi
- fg = penguapan
- sg = sublimasi

2. Persamaan Clayperon dengan menggunakan notasi ini untuk tiga perubahan fasa:

Fusi:
$$\frac{dp^{sat}}{dT} = \frac{H_{sf}}{T V_{sf}} = \frac{H_f - H_s}{T (V_f - V_s)} \tag{6.4}$$

Penguapan:
$$\frac{dp^{sat}}{dT} = \frac{H_{fg}}{T V_{fg}} = \frac{H_g - H_f}{T (V_g - V_f)} \tag{6.5}$$

Sublimasi:
$$\frac{dp^{sat}}{dT} = \frac{H_{sg}}{T V_{sg}} = \frac{H_g - H_s}{T (V_g - V_s)} \tag{6.6}$$

Contoh soal 6.1:

Dengan menggunakan data p - V - T air jenuh, untuk temperatur 100°C, hitunglah (a) $h_g - h_f$, (b) $u_g - u_f$, (c) $s_g - s_f$. Bandingkan hasilnya dengan data dari tabel uap.

Jawab:

Dari tabel uap (tabel A-2) untuk temperatur 100°C diperoleh:

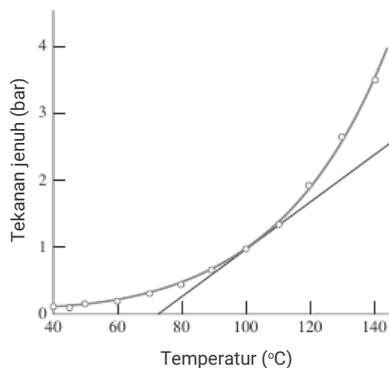
$h_g - h_f = h_{fg} = 2257,0$ kJ/kg; $u_g = 2506,5$ kJ/kg; $u_f = 418,94$ kJ/kg, $s_g = 7,3549$ kJ/kg.K; $s_f = 1,306$ kJ/kg.K, sehingga:

$u_f - u_g = 2506,5 - 418,94 = 2087,56$ kJ/kg

$s_f - s_g = 7,3549 - 1,306 = 6,0489$ kJ/kg.K

(a) Nilai $h_g - h_f$ dapat dicari dengan menggunakan persamaan Clapeyron:

$$h_g - h_f = T(v_g - v_f) \frac{dp^{sat}}{dT}$$



Nilai dp^{sat}/dT pada 100°C dapat diperkirakan dari grafik. Dengan memakai data dari tabel uap, dapat dibuat grafik seperti di samping. Kemudian dicari kemiringan garis tangen pada titik 100°C. Diperoleh nilai kemiringan sebesar 3570 N/m².K, atau:

$$\frac{dp^{sat}}{dT} = 3570 \text{ N/m}^2.\text{K}$$

Dari tabel A-2, pada 100°C diperoleh $v_g = 1,673\text{ m}^3/\text{kg}$; $v_f = 1,0435 \times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{kg}$, maka:

$$\begin{aligned} h_g - h_f &= [373 (1,673 - 1,0435 \times 10^{-3})(3570)] \times 10^{-3} \\ &= 2226,4\text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Nilai ini kurang sekitar 1% dari nilai dari tabel uap.

(b) $u_g - u_f$

$$\begin{aligned} u_g - u_f &= (h_g - h_f) - p_{sat} (v_g - v_f) \\ &= 2226,4 - [1,014 \times 10^5 (1,673 - 1,0435 \times 10^{-3})] \times 10^{-3} \\ &= 2056,86\text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Nilai ini berbeda sekitar 1% dari nilai dari tabel uap.

(c) $s_g - s_f$.

$$\begin{aligned} s_g - s_f &= \frac{h_g - h_f}{T} \\ &= \frac{2226,4}{373} = 5,97\text{ kJ/kg.K} \end{aligned}$$

Terdapat perbedaan sekitar 1% dengan nilai dari tabel uap

6.2 Tekanan Uap dan Kalor Laten

Persamaan Clayperon biasanya digunakan untuk menghitung kalor laten penguapan dan sublimasi dari data tekanan uap dan volumetrik.

$$\Delta H^{a\beta} = T \Delta V^{a\beta} \frac{dP^{sat}}{dT} \quad (6.7)$$

Untuk mendapatkan harga $\Delta H^{a\beta}$, dibutuhkan harga P^{sat} sebagai fungsi T yang tepat. Plot harga $\ln \Delta H^{a\beta}$ terhadap $1/T$ umumnya memberikan kurva garis yang mendekati linier. Hal ini memberikan persamaan tekanan-uap dalam bentuk:

$$\ln P^{sat} = A - \frac{B}{T} \quad (6.8)$$

dimana A dan B adalah konstanta. Persamaan ini berguna bagi berbagai tujuan, tetapi tidak memberikan data yang cukup baik untuk harga turunan.

Persamaan Antoine lebih baik dan memberikan penggunaan yang lebih luas:

$$\ln P^{sat} = A - \frac{B}{T + C} \quad (6.9)$$

dimana A , B dan C adalah konstanta.

Jika data tekanan-uap dengan akurasi yang tinggi tersedia, persamaan di atas tidak memberikan hasil yang tepat. Persamaan berikut bisa memberikan ketepatan yang lebih baik.

$$\ln P^{sat} = A - \frac{B}{T + C} + DT + E \ln T \quad (6.10)$$

dimana A , B , C , D dan E adalah konstanta.

6.3 Sifat-sifat Sistem Dua Fasa

Jika perubahan fasa zat murni terjadi pada T dan p konstan, sifat-sifat molar fasa individu tidak berubah. Jika terjadi perubahan fasa dari α ke β , keadaan intermediet sistem akan terdiri dari dua fasa α dan β , dimana masing-masing fasa akan mempunyai sifat molar yang sama. Jika x adalah fraksi jumlah mol total (atau masa total) dari sistem dengan fasa β , maka sifat rata-rata sistem dua fasa diberikan oleh:

$$\begin{aligned} V &= (1-x)V^\alpha + xV^\beta & U &= (1-x)U^\alpha + xU^\beta \\ H &= (1-x)H^\alpha + xH^\beta & S &= (1-x)S^\alpha + xS^\beta \end{aligned}$$

dimana U adalah energi dalam. Secara umum persamaan tersebut bisa ditulis sebagai:

$$M = (1-x)M^\alpha + xM^\beta \quad (6.11)$$

atau bisa ditulis sebagai:

$$M = M^\alpha + x(M^\beta - M^\alpha)$$

atau:

$$M = M^\alpha + x\Delta M^{\alpha\beta} \quad (6.12)$$

Contoh soal 6.2:

Uap pada tekanan 35 bar diketahui mempunyai volume spesifik 50 dm³/kg. Berapakah enthalpinya?

Jawab:

Diketahui: $p = 35 \text{ bar}$; volume spesifik = $v = 50 \text{ dm}^3/\text{kg} = 50 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$.

Dengan menggunakan tabel uap (tabel A-3 pada lampiran) harga v pada 35 bar menunjukkan bahwa v terletak antara $v_f = 1,2347 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ dan $v_g = 0,057 \text{ m}^3/\text{kg}$. Karena itu uap dalam keadaan basah.

$$v = v_f + xv_{fg} \quad \text{dimana } v_{fg} = v_g - v_f$$

Kualitas uap, x :

$$x = \frac{v - v_f}{v_{fg}} = \frac{(50 \times 10^{-3}) - (1,2347 \times 10^{-3})}{0,057 - (1,2347 \times 10^{-3})} = 0,874$$

Untuk 35 bar, dari tabel diperoleh enthalpi spesifik, h :

$$h_f = 1049,7 \quad \text{dan} \quad h_{fg} = 1753,7 \text{ kJ/kg}$$

Maka enthalpi adalah:

$$h = h_f + x.h_{fg}$$

$$h = 1049,7 + (0,874 \times 1753,7) = 2582,4 \text{ kJ/kg}$$

6.4 Ekspansivitas Volume dan Kompresibilitas Isothermal Bahan Padat dan Cair

Kenaikan fraksi volume per satuan temperatur disebut ekspansivitas volume. Ekspansivitas volume dirumuskan:

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (6.13)$$

dimana β adalah ekspansivitas volume.

Kompresibilitas isothermal adalah besaran yang menyatakan perubahan volume relatif fluida karena adanya tekanan. Kompresibilitas isothermal didefinisikan dengan:

$$\kappa = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad (6.14)$$

dimana κ adalah kompresibilitas isothermal. Nilai eksperimen untuk harga-harga ini diberikan dalam bentuk tabel di data *handbook*. Untuk bahan padat dan cair, persamaan di atas bisa dihubungkan sehingga menjadi:

$$\frac{dV}{V} = \beta dT - \kappa dp \quad (6.15)$$

6.5 Kapasitas Kalor Bahan Padat dan Cair

Pada umumnya kapasitas kalor mesti didapatkan dari eksperimen untuk setiap zat. Data untuk bahan padat dan cair biasanya diambil pada tekanan atmosfer dan dinyatakan sebagai fungsi temperatur dengan persamaan:

$$C_p = a + bT + cT^2 \quad (6.16)$$

Atau
$$C_p = a + bT + cT^{-2} \quad (6.17)$$

Dimana konstanta a , b dan c spesifik untuk masing-masing zat. Kapasitas kalor biasanya meningkat dengan meningkatnya temperatur. Pengaruh tekanan pada kapasitas kalor untuk cairan dan padatan biasanya sangat kecil dan bisa diabaikan.

Perbedaan kapasitas kalor bisa dinyatakan dalam variabel ekspansivitas volume dan kompresibilitas isothermal dengan persamaan:

$$C_p - C_v = \frac{TV\beta^2}{\kappa} \quad (6.18)$$

Perbedaan ini cukup signifikan, kecuali pada temperatur sangat rendah.

Contoh soal 6.3:

Material tembaga pada temperatur 300 K mempunyai sifat-sifat berikut:

$$C_p = 24,5 \text{ J/mol-K}$$

$$\beta = 50,4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

$$\kappa = 7,78 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$$

$$v = 7,06 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

Carilah C_v .

Jawab:

$$C_p - C_v = \frac{T_V \beta^2}{\kappa}$$

$$= \frac{300 \times (7,06 \times 10^{-6}) \times (50,4 \times 10^{-6})^2}{7,78 \times 10^{-12}} = 0,692 \text{ J/mol.K}$$

$$C_v = 24,5 - 0,69 = 23,8 \text{ J/mol.K}$$

Contoh soal 6.4:

Kapasitas kalor kuarsa (SiO_2) pada 100 kPa antara 298 dan 848 K diberikan oleh persamaan:

$$C_p = 46,98 + 34,33 \times 10^{-3} T - 11,3 \times 10^5 T^{-2} \quad \text{J/mol K}$$

Jika 1000 kg dipanaskan dari 300 K ke 700 K pada 100 kPa, berapa banyak panas dibutuhkan?

Jawab:

Diketahui: $m = 1000 \text{ kg}$; $T_1 = 300 \text{ K}$; $T_2 = 700 \text{ K}$; $p = 100 \text{ kPa}$

Untuk proses tekanan konstan maka $\Delta H = Q$, dan $dH = C_p dT$. Sehingga:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT$$

dengan memasukkan harga C_p dan dengan integrasi, diperoleh:

$$Q = 46,98 \times (T_2 - T_1) + \frac{34,33 \times 10^{-3}}{2} \times (T_2^2 - T_1^2) - 11,3 \times 10^5 \times \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

masukkan harga temperatur ke persamaan di atas, maka diperoleh:

$$Q = 23.506 \text{ J/mol}$$

Massa molar SiO_2 adalah 0,052 kg/mol, maka jumlah kalor per kg:

$$Q = \frac{23506}{0,052} = 452.040 \text{ J/kg}$$

Total kalor yang diperlukan untuk memanaskan 1000 kg:

$$Q_t = 1000 \times (452 \times 10^3) = 452 \times 10^6 \text{ J atau } 452 \text{ MJ}$$

6.6 Kapasitas Kalor Gas

Kapasitas kalor gas juga diperoleh dari fungsi empirik temperatur, dan biasanya dalam bentuk yang sama dengan persamaan yang digunakan pada bahan cair dan padat. Kapasitas kalor gas juga sangat dipengaruhi oleh tekanan. Namun pengaruh tekanan pada sifat-sifat termodinamik tidak diperlukan dalam persamaan kapasitas kalor. Sebagai gantinya, kapasitas kalor gas dibuat pada kondisi keadaan gas ideal. Kapasitas kalor ini dilambangkan dengan C'_p dan C'_v dan tidak bergantung dengan tekanan dan berlaku hubungan:

$$C'_p - C'_v = R$$

C'_p dinyatakan dengan salah satu persamaan berikut:

$$C'_p = a + bT + cT^2 \quad (6.19)$$

$$C'_p = a + bT + cT^{-2} \quad (6.20)$$

dimana konstanta adalah spesifik untuk setiap gas. Karena gas pada tekanan rendah biasanya mendekati ideal, kapasitas kalor gas ideal bisa digunakan untuk hampir semua perhitungan gas *real* pada tekanan atmosfer.

Contoh soal 6.5:

Satu gram mole nitrogen berada di dalam sebuah tangki tertutup dengan volume tetap. Nitrogen diasumsikan sebagai gas ideal, hitunglah kalor yang diperlukan untuk menaikkan temperatur dari 300 K ke 1000 K. Untuk nitrogen berlaku:

$$C'_p = 27,336 + 5,233 \times 10^{-3} T \quad (\text{J/mol K})$$

Jawab:

Untuk proses volume konstan, tidak ada kerja dan hukum pertama menjadi $\Delta U = Q$. Karena nitrogen dianggap gas ideal, maka:

$$Q = \Delta U = \int_{T_1}^{T_2} C'_v dT$$

Untuk mendapatkan C'_v gunakan persamaan $C'_p - C'_v = R$, sehingga:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} (C'_p - R) dT$$

dimana $R = 8,314 \text{ J/mol K}$. Substitusi C'_p dan R menghasilkan:

$$Q = \int_{300}^{1000} (19,022 + 5,233 \times 10^{-3} T) dT$$

$$\begin{aligned} Q &= 19,022 (T_2 - T_1) + 5,233 \times 10^{-3}/2 (T_2^2 - T_1^2) \\ &= 19,022 (1000 - 300) + 5,233 \times 10^{-3}/2 (1000^2 - 300^2) \\ &= 19,022 \times 700 + \frac{5,233 \times 10^{-3}}{2} \times 91 \times 10^4 = 15696 \text{ J} \end{aligned}$$

Soal-soal

1. Sebuah tangki berisikan 1 kg H₂O yang mempunyai fasa cair dan gas dalam keadaan setimbang pada 10 bar. Jika cairan dan uap air masing-masing menempati setengah volume tangki, berapakah enthalpi dari isi tangki.
2. Sebuah tangki mempunyai volume total 1 m³ berisikan 0,05 m³ air jenuh dan 0,95 m³ uap air jenuh pada tekanan 1 bar. Berapakah kalor mesti ditambahkan ke air sehingga semua air menguap?
3. Dengan menggunakan data p - V - T untuk air jenuh dari tabel uap, untuk temperatur 50°C, hitunglah:
 - a. $h_g - h_f$
 - b. $u_g - u_f$
 - c. $s_g - s_f$

Bandingkan hasilnya dengan data dari tabel uap.

4. Untuk interval temperatur tertentu, kurva jenuh tekanan-temperatur suatu zat diwakili oleh persamaan $\ln p_{sat} = A - B/T$, dimana A dan B adalah konstanta.
 - a. Carilah persamaan untuk $h_g - h_f$ dan $s_g - s_f$ dari data p - V - T dan konstanta B .
 - b. Dengan menggunakan hasil dari (a), hitunglah $h_g - h_f$ dan $s_g - s_f$ untuk uap air pada 25°C dan bandingkan hasilnya dengan data tabel uap.
5. Dengan menggunakan data dari tabel A-2, carilah konstanta A dan B yang memberikan hasil paling cocok untuk tekanan jenuh antara interval 20 – 30°C dengan persamaan $\ln p_{sat} = A - B/T$. Dengan menggunakan persamaan ini, carilah dp^{sat}/dT pada 25°C. Hitunglah $h_g - h_f$ pada 25°C dan bandingkan hasilnya dengan nilai dari tabel uap.
6. Satu gram mole nitrogen berada di dalam sebuah tangki tertutup dengan volume tetap. Nitrogen diasumsikan sebagai gas ideal, hitunglah kalor yang diperlukan untuk menaikkan temperatur dari 350 K ke 850 K. Kapasitas kalor nitrogen adalah:

$$C'_p = 27,336 + 5,233 \times 10^{-3} T \quad (\text{J/mol K})$$

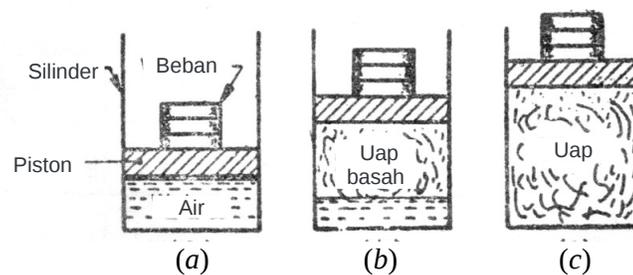
***“Pengetahuan tidaklah cukup, kita harus mengamalkannya. Niat
tidaklah cukup, kita harus melakukannya.” (Johann Wolfgang von
Goethe)***

BAB VII

PEMBENTUKAN DAN SIFAT-SIFAT UAP AIR

Uap air adalah air yang berada dalam fase gas. Penggunaan yang paling umum dari uap air adalah sebagai fluida kerja pada sistem mesin uap dan turbin uap. Uap air tidak mengikuti hukum gas sempurna sampai uap benar-benar kering.

7.1 Pembentukan Uap Air Pada Tekanan Konstan



Gambar 7.1. Pembentukan uap air pada tekanan konstan.

Misalkan 1 kg air pada temperatur 0°C berada dalam silinder-piston, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 7.1. Jika air dipanaskan hingga berubah menjadi uap, maka terjadi proses-proses berikut ini.

1. Volume air akan sedikit meningkat dengan naiknya temperatur. Keadaan ini akan menggerakkan piston ke atas.
2. Jika proses pemanasan berlanjut terus, temperatur suatu saat akan mencapai

titik uap. Temperatur uap air pada tekanan atmosfer normal atau 1,033 bar adalah 100°C . Ketika titik uap tercapai, temperatur akan konstan dan air akan menguap dan akan menekan piston ke atas pada tekanan konstan. Akibatnya, volume spesifik uap meningkat (Gambar 7.1b). Pada tahapan ini uap mengandung partikel air dalam bentuk suspensi, dan disebut dengan *uap basah*. Proses akan berlanjut terus hingga semua air berubah menjadi uap.

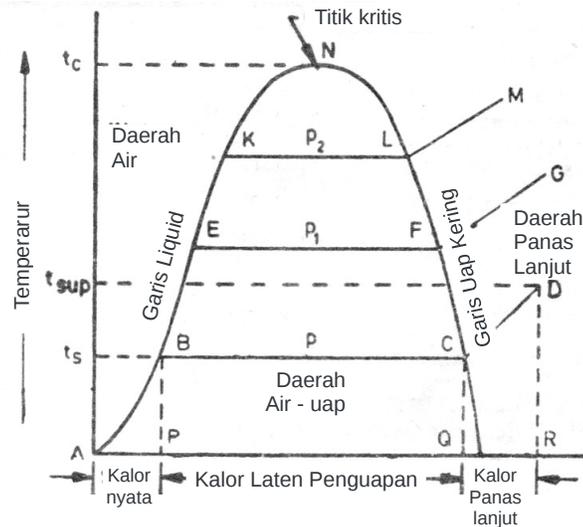
3. Pada proses pemanasan selanjutnya, partikel air yang berbentuk suspensi akan berubah menjadi uap. Ketika air semuanya sudah berbentuk uap, maka uap air disebut dengan *uap air kering* atau *uap air jenuh*. Uap air kering mempunyai sifat seperti gas ideal.
4. Pada proses pemanasan selanjutnya, temperatur uap air mulai meningkat. Uap air pada kondisi ini disebut dengan *uap air panas lanjut (superheated steam)*.

Proses pembentukan uap dapat digambarkan dengan grafik antara kalor total (sumbu x) dan temperatur (sumbu y), sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 7.2. Titik A merupakan kondisi awal air pada 0°C dan tekanan, misalkan $p\text{ N/m}^2$. Garis $ABCD$ menunjukkan hubungan antara temperatur dan kalor pada tekanan spesifik p . Selama pembentukan uap panas lanjut dari titik beku air, terdapat tiga tahapan sebagai berikut.

1. Pemanasan air hingga temperatur uap atau temperatur jenuh (t_g) yang diwakili oleh garis AB . Jumlah kalor yang diserap pada tahap ini adalah AP dan disebut dengan *kalor nyata (sensible heat)*.
2. Tahap selanjutnya, terjadi perubahan fase air dari cair ke uap, yang ditunjukkan oleh garis BC . Kalor yang diserap pada tahapan ini disebut dengan *kalor tersembunyi/laten (latent heat)*.
3. Tahap terakhir adalah proses pemanasan lanjut (*superheating*) yang ditunjukkan oleh garis CD . Kalor yang diserap pada proses ini disebut dengan *kalor panas lanjut*. Total kalor dari ketiga tahapan ini diwakili oleh panjang AR .

Jika tekanan dinaikkan, misalkan p_1 , temperatur penguapan juga akan naik. Titik E pada Gambar 7.2 merupakan titik penguapan atau titik cairan jenuh pada tekanan p_1 sedangkan titik F adalah titik uap jenuh. Garis FG merupakan garis proses pemanasan lanjut dimana uap air mengalami pemanasan lanjut. Dengan cara yang

sama, dapat dibuat garis untuk tekanan yang berbeda (misal p_2 pada Gambar 7.2).



Gambar 7.2. Grafik Temperatur – kalor total selama pembentukan uap.

Garis yang melalui titik-titik A, B, E, K disebut dengan *garis liquid* atau *garis cairan jenuh* yang membentuk garis pembatas antara air dan uap. Sementara itu garis yang melalui titik-titik L, F, C disebut dengan *garis uap jenuh* yang memisahkan daerah uap basah dengan uap panas lanjut. Titik N adalah puncak kurva dimana garis cairan jenuh dan garis uap jenuh bertemu. Titik ini dikenal dengan *titik kritis*, dan pada titik ini fase cair dan uap bergabung. Temperatur pada titik N disebut dengan *temperatur kritis* dan tekanannya disebut dengan *tekanan kritis*. Untuk air, temperatur kritis adalah 374°C dan tekanan kritis adalah 221,2 bar.

7.2 Istilah-istilah Penting

Beberapa istilah penting yang wajib diketahui terkait dengan uap air.

1. Uap basah

Apabila uap air mengandung embun atau partikel dalam bentuk suspensi maka uap disebut sebagai *uap basah*. Hal ini berarti proses penguapan belum selesai atau sempurna dan kalor laten belum semuanya diserap.

2. Uap jenuh kering (*saturated steam*)

Ketika uap basah dipanaskan sampai semua partikel suspensi airnya habis menguap maka uap disebut dengan *uap jenuh kering* atau *uap kering*. Uap jenuh kering ini adalah uap yang telah menyerap semua kalor laten dan secara praktis dikatakan uap memiliki sifat-sifat gas sempurna.

3. Uap panas lanjut (*superheated steam*)

Jika selanjutnya uap tetap dipanaskan pada tekanan konstan maka temperaturnya akan naik, dalam kondisi ini uap disebut dengan *uap panas lanjut* (*superheated steam*). Karena tekanan uap tetap maka volumenya meningkat. Pada prakteknya, uap panas lanjut dihasilkan oleh alat yang disebut dengan *superheater*.

4. Fraksi kekeringan atau kualitas uap basah

Fraksi kering atau kualitas uap basah adalah perbandingan berat sebenarnya uap kering terhadap uap basah dengan jumlah yang sama, dan biasanya dinotasikan dengan x . Persamaan matematikanya:

$$x = \frac{W_g}{W_g + W} \quad (7.1)$$

dimana x adalah fraksi kekeringan, W_g adalah berat sebenarnya uap kering dan W adalah berat suspensi air.

5. Kalor nyata air

Kalor nyata dari air adalah jumlah kalor yang diserap oleh 1 kg air bila dipanaskan pada tekanan konstan, dari temperatur awal ke temperatur pembentukan uap atau temperatur jenuh (T). Kalor nyata air disebut juga dengan kalor cair atau kalor total air.

Kalor spesifik air pada daerah ini diasumsikan nilainya sama dengan 1 kcal/kg-⁰C, sehingga:

$$\begin{aligned} \text{Kalor nyata} &= \text{massa} \times \text{kalor spesifik} \times \text{temperatur jenuh} \\ &= 1 \times 1 \times T = T \quad (\text{kcal/kg}) \end{aligned} \quad (7.2)$$

atau $\text{kalor nyata} = 4,184 T \quad (\text{kJ/kg})$

6. Kalor tersembunyi/laten

Kalor tersembunyi atau kalor laten adalah kalor yang diserap untuk

menguapkan 1 kg air pada titik uapnya tanpa terjadinya perubahan temperatur. Biasanya dilambungkan dengan h_{fg} . Kalor laten penguapan air atau kalor laten uap adalah 537 kcal/kg atau 2257,0 kJ/kg pada tekanan atmosfer.

7. Kalor total atau enthalpi uap

Kalor total adalah jumlah kalor yang diserap dari titik beku sampai temperatur jenuh ditambah dengan kalor yang diserap selama penguapan.

Kalor total atau enthalpi uap = kalor nyata + kalor laten

Rumus-rumus kalor total untuk uap basah, uap kering dan uap panas lanjut adalah sebagai berikut:

a. Uap basah

Untuk uap basah, kalor spesifik total adalah:

$$h = h_f + x h_{fg} \quad (7.3)$$

dimana h adalah kalor spesifik total uap basah, h_f adalah kalor spesifik nyata atau kalor cair jenuh, x adalah fraksi kekeringan uap dan h_{fg} adalah kalor spesifik laten.

b. Uap kering

Untuk uap kering maka $x = 1$, sehingga:

$$h = h_g = h_f + h_{fg} \quad (7.4)$$

dimana h_g adalah kalor spesifik uap kering

c. Uap panas lanjut

Kalor spesifik total untuk merubah air menjadi uap panas lanjut adalah:

$$\begin{aligned} h &= h_{sup} = h_f + h_{fg} + C_p (T_{sup} - T_g) \\ &= h_g + C_p (T_{sup} - T_g) \end{aligned} \quad (7.5)$$

dimana C_p adalah kalor spesifik rata-rata pada tekanan konstan untuk uap panas lanjut, h_g adalah kalor spesifik uap jenuh, h_{sup} adalah kalor spesifik uap panas lanjut, T_{sup} adalah temperatur uap panas lanjut dan T_g adalah temperatur uap jenuh pada tekanan konstan.

8. Volume spesifik uap

Volume spesifik uap adalah volume yang ditempati oleh uap air per satuan massa pada temperatur dan tekanan tertentu. Nilai volume spesifik akan menurun ketika tekanan naik. Rumus-rumus volume spesifik uap air untuk berbagai keadaan adalah sebagai berikut.

a. Uap basah

Misalkan 1 kg uap basah mempunyai fraksi kekeringan x , maka artinya uap mempunyai x kg uap kering dan $(1 - x)$ kg air. Jika v_f adalah volume 1 kg air maka:

$$\text{Volume 1 kg uap basah} = x \cdot v_g + (1 - x) v_f \text{ (m}^3\text{/kg)} \quad (7.6)$$

dimana v_g adalah volume spesifik uap kering. Karena v_f nilainya sangat kecil bila dibandingkan dengan v_g maka rumus $(1-x)$ dapat diabaikan, sehingga persamaan di atas dapat ditulis menjadi:

$$\text{Volume 1 kg uap basah} = x \cdot v_g \text{ (m}^3\text{/kg)} \quad (7.7)$$

disebut juga dengan volume spesifik uap basah.

b. Uap kering

Untuk uap kering, berat air suspensi adalah nol atau fraksi kekeringan adalah satu ($x=1$), sehingga:

$$\text{Volume spesifik uap kering} = v_g \text{ (m}^3\text{/kg)} \quad (7.8)$$

c. Uap panas lanjut

Uap panas lanjut berperilaku lebih kurang seperti gas ideal. Sehingga sesuai dengan hukum Charles:

$$\frac{v_{\text{sup}}}{T_{\text{sup}}} = \frac{v_g}{T_g} \quad ; \text{ karena } p \text{ konstan}$$

sehingga:
$$v_{\text{sup}} = \frac{v_g \cdot T_{\text{sup}}}{T_g} \text{ (m}^3\text{/kg)} \quad (7.9)$$

dimana v_{sup} adalah volume spesifik uap panas lanjut, v_g adalah volume spesifik uap kering pada tekanan pembentukan uap, T_{sup} adalah temperatur mutlak uap panas lanjut dan T_g adalah temperatur jenuh pada tekanan pembentukan uap.

7.3 Tabel Uap dan Penggunaannya

Sifat-sifat uap jenuh kering, seperti temperatur pembentukan (temperatur jenuh), kalor nyata, kalor laten, enthalpi, volume spesifik, entropi, dan sebagainya berubah dengan berubahnya temperatur dan nilainya hanya dapat diperoleh melalui eksperimen dan telah dikumpulkan hasilnya dalam bentuk tabel yang disebut dengan *tabel uap*. Terdapat dua jenis tabel uap, satu berdasarkan tekanan absolut dan yang lainnya berdasarkan temperatur. Contoh kutipan nilai dari sifat-sifat uap diberikan oleh tabel Tabel 7.1 dan Tabel 7.2.

Tabel 7.1. Sifat-sifat uap jenuh berdasarkan tekanan absolut.

TABEL A-3. Sifat-sifat air jenuh (Cairan-Uap): Tabel Tekanan

Press. bars	Temp. °C	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K	
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g
0.04	28.96	1.0040	34.800	121.45	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746
0.06	36.16	1.0064	23.739	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304
0.08	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2403.1	2577.0	0.5926	8.2287
0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	8.1502
0.20	60.06	1.0172	7.649	251.38	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.9085
0.30	69.10	1.0223	5.229	289.20	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	7.7686
0.40	75.87	1.0265	3.993	317.53	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	7.6700
0.50	81.33	1.0300	3.240	340.44	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	7.5939
0.60	85.94	1.0331	2.732	359.79	2489.6	359.86	2293.6	2653.5	1.1453	7.5320
0.70	89.95	1.0360	2.365	376.63	2494.5	376.70	2283.3	2660.0	1.1919	7.4797

Tabel 7.2. Sifat-sifat uap jenuh berdasarkan temperatur.

TABEL A-2. Sifat-sifat air jenuh (Cairan-Uap): Tabel Temperatur

Temp. °C	Press. bars	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K	
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g
.01	0.00611	1.0002	206.136	0.00	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562
4	0.00813	1.0001	157.232	16.77	2380.9	16.78	2491.9	2508.7	0.0610	9.0514
5	0.00872	1.0001	147.120	20.97	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	9.0257
6	0.00935	1.0001	137.734	25.19	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003
8	0.01072	1.0002	120.917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.1	0.1212	8.9501
10	0.01228	1.0004	106.379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008
11	0.01312	1.0004	99.857	46.20	2390.5	46.20	2475.4	2521.6	0.1658	8.8765
12	0.01402	1.0005	93.784	50.41	2391.9	50.41	2473.0	2523.4	0.1806	8.8524
13	0.01497	1.0007	88.124	54.60	2393.3	54.60	2470.7	2525.3	0.1953	8.8285
14	0.01598	1.0008	82.848	58.79	2394.7	58.80	2468.3	2527.1	0.2099	8.8048

Contoh soal 7.1:

Hitunglah jumlah kalor total yang dimiliki oleh 1 kg air pada tekanan 8 bar mutlak dengan fraksi kekeringan 0,8. Dan hitung juga berapa banyak kalor yang dibutuhkan untuk menguapkan 2 kg air ini dari 20⁰ C ke kondisi ini ?

Jawab:

Diketahui: $p = 8 \text{ bar}$; $x = 0,8$

- Kalor total per 1 kg uap:

Dari tabel A-3, untuk tekanan 8 bar diperoleh: $h_f = 721,11 \text{ kJ/kg}$; $h_{fg} = 2048,0 \text{ kJ/kg}$. Kalor total yang dimiliki oleh 1 kg uap:

$$\begin{aligned} h &= h_f + x h_{fg} \\ &= 721,11 + 0,8 (2048,0) \\ &= 2359,51 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

- Kalor yang dibutuhkan untuk membentuk 2 kg uap air dari 20⁰ C:

Pada temperatur 20⁰ C air mempunyai kalor sebesar 20 kcal :

$$h_w = 20 \text{ kcal} \times 4,184 = 83,68 \text{ kJ/kg}$$

Kalor yang dibutuhkan untuk menguapkan 1 kg air dari 20⁰ C adalah:

$$\Delta h = h - h_w = 2359,51 - 83,68 = 2275,83 \text{ kJ/kg}$$

Sehingga kalor yang dibutuhkan oleh 2 kg uap ($m=2 \text{ kg}$) adalah:

$$H = m \times \Delta h = 2 \times 2275,83 = 4551,66 \text{ kJ}$$

Contoh soal 7.2 (MKS):

Carilah jumlah kalor yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1 kg uap air pada tekanan 6 bar dan temperatur 25⁰ C dengan kondisi seperti berikut ini.

- Jika uap dalam keadaan basah dengan fraksi kekeringan 0,9
- Jika uap dalam keadaan kering
- Jika uap dalam keadaan panas lanjut dengan temperatur 250⁰ C. Asumsikan kalor spesifik rata-rata uap panas lanjut adalah 0,55

Jawab:

Diketahui: $m = 1$ kg; $p = 6$ bar; $T_1 = 25^\circ\text{C}$; $x = 0,9$; $T_2 = 250^\circ\text{C}$; $C_p = 0,55$ kcal/kg- $^\circ\text{C}$.

Dari tabel A-3 pada tekanan 6 bar diperoleh

$$h_f = 670,56 \text{ kJ/kg} = 670,56 / 4,184 = 160,27 \text{ kcal/kg};$$

$$h_{fg} = 2086,4 \text{ kJ/kg} = 2086,4 / 4,184 = 498,66 \text{ kcal/kg};$$

$$T_g = 158,9^\circ\text{C}$$

a. Uap air dalam keadaan basah

enthalpi air pada 25°C : $h_w = 25$ kcal/kg

Kalor yang dibutuhkan untuk menguap 1 kg air adalah:

Kalor yang dibutuhkan = enthalpi akhir – enthalpi awal

$$H = m [(h_f + x h_{fg}) - h_w] = 1 \times [(160,27 + 0,9 (498,66)) - 25] = 584,06 \text{ kcal}$$

b. Uap dalam keadaan kering

Kalor yang dibutuhkan untuk menguap 1 kg air adalah:

$$H = m \times [(h_f + h_{fg}) - h_w] = 1 \times [(160,27 + 498,66) - 25] = 633,93 \text{ kcal}$$

c. Uap dalam keadaan panas lanjut

Kalor yang dibutuhkan untuk menguap 1 kg air adalah:

$$\begin{aligned} H &= m \times [(h_f + h_{fg} + C_p (T_2 - T_g)) - h_w] \\ &= 1 \times ((160,27 + 498,66 + 0,55 (250 - 158,9)) - 25) = 684,04 \text{ kcal} \end{aligned}$$

Contoh soal 7.3:

Uap memasuki sebuah mesin pada tekanan 12 bar absolut dengan kondisi panas lanjut dan kenaikan temperatur 67°C . Uap keluar dari mesin pada tekanan 0,15 bar absolut dan tingkat kekeringan 0,95. Carilah penurunan enthalpi dari uap. Diasumsikan kalor spesifik uap panas lanjut adalah $2,0$ kJ/kg- $^\circ\text{C}$.

Jawab:

Diketahui: $p_1 = 12$ bar; kenaikan temperatur panas lanjut = $(T_{sup} - T_g) = 67^\circ\text{C}$; $p_2 = 0,15$ bar, $x = 0,95$; $C_p = 2,0$ kJ/kg- $^\circ\text{C}$.

◆ Tekanan 12 bar:

Pada tabel A-3, tidak ada data untuk tekanan 12 bar, sehingga nilai enthalpi diperoleh dengan cara interpolasi.

Karena 12 bar terletak antara tekanan 10 bar dan 15 bar, dari tabel:

➤ 10 bar: $h_{f10} = 762,81 \text{ kJ/kg}$; $h_{fg10} = 2015,3 \text{ kJ/kg}$

➤ 15 bar: $h_{f15} = 844,84 \text{ kJ/kg}$; $h_{fg15} = 1947,3 \text{ kJ/kg}$

Dengan cara interpolasi untuk tekanan 12 bar, diperoleh:

- Enthalpi air, h_f :

$$h_f = h_{f10} + \frac{12-10}{15-10}(h_{f15} - h_{f10}) = 762,81 + \frac{2}{5}(844,84 - 762,81)$$

$$= 762,8 + 32,8 = 795,6 \text{ kJ/kg}$$

- Enthalpi uap

$$h_{fg} = h_{fg10} + \frac{12-10}{15-10}(h_{fg15} - h_{fg10}) = 2015,3 + \frac{2}{5}(1947,3 - 2015,3)$$

$$= 2015,3 - 27,2 = 1988,1 \text{ kJ/kg}$$

Maka besar enthalpi uap masuk mesin:

$$h_1 = h_f + h_{fg} + C_p (T_{sup} - T)$$

$$= 795,6 + 1988,1 + 2,0 (67)$$

$$= 2917,7 \text{ kJ/kg}$$

◆ Tekanan 0,15 bar:

Pada tabel A-3, tidak ada data untuk tekanan 0,15 bar, sehingga nilai enthalpi diperoleh dengan cara interpolasi.

Karena 0,15 bar terletak antara tekanan 0,10 bar dan 0,20 bar, dari tabel:

➤ 0,10 bar: $h_{f010} = 191,83 \text{ kJ/kg}$; $h_{fg010} = 2392,8 \text{ kJ/kg}$

➤ 0,20 bar: $h_{f020} = 251,40 \text{ kJ/kg}$; $h_{fg020} = 2358,3 \text{ kJ/kg}$

Dengan cara interpolasi untuk tekanan 0,15 bar, diperoleh:

- Enthalpi air, h_f :

$$h_f = h_{f\ 010} + \frac{0,15-0,10}{0,20-0,10} (h_{f\ 020} - h_{f\ 010}) = 191,83 + \frac{0,05}{0,10} (251,40 - 191,83)$$

$$= 191,83 + 29,79 = 221,62 \text{ kJ/kg}$$

- Enthalpi uap

$$h_{fg} = h_{fg\ 010} + \frac{0,15-0,10}{0,20-0,10} (h_{fg\ 020} - h_{fg\ 010}) = 2392,8 + \frac{0,05}{0,10} (2358,3 - 2392,8)$$

$$= 2392,8 - 17,25 = 2375,55 \text{ kJ/kg}$$

Maka besar enthalpi uap keluar mesin:

$$h_2 = h_f + x h_{fg} = 221,62 + 0,95 (2375,55)$$

$$= 2478,39 \text{ kJ/kg}$$

Penurunan enthalpi:

$$\Delta h = h_1 - h_2 = 2917,7 - 2478,39 = 439,31 \text{ kJ/kg}$$

7.4 Uap Panas lanjut

Uap panas lanjut (*superheated steam*) adalah uap dari hasil pemanasan lanjutan uap jenuh. Proses pemanasan lanjutan diasumsikan terjadi pada proses tekanan konstan.

Nilai-nilai dari temperatur jenuh, volume, kalor total dan entropi dari uap air dapat diperoleh dari *tabel uap panas lanjut*.

Beberapa keuntungan-keuntungan dari uap panas lanjut antara lain:

1. Uap panas lanjut mempunyai energi kalor yang lebih tinggi sehingga kemampuan untuk menghasilkan kerja juga meningkat tanpa harus menaikkan tekanan.
2. Pemanasan uap dilakukan dengan alat yang bernama *superheater* yang memperoleh energi panas dari panas gas sisa dari tungku, dimana kalau gas ini tidak dimanfaatkan maka akan terbuang dengan sia-sia ke udara.
3. Dengan temperaturnya yang lebih tinggi akan menghasilkan efisiensi termal yang lebih baik.

4. Karena temperatur uap panas lanjut lebih tinggi, maka ketika mengalami proses ekspansi dan temperaturnya turun, uap ini belum mengalami kondensasi sehingga kerugian kalor karena kondensasi uap di dalam dinding silinder bisa dihindari.

Contoh soal 7.4:

Carilah volume 1 kg uap panas lanjut pada tekanan 20 bar dan temperatur 300⁰ C.

Jawab:

Diketahui: $m = 1$ kg; $p = 20$ bar; $T_{sup} = 300^0$ C = 573 K

Dari tabel A-3, untuk tekanan 20 bar diperoleh $T_g = 212,4^0$ C = 485,4 K; $v_g = 0,1$ m³/kg;

- Volume uap panas lanjut:

$$\frac{v_g}{T_g} = \frac{v_{sup}}{T_{sup}}$$

$$v_{sup} = \frac{v_g}{T_g} \times T_{sup} = \frac{0,1}{485,4} \times 573$$

$$= 0,118 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Contoh soal 7.5:

Sebuah ketel uap diumpan dengan air pada temperatur 45⁰ C. Air dirubah menjadi uap pada tekanan absolut 5,0 bar dan temperatur 188⁰ C. Carilah jumlah kalor yang dibutuhkan per kg uap.

Jawab:

Diketahui: temperatur air: 45⁰ C; $p = 5,0$ bar; $T_1 = 188^0$ C;

Dari tabel uap, untuk tekanan $p = 5,0$ bar diperoleh:

$$h_f = 640,23 \text{ kJ/kg} ; h_{fg} = 2108,5 \text{ kJ/kg} \text{ dan } T_g = 151,9^0\text{C}$$

Karena T_1 lebih tinggi dari T_g maka uap adalah uap panas lanjut, sehingga $T_{sup} = T_1 = 188^0$ C. Dengan mengasumsikan C_p panas lanjut 2,0 kJ/kg⁰C, maka kalor total uap panas lanjut adalah:

$$\begin{aligned}
 h_{sup} &= h_f + h_{fg} + C_p (T_{sup} - T) \\
 &= 640,23 + 2108,5 + 2,0 (188 - 151,9) \\
 &= 2820,93 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Karena air disuplai pada temperatur 45°C , dari tabel uap, kalor air adalah 188,45 kJ/kg. Total kalor yang dibutuhkan adalah:

$$\Delta h = h_{sup} - 188,45 = 2820,93 - 188,45 = 2632,48 \text{ kJ/kg}$$

7.5 Kerja Luar Selama Proses Penguapan

Ketika air mengalami penguapan, sejumlah kalor diberikan ke air pada tekanan konstan, kalor ini disebut kalor laten. Kalor laten ini digunakan oleh air untuk dua hal, yaitu:

1. Mengatasi tahanan molekul internal dari air ketika air berubah dari cair menjadi gas, dan
2. Mengatasi tahanan luar karena gerakan piston yang disebabkan oleh ekspansi volume selama penguapan.

Untuk poin 1 disebut dengan kerja internal atau kerja dalam, karena perubahan terjadi di dalam uapnya dan merupakan energi yang tersimpan di dalam uap. Untuk poin 2 disebut dengan kerja eksternal atau kerja luar yang menggambarkan energi yang diambil dari uap.

Kerja selama penguapan adalah:

$$W = \text{tekanan} \times \text{perubahan volume}$$

$$W = p(V_g - V_f) \text{ Joule} \quad (7.10)$$

dimana: p = tekanan pada piston (N/m^2 atau Pa)

V_g = volume uap (m^3)

V_f = volume air (m^3)

Catatan:

Dalam satuan MKS:

Kerja selama penguapan adalah:

$$W = p(V_g - V_f) \text{ kg.m (satuan kerja)} \quad (7.11)$$

$$W = \frac{p \times (V_g - V_f)}{J} \text{ kcal (satuan kalor)} \quad (7.12)$$

dimana: p dalam kg/m^2 dan J adalah ekivalensi kalor ke mekanik

Contoh soal 7.6:

Carilah kerja luar yang dilakukan selama proses penguapan per kg uap pada tekanan 15 bar, bila uap dalam kondisi: (i) 90% kering, (ii) jenuh kering.

Jawab:

Diketahui: $p = 15 \text{ bar} = 15 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

Dari tabel uap untuk tekanan 15 bar diperoleh $v_g = 0,132 \text{ m}^3/\text{kg}$.

(i) Kerja yang dilakukan oleh 90% uap kering:

$$x = 0,9$$

$$w = p \cdot x \cdot v_g ; v_f \text{ diabaikan karena volumenya jauh lebih kecil dari } v_g$$

sehingga:

$$\begin{aligned} w &= (15 \times 10^5) \times 0,9 \times 0,132 \\ &= 178\,200 \text{ J/kg} \\ &= 178\,200/1000 = 178,2 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

(ii) Kerja yang dilakukan oleh uap jenuh kering:

$$\begin{aligned} w &= p \cdot v_g \\ &= (15 \times 10^5) \times 0,132 = 198\,000 \text{ J/kg} \\ &= 198\,000/1000 = 198 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

7.6 Energi Dalam Uap

Energi dalam uap adalah energi yang tersimpan di dalam uap, di atas titik beku air. Energi dalam dapat dihitung dengan mengurangi kalor total uap dengan kerja luar.

(a) Untuk uap basah, energi dalam:

$$U = H - W$$

$$U = H - \frac{(p \cdot x \cdot V_g)}{1000} \text{ kJ} \quad (7.13)$$

dimana U adalah energi dalam (kJ), H adalah besarnya kalor uap basah (kJ) dan W adalah kerja (kJ).

(b) Untuk uap kering, energi dalam:

$$U = H_g - \frac{p \cdot V_g}{1000} \text{ kJ} \quad (7.14)$$

dimana H_g adalah kalor uap kering (kJ).

(c) Untuk uap panas lanjut, energi dalam:

$$U = H_{\text{sup}} - \frac{p \cdot V_{\text{sup}}}{1000} \text{ kJ} \quad (7.15)$$

atau

$$U = [H_g + m \cdot C_p (T_{\text{sup}} - T_g)] - \frac{p \cdot V_{\text{sup}}}{1000} \text{ kJ} \quad (7.16)$$

dimana V_{sup} adalah volume uap panas lanjut dan H_{sup} adalah kalor uap panas lanjut.

Catatan:

Dalam sistem MKS, energi dalam:

Uap basah:

$$U = H - \frac{p \cdot x \cdot V_g}{J} \text{ kcal} \quad (7.17)$$

Uap kering

$$U = H_g - \frac{p \cdot V_g}{J} \text{ kcal} \quad (7.18)$$

Uap panas lanjut:

$$U = H_{\text{sup}} - \frac{p \cdot V_{\text{sup}}}{J} \text{ kcal} \quad (7.19)$$

atau

$$U = [H_g + m \cdot C_p (T_{\text{sup}} - T_g)] - \frac{p \cdot V_{\text{sup}}}{J} \text{ kcal} \quad (7.20)$$

dimana p dalam kg/m^2 .

Contoh soal 7.7:

Hitunglah besarnya energi dalam dari 1 kg uap air pada tekanan 10 bar bila: (i) kekekeringan 0,9; dan (ii) uap kering. Volume air dapat diabaikan.

Jawab:

Diketahui: $p = 10 \text{ bar} = 10 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

Dari tabel uap, pada tekanan 10 bar didapatkan $h_f = 762,81 \text{ kJ/kg}$; $h_{fg} = 2015,3 \text{ kJ/kg}$ dan $v_g = 0,1944 \text{ m}^3/\text{kg}$.

(i) Untuk uap dengan derajat kekekeringan 0,9:

$$x = 0,9$$

sebagaimana diketahui bahwa
$$U = H - \frac{p \cdot x \cdot V_g}{1000}$$

untuk massa uap 1 kg, persamaan energi dalam dapat ditulis dalam bentuk:

$$\begin{aligned} u &= h - \frac{p \cdot x \cdot v_g}{1000} = (h_f + x \cdot h_{fg}) - \frac{p \cdot x \cdot v_g}{1000} \\ u &= (762,81 + 0,9(2015,3)) - \frac{(10 \times 10^5) \times 0,9 \times 0,1944}{1000} \\ &= 2576,58 - 174,96 = 2401,6 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

(ii) Untuk uap dalam keadaan kering:

$$\begin{aligned} u &= h_g - \frac{p \cdot v_g}{1000} = (h_f + h_{fg}) - \frac{p \cdot v_g}{1000} \\ &= (762,81 + 2015,3) - \frac{(10 \times 10^5) \times 0,1944}{1000} \\ &= 2778,11 - 194,4 = 2583,71 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Contoh soal 7.8:

Carilah energi dalam dari 1 kg uap panas lanjut pada tekanan 10 bar dan temperatur 280°C . Bila uap berekspansi ke tekanan 1,5 bar dan kekekeringan 0,8;

carilah perubahan energi dalam. Asumsikan kalor spesifik uap panas lanjut sebesar $2,0 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$.

Jawab:

Diketahui: $p_1 = 10 \text{ bar} = 10 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $T_{sup} = 280^\circ \text{C} = 553 \text{ K}$; $p_2 = 1,5 \text{ bar} = 1,5 \times 10^5 \text{ kg/m}^2$; $x = 0,8$; $C_p = 2,0$.

Dari tabel uap, pada tekanan 10 bar diperoleh: $h_f = 762,81 \text{ kJ/kg}$; $h_{fg} = 2015,3 \text{ kJ/kg}$; $v_g = 0,1944 \text{ m}^3/\text{kg}$ dan $T_g = 179,9^\circ \text{C} = 452,9 \text{ K}$.

Jumlah kalor pada uap panas lanjut untuk 1 kg uap adalah:

$$\begin{aligned} h_{sup} &= h_f + h_{fg} + C_p (T_{sup} - T) \\ &= 762,81 + 2015,3 + 2,0 (280 - 179,9) \\ &= 2978,31 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{dan : } v_{sup} &= \frac{v_g \cdot T_{sup}}{T_g} = \frac{0,1944 (553)}{452,9} \\ &= 0,237 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan $U = H_{sup} - \frac{p \cdot V_{sup}}{1000}$, untuk massa 1 kg maka energi dalam awal:

$$\begin{aligned} u_1 &= h_{sup} - \frac{p \cdot v_{sup}}{1000} = 2978,31 - \frac{10 \times 10^5 \times 0,237}{1000} \\ &= 2978,07 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Selanjutnya uap berekspansi ke tekanan 1,5 bar. Dari tabel uap, pada tekanan 1,5 bar diperoleh: $h_f = 467,11 \text{ kJ/kg}$; $h_{fg} = 2226,5 \text{ kJ/kg}$; $v_g = 1,159 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Energi dalam akhir:

$$\begin{aligned} u_2 &= (h_f + x \cdot h_{fg}) - \frac{p \cdot x \cdot v_g}{1000} = 467,11 + 0,8 (2226,5) - \frac{1,5 \times 10^5 \times 0,8 \times 1,159}{1000} \\ &= 2248,17 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Maka perubahan energi dalam adalah:

$$\Delta u = u_1 - u_2 = 2978,07 - 2248,17 = 729,9 \text{ kJ/kg}$$

Contoh soal 7.9:

Sebuah bejana berisi 2 kg uap dengan tekanan 8 bar. Carilah jumlah kalor yang mesti dibuang supaya kualitas uap berkurang menjadi 70%.

Jawab:

Diketahui: $m = 2$ kg; $p = 8$ bar = 8×10^5 Pa; $x = 70\% = 0,7$

Dari tabel uap, pada tekanan 8 bar diperoleh: $h_g = 2769$ kJ/kg; $v_{g1} = 0,240$ m³/kg.
Volume bejana:

$$\begin{aligned} V_b &= m \times v_{g1} = 2 \times 0,240 \\ &= 0,48 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Energi dalam uap awal per kg uap:

$$\begin{aligned} u_1 &= h_g - (p \cdot v_{g1})/1000 \\ u_1 &= 2769 - (8 \times 10^5 \times 0,240)/1000 \\ &= 2577 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Selanjutnya, dengan mengabaikan volume air di dalam uap basah (derajat kering 0,7), volume uap akan sama dengan volume bejana. Maka:

$$\begin{aligned} V_b &= m \cdot x \cdot v_{g2} \\ 0,48 &= 2 \times 0,7 \times v_{g2} = 1,4 v_{g2} \\ v_{g2} &= 0,48/1,4 = 0,343 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

Dari Tabel A-2, nilai $v_{g2} = 0,343$ m³/kg terletak antara temperatur 150⁰ C dan 160⁰ C, dimana:

- Temperatur 150⁰ C: $v_{g150} = 0,3928$ m³/kg; $h_{f150} = 632,20$ kJ/kg dan $h_{fg150} = 2114,3$ kJ/kg
- Temperatur 160⁰ C: $v_{g160} = 0,3071$ m³/kg; $h_{f160} = 675,55$ kJ/kg dan $h_{fg160} = 2082,6$ kJ/kg

Dengan cara interpolasi diperoleh:

- enthalpi air, h_f :

$$h_f = h_{f150} + \frac{v_{g2} - v_{g150}}{v_{g160} - v_{g150}} (h_{f160} - h_{f150})$$

$$\begin{aligned}
 &= 632,20 + \frac{0,343 - 0,3928}{0,3071 - 0,3928} (675,55 - 632,20) \\
 &= 632,20 + 0,58 (43,35) = 657,34 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

- enthalpi penguapan, h_{fg} :

$$\begin{aligned}
 h_{fg} &= h_{fg\ 150} + \frac{v_{g2} - v_{g150}}{v_{g160} - v_{g150}} (h_{fg\ 160} - h_{fg\ 150}) \\
 &= 2114,3 + \frac{0,343 - 0,3928}{0,3071 - 0,3928} (2082,6 - 2114,3) \\
 &= 2114,3 + 0,58 (-31,7) = 2095,91 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Energi dalam uap akhir per kg uap:

$$\begin{aligned}
 u_2 &= h_f + x \cdot h_{fg} - (p \cdot x \cdot v_{g2}) / 1000 \\
 u_2 &= 657,34 + 0,7(2095,91) - (5,5 \times 10^5 \times 0,7 \times 0,343) / 1000 \\
 &= 657,34 + 1467,14 - 132,06 \\
 &= 1992,42 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Maka kalor yang dibuang:

$$\begin{aligned}
 u &= u_1 - u_2 = 2577 - 1992,42 \\
 &= 584,58 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Soal-soal

1. 5 kg uap dengan tekanan 5 bar dihasilkan dari air dengan temperatur 20° C. Carilah jumlah kalor yang diberikan, bila uap mempunyai derajat kekeringan 0,9.
(Jawab: 12581 kJ)
2. Satu kg air dengan temperatur 47,8° C dipanaskan pada tekanan konstan 14 bar hingga berubah menjadi uap panas lanjut dengan temperatur 111° C. Carilah jumlah kalor yang diberikan selama proses pemanasan ke panas lanjut dan kalor total uap panas lanjut. Asumsikan $C_p = 2,1$.
(Jawab: 232,2 kJ; 2602,5 kJ)
3. Carilah jumlah kalor yang diperlukan untuk merubah 1 kg uap air pada tekanan 0,5 kg/cm² dan fraksi kekeringan 0,9 ke uap kering jenuh.
(jawab: 50,4 kcal)
4. Carilah energi dalam 1 kg uap pada tekanan 10 bar, jika (a) uap dalam kondisi kering jenuh, (b) uap kering 0,75
(jawab: 2585 kJ; 2128,7 kJ)
5. Dua buah ketel uap dimana satu mempunyai *superheater* dan satu lagi tidak mempunyai *superheater* menghasilkan jumlah uap yang sama ke pembangkit utama. Tekanan di ketel uap dan pembangkit adalah 14,7 kg/cm² absolut. Temperatur uap dari ketel uap dengan *superheater* adalah 325° C dan pada pembangkit adalah 250° C. Perkirakanlah kualitas uap yang disuplai ke ketel uap yang lainnya. (Jawab: 0,97)
6. Uap yang digunakan oleh ketel uap kecil disalurkan melalui pipa ke drum yang berisi air dan setelah beberapa menit dilakukan observasi yang didasarkan atas berat dan temperatur air. Dari data yang dikumpulkan berikut ini, carilah fraksi kekeringan uap.

Berat kosong drum	= 25 kg
Berat drum + air dingin	= 135 kg
Berat drum + air dingin + uap	= 140 kg
Temperatur awal air	= 15° C
Temperatur akhir air	= 42° C
Tekanan uap	= 8 bar
Kalor spesifik bahan drum	= 0,095

(Jawab: 0,98)

BAB VIII

ENTROPI UAP AIR

8.1 Entropi Air

Bila 1 kg air dipanaskan dari titik beku 0°C dan tekanan konstan ke temperatur didih, jumlah kalor yang diserap:

$$\begin{aligned}dH &= \text{massa} \times \text{kalor spesifik} \times \text{kenaikan temperatur} \\ &= 1 \times 1 \times dT \quad \dots (\text{kalor spesifik air} = 1 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}) \\ &= dT \text{ (kcal)}\end{aligned}$$

atau
$$= 4,184 dT \text{ (kJ)} \quad \dots (\text{kalor spesifik air} = 4,184 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C})$$

Kenaikan entropi untuk kenaikan temperatur dT adalah:

$$ds = \frac{dH}{T} = \frac{4,184 dT}{T} \quad \text{untuk 1 kg air}$$

Kenaikan entropi total air dari titik beku ke titik didih diperoleh dengan mengintegalkan persamaan di atas dengan batas 273 K (0°C) dan T K.

$$\begin{aligned}\int_0^s ds &= \int_{273}^T \frac{4,184 dT}{T} \\ s_f &= 4,184 \ln \frac{T}{273}\end{aligned} \tag{8.1}$$

dimana s_f adalah entropi spesifik air pada temperatur T .

8.2 Kenaikan Entropi Selama Proses Penguapan

Ketika air menguap secara sempurna, air akan menyerap kalor laten pada temperatur konstan T_g dan tekanan konstan. Karena:

$$\text{Entropi} = \frac{\text{Kalor yang diserap}}{\text{Temperatur Absolut}}$$

atau

$$dS = \frac{dH}{T_g}$$

$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T_g}$$

Untuk 1 kg uap dirumuskan dengan:

$$\Delta s = \frac{h_{fg}}{T_g} \quad (8.2)$$

dimana Δs adalah kenaikan entropi per kg uap.

Jika uap dalam keadaan basah dengan derajat kekeringan x , maka penguapan terjadi sebagian, sehingga kenaikan entropi adalah:

$$\Delta s = \frac{x \cdot h_{fg}}{T_g} \quad (8.3)$$

8.3 Entropi Uap Basah dan Uap Kering

Entropi uap basah dan uap kering adalah adalah entropi air ditambah dengan entropi selama penguapan. Secara matematik, entropi per kg uap dirumuskan dengan:

$$s = s_f + \frac{x \cdot h_{fg}}{T_g} \quad \dots \text{ (untuk uap basah)} \quad (8.4)$$

$$s = s_g = s_f + \frac{h_{fg}}{T_g} \quad \dots \text{ (untuk uap kering)} \quad (8.5)$$

dimana s_f adalah entropi air per kg pada temperatur T_g (temperatur penguapan).

Catatan: entropi uap kering di lambangkan dengan s_g dan nilainya dapat dilihat langsung dari

tabel uap.

8.4 Entropi Uap Panas Lanjut

Selama proses pemanasan lanjut, kalor diberikan pada tekanan konstan dan temperatur uap kering meningkat ke temperatur uap panas lanjut (T_{sup}). Untuk kenaikan sejumlah kecil temperatur dT , kalor yang diserap:

$$dh = C_p \cdot dT \quad \text{per kg uap}$$

atau
$$\frac{dh}{T} = \frac{C_p \cdot dT}{T} \quad \dots \text{persamaan dibagi dengan } T$$

$$ds = \frac{dh}{T} = \frac{C_p \cdot dT}{T} \quad (8.6)$$

Kenaikan entropi:

$$\int_{s_g}^{s_{sup}} ds = C_p \int_{T_g}^{T_{sup}} \frac{dT}{T}$$

atau
$$\Delta s = s_{sup} - s_g = C_p \ln \frac{T_{sup}}{T_g} \quad (8.7)$$

dimana $s_{sup} - s_g$ adalah kenaikan entropi proses panas lanjut.

Contoh soal 8.1:

Carilah entropi dari 1 kg uap jenuh pada tekanan 5,0 bar. Titik didih air pada tekanan ini adalah 151,9^o C dan kalor penguapan pada temperatur ini adalah 2108,5 kJ/kg.

Jawab:

Diketahui: $p = 5,0$ bar ; $T = 151,9^{\circ} \text{C} = 151,9^{\circ} + 273 = 424,9 \text{ K}$; $h_{fg} = 2108,5 \text{ kJ/kg}$;

Dengan memakai persamaan:

$$s_g = s_f + \frac{h_{fg}}{T_g} = 4,184 \ln \frac{T}{273} + \frac{h_{fg}}{T_g}$$

$$\begin{aligned}
 &= 4,184 \ln \frac{424,9}{273} + \frac{2108,5}{424,9} = 1,85 + 4,96 \\
 &= 6,81 \text{ satuan entropi}
 \end{aligned}$$

Contoh soal 8.2:

Hitunglah entropi 1 kg uap basah dengan derajat kekeringan 0,9 pada tekanan 8,0 bar.

Jawab:

Diketahui: $x = 0,9$; $p = 8,0$ bar

Dari tabel uap pada tekanan 8,0 bar diperoleh:

$$T_g = 170,4^\circ \text{ C} = 443,4 \text{ K};$$

$$h_{fg} = 2048,0 \text{ kJ/kg}$$

Entropi uap:

$$\begin{aligned}
 s &= 4,184 \ln \frac{T_g}{273} + \frac{x \cdot h_{fg}}{T_g} \\
 &= 4,184 \ln \frac{443,4}{273} + \frac{0,9 \times 2048,0}{443,4} = 2,03 + 4,16 \\
 &= 6,19 \text{ satuan entropi}
 \end{aligned}$$

Contoh soal 8.3:

Carilah entropi per kg uap panas lanjut pada tekanan 20 bar dan temperatur 250° C . Asumsikan C_p untuk uap panas lanjut adalah 2,2.

Jawab:

Diketahui: $p = 20$ bar; $T_{sup} = 250^\circ \text{ C} = 523 \text{ K}$; $C_p = 2,2$

Dari tabel uap pada tekanan 20 bar diperoleh:

$$T_g = 212,4^\circ \text{ C} = 485,4 \text{ K};$$

$$h_{fg} = 1890 \text{ kJ/kg}.$$

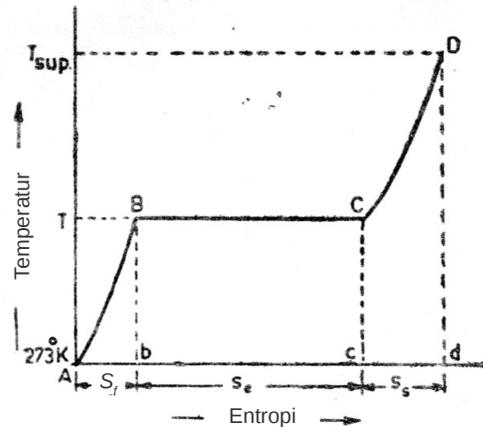
Entropi uap panas lanjut:

$$\begin{aligned}
 s_{\text{sup}} &= 4,184 \ln \frac{T_g}{273} + \frac{h_{fg}}{T_g} + C_p \ln \frac{T_{\text{sup}}}{T_g} \\
 &= 4,184 \ln \frac{485,4}{273} + \frac{1890}{485,4} + 2,2 \ln \frac{523}{485,4} \\
 &= 6,47 \text{ satuan entropi}
 \end{aligned}$$

8.5 Diagram Temperatur-Entropi (T-S) Untuk Air dan Uap

Diagram Temperatur vs. Entropi sangat bermanfaat di dalam mencari solusi suatu permasalahan termodinamika, terutama permasalahan dalam ekspansi dan kontraksi uap secara adiabatik. Sumbu x pada diagram Temperatur-Entropi adalah entropi 1 kg air dan uap di atas titik beku air, sementara sumbu y mewakili nilai temperatur, sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 8.1.

Jika 1 kg air dipanaskan pada tekanan konstan (p) maka kalor diberikan ke air dan entropi air meningkat. Jika di plot ke diagram T-s, maka kurva kenaikan entropi digambarkan secara logaritmik vs. temperatur sampai temperatur didih (T) pada tekanan kerjanya. Proses ini ditunjukkan oleh kurva AB pada kurva di Gambar 8.1 dan kenaikan entropinya ditunjukkan sebagai s_f .



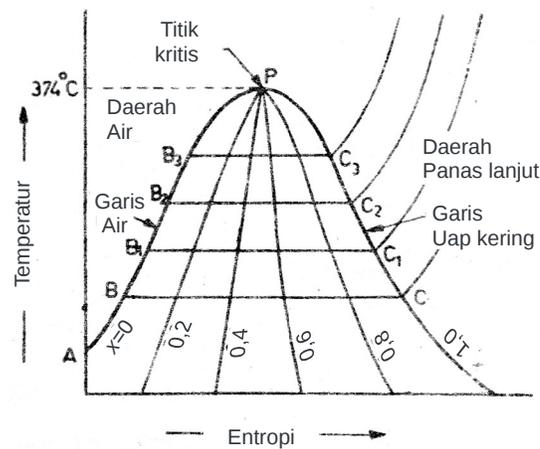
Gambar 8.1. Diagram T-s

Ketika pemanasan diteruskan, air mulai mengalami penguapan dengan menerima kalor pada temperatur (T). Entropi terus meningkat sampai semua kalor laten diserap, dan entropi bertambah sebesar s_e , ditandai oleh garis BC pada Gambar 8.1.

Dan ketika pemanasan terus dilanjutkan, maka uap air akan menjadi uap panas lanjut. Temperatur meningkat dan entropi juga meningkat, ditandai oleh garis CD pada gambar. Entropi bertambah sebesar s_s .

Bila diplot beberapa kurva berdasarkan perbedaan tekanan, maka akan diperoleh

titik-titik B_1 , B_2 dan C_1 , C_2 dan lain-lain, seperti ditunjukkan oleh Gambar 8.2. Garis A , B , B_1 , B_2 dan seterusnya disebut dengan garis air. Sementara garis C , C_1 , C_2 dan seterusnya disebut dengan garis uap. Titik dimana garis air dan garis uap bertemu (yaitu titik P) disebut dengan titik kritis, dan temperaturnya adalah 374°C .



Gambar 8.2. Grafik T - s untuk air dan uap

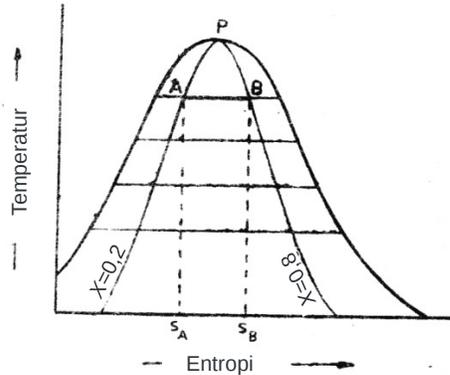
Perhatikan kurva BC yang memperlihatkan kenaikan entropi pada temperatur konstan. Fraksi kekeringan uap meningkat dengan meningkatnya entropi, yaitu dari $x = 0$ di B ke $x = 1$ di C . Misal garis BC dibagi dengan 10 bagian yang mewakili derajat kekeringan dari 0 ke 1,0. dan hal yang sama dilakukan juga terhadap garis B_1 , C_1 , B_2 , C_2 dan seterusnya. Maka dapat dibuat garis yang menghubungkan nilai fraksi kekeringan yang sama untuk tekanan yang berbeda-beda dan garis ini disebut dengan *garis fraksi kekeringan konstan*. Sebagai contoh, pada Gambar 8.2, garis fraksi kekeringan dibuat dengan interval 0,2.

8.6 Garis Isotermal Pada Diagram T - s

Proses isotermal adalah proses dimana tidak terjadi perubahan temperatur, pada diagram T - s terlihat sebagai garis horisontal.

Misalkan 1 kg uap basah pada temperatur 250°C dengan fraksi kekeringan 0,2 dan diwakilkan sebagai titik A pada Gambar 8.3. Misalkan uap berekspansi secara isotermal sampai fraksi kekeringan 0,8 (ditandai dengan titik B pada diagram). Pada titik A entropi uap adalah s_A dan pada titik B adalah s_B . Perubahan entropi pada proses

ekspansi ini adalah besarnya perbedaan entropi antara s_A dan s_B atau $s_B - s_A$. Jika entropi titik A adalah 0,82 dan entropi pada titik B adalah 1,135 maka kenaikan entropinya adalah $1,135 - 0,82 = 0,315$.

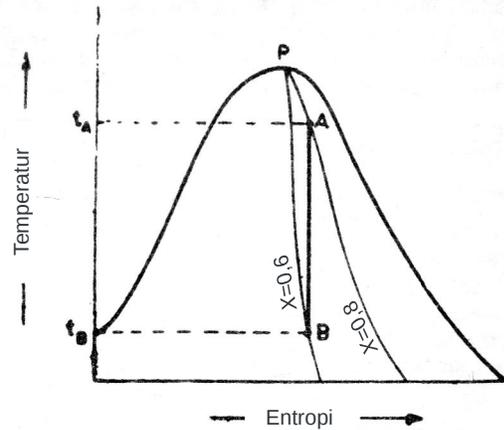


Gambar 8.3. Garis isothermal pada diagram T-s.

8.7 Garis Adiabatik Pada Diagram T-s

Pada proses adiabatik tidak terjadi kenaikan atau penurunan kalor selama proses. Karena itu pada proses adiabatik juga tidak terjadi perubahan entropi. Pada diagram T-s, proses adiabatik ini ditunjukkan oleh garis vertikal.

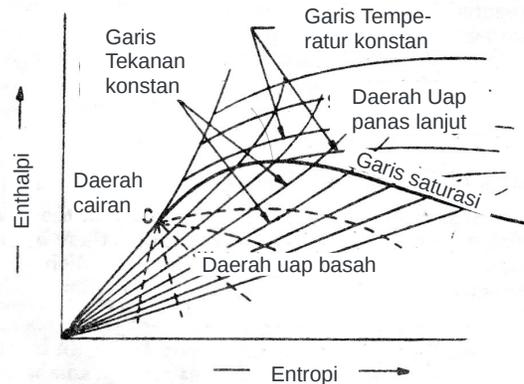
Misalkan 1 kg uap basah pada temperatur 310°C dengan kekeringan 0,8, ditunjukkan oleh titik A pada diagram T-s (Gambar 8.4). Misalkan uap mengalami ekspansi secara adiabatik hingga kekeringannya menjadi 0,6 dengan temperatur 40°C , ditandai oleh titik B pada diagram. Proses ini digambarkan sebagai garis AB pada diagram T-s. Perubahan temperatur selama proses ini diperoleh dari perbedaan temperatur awal, yaitu 310°C dengan temperatur akhir, yaitu 40°C atau $310 - 40 = 270^{\circ}\text{C}$.



Gambar 8.4. Garis adiabatik pada diagram T-S.

8.8 Diagram Enthalpi-Entropi ($h-s$) Untuk Air-Uap atau Grafik Mollier

Grafik Mollier adalah grafik sifat uap air yang dibuat berdasarkan data dari tabel uap. Pada grafik ini, sumbu y adalah enthalpi dan sumbu x adalah entropi, sehingga disebut juga dengan diagram Enthalpi-Entropi ($h-s$) (Gambar 8.5).



Gambar 8.5. Diagram $h-s$ untuk air dan uap

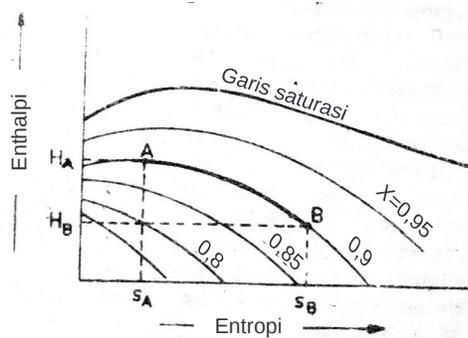
Grafik ini sangat berguna dalam memecahkan masalah terkait dengan ekspansi dan kompresi adiabatik dari uap air. Pada diagram ini, sumbu x mewakili entropi 1 kg air dan uap di atas titik bekunya. Sumbu vertikal menunjukkan nilai enthalpi. Diagram ini terbagi atas dua daerah oleh garis saturasi, dimana di bawah garis ini adalah daerah basah dan di atasnya daerah panas lanjut. Pada daerah basah temperatur uap konstan untuk tekanan yang sama sementara di daerah panas lanjut temperatur uap meningkat untuk tekanan yang sama.

8.9 Garis Fraksi Kekeringan Pada Diagram $h-s$

Garis fraksi kekeringan uap hanya terdapat di bawah garis saturasi. Garis saturasi ini sendiri mewakili fraksi kekeringan 1,0. Garis fraksi kekeringan menyatakan kondisi uap basah pada berbagai nilai entropi dan enthalpi.

Misalkan 1 kg uap basah dengan fraksi kekeringan 0,9. Awalnya, katakan uap ini mempunyai nilai enthalpi 2594 kJ/kg dan ditunjukkan oleh titik A pada diagram $h-s$ di Gambar 8.6. Bila uap didinginkan pada fraksi kekeringan konstan ke nilai kalor total 2301 kJ/kg, titik B pada gambar, perubahan entropi selama proses ini diperoleh

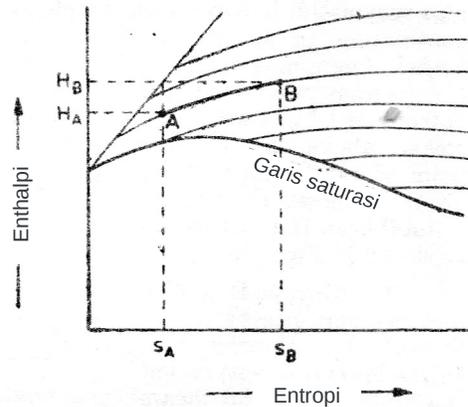
dari selisih nilai entropi titik B dengan titik A. Jika entropi di titik B adalah 7,75 dan titik A adalah 6,05 maka kenaikan entropi dari titik A ke titik B adalah $7,75 - 6,05 = 1,70$.



Gambar 8.6. Fraksi kekeringan pada diagram $h-s$.

8.10 Garis Isotermal Pada Diagram $h-s$

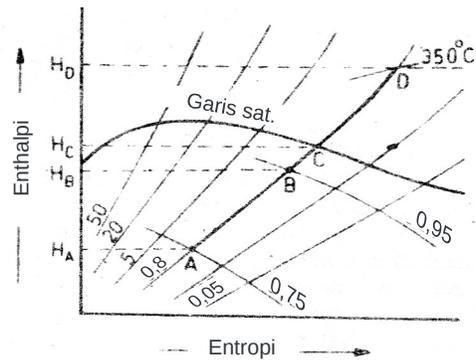
Garis isotermal hanya terdapat di atas garis saturasi. Misalkan 1 kg uap panas lanjut dengan temperatur 400° C. Pada keadaan awal (titik A pada Gambar 8.7) uap mempunyai nilai enthalpi sebesar 2887 kJ/kg. Uap kemudian dipanaskan secara isotermal hingga nilai enthalpinya mencapai 3242,6 kJ/kg (titik B pada gambar). Perubahan entropi dapat dicari dari diagram berdasarkan nilai entropi di A, yaitu s_A dan entropi di B, yaitu s_B . Jika nilai s_A adalah 5,72 dan s_B adalah 7,14 maka perubahan entropinya adalah $7,14 - 5,72 = 1,42$.



Gambar 8.7. Garis isotermal pada diagram $h-s$.

8.11 Garis Tekanan Konstan Pada Diagram $h-s$

Garis tekanan konstan terdapat di dua daerah, yaitu di bawah dan di atas garis saturasi. Garis ini merupakan garis lurus di daerah uap basah, karena selama penguapan kenaikan nilai enthalpi berbanding lurus dengan kenaikan kualitas uap, sehingga berbanding lurus dengan entropi. Sementara di daerah panas lanjut, garis tekanan konstan sedikit melengkung ke atas, seperti dapat dilihat pada Gambar 8.8.



Gambar 8.8. Garis tekanan konstan pada diagram $h-s$.

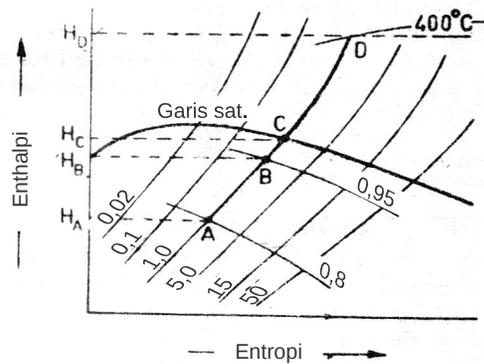
Misalkan uap basah dengan fraksi kekeringan 0,75 mempunyai enthalpi sebesar 2092 kJ/kg dan ditunjukkan oleh titik A pada Gambar 8.8. Dari diagram $h-s$ kita dapatkan tekanan uapnya adalah 0,8 bar. Selanjutnya uap dipanaskan pada tekanan konstan hingga fraksi kekeringannya mencapai 0,95 dan ditunjukkan sebagai titik B pada diagram. Perubahan nilai enthalpi dari proses ini adalah selisih nilai enthalpi antara titik A dan titik B. Jika titik B enthalpinya adalah 2552,2 kJ/kg, maka kenaikan nilai enthalpi proses ini adalah $2552,2 - 2092 = 460,2$ kJ/kg.

Seandainya uap di titik B dipanaskan pada tekanan konstan 0,8 kg/cm², pertamanya uap mencapai keadaan uap jenuh (titik C pada gambar) dan diteruskan sehingga uap menjadi uap panas lanjut di titik D. Dari diagram diperoleh nilai enthalpi di titik C adalah 2656,8 kJ/kg dan titik D adalah 3171,5 kJ/kg. Maka kenaikan enthalpi dari A ke C adalah $2656,8 - 2092 = 564,8$ kJ/kg. Dengan cara yang sama kenaikan enthalpi dari A ke D adalah $3171,5 - 2092 = 1079,5$ kJ/kg.

8.12 Garis Volume Konstan Pada Diagram $h-s$

Garis volume konstan terdapat di kedua daerah uap basah dan panas lanjut. Garis ini berupa garis lurus di daerah uap basah dan melengkung ke atas di daerah panas lanjut, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 8.9.

Misalkan uap basah dengan fraksi kekeringan 0,8 mempunyai enthalpi sebesar 2238,4 kJ/kg dan ditunjukkan oleh titik A pada Gambar 8.9. Dari diagram $h-s$ kita dapatkan volume uap adalah 1,0 m³/kg. Selanjutnya uap dipanaskan pada volume konstan hingga fraksi kekeringannya mencapai 0,95 dan ditunjukkan sebagai titik B pada diagram. Perubahan nilai enthalpi dari proses ini adalah selisih nilai enthalpi antara titik A dan titik B. Jika titik B nilai enthalpinya adalah 2585,7 kJ/kg, maka kenaikan nilai enthalpi proses ini adalah $2585,7 - 2238,4 = 347,3$ kJ/kg.



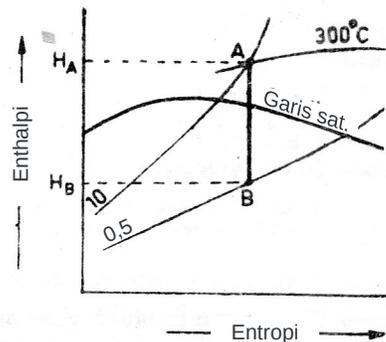
Gambar 8.9. Garis volume konstan pada diagram $h-s$.

Seandainya uap di titik B selanjutnya dipanaskan pada volume konstan 1,0 m³/kg, pertama-tama uap mencapai keadaan uap jenuh (titik C pada gambar) dan diteruskan sehingga uap menjadi uap panas lanjut di titik D dengan temperatur 400^o C. Misalkan nilai enthalpi di titik C adalah 2698,7 kJ/kg dan titik D adalah 3280,3 kJ/kg. Maka kenaikan enthalpi dari A ke C adalah $2698,7 - 2238,4 = 460,3$ kJ/kg. Dengan cara yang sama kenaikan enthalpi dari A ke D adalah $3280,3 - 2238,4 = 1041,9$ kJ/kg.

8.13 Garis Adiabatik Pada Diagram $h-s$

Pada proses adiabatik tidak terjadi perubahan entropi. Oleh karenanya proses adiabatik ini digambarkan sebagai garis vertikal pada diagram $h-s$ (garis AB pada Gambar 8.10).

Misalkan uap berupa uap panas lanjut dengan temperatur 300^o C dan tekanan 10 bar, yang ditunjukkan oleh titik A pada diagram $h-s$. Dari diagram $h-s$ diperoleh nilai enthalpi uap adalah 3045,9 kJ/kg. Jika uap berekspansi secara adiabatik hingga tekanan menjadi 0,5 bar, dengan menarik garis vertikal ke titik B diperoleh nilai



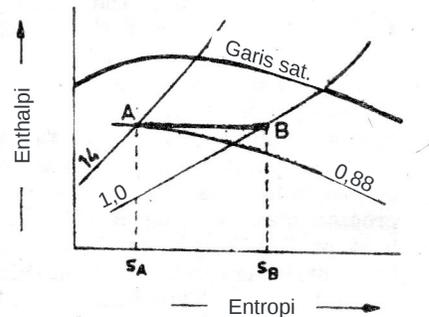
Gambar 8.10. Garis adiabatik pada diagram $h-s$.

enthalpi uap sebesar 2502 kJ/kg. Penurunan kalor dari titik A ke B dapat dihitung, yaitu $3045,9 - 2502 = 543,9$ kJ/kg.

8.14 Garis Throttle Pada Diagram h - s

Proses *throttle* adalah proses dimana tidak terjadi perubahan enthalpi. Sehingga pada diagram h - s proses *throttle* dapat digambarkan sebagai garis horisontal (garis AB pada Gambar 8.11).

Misalkan uap berupa uap basah dengan tekanan 14 bar dan fraksi kekeringan 0,88 yang ditunjukkan oleh titik A pada diagram h - s . Dari diagram h - s diperoleh nilai entropi uap adalah 5,966 kJ/kg.K. Jika uap berekspansi secara *throttle* hingga tekanan menjadi 1,0 bar, dengan menarik garis horisontal ke titik B diperoleh nilai entropi uap sebesar 7,029 kJ/kg.K. Kenaikan entropi uap dari titik A ke B adalah $7,029 - 5,966 = 1,063$ kJ/kg.K.



Gambar 8.11. Garis *throttle* pada diagram h - s .

Contoh soal 8.4:

Dengan menggunakan grafik *Mollier*, carilah penurunan nilai kalor dan kondisi akhir uap bila uap berekspansi secara adiabatik dari tekanan awal 30 bar dan temperatur 350°C ke tekanan 1 bar.

Jawab:

Diketahui $p_1 = 30$ bar; $T_1 = 350^{\circ}\text{C}$; $p_2 = 1$ bar

Prosedur:

1. Pertama-tama pada diagram *Mollier* tandai titik A, dimana perpotongan antara garis tekanan melalui p_1 (30 bar) dan temperatur melalui T_1 (350°C).
2. Karena uap berekspansi secara adiabatik (entropi konstan), gambarlah garis vertikal dari A ke tekanan p_2 (1 bar) dan beri tanda titik ini sebagai titik B.

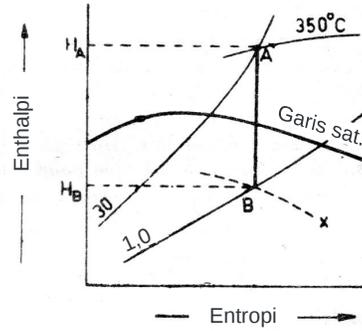
- Penurunan kalor selama proses

Dari grafik *Mollier*, diperoleh nilai kalor pada titik *A* dan *B*:

$$h_A = 3.120 \text{ kJ/kg} \text{ dan } h_B = 2.450 \text{ kJ/kg}$$

maka penurunan adalah:

$$h = h_A - h_B = 3.120 - 2.450 = 670 \text{ kJ/kg}$$



Gambar 8.12.

Soal-soal

1. Hitunglah entropi dari 1 kg air pada 90°C . (jawab: 0,2845 satuan entropi)
2. Hitunglah kenaikan entropi selama proses penguapan 1 kg uap jenuh kering pada tekanan 7 bar. (Jawab: 1,13 satuan entropi)
3. Carilah entropi dari 1 kg uap basah pada tekanan 10,5 bar dan fraksi kekeringan 0,9 (Jawab: 1,54 satuan entropi)
4. Carilah entropi 1 kg uap panas lanjut pada tekanan 14 bar dan 300°C . Asumsikan $C_p = 2,1$. (Jawab: 0,15 satuan entropi)
5. Hitunglah entropi 1 kg uap panas lanjut pada tekanan 15 kg/cm² dan 100°C . Asumsikan $C_p = 0,55$. (Jawab: 1,646 satuan entropi)
6. Uap jenuh kering pada tekanan 10 bar berekspansi secara adiabatik ke tekanan 0,7 bar. Dengan memakai diagram Mollier, carilah besarnya penurunan tekanan. (Jawab: 444,8 kJ/kg)

BAB IX

PROSES TERMODINAMIKA UAP AIR

9.1 Proses Volume Konstan

Proses volume konstan dari uap air adalah sebuah proses dimana volume uap sebelum dan setelah proses sama/konstan. Misalkan 1 kg uap basah dipanaskan pada volume konstan, volume awal uap adalah:

$$= x_1 \cdot v_{g1}$$

Volume akhir uap:

$$= x_2 \cdot v_{g2}$$

Karena uap dipanaskan pada volume konstan, maka volume awal uap sama dengan volume akhir uap, sehingga:

$$x_1 \cdot v_{g1} = x_2 \cdot v_{g2}$$

$$x_2 = \frac{x_1 \cdot v_{g1}}{v_{g2}} \quad (9.1)$$

dimana v_{g1} adalah volume spesifik uap pada tekanan awal (m^3/kg), x_1 adalah fraksi kekeringan awal uap, v_{g2} adalah volume spesifik uap pada kondisi akhir (m^3/kg) dan x_2 adalah fraksi kekeringan uap pada kondisi akhir.

Energi dalam uap pada kondisi awal:

$$u_1 = h_1 - \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1})}{1000} \quad \text{kJ/kg} \quad (9.2)$$

$$= (h_{f1} + x_1 \cdot h_{fg1}) - \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1})}{1000} \text{ kJ/kg} \quad (9.3)$$

Dengan cara yang sama untuk kondisi 2:

$$u_2 = h_2 - \frac{(p_2 \cdot x_2 \cdot v_{g2})}{1000} \text{ kJ/kg} \quad (9.4)$$

$$= (h_{f2} + x_2 \cdot h_{fg2}) - \frac{(p_2 \cdot x_2 \cdot v_{g2})}{1000} \text{ kJ/kg} \quad (9.5)$$

sehingga perubahan energi dalam:

$$u = u_2 - u_1$$

dimana u adalah energi dalam (kJ/kg), h adalah enthalpi uap (kJ/kg), h_f adalah entalpi caian jenuh (kJ/kg), h_{fg} adalah enthalpi penguapan (kJ/kg), x adalah fraksi kekeringan dan p adalah tekanan (N/m²). Suku kedua pada persamaan 9.2 adalah kerja, dibagi dengan 1000 sebagai konversi dari J ke kJ.

Karena tidak terjadi perubahan volume, maka kerja yang dilakukan adalah nol. Dari persamaan umum gas, kalor yang diserap adalah:

$$h = u + w = u + 0$$

$$= u = (u_2 - u_1)$$

Dapat disimpulkan bahwa selama proses volume konstan kalor yang diserap oleh uap sama dengan perubahan energi dalam.

Catatan: Dalam sistem MKS energi dalam adalah:

$$u_1 = h_{f1} + x_1 \cdot h_{fg1} - \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1})}{J} \text{ kcal/kg} \quad (9.6)$$

$$u_2 = (h_{f2} + x_2 \cdot h_{fg2}) - \frac{(p_2 \cdot x_2 \cdot v_{g2})}{J} \text{ kcal/kg} \quad (9.7)$$

J adalah konversi dari kg.m ke kcal, dan p dalam kg/m².

Contoh soal 9.1:

Uap dengan tekanan 4,0 bar dan kekeringan 0,7 berekspansi pada volume konstan hingga tekanan naik mencapai 5,5 bar. Carilah kondisi akhir uap dan besarnya kalor yang diserap oleh 1 kg uap.

Jawab:

Diketahui: $p_1 = 4,0$ bar ; $x_1 = 0,7$; $p_2 = 5,5$ bar.

a. Kondisi akhir uap

Dari tabel uap, pada tekanan 4,0 bar diperoleh: $h_{f1} = 604,74$ kJ/kg; $h_{fg1} = 2133,8$ kJ/kg dan $v_{g1} = 0,4625$ m³/kg.

Pada tekanan 5,5 bar, nilai enthalpi dan volume spesifik diperoleh dengan cara interpolasi karena tidak ada pada tabel A-3. Dari tabel:

- 5,0 bar: $h_{f5} = 640,23$ kJ/kg ; $h_{fg5} = 2108,5$ kJ/kg ; $v_{g5} = 0,3749$ m³/kg
- 6,0 bar: $h_{f6} = 670,56$ kJ/kg ; $h_{fg6} = 2086,3$ kJ/kg ; $v_{g6} = 0,3157$ m³/kg

Dengan cara interpolasi untuk tekanan 5,5 bar, diperoleh:

- Enthalpi air, h_{f2} :

$$h_{f2} = h_{f5} + \frac{5,5-5,0}{6,0-5,0} (h_{f6} - h_{f5}) = 640,23 + \frac{0,5}{1} (670,56 - 640,23)$$

$$= 640,23 + 15,17 = 655,40 \text{ kJ/kg}$$

- Enthalpi uap, h_{fg2} :

$$h_{fg2} = h_{fg5} + \frac{5,5-5,0}{6,0-5,0} (h_{fg6} - h_{fg5}) = 2108,5 + \frac{0,5}{1} (2086,3 - 2108,5)$$

$$= 2108,5 - 11,1 = 2097,4 \text{ kJ/kg}$$

- Volume spesifik gas, v_{g2} :

$$v_{g2} = v_{g5} + \frac{5,5-5,0}{6,0-5,0} (v_{g6} - v_{g5}) = 0,3749 + \frac{0,5}{1} (0,3157 - 0,3749)$$

$$= 0,3749 - 0,0296 = 0,3453 \text{ m}^3/\text{kg}$$

sehingga:

$$x_2 = \frac{x_1 \cdot v_{g1}}{v_{g2}}$$

$$= \frac{0,7 \times 0,4625}{0,3453} = 0,94$$

b. Kalor yang diserap oleh 1 kg uap

Energi dalam uap awal:

$$u_1 = h_{f1} + x_1 \cdot h_{fg1} - \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1})}{1000}$$

$$= 604,74 + (0,7 \times 2133,8) - \frac{4,0 \times 10^5 \times 0,7 \times 0,4625}{1000}$$

$$= 1968,9 \text{ kJ/kg}$$

Energi dalam uap akhir:

$$u_2 = h_{f2} + x_2 \cdot h_{fg2} - \frac{(p_2 \cdot x_2 \cdot v_{g2})}{1000}$$

$$= 655,40 + (0,94 \times 2097,3) - \frac{5,5 \times 10^5 \times 0,94 \times 0,3453}{1000}$$

$$= 2448,34 \text{ kJ/kg}$$

Perubahan energi dalam:

$$u = u_2 - u_1$$

$$= 2448,34 - 1968,9 = 479,44 \text{ kJ/kg}$$

Pada proses volume konstan, kalor yang diserap oleh uap sama dengan perubahan energi dalam, sehingga:

$$h = u = 479,44 \text{ kJ/kg}$$

9.2 Proses Tekanan Konstan

Pada proses tekanan konstan, tekanan uap air sebelum dan setelah proses tidak berubah. Pada proses pemanasan uap basah menjadi uap kering sebagaimana kita

ketahui bahwa tekanan uap adalah konstan. Disisi lain, pada proses ini temperatur uap juga tidak berubah, sehingga proses tekanan konstan adalah juga proses temperatur konstan.

Misalkan 1 kg uap basah dipanaskan dari 0° C pada tekanan konstan. Karena tekanan konstan maka volume spesifik konstan. Kerja yang dilakukan selama proses:

$$w = p \times \text{perubahan volume}$$

$$w = p(x_2 \cdot v_g - x_1 \cdot v_g)$$

$$w = p \cdot v_g(x_2 - x_1) \quad \text{J/kg}$$

atau:
$$w = \frac{p \cdot v_g(x_2 - x_1)}{1000} \quad \text{kJ/kg}$$

Energi dalam uap pada kondisi awal:

$$u_1 = h_1 - \frac{(p \cdot x_1 \cdot v_g)}{1000} \quad \text{kJ/kg} \quad (9.8)$$

Dan energi dalam uap pada kondisi akhir:

$$u_2 = h_2 - \frac{(p \cdot x_2 \cdot v_g)}{1000} \quad \text{kJ/kg} \quad (9.9)$$

Perubahan energi dalam:

$$\begin{aligned} u &= u_2 - u_1 \\ u &= \left[h_2 - \frac{(p \cdot x_2 \cdot v_g)}{1000} \right] - \left[h_1 - \frac{(p \cdot x_1 \cdot v_g)}{1000} \right] \\ &= [h_2 - h_1] - \frac{p \cdot v_g(x_2 - x_1)}{1000} \quad \text{kJ/kg} \end{aligned} \quad (9.10)$$

Dimana x_1 adalah fraksi kekeringan uap kondisi awal, x_2 adalah fraksi kekeringan uap pada kondisi akhir.

Dari persamaan energi dan substitusi dari persamaan di atas diperoleh:

$$h = u + w$$

$$h = \left[[h_2 - h_1] - \frac{p \cdot v_g (x_2 - x_1)}{1000} \right] + \frac{p \cdot v_g (x_2 - x_1)}{1000}$$

$$= h_2 - h_1 \quad (9.11)$$

Catatan:

Dalam satuan MKS:

$$u_1 = h_1 - \frac{(p \cdot x_1 \cdot v_g)}{J} \quad \text{kcal/kg} \quad (9.12)$$

$$u_2 = h_2 - \frac{(p \cdot x_2 \cdot v_g)}{J} \quad \text{kcal/kg} \quad (9.13)$$

$$u = [h_2 - h_1] - \frac{p \cdot v_g (x_2 - x_1)}{J} \quad \text{kcal/kg} \quad (9.14)$$

J adalah konversi dari kg.m ke kcal.

Contoh soal 9.2 (MKS):

1 kg uap pada tekanan 15 bar dan fraksi kekeringan 0,95 dipanaskan pada tekanan konstan hingga mengering dengan sempurna. Carilah kenaikan volume uap dan besarnya kalor yang diberikan.

Jawab:

Diketahui: $p = 15$ bar; $x_1 = 0,95$; $x_2 = 1$.

Kenaikan volume

Dari tabel uap, pada tekanan 15 bar diperoleh: $h_{f1} = h_{f2} = 844,84$ kJ/kg; $h_{fg1} = h_{fg2} = 1947,3$ kJ/kg; $v_g = 0,1318$ m³/kg.

$$h_{f1} = h_{f2} = 844,84 / 4,184 = 201,92 \text{ kcal/kg}$$

$$h_{fg1} = h_{fg2} = 1947,3 / 4,184 = 465,42 \text{ kcal/kg}$$

Volume 1 kg uap basah:

$$v = x_1 \cdot v_g = 0,95 \times 0,1318 = 0,1252 \text{ m}^3$$

Kenaikan volume:

$$= v_g - v = 0,1318 - 0,1252 = 0,0066 \text{ m}^3$$

Jumlah kalor yang diberikan

Kalor total uap basah:

$$\begin{aligned} h_1 &= h_{f1} + x_1 h_{fg1} \\ &= 201,92 + (0,95 \times 465,42) \\ &= 644,07 \text{ kcal/kg} \end{aligned}$$

Kalor total uap kering:

$$\begin{aligned} h_2 &= h_{f2} + h_{fg2} \\ &= 201,92 + 465,42 = 667,34 \text{ kcal/kg} \end{aligned}$$

Kalor yang diberikan = perubahan kalor total uap

$$\begin{aligned} &= h_2 - h_1 = 667,34 - 644,07 \\ &= 23,27 \text{ kcal/kg} \end{aligned}$$

9.3 Proses Isotermal

Sebagaimana diketahui bahwa uap basah mempunyai temperatur konstan pada saat proses perubahan fasa pada tekanan tertentu. Oleh karenanya proses pemanasan uap basah pada temperatur konstan/isotermal sama dengan proses pemanasan pada tekanan konstan.

Ketika uap menjadi panas lanjut, uap berlaku seperti gas sempurna. Dengan kata lain uap panas lanjut mengikuti hukum:

$$\frac{pv}{T} = \text{konstan}$$

atau: $pv = \text{konstan}$... (karena T konstan)

Pemanasan uap menjadi uap panas lanjut dapat dianggap sebagai proses hiperbolik, dengan kata lain proses mengikuti hukum Boyle.

9.4 Proses Hiperbolik

Proses ekspansi hiperbolik bukanlah proses isotermal untuk uap basah, tapi dapat digunakan untuk proses pemanasan lanjut uap. Misalkan 1 kg uap basah dipanaskan secara hiperbolik. Volume awal dan akhir uap:

$$v_1 = x_1 \cdot v_{g1} \quad \text{dan} \quad v_2 = x_2 \cdot v_{g2}$$

Karena uap dipanaskan secara hiperbolik ($pv = \text{konstan}$), maka:

$$p_1 v_1 = p_2 v_2$$

atau

$$p_1 (x_1 \cdot v_{g1}) = p_2 (x_2 \cdot v_{g2})$$

$$x_2 = \frac{p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1}}{p_2 \cdot v_{g2}} \quad (9.15)$$

Nilai x_2 memberikan informasi mengenai kondisi akhir uap, yaitu:

1. Jika nilai x_2 kurang dari satu maka uap dalam keadaan basah,
2. Jika nilai x_2 sama dengan satu maka uap dalam keadaan kering jenuh,
3. Jika nilai x_2 besar dari satu maka uap dalam keadaan panas lanjut.

Untuk uap panas lanjut, kita bisa cari volume dan temperaturnya.

$$p_1 x_1 \cdot v_{g1} = p_2 v_{sup}$$

$$v_{sup} = \frac{p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1}}{p_2} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (9.16)$$

berdasarkan hukum Charles:

$$\frac{v_{sup}}{T_{sup}} = \frac{v_{g2}}{T_2} \quad (9.17)$$

dimana v_{sup} adalah volume uap panas lanjut, T_{sup} adalah temperatur uap panas lanjut, T_2 adalah temperatur jenuh uap pada p_2 .

Selanjutnya energi dalam uap pada kondisi awal:

$$u_1 = h_1 - \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_g)}{1000} \quad \text{kJ/kg} \quad (9.18)$$

Dan energi dalam uap pada kondisi akhir:

$$u_2 = h_2 - \frac{(p_2 \cdot x_2 \cdot v_g)}{1000} \text{ kJ/kg} \quad (9.19)$$

Perubahan energi dalam:

$$u = u_2 - u_1$$

$$u = \left[h_2 - \frac{(p_2 \cdot x_2 \cdot v_{g2})}{1000} \right] - \left[h_1 - \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1})}{1000} \right] \text{ kJ/kg}$$

karena $p_1 (x_1 \cdot v_{g1}) = p_2 (x_2 \cdot v_{g2})$, maka:

$$u = h_2 - h_1 \quad (9.20)$$

dimana $h_1 = h_{f1} + x_1 (h_{fg1})$

$h_2 = h_{f2} + x_2 (h_{fg2})$... bila uap masih basah

$h_2 = h_{f2} + h_{fg2}$... bila uap kering

$h_2 = h_{sup} = h_{f2} + h_{fg2} + C_p (T_{sup} - T_2)$... bila uap panas lanjut

Kerja yang dilakukan uap selama ekspansi hiperbolik:

$$w = p_1 \cdot v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$$

Untuk uap basah: $w = p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1} \ln \frac{x_2 \cdot v_{g2}}{x_1 \cdot v_{g1}} \text{ Joule/kg} \quad (9.21)$

Untuk uap kering: $w = p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1} \ln \frac{v_{g2}}{x_1 \cdot v_{g1}} \text{ Joule/kg} \quad (9.22)$

Untuk uap panas lanjut: $w = p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1} \ln \frac{v_{sup}}{x_1 \cdot v_{g1}} \text{ Joule/kg} \quad (9.23)$

dimana p dalam N/m^2 .

Catatan:

Untuk sistem MKS:

1. Energi dalam:

$$u_1 = h_1 - \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_g)}{J} \quad \text{kcal/kg} \quad (9.24)$$

$$u_2 = h_2 - \frac{(p_2 \cdot x_2 \cdot v_g)}{J} \quad \text{kcal/kg} \quad (9.25)$$

2. Kerja:

Untuk uap basah: $w = \frac{p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1}}{J} \ln \frac{x_2 \cdot v_{g2}}{x_1 \cdot v_{g1}} \quad \text{kcal/kg} \quad (9.26)$

Untuk uap kering: $w = \frac{p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1}}{J} \ln \frac{v_{g2}}{x_1 \cdot v_{g1}} \quad \text{kcal/kg} \quad (9.27)$

Untuk uap panas lanjut: $w = \frac{p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1}}{J} \ln \frac{v_{\text{sup}}}{x_1 \cdot v_{g1}} \quad \text{kcal/kg} \quad (9.28)$

dimana p dalam kg/m^2 .

Contoh soal 9.3:

Satu kg uap dengan tekanan 7 bar dan fraksi kekeringan 0,85 berekspansi secara hiperbolik ke tekanan 1,5 bar. Carilah fraksi kekeringan akhir dan kerja yang dilakukan selama ekspansi.

Jawab:

Diketahui: $p_1 = 7 \text{ bar} = 7 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $x_1 = 0,85$; $p_2 = 1,5 \text{ bar} = 1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.

Fraksi kekeringan akhir uap

Dari tabel uap, untuk tekanan 7 bar, diperoleh: $v_{g1} = 0,2729 \text{ m}^3/\text{kg}$. Dan pada tekanan 1,5 bar diperoleh: $v_{g2} = 1,159 \text{ m}^3/\text{kg}$.

$$p_1 x_1 v_{g1} = p_2 x_2 v_{g2}$$

$$(7 \times 10^5) \times 0,85 \times 0,2729 = (1,5 \times 10^5) \times x_2 \times 1,159$$

$$x_2 = 0,934$$

Kerja yang dilakukan selama proses ekspansi

$$w = p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1} \ln \frac{x_2 \cdot v_{g2}}{x_1 \cdot v_{g1}}$$

$$w = (7 \times 10^5) \times 0,85 \times 0,2729 \ln \frac{0,934 \times 1,159}{0,85 \times 0,2729}$$

$$= 250,13 \times 10^3 \text{ J/kg}$$

$$= 250,13 \text{ kJ/kg}$$

9.5 Proses Politropik

Pada proses politropik berlaku persamaan $p v^n = \text{konstan}$. Misalkan 1 kg uap dipanaskan secara politropik. Volume awal dan akhir uap:

$$v_1 = x_1 \cdot v_{g1} \quad \text{dan} \quad v_2 = x_2 \cdot v_{g2}$$

Untuk proses politropik, berlaku:

$$p_1 (x_1 \cdot v_{g1})^n = p_2 (x_2 \cdot v_{g2})^n$$

$$x_2 = \frac{x_1 \cdot v_{g1}}{v_{g2}} \times \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (9.29)$$

dimana n adalah indeks politropik.

Nilai x_2 menjelaskan keadaan uap, yaitu:

1. Jika nilai x_2 kurang dari satu maka uap dalam keadaan basah,
2. Jika nilai x_2 sama dengan satu maka uap dalam keadaan kering jenuh,
3. Jika nilai x_2 besar dari satu maka uap dalam keadaan panas lanjut.

Untuk uap panas lanjut, kita akan turunkan persamaan untuk volume dan temperatur.

Volume uap panas lanjut:

$$p_1 (x_1 \cdot v_{g1})^n = p_2 \cdot (v_{sup})^n$$

$$v_{\text{sup}} = x_1 \cdot v_{g1} \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (9.30)$$

Temperatur uap panas lanjut:

$$\frac{v_{\text{sup}}}{T_{\text{sup}}} = \frac{v_{g2}}{T_2}$$

$$T_{\text{sup}} = \frac{v_{\text{sup}} T_2}{v_{g2}} \quad (9.31)$$

dimana T_2 adalah temperatur didih uap pada p_2 .

Selanjutnya, energi dalam uap pada kondisi awal:

$$u_1 = h_1 - \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1})}{1000} \quad \text{kJ/kg}$$

Dan energi dalam uap pada kondisi akhir:

$$u_2 = h_2 - \frac{(p_2 \cdot x_2 \cdot v_{g2})}{1000} \quad \text{kJ/kg}$$

Perubahan energi dalam:

$$u = u_2 - u_1$$

dimana $h_1 = h_{f1} + x_1 (h_{fg1})$

$$h_2 = h_{f2} + x_2 (h_{fg2}) \quad \dots \text{ bila uap masih basah}$$

$$h_2 = h_{f2} + h_{fg2} \quad \dots \text{ bila uap kering}$$

$$h_2 = h_{\text{sup}} = h_{f2} + h_{fg2} + C_p (T_{\text{sup}} - T_2) \quad \dots \text{ bila uap panas lanjut}$$

Kerja yang dilakukan uap selama ekspansi politropik:

Untuk uap basah: $w = \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1} - p_2 \cdot x_2 \cdot v_{g2})}{n-1} \quad \text{Joule/kg} \quad (9.32)$

Untuk uap kering: $w = \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1} - p_2 \cdot v_{g2})}{n-1} \quad \text{Joule/kg} \quad (9.33)$

$$\text{Untuk uap panas lanjut: } w = \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1} - p_2 \cdot v_{\text{sup}})}{n-1} \text{ Joule/kg} \quad (9.34)$$

dimana p dalam N/m^2 .

Catatan:

Untuk sistem MKS:

$$1. \text{ Energi dalam: } u_1 = h_1 - \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_g)}{J} \text{ kcal/kg}$$

$$u_2 = h_2 - \frac{(p_2 \cdot x_2 \cdot v_g)}{J} \text{ kcal/kg}$$

2. Kerja:

$$\text{Untuk uap basah: } w = \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1} - p_2 \cdot x_2 \cdot v_{g2})}{J(n-1)} \text{ kcal/kg} \quad (9.35)$$

$$\text{Untuk uap kering: } w = \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1} - p_2 \cdot v_{g2})}{J(n-1)} \text{ kcal/kg} \quad (9.36)$$

$$\text{Untuk uap panas lanjut: } w = \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1} - p_2 \cdot v_{\text{sup}})}{J(n-1)} \text{ kcal/kg} \quad (9.37)$$

dimana p dalam kg/m^2 .

Contoh soal 9.4:

Satu kg uap pada tekanan 1 bar dan kekeringan 0,8 di kompresi di dalam sebuah silinder ke tekanan 2 bar. Kompresi mengikuti persamaan $pv^{1.2} = \text{konstan}$. Carilah kondisi akhir uap, perubahan energi dalam dan kalor yang lepas melalui dinding silinder.

Jawab:

Diketahui: $p_1 = 1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $x_1 = 0,8$; $p_2 = 2 \text{ bar} = 2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $n = 1,2$.

Dari tabel uap, untuk tekanan 1 bar diperoleh:

$$h_{f1} = 417,46 \text{ kJ/kg}; h_{fg1} = 2258,0 \text{ kJ/kg} \text{ dan } v_{g1} = 1,694 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Dari tabel uap, untuk tekanan 2 bar diperoleh:

$$h_{f2} = 504,7 \text{ kJ/kg}; h_{fg2} = 2201,9 \text{ kcal/kg dan } v_{g2} = 0,8857 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Kondisi akhir uap

$$p_1 (x_1 \cdot v_{g1})^n = p_2 \cdot (x_2 \cdot v_{g2})^n$$

$$1 \times 10^5 (0,8 \times 1,694)^{1,2} = 2 \times 10^5 (x_2 \times 0,8857)^{1,2}$$

$$x_2 = \frac{0,8 \times 1,694}{0,8857} \times \left(\frac{1 \times 10^5}{2 \times 10^5} \right)^{\frac{1}{1,2}} = 1,53 (0,5)^{0,833}$$

$$= 1,53 \times 0,5614 = 0,86$$

Perubahan energi dalam

Energi dalam awal:

$$u_1 = h_{f1} + x_1 \cdot h_{fg1} - \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1})}{1000}$$

$$= 417,46 + 0,8(2258,0) - \frac{1 \times 10^5 \times 0,8 \times 1,694}{1000}$$

$$= 2088,34 \text{ kJ/kg}$$

Energi dalam akhir:

$$u_2 = h_{f2} + x_2 \cdot h_{fg2} - \frac{(p_2 \cdot x_2 \cdot v_{g2})}{1000}$$

$$= 504,7 + 0,86(2201,9) - \frac{2 \times 10^5 \times 0,86 \times 0,8857}{1000}$$

$$= 2245,99 \text{ J/kg}$$

Perubahan energi dalam:

$$u = u_2 - u_1 = 2245,99 - 2088,34$$

$$= 157,65 \text{ kJ/kg}$$

Kalor yang dilepaskan melalui dinding silinder

Kerja selama proses:

$$\begin{aligned}
 w &= \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1} - p_2 \cdot x_2 \cdot v_{g2})}{(n-1)} \\
 &= \frac{(1 \times 10^5 \times 0,8 \times 1,694) - (2 \times 10^5 \times 0,86 \times 0,8857)}{(1,2-1)} \\
 &= -84102 \text{ J/kg} = -84,102 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa kerja diberikan ke sistem.

Kalor yang dilepaskan:

$$\begin{aligned}
 h &= u + w = 157,65 - 84,102 \\
 &= 73,548 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

9.6 Proses Adiabatik atau Proses Isentropik

Pada proses adiabatik berlaku:

1. Tidak terjadi perpindahan kalor melalui dinding silinder,
2. Tidak terjadi perubahan entropi, dan
3. Kerja yang dilakukan pada piston oleh uap yang berekspansi.

Misalkan 1 kg uap basah dipanaskan secara adiabatik.

Entropi uap sebelum ekspansi:

$$s_1 = s_{f1} + \frac{x_1 \cdot h_{fg1}}{T_1} \quad (9.38)$$

dan entropi uap setelah ekspansi:

$$s_2 = s_{f2} + \frac{x_2 \cdot h_{fg2}}{T_2} \quad (9.39)$$

karena entropi sebelum dan setelah ekspansi sama, maka:

$$s_{f1} + \frac{x_1 \cdot h_{fg1}}{T_1} = s_{f2} + \frac{x_2 \cdot h_{fg2}}{T_2} \quad (9.40)$$

Dari persamaan di atas dapat dicari x_2 . Harga x_2 akan menentukan kondisi uap, dimana:

1. Jika nilai x_2 kurang dari satu maka uap dalam keadaan basah,
2. Jika nilai x_2 sama dengan satu maka uap dalam keadaan kering jenuh,
3. Jika nilai x_2 besar dari satu maka uap dalam keadaan panas lanjut.

Jika uap berupa uap panas lanjut, maka harus dicari nilai volume dan temperaturnya dengan cara yang sama dengan proses politropik (persamaan 9.30 dan 9.31).

Selanjutnya, energi dalam uap pada kondisi awal:

$$u_1 = h_1 - \frac{(p_1 \cdot x_1 \cdot v_{g1})}{1000} \quad \text{kJ/kg}$$

Dan energi dalam uap pada kondisi akhir:

$$u_2 = h_2 - \frac{(p_2 \cdot x_2 \cdot v_{g2})}{1000} \quad \text{kJ/kg}$$

Perubahan energi dalam:

$$u = u_2 - u_1$$

dimana $h_1 = h_{f1} + x_1 (h_{fg1})$

$$h_2 = h_{f2} + x_2 (h_{fg2}) \quad \dots \text{ bila uap basah}$$

$$h_2 = h_{f2} + h_{fg2} \quad \dots \text{ bila uap kering}$$

$$h_2 = h_{sup} = h_{f2} + h_{fg2} + C_p (T_{sup} - T_2) \quad \dots \text{ bila uap panas lanjut}$$

Karena tidak ada kalor yang ditambahkan atau diambil dari uap selama proses, maka kerja yang dilakukan uap adalah:

$$w = -u$$

Terlihat bahwa pada proses adiabatik, kerja yang dilakukan selama ekspansi sama dengan perubahan energi dalam.

Contoh soal 9.5:

Uap pada tekanan 10 bar dan kekeringan 0,95 berekspansi secara adiabatik hingga tekanan 4 bar. Carilah fraksi kekeringan akhir dengan (a) menggunakan tabel uap, (b) menggunakan grafik Mollier.

Jawab:

Diketahui: $p_1 = 10 \text{ bar} = 10 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $x_1 = 0,95$; $p_2 = 4 \text{ bar} = 4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

(a) Menggunakan tabel uap

Dari tabel uap pada tekanan 10 bar diperoleh:

$$s_{f1} = 2,1387 \quad ; \quad h_{fg1} = 2015,3 \text{ kJ/kg}$$

$$T_1 = 179,9^\circ \text{ C} + 273 = 452,9 \text{ K}$$

Dari tabel uap pada tekanan 4 bar diperoleh:

$$s_{f2} = 1,7766 \quad ; \quad h_{fg2} = 2133,8 \text{ kJ/kg}$$

$$T_2 = 143,6^\circ \text{ C} + 273 = 416,6 \text{ K}$$

Fraksi kekeringan uap akhir:

$$s_{f1} + \frac{x_1 \cdot h_{fg1}}{T_1} = s_{f2} + \frac{x_2 \cdot h_{fg2}}{T_2}$$

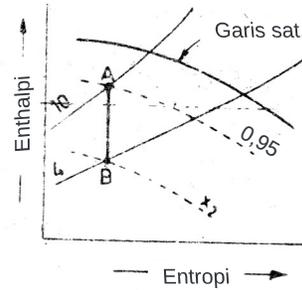
$$2,1387 + \frac{0,95 \times 2015,3}{452,9} = 1,7766 + \frac{x_2 \times 2133,8}{416,6}$$

$$6,366 = 1,7766 + 5,122 x_2$$

$$x_2 = (6,366 - 1,7766) / 5,122 = 0,896$$

(b) Menggunakan diagram Mollier

Pertama-tama tandai titik A dimana garis tekanan melalui p_1 (yaitu 10 bar) dan kekeringan x_1 (0,95) berpotongan, sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 9.1. Karena uap berekspansi secara adiabatik, maka gambarlah garis vertikal melalui A sehingga berpotongan dengan garis tekanan p_2 (yaitu 4 bar) di B.



Gambar 9.1.

Fraksi kekeringan uap akan diperoleh dari diagram di titik *B* yaitu 0,896.

9.7 Proses Throttle (Proses Kalor Konstan)

Uap dikatakan sebagai *throttle* apabila uap melewati bukaan terbatas, seperti katup yang terbuka sedikit. Kebocoran fluida di sela keretakan pada sebuah bejana adalah contoh dari *throttle*.

Selama proses *throttle*, fluida dipaksa keluar oleh tekanan melalui celah terbatas. Celah begitu sempit sehingga terjadi gesekan fluida dengan celah dan kecepatan fluida keluar celah berkurang mendekati nol. Energi kinetik akan berubah menjadi panas karena gesekan. Oleh sebab itu, apabila uap yang awalnya basah, uap akan mengalami pengeringan ketika berekspansi. Jika uap kering mengalami *throttle* maka uap akan berubah menjadi uap panas lanjut.

Perlu dicatat bahwa selama proses ini akan terjadi:

1. Tidak ada kalor yang diberikan atau dibuang,
2. Tidak ada kerja oleh uap yang berekspansi,
3. Tidak ada perubahan energi dalam dari fluida,
4. Kalor total fluida tetap konstan.

Misalkan 1 kg uap basah mengalami *throttle* melewati celah sempit. Kalor sebelum ekspansi:

$$h_1 = h_{f1} + x_1 \cdot h_{fg1}$$

Kalor setelah ekspansi:

$$h_2 = h_{f2} + x_2 \cdot h_{fg2}$$

Karena kalor selama proses *throttle* konstan, maka:

$$h_1 = h_2$$

atau

$$h_{f1} + x_1 \cdot h_{fg1} = h_{f2} + x_2 \cdot h_{fg2}$$

sehingga:

$$x_2 = \frac{h_{f1} + x_1 h_{fg1} - h_{f2}}{h_{fg2}}$$

Harga x_2 akan menentukan kondisi uap, dimana:

1. Jika nilai x_2 kurang dari satu maka uap dalam keadaan basah,
2. Jika nilai x_2 sama dengan satu maka uap dalam keadaan kering jenuh,
3. Jika nilai x_2 besar dari satu maka uap dalam keadaan panas lanjut.

Proses *throttle* dapat digambarkan pada diagram Moller dengan sebuah garis horisontal. Kondisi akhir uap dapat diperoleh langsung dari diagram.

Contoh soal 9.6:

Uap pada tekanan 10 bar dan kekeringan 0,9 mengalami *throttle* ke tekanan 2 bar. Dengan menggunakan tabel uap hitunglah fraksi kekeringan akhir uap atau derajat panas lanjut. Perkirakanlah perubahan entropi selama proses ini.

Jawab:

Diketahui: $p_1 = 10$ bar; $x_1 = 0,9$; $p_2 = 2$ bar.

Dari tabel uap pada tekanan 10 bar diperoleh:

$$h_{f1} = 762,6 \text{ kJ/kg} ; h_{fg1} = 2015,3 \text{ kJ/kg}$$

$$T_1 = 179,9^0 \text{ C} + 273 = 452,9 \text{ K} ; s_{f1} = 2,138$$

Dari tabel uap pada tekanan 2 bar diperoleh:

$$h_{f2} = 504,7 \text{ kJ/kg} ; h_{fg2} = 2201,9 \text{ kJ/kg}$$

$$T_2 = 120,2^0 \text{ C} + 273 = 393,2 \text{ K} ; s_{g2} = 1,530$$

Fraksi kekeringan akhir proses

$$h_{f1} + x_1 \cdot h_{fg1} = h_{f2} + x_2 \cdot h_{fg2}$$

$$762,6 + 0,9 (2015,3) = 504,7 + x_2 (2201,9)$$

$$x_2 = 0,94$$

Perubahan entropi

Entropi sebelum ekspansi:

$$\begin{aligned} s_1 &= s_{f1} + \frac{x_1 \cdot h_{fg1}}{T_1} \\ &= 2,138 + \frac{0,9 \times 2015,3}{452,9} \\ &= 6,14 \text{ satuan entropi} \end{aligned}$$

Entropi setelah ekspansi:

$$\begin{aligned} s_2 &= s_{f2} + \frac{x_2 \cdot h_{fg2}}{T_2} \\ &= 1,530 + \frac{0,94 \times 2201,9}{393,2} \\ &= 6,79 \text{ satuan entropi} \end{aligned}$$

Perubahan entropi:

$$\begin{aligned} s &= s_2 - s_1 = 6,79 - 6,14 \\ &= 0,65 \text{ satuan entropi} \end{aligned}$$

Soal-soal

1. Uap dengan tekanan 6 bar dan kekeringan 0,8 dipanaskan pada volume konstan ke tekanan 7 bar. Carilah fraksi kekeringan akhir dan kalor yang diserap oleh 1 kg uap.
(Jawab: 0,9; 197,19 kcal/kg)
2. Satu kg air dengan temperatur 95^o C dipanaskan pada tekanan konstan 17,5 bar hingga menjadi uap dengan kekeringan 0,98. Carilah jumlah kerja yang dilakukan uap, perubahan energi dalam dan kalor yang diberikan ke uap.
(Jawab: 111,7 kJ; 2246,8 kJ; 2358,5 kJ)
3. Uap jenuh kering pada tekanan 7 kg/cm² absolut berekspansi secara hiperbolik ke tekanan 0,36 kg/cm² absolut. Carilah kondisi akhir uap dan pertukaran kalor melalui dinding silinder per kg uap.
(Jawab: 1,2; 138,6 kcal/kg)
4. Uap pada tekanan 10 bar dan kekeringan 0,9 berekspansi ke tekanan atmosfer secara hiperbolik. Carilah (i) kerja yang dilakukan, (ii) perubahan enthalpi, (iii) perubahan energi dalam dan (iv) kalor yang diserap. Kalor spesifik uap pada tekanan konstan = 0,48.
(Jawab: 401,7 kJ/kg; 123 kJ/kg; 123 kJ/kg; 524,67 kJ/kg)
5. Uap dengan fraksi kekeringan 0,96 diekspansikan di dalam sebuah silinder sesuai dengan persamaan $pv^{1,02} = \text{konstan}$. Tekanan pada awal ekspansi adalah 20 kg/cm² absolut dan dilanjutkan hingga tekanan berkurang sampai 1 kg/cm² absolut. Carilah kondisi akhir uap dan pertukaran kalor yang terjadi antara uap dengan dinding silinder per kg, dan kerja oleh uap.
(Jawab: 1,11; 36,1 kcal/kg; 32,5 kcal)
6. Satu kg uap dengan tekanan 5 bar dan kekeringan 0,8 berekspansi mengikuti persamaan $pv = C$ di dalam silinder ke tekanan 0,5 bar. Carilah kondisi uap setelah ekspansi.
(Jawab: 0,925)
7. Hitunglah energi dalam dari 1 m³ uap dengan tekanan 9 bar dan kekeringan 0,95. Jika uap berekspansi mengikuti persamaan $pv = \text{konstan}$ hingga uap menjadi kering jenuh, carilah tekanan akhir uap. Cari juga kalor yang ditambahkan selama ekspansi.
(Jawab: 11924,4 kJ/m³; 2 bar; 1414,2 kJ/kg)
8. Uap jenuh kering dengan tekanan 11 bar berekspansi secara politropik mengikuti persamaan $pv^{1,13} = \text{konstan}$ ke tekanan 1 bar. Carilah kondisi akhir uap dan jumlah kalor yang dipindahkan per kg uap.
(Jawab: 0,87; 20 kJ/kg)
9. Uap dengan tekanan awal 7 bar dan 200^o C berekspansi secara adiabatik ke tekanan 1 bar. Hitunglah kondisi akhir uap, jika kalor spesifik uap pada tekanan 7 bar adalah 2,3. Jika ekspansi di atas diwakili oleh persamaan $pv^n = C$, carilah nilai n .

(Jawab: 0,92; 1,18)

10. Uap jenuh kering dengan tekanan 7 bar berekspansi secara adiabatik ke 4 bar, dan kemudian mengalami kondensasi pada volume konstan dan tekanan 1 bar. Carilah fraksi kekeringan akhir uap. (Jawab: 0,28)
11. Satu kg uap pada tekanan 14 kg/cm² absolut dan kekeringan 0,9 mengalami *throttle* hingga tekanan turun menjadi 1,4 kg/cm² absolut. Carilah kondisi akhir uap dengan menggunakan (i) tabel uap, (ii) diagram Mollier. (Jawab: $x_2 = 0,96$)
12. Uap pada tekanan 14 bar dan temperatur 80^o C panas lanjut mengalami proses *throttle* hingga tekanan menjadi 8,5 bar. Carilah temperatur uap setelah *throttle*. Kalor spesifik uap panas lanjut diasumsikan 2,1. (Jawab: 260,6^o C).
13. Uap dengan tekanan 7 bar dan fraksi kekeringan 0,5 mengalami *throttle* ke tekanan 4,5 bar. Carilah kondisi akhir uap. (Jawab: 0,52)
14. Uap dengan tekanan 16,5 kg/cm² absolut dan kekeringan 0,98 mengalami proses *throttle* ke tekanan 6,3 kg/cm² absolut. Uap kemudian masuk ke silinder mesin dan dikeluarkan dari silinder dengan tekanan 1,2 kg/cm² absolut dan kekeringan 0,99. Carilah kualitas uap setelah mengalami *throttle* dan kerja yang diberikan uap pada mesin per kg uap. (Jawab: ; 64,4 kcal/kg)
15. Uap mengalami *throttle* dari tekanan 11,2 kg/cm² absolut ke tekanan 1,4 kg/cm² absolut. Jika kondisi uap adalah kering jenuh pada akhir ekspansi, berapakah fraksi kekeringan uap pada kondisi awal? Berapakah kenaikan entropi karena proses *throttle*? (Jawab: 0,95; 0,22 unit entropi)

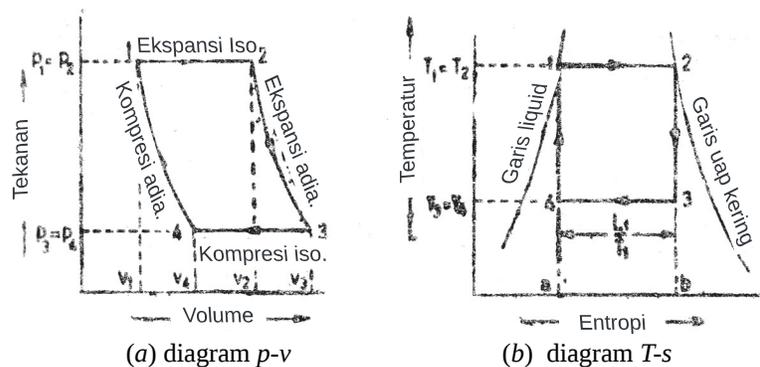
BAB X

SIKLUS UAP TERMODINAMIKA

Dalam pembahasan di bab ini, yaitu siklus uap termodinamika, semua teori yang dipakai adalah sama dengan teori yang sudah dibahas di Bab 5, yaitu mengenai siklus udara termodinamika. Bedanya adalah bahwa fluida dalam bab ini adalah uap air, yaitu uap air dapat dalam berbagai bentuk, yaitu uap basah, uap kering atau uap panas lanjut. Siklus yang dibahas berikut ini adalah siklus-siklus yang umum saja.

10.1 Siklus Carnot Dengan Uap Air Sebagai Fluida Kerja

Siklus Carnot dimana uap air sebagai fluida kerjanya ditunjukkan oleh diagram $p-v$ dan $T-s$ pada Gambar 10.1 (a) dan (b). Misalkan 1 kg air jenuh dengan tekanan p_1 dan temperatur T_1 , ditunjukkan oleh titik 1 pada Gambar 10.1 (a) dan (b), mengalami proses siklus 1-2-3-4-1. Siklus melewati empat tahapan proses, yaitu: proses ekspansi isotermal, ekspansi adiabatik, kompresi isotermal, dan kompresi adiabatik. Berikut ini akan dijelaskan setiap tahapan proses tersebut.



Gambar 10.1. Siklus Carnot.

Proses pertama

Pada proses pertama, prosesnya adalah ekspansi isothermal, dimana air di panaskan menjadi uap jenuh kering pada temperatur konstan (T_1) dan tekanan p_1 , Posisi uap kering ditunjukkan oleh titik 2 pada gambar. Proses ekspansi isothermal digambarkan sebagai kurva 1-2 pada diagram $p-v$ dan $T-s$.

Kalor yang diserap oleh air selama berubah menjadi uap kering jenuh adalah kalor latennya (h_{fg}). Perubahan entropi yang terjadi:

$$\text{Perubahan entropi} = s_2 - s_1$$

Luas daerah $12ba$ pada diagram $T-s$ di Gambar 10.1(b) mewakili kalor yang diserap dengan skala tertentu selama ekspansi isothermal. Secara rumus, kalor yang diserap adalah:

$$h_{12} = (s_2 - s_1) T_1 \quad (\text{i})$$

Dimana h adalah enthalpi air atau uap, s adalah entropi dan T adalah temperatur.

Proses kedua

Selanjutnya uap kering berekspansi secara adiabatik. Tekanan dan temperatur turun masing-masing dari p_2 ke p_3 dan dari T_2 ke T_3 . Karena pada proses ini tidak ada kalor yang diberikan atau yang dikeluarkan maka tidak terjadi perubahan entropi. Ekspansi adiabatik ini digambarkan sebagai kurva 2-3 pada Gambar 10.1.

Proses ketiga

Uap basah selanjutnya dikompresi secara isothermal pada temperatur konstan (T_3) dan tekanan (p_3). Artinya temperatur T_3 sama dengan T_4 dan tekanan p_3 sama dengan p_4 . Proses ini diwakili oleh garis 3-4 pada Gambar 10.1.

Luas daerah $3ba4$ pada diagram $T-s$ mewakili besarnya kalor yang dilepaskan selama proses kompresi isothermal dan dapat dirumuskan dengan:

$$h_{34} = (s_3 - s_4) T_4 = (s_2 - s_1) T_3 \quad (\text{ii})$$

karena $s_3 = s_2$, $s_4 = s_1$ dan $T_3 = T_4$.

Proses keempat

Selanjutnya uap kering berkompresi secara adiabatik dan kembali ke titik awal 1. Tekanan dan temperatur naik masing-masing dari p_4 ke p_1 dan dari T_4 ke T_1 . Kompresi adiabatik ini digambarkan sebagai kurva 4-1 pada Gambar 10.1. Karena pada proses ini tidak ada kalor yang diberikan atau yang dikeluarkan maka tidak terjadi perubahan entropi.

Kerja yang dilakukan selama siklus:

= Panas yang diserap – panas yang dilepaskan

$$w = (s_2 - s_1) T_1 - (s_2 - s_1) T_3$$

$$w = (s_2 - s_1) (T_1 - T_3) \tag{10.1}$$

dan efisiensi siklus Carnot:

$$\eta_c = \frac{\text{Kerja}}{\text{Kalor yang diserap}}$$

$$\eta_c = \frac{(s_2 - s_1)(T_1 - T_3)}{(s_2 - s_1)T_1} = \frac{T_1 - T_3}{T_1} \tag{10.2}$$

atau:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_3}{T_1} \tag{10.3}$$

Catatan: 1. Ketika kalor diserap pada temperatur yang paling tinggi dan dilepaskan pada temperatur yang paling rendah maka siklus Carnot akan mempunyai nilai efisiensi maksimum.

2. Pada pembahasan di atas, temperatur diambil pada titik 1, 2, 3 dan 4. Tapi beberapa buku menentukan T_1 diantara titik 1 dan 2 dan T_2 diantara titik 3 dan 4. Dalam hal ini efisiensi dirumuskan dengan:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

3. Perlu dicatat bahwa adalah tidak mungkin membuat mesin uap yang bekerja mengikuti siklus Carnot. Alasan sederhananya adalah bahwa ekspansi isothermal 1-2 harus terjadi sangat lambat supaya temperatur uap selalu mempunyai

temperatur T_1 . Dengan alasan yang sama, kompresi isothermal 3-4 harus terjadi secepat mungkin. Sementara itu proses kompresi adiabatik 4-1 harus terjadi secepat mungkin supaya kondisi ideal adiabatik dapat dicapai. Namun seperti diketahui bahwa perubahan kecepatan secara tiba-tiba hampir tidak mungkin dilakukan oleh mesin pada kondisi nyata. Di sisi lain adalah tidak mungkin menghilangkan secara sempurna gesekan antar komponen yang bergerak di mesin, dan kerugian panas karena radiasi, dsb. Sehingga jelas bahwa tidaklah mungkin membuat sebuah mesin dengan siklus Carnot pada kondisi nyata. Walaupun begitu, mesin Carnot teoritis ini dapat digunakan sebagai siklus pembanding untuk mesin-mesin uap lainnya.

Contoh soal 10.1:

Sebuah pembangkit daya disuplai dengan uap jenuh kering pada tekanan 15 bar dan uap keluar pada tekanan 0,2 bar. Dengan menggunakan tabel uap, carilah efisiensi siklus Carnot.

Jawab:

Diketahui: $p_1 = 15$ bar; $p_2 = 0,2$ bar.

Dari tabel uap, pada tekanan 15 bar diperoleh:

$$T_1 = 198,3^{\circ} \text{C} = 198,3 + 273 = 471,3 \text{ K}$$

dan pada tekanan 0,2 bar:

$$T_3 = 60,06^{\circ} \text{C} = 60,06 + 273 = 333,06 \text{ K}$$

Efisiensi siklus

$$\begin{aligned} \eta_c &= \frac{T_1 - T_3}{T_1} = \frac{(471,3 - 333,06)}{471,3} = 0,293 \\ &= 29,3 \% \end{aligned}$$

Contoh soal 10.2:

Pada sebuah siklus Carnot, kalor diberikan pada 340°C dan dilepaskan pada 25°C . Fluida kerjanya adalah air, dimana ketika menerima kalor air menguap pada temperatur 340°C . Dari tabel uap diperoleh bahwa perubahan entropi proses ini adalah $1,6763 \text{ kJ/kg.K}$. Jika siklus beroperasi pada massa konstan 1 kg air, carilah

kalor yang diberikan, kerja yang dihasilkan dan kalor yang dilepas dari siklus. Dan berapakah tekanan air selama menerima kalor.

Jawab:

Diketahui: $T_1 = 340^\circ \text{C} + 273 = 613 \text{ K}$; $T_3 = 25^\circ + 273 = 298 \text{ K}$; $s_2 - s_1 = 1,6763 \text{ kJ/kg.K}$.

Kalor yang diberikan ke siklus

$$\begin{aligned} h_{12} &= (s_2 - s_1) T_1 \\ &= 1,6763 \times 613 = 1.027,57 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Kerja yang dihasilkan siklus

$$\begin{aligned} w &= (s_2 - s_1) (T_1 - T_3) \\ &= 1,6763 \times (613 - 298) = 528,03 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Kalor yang dilepas siklus

$$\begin{aligned} h_{34} &= (s_2 - s_1) T_3 \\ &= 1,673 \times 298 = 499,54 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Tekanan air selama menerima kalor

Tekanan air selama menerima kalor adalah proses pembentukan uap pada tekanan 340°C . Dari tabel uap, pada temperatur 340°C tekanannya adalah 145,9 bar.

10.2 Siklus Rankine

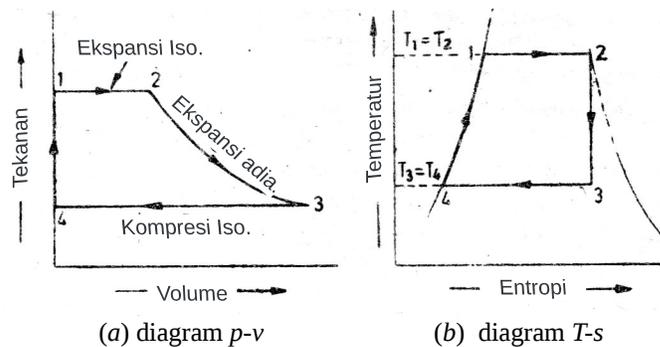
Siklus Rankine merupakan modifikasi dari siklus Carnot. Langkah kompresi isothermal pada siklus Carnot, pada siklus ini dilanjutkan hingga uap berubah menjadi air. Diagram $p-v$ dan $T-s$ dari siklus Rankine ditunjukkan oleh Gambar 10.2.

Misalkan 1 kg air dengan tekanan p_1 dan T_1 , yang ditunjukkan oleh titik 1 pada Gambar 10.2, mengalami siklus Rankine yang terdiri dari 4 tahapan proses yang dijelaskan berikut ini.

Proses pertama

Pada tahapan ini fluida mengalami proses ekspansi isothermal dimana pada gambar ditunjukkan oleh kurva 1-2. Kondisi uap pada titik 2 adalah kering dan tekanan serta temperaturnya sama dengan titik 1. Kalor yang diserap selama proses ini digunakan oleh air untuk merubah fasenya menjadi uap dan besar kalornya adalah sebesar kalor laten, sehingga:

$$h_{12} = h_{fg2} = h_2 - h_1 \quad (10.4)$$



Gambar 10.2. Siklus Rankine

Proses kedua

Pada tahapan ini proses yang terjadi adalah proses ekspansi adiabatik. Proses ini pada gambar terjadi pada titik 2-3. Tekanan dan temperatur turun masing-masing dari p_2 ke p_3 dan dari T_2 ke T_3 dengan kekeringan uap x_3 . Karena pada proses ini tidak ada kalor yang diberikan atau yang dikeluarkan maka tidak terjadi perubahan entropi.

Proses ketiga

Proses pada tahapan ketiga adalah kompresi isothermal, dan ditandai dengan titik 3-4 pada gambar. Uap basah di titik 3 dikompresi secara isothermal pada temperatur konstan (T_3) dan tekanan konstan (p_3) hingga terkondensasi menjadi air. Dalam proses ini temperatur T_4 sama dengan T_3 dan tekanan p_4 sama dengan p_3 . Kalor yang dilepaskan oleh uap adalah kalor laten dimana:

$$h_{34} = x_3 \cdot h_{fg3} = h_3 - h_4 \quad (10.5)$$

Proses keempat

Proses pada tahapan ini adalah proses pemanasan. Pada Gambar 10.2 proses ini diwakili oleh titik 4-1. Pada tahapan ini air dipanaskan pada volume konstan dari temperatur T_4 ke T_1 . Tekanan air meningkat dari p_4 ke p_1 . Kalor yang diserap oleh air dalam proses ini sama dengan besarnya kalor nyata/sensibel ke tekanan p_1 , yaitu sama dengan kalor nyata pada titik 1 dikurangi dengan kalor nyata pada titik 4, yaitu:

$$h_{41} = h_1 - h_4 \quad (10.6)$$

Kalor sensibel pada titik 4 adalah sama dengan kalor sensibel pada titik 3, sehingga persamaan 10.6 dapat ditulis dengan:

$$h_{41} = h_1 - h_3$$

Jadi, kalor yang diserap selama siklus adalah:

= kalor yang diserap selama proses ekspansi isotermal + kalor yang diserap selama proses pemanasan.

Atau:

$$\begin{aligned} h_{42} &= h_{12} + h_{41} = (h_2 - h_1) + (h_1 - h_4) \\ &= h_2 - h_4 \end{aligned} \quad (10.7)$$

Kalor yang dilepas selama siklus:

$$h_{34} = h_3 - h_4 \quad (10.8)$$

Kerja siklus adalah:

= kalor yang diserap – kalor yang dilepas

$$\begin{aligned} w &= h_{42} - h_{34} \\ &= (h_2 - h_4) - (h_3 - h_4) \\ &= h_2 - h_3 \end{aligned} \quad (10.9)$$

Efisiensi Rankine:

$$\eta_R = \frac{\text{Kerja yang dilakukan}}{\text{Kalor yang diserap}}$$

$$\eta_R = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_4} \quad (10.10)$$

Catatan: Jika proses ekspansi 2-3 tidak adiabatik dan mengikuti hukum $pv^n = \text{konstan}$, maka kerja selama proses tidak sama dengan $h_2 - h_3$. Kerja dalam hal ini adalah:

$$w = \frac{n(p_2 v_2 - p_3 v_3)}{n-1} \quad (10.11)$$

Contoh soal 10.2:

Sebuah pembangkit daya uap dengan siklus Rankine sederhana beroperasi diantara temperatur 260°C dan 95°C . Uap disuplai ke turbin dalam keadaan kering jenuh. Di dalam turbin, uap berekspansi dengan cara isentropik. Carilah efisiensi siklus Rankine dari turbin dan efisiensi siklus Carnot yang beroperasi diantara dua batas temperatur ini. Gambarkanlah siklus turbin pada diagram h - s dan T - s .

Jawab:

Diketahui: $T_1 = T_2 = 260^\circ + 273 = 533 \text{ K}$; $T_3 = T_4 = 95^\circ + 273 = 368 \text{ K}$;

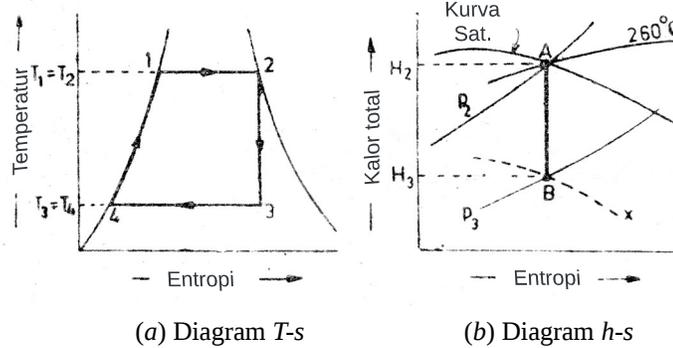
Dari tabel uap, $T_1 = 260^\circ \text{C}$ terletak antara tekanan 45,0 bar dan 50,0 bar, yaitu:

- 45 bar: $T_{45} = 257,5^\circ \text{C}$
- 50 bar: $T_{50} = 264,0^\circ \text{C}$

Dengan cara interpolasi diperoleh:

$$\begin{aligned} p_2 &= 45 \text{ bar} + \frac{(T_1 - T_{45})}{(T_{50} - T_{45})} (50 \text{ bar} - 45 \text{ bar}) \\ &= 45 \text{ bar} + \frac{260 - 257,5}{264,0 - 257,5} (50 \text{ bar} - 45 \text{ bar}) \\ &= 45 + 1,92 = 46,92 \text{ bar} \end{aligned}$$

Dari tabel uap, untuk $T_3 = 95^\circ \text{C}$, diperoleh $p_3 = 0,8455 \text{ bar}$.



Gambar 10.3.

Kondisi uap diawal dan diakhir siklus ditunjukkan oleh Gambar 10.3 (a) dan (b). Dari grafik Mollier diperoleh:

$$h_2 = 2800 \text{ kJ/kg} \text{ dan } h_3 = 2170 \text{ kJ/kg}$$

Dari tabel uap, pada $T_4 = 95^\circ \text{C}$, diperoleh $h_4 = 397,96 \text{ kJ/kg}$.

Efisiensi siklus Rankine

$$\begin{aligned} \eta_R &= \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_4} \\ &= \frac{2800 - 2170}{2800 - 397,96} = 0,262 = 26,2 \% \end{aligned}$$

Efisiensi siklus Carnot

$$\begin{aligned} \eta_C &= \frac{T_1 - T_3}{T_3} \\ &= \frac{533 - 368}{368} = 0,3096 = 30,96 \% \end{aligned}$$

Contoh soal 10.3:

Sebuah pembangkit daya disuplai dengan uap jenuh kering pada tekanan 12 bar dan keluar ke kondenser dengan tekanan 0,1 bar. Hitunglah efisiensi Rankine dengan menggunakan (i) tabel uap, (ii) Diagram Mollier.

Jawab:

Diketahui: $p_2 = 12$ bar; $p_3 = 0,1$ bar.

Menggunakan tabel uap

Dari tabel uap, pada tekanan 12 bar untuk titik 2 diperoleh $h_2 = 2783,74$ kJ/kg ; $s_2 = 6,5297$.

Dan pada tekanan 0,1 bar diperoleh:

$$h_4 = 191,83 \text{ kJ/kg} ; h_{fg3} = 2392,8 \text{ kJ/kg}$$

$$s_4 = 0,6493 ; T_3 = 45,81^0 \text{ C} + 273 = 318,81 \text{ K}$$

Pertama-tama dicari besarnya fraksi kekeringan uap pada titik 3 (x_3). Pada ekspansi adiabatik:

Entropi sebelum ekspansi = Entropi setelah ekspansi

$$s_2 = s_3 = s_4 + \frac{x_3 \cdot h_{fg3}}{T_3}$$

$$6,5297 = 0,6493 + \frac{x_3 \cdot 2392,8}{318,81}$$

$$6,5297 = 0,6493 + 7,505 x_3$$

$$x_3 = 0,784$$

Kalor total setelah ekspansi:

$$\begin{aligned} h_3 &= h_4 + x_3 \cdot h_{fg3} \\ &= 191,83 + 0,784 \times 2392,8 \\ &= 2067,79 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Efisiensi siklus:

$$\begin{aligned} \eta_R &= \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_4} \\ &= \frac{2783,74 - 2067,79}{2783,74 - 191,83} = 0,276 = 27,6 \% \end{aligned}$$

Menggunakan diagram Mollier

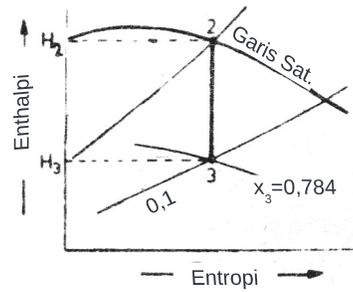
Dari Gambar 10.4, kondisi awal uap ditandai dengan titik 2 dan kondisi akhir

ditandai dengan titik 3. Dari diagram Mollier ini diperoleh:

$$h_2 = 2782 \text{ kJ/kg}; h_3 = 2064 \text{ kJ/kg}; \text{ dan } h_4 = 191,83 \text{ kJ/kg (dari tabel uap)}$$

Efisiensi siklus:

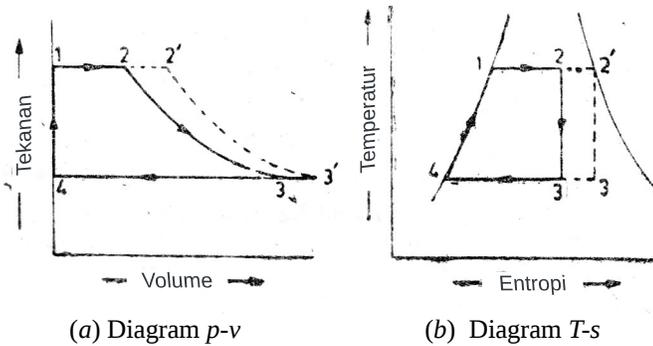
$$\eta_R = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_4} = \frac{2782 - 2064}{2782 - 191,83} = 0,277 = 27,7 \%$$



Gambar 10.4.

10.3 Siklus Rankine Dengan Penguapan Tidak Sempurna

Pada siklus Rankine, air dipanaskan sampai menjadi uap jenuh kering pada temperatur dan tekanan konstan. Tetapi kadang-kadang uap yang terbentuk tidak kering tetapi berbentuk uap basah dengan fraksi kekeringan tertentu, katakanlah x_1 . Kondisi seperti ini ditunjukkan oleh Gambar 10.5 (a) dan (b).



Gambar 10.5. Siklus Rankine dengan penguapan tak sempurna.

Dari Gambar 10.5, kurva 1-2-3-4 merupakan siklus Rankine dengan penguapan tidak sempurna, sementara 1-2'-3'-4 mewakili siklus Rankine dengan penguapan sempurna. Untuk siklus Rankine dengan penguapan tidak sempurna, kalor yang diserap selama ekspansi isothermal adalah:

$$h_{12} = x_1 \cdot h_{fg2}. \tag{10.12}$$

Contoh soal 10.4:

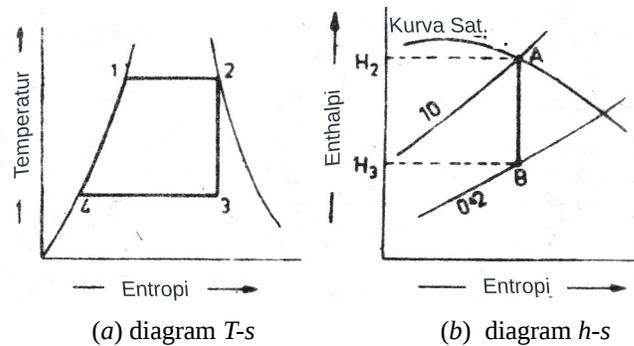
Uap jenuh kering pada tekanan 10 bar disuplai ke penggerak utama dan keluar pada tekanan 0,2 bar. Carilah efisiensi Rankine dan rasio efisiensi penggerak mula jika efisiensi termal indikated 20%.

Cari juga perubahan persentase efisiensi Rankine jika uap pada kondisi awal mempunyai kekeringan 90%.

Jawab:

Diketahui: $p_2 = 10 \text{ bar}$; $p_3 = 0,2 \text{ bar}$; efisiensi termal indikated = 20% = 0,2

Efisiensi Rankine



Gambar 10.6.

Kondisi awal dan akhir uap ditunjukkan oleh Gambar 10.6 (a) dan (b). Dari grafik Mollier diperoleh:

$$h_2 = 2778 \text{ kcal/kg} ; \text{ dan } h_3 = 2160 \text{ kJ/kg}$$

Dari tabel uap, pada tekanan 0,2 kg/cm² (0,2 bar) diperoleh nilai kalor air: $h_4 = h_f = 251,4 \text{ kJ/kg}$

Sehingga:

$$\begin{aligned} \eta_R &= \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_4} \\ &= \frac{2778 - 2160}{2778 - 251,4} = 0,244 = 24,4 \% \end{aligned}$$

Rasio efisiensi

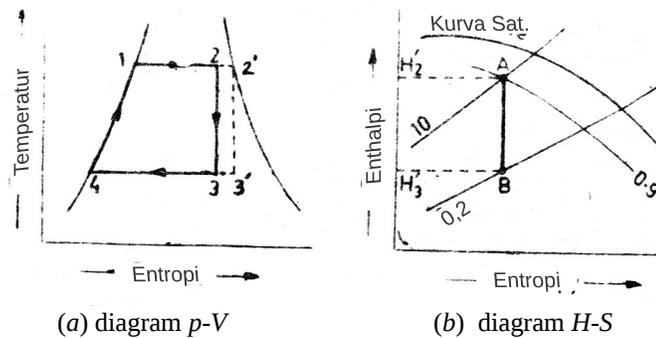
Rasio efisiensi

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{Efisiensi termal indikated}}{\text{Efisiensi Rankine}} \\
 &= \frac{0,20}{0,244} = 0,769 = 76,9 \text{ \%}
 \end{aligned}$$

Perubahan persentase efisiensi Rankine jika kondisi awal uap 90% kering.

Kondisi awal dan akhir uap ditunjukkan oleh Gambar 10.7 (a) dan (b). Dari diagram Mollier diperoleh:

$$h_2 = 2574 \text{ kJ/kg ; dan } h_3 = 2018 \text{ kJ/kg}$$



Gambar 10.7.

Efisiensi siklus:

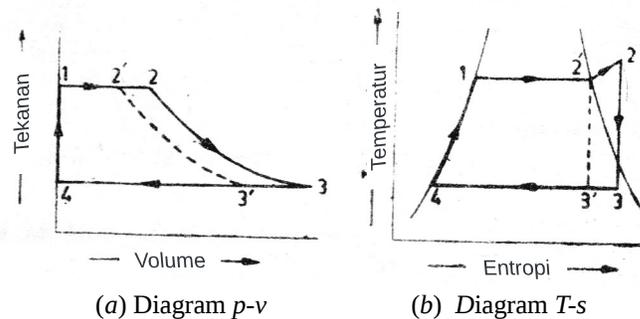
$$\begin{aligned}
 \eta'_{R} &= \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_4} \\
 &= \frac{2574 - 2018}{2574 - 251,4} = 0,24 = 24 \text{ \%}
 \end{aligned}$$

Perubahan persentase efisiensi Rankine:

$$\begin{aligned}
 \eta'_{R} &= \frac{\eta_R - \eta'_{R}}{\eta_R} \\
 &= \frac{24,4 - 24}{24,4} \times 100 = 1,64 \text{ \% (turun)}
 \end{aligned}$$

10.4 Siklus Rankine Dengan Sistem Panas Lanjut

Seperti yang telah dibahas sebelumnya bahwa uap yang diproduksi dapat berupa uap basah atau uap kering jenuh. Jika uap kering jenuh dipanaskan lebih lanjut maka akan dihasilkan uap panas lanjut. Ketika uap panas lanjut mengalami proses ekspansi adiabatik, proses ini dapat digambar dalam diagram $p-v$ dan $T-s$ seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 10.8 (a) dan (b).



Gambar 10.8. Siklus Rankine dengan uap panas lanjut.

Dari Gambar 10.8, kurva 1-2-3-4 mewakili siklus Rankine dengan uap panas lanjut, sementara kurva 1-2'-3'-4 mewakili siklus Rankine dengan penguapan sempurna. Kalor yang diserap pada siklus Rankine dengan uap panas lanjut selama ekspansi isothermal adalah:

$$h_{12} = h_2 - h_1 = h_{fg} + C_p (T_{sup} - T_2) \quad (10.13)$$

Contoh soal 10.5:

Sebuah turbin uap menerima uap air pada tekanan 15 bar dan temperatur 320°C , dan keluar ke kondenser pada tekanan 0,06 bar. Carilah efisiensi termal dari siklus Rankine ideal yang beroperasi diantara kedua batas tersebut.

Jawab:

Diketahui: $p_2 = 15$ bar; $p_3 = 0,06$ bar; $T_{sup} = 320^\circ\text{C} = 593$ K.

Dari tabel uap (uap panas lanjut), pada tekanan 15 bar dan 320°C diperoleh:

$$s_2 = s_{sup} = 6,9938; \quad h_2 = h_{sup} = 3081,9 \text{ kJ/kg}$$

dan pada tekanan 0,06 bar diperoleh:

$$s_4 = s_f = 0,521 ; T_3 = 36,16^{\circ} \text{C} + 273 = 309,16 \text{ K}$$

$$h_4 = 151,53 \text{ kJ/kg} ; h_{fg3} = 2415,9 \text{ kJ/kg}$$

Pertama-tama dicari fraksi kekeringan uap pada titik 3 (x_3).

$$s_3 = s_4 + \frac{x_3 \cdot h_{fg3}}{T_3}$$

$s_3 = s_2 = 6,9938$, sehingga:

$$6,9938 = 0,521 + \frac{x_3 \times 2415,9}{309,16}$$

$$6,9938 = 0,521 + 7,81 x_3$$

$$x_3 = 0,829$$

Kalor di titik 3:

$$\begin{aligned} h_3 &= h_4 + x_3 h_{fg3} = 151,53 + 0,829 (2415,9) \\ &= 2154,3 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Efisiensi siklus:

$$\begin{aligned} \eta_R &= \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_4} \\ &= \frac{3081,9 - 2154,3}{3081,9 - 151,53} = 0,316 = 31,6 \% \end{aligned}$$

Soal-soal

1. Sebuah mesin Carnot yang bekerja diantara batas tekanan 35 bar dan 0,7 bar. Carilah kerja yang dilakukan per kg uap dan efisiensi termal mesin. (Jawab: 519,32 kJ/kg; 29,6%)
2. Carilah efisiensi termal sebuah mesin yang beroperasi mengikuti siklus Rankine bila tekanan dai suplai uap adalah 6 bar dan kekeringan 0,9. Tekanan balik adalah 0,7 bar. (Jawab: 15,4%)
3. Sebuah ketel uap mensuplai uap jenuh kering ke pusat pembangkit tenaga uap pada tekanan 12,5 bar. Tekanan balik adalah 0,2 bar. Carilah efisiensi pembangkit jika beroperasi mengikuti siklus Rankine dengan menggunakan:
 - a. Hanya tabel uap
 - b. Diagram Mollier (Jawab: 25,6%)
4. Uap disuplai ke sebuah mesin Rankine pada tekanan 21 bar dengan temperatur 110°C dan panas lanjut. Tekanan balik adalah 0,20 bar. Carilah:
 - a. Efisiensi Rankine
 - b. Volume uap yang masuk/jam, jika uap disuplai sebesar 100 kg/h. (Jawab: 29%; $0,1835\text{ m}^3$)
5. Sebuah penggerak mula menerima uap pada tekanan 40 bar dan uap keluar ke kondenser pada 0,05 bar. Carilah efisiensi siklus Rankine. (Jawab: 35,6%)

DAFTAR PUSTAKA

1. Moran, M.J., H.N. Shapiro. *Fundamentals Of Engineering Thermodynamics.*, 2th edition. John Wiley and Son, 1993.
2. Moran, M.J., H.N. Shapiro, D.D. Boetner, M.B. Bailey. *Fundamentals Of Engineering Thermodynamics.*, 8th edition. John Wiley and Son, 2014.
3. Khurmi, R.S. *A Text Book of Mechanical Technology, Thermal Engineering.* S. Chand & Company LTD, 1995.
4. Abbott M.M., HC. Van Ness, *Theory and problems of Thermodynamics*, Schaum's Outline Series McGraw-Hill International Book Company, 1981.

LAMPIRAN

TABEL A-1. Berat atom atau molekul dan sifat-sifat kritis beberapa unsur dan senyawa umum

Substance	Chemical formula	M	T_c , K	p_c , bars	$Z_c = \frac{p_c v_c}{RT_c}$
Acetylene	C ₂ H ₂	26.04	309	62.8	0.274
Air (equivalent)	—	28.97	133	37.7	0.284
Ammonia	NH ₃	17.04	406	112.8	0.242
Argon	Ar	39.94	151	48.6	0.290
Benzene	C ₆ H ₆	78.11	563	49.3	0.274
Butane	C ₄ H ₁₀	58.12	425	38.0	0.274
Carbon	C	12.01	—	—	—
Carbon dioxide	CO ₂	44.01	304	73.9	0.276
Carbon monoxide	CO	28.01	133	35.0	0.294
Copper	Cu	63.54	—	—	—
Ethane	C ₂ H ₆	30.07	305	48.8	0.285
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH	46.07	516	63.8	0.249
Ethylene	C ₂ H ₄	28.05	283	51.2	0.270
Helium	He	4.003	5.2	2.3	0.300
Hydrogen	H ₂	2.018	33.2	13.0	0.304
Methane	CH ₄	16.04	191	46.4	0.290
Methyl alcohol	CH ₃ OH	32.05	513	79.5	0.220
Nitrogen	N ₂	28.01	126	33.9	0.291
Octane	C ₈ H ₁₈	114.22	569	24.9	0.258
Oxygen	O ₂	32.00	154	50.5	0.290
Propane	C ₃ H ₈	44.09	370	42.7	0.276
Propylene	C ₃ H ₆	42.08	365	46.2	0.276
Refrigerant 12	CCl ₂ F ₂	120.92	385	41.2	0.278
Refrigerant 134a	CF ₃ CH ₂ F	102.03	374	40.7	0.260
Sulfur dioxide	SO ₂	64.06	431	78.7	0.268
Water	H ₂ O	18.02	647.3	220.9	0.233

Source: Adapted from *International Critical Tables* and L. C. Nelson and E. F. Obert, Generalized Compressibility Charts, *Chem. Eng.*, 61: 203 (1954).

TABEL A-2. Sifat-sifat air jenuh (Cairan-Uap): Tabel Temperatur

Temp. °C	Press. bars	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
.01	0.00611	1.0002	206.136	0.00	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	.01
4	0.00813	1.0001	157.232	16.77	2380.9	16.78	2491.9	2508.7	0.0610	9.0514	4
5	0.00872	1.0001	147.120	20.97	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	9.0257	5
6	0.00935	1.0001	137.734	25.19	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003	6
8	0.01072	1.0002	120.917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.1	0.1212	8.9501	8
10	0.01228	1.0004	106.379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008	10
11	0.01312	1.0004	99.857	46.20	2390.5	46.20	2475.4	2521.6	0.1658	8.8765	11
12	0.01402	1.0005	93.784	50.41	2391.9	50.41	2473.0	2523.4	0.1806	8.8524	12
13	0.01497	1.0007	88.124	54.60	2393.3	54.60	2470.7	2525.3	0.1953	8.8285	13
14	0.01598	1.0008	82.848	58.79	2394.7	58.80	2468.3	2527.1	0.2099	8.8048	14
15	0.01705	1.0009	77.926	62.99	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.7814	15
16	0.01818	1.0011	73.333	67.18	2397.4	67.19	2463.6	2530.8	0.2390	8.7582	16
17	0.01938	1.0012	69.044	71.38	2398.8	71.38	2461.2	2532.6	0.2535	8.7351	17
18	0.02064	1.0014	65.038	75.57	2400.2	75.58	2458.8	2534.4	0.2679	8.7123	18
19	0.02198	1.0016	61.293	79.76	2401.6	79.77	2456.5	2536.2	0.2823	8.6897	19
20	0.02339	1.0018	57.791	83.95	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.6672	20
21	0.02487	1.0020	54.514	88.14	2404.3	88.14	2451.8	2539.9	0.3109	8.6450	21
22	0.02645	1.0022	51.447	92.32	2405.7	92.33	2449.4	2541.7	0.3251	8.6229	22
23	0.02810	1.0024	48.574	96.51	2407.0	96.52	2447.0	2543.5	0.3393	8.6011	23
24	0.02985	1.0027	45.883	100.70	2408.4	100.70	2444.7	2545.4	0.3534	8.5794	24
25	0.03169	1.0029	43.360	104.88	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.5580	25
26	0.03363	1.0032	40.994	109.06	2411.1	109.07	2439.9	2549.0	0.3814	8.5367	26
27	0.03567	1.0035	38.774	113.25	2412.5	113.25	2437.6	2550.8	0.3954	8.5156	27
28	0.03782	1.0037	36.690	117.42	2413.9	117.43	2435.2	2552.6	0.4093	8.4946	28
29	0.04008	1.0040	34.733	121.60	2415.2	121.61	2432.8	2554.5	0.4231	8.4739	29
30	0.04246	1.0043	32.894	125.78	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.4533	30
31	0.04496	1.0046	31.165	129.96	2418.0	129.97	2428.1	2558.1	0.4507	8.4329	31
32	0.04759	1.0050	29.540	134.14	2419.3	134.15	2425.7	2559.9	0.4644	8.4127	32
33	0.05034	1.0053	28.011	138.32	2420.7	138.33	2423.4	2561.7	0.4781	8.3927	33
34	0.05324	1.0056	26.571	142.50	2422.0	142.50	2421.0	2563.5	0.4917	8.3728	34
35	0.05628	1.0060	25.216	146.67	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	8.3531	35
36	0.05947	1.0063	23.940	150.85	2424.7	150.86	2416.2	2567.1	0.5188	8.3336	36
38	0.06632	1.0071	21.602	159.20	2427.4	159.21	2411.5	2570.7	0.5458	8.2950	38
40	0.07384	1.0078	19.523	167.56	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	8.2570	40
45	0.09593	1.0099	15.258	188.44	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	8.1648	45

TABEL A-2 (Lanjutan)

H ₂ O	Temp. °C	Press. bars	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
			Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
			50	.1235	1.0121	12.032	209.32	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	
55	.1576	1.0146	9.568	230.21	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.9913	55	
60	.1994	1.0172	7.671	251.11	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.9096	60	
65	.2503	1.0199	6.197	272.02	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	7.8310	65	
70	.3119	1.0228	5.042	292.95	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	7.7553	70	
75	.3858	1.0259	4.131	313.90	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	7.6824	75	
80	.4739	1.0291	3.407	334.86	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	7.6122	80	
85	.5783	1.0325	2.828	355.84	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	7.5445	85	
90	.7014	1.0360	2.361	376.85	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	7.4791	90	
95	.8455	1.0397	1.982	397.88	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	7.4159	95	
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100	
110	1.433	1.0516	1.210	461.14	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	7.2387	110	
120	1.985	1.0603	0.8919	503.50	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	7.1296	120	
130	2.701	1.0697	0.6685	546.02	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	7.0269	130	
140	3.613	1.0797	0.5089	588.74	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	6.9299	140	
150	4.758	1.0905	0.3928	631.68	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	6.8379	150	
160	6.178	1.1020	0.3071	674.86	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	6.7502	160	
170	7.917	1.1143	0.2428	718.33	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	6.6663	170	
180	10.02	1.1274	0.1941	762.09	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	6.5857	180	
190	12.54	1.1414	0.1565	806.19	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	6.5079	190	
200	15.54	1.1565	0.1274	850.65	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	6.4323	200	
210	19.06	1.1726	0.1044	895.53	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	6.3585	210	
220	23.18	1.1900	0.08619	940.87	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	6.2861	220	
230	27.95	1.2088	0.07158	986.74	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	6.2146	230	
240	33.44	1.2291	0.05976	1033.2	2604.0	1037.3	1766.5	2803.8	2.7015	6.1437	240	
250	39.73	1.2512	0.05013	1080.4	2602.4	1085.4	1716.2	2801.5	2.7927	6.0730	250	
260	46.88	1.2755	0.04221	1128.4	2599.0	1134.4	1662.5	2796.6	2.8838	6.0019	260	
270	54.99	1.3023	0.03564	1177.4	2593.7	1184.5	1605.2	2789.7	2.9751	5.9301	270	
280	64.12	1.3321	0.03017	1227.5	2586.1	1236.0	1543.6	2779.6	3.0668	5.8571	280	
290	74.36	1.3656	0.02557	1278.9	2576.0	1289.1	1477.1	2766.2	3.1594	5.7821	290	
300	85.81	1.4036	0.02167	1332.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	5.7045	300	
320	112.7	1.4988	0.01549	1444.6	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	5.5362	320	
340	145.9	1.6379	0.01080	1570.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	5.3357	340	
360	186.5	1.8925	0.006945	1725.2	2351.5	1760.5	720.5	2481.0	3.9147	5.0526	360	
374.14	220.9	3.155	0.003155	2029.6	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	4.4298	374.14	

Source: Tables A-2 through A-5 are adapted from K. Wark, *Thermodynamics*, 4th ed., McGraw-Hill, New York, 1983, as extracted from J. H. Keenan, F. G. Keyes, P. G. Hill, and J. G. Moore, *Steam Tables*, Wiley, New York, 1969.

TABEL A-3. Sifat-sifat air jenuh (Cairan-Uap): Tabel Tekanan

Press. bars	Temp. °C	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Press. bars
		Sat. Liquid v _f × 10 ³	Sat. Vapor v _g	Sat. Liquid u _f	Sat. Vapor u _g	Sat. Liquid h _f	Evap. h _{fg}	Sat. Vapor h _g	Sat. Liquid s _f	Sat. Vapor s _g	
0.04	28.96	1.0040	34.800	121.45	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746	0.04
0.06	36.16	1.0064	23.739	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304	0.06
0.08	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2403.1	2577.0	0.5926	8.2287	0.08
0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	8.1502	0.10
0.20	60.06	1.0172	7.649	251.38	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.9085	0.20
0.30	69.10	1.0223	5.229	289.20	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	7.7686	0.30
0.40	75.87	1.0265	3.993	317.53	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	7.6700	0.40
0.50	81.33	1.0300	3.240	340.44	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	7.5939	0.50
0.60	85.94	1.0331	2.732	359.79	2489.6	359.86	2293.6	2653.5	1.1453	7.5320	0.60
0.70	89.95	1.0360	2.365	376.63	2494.5	376.70	2283.3	2660.0	1.1919	7.4797	0.70
0.80	93.50	1.0380	2.087	391.58	2498.8	391.66	2274.1	2665.8	1.2329	7.4346	0.80
0.90	96.71	1.0410	1.869	405.06	2502.6	405.15	2265.7	2670.9	1.2695	7.3949	0.90
1.00	99.63	1.0432	1.694	417.36	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	7.3594	1.00
1.50	111.4	1.0528	1.159	466.94	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	7.2233	1.50
2.00	120.2	1.0605	0.8857	504.49	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	7.1271	2.00
2.50	127.4	1.0672	0.7187	535.10	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	7.0527	2.50
3.00	133.6	1.0732	0.6058	561.15	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	6.9919	3.00
3.50	138.9	1.0786	0.5243	583.95	2546.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	6.9405	3.50
4.00	143.6	1.0836	0.4625	604.31	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	6.8959	4.00
4.50	147.9	1.0882	0.4140	622.25	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	6.8565	4.50
5.00	151.9	1.0926	0.3749	639.68	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	6.8212	5.00
6.00	158.9	1.1006	0.3157	669.90	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	6.7600	6.00
7.00	165.0	1.1080	0.2729	696.44	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	6.7080	7.00
8.00	170.4	1.1148	0.2404	720.22	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	6.6628	8.00
9.00	175.4	1.1212	0.2150	741.83	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	6.6226	9.00
10.0	179.9	1.1273	0.1944	761.68	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	6.5863	10.0
15.0	198.3	1.1539	0.1318	843.16	2594.5	844.84	1947.3	2792.2	2.3150	6.4448	15.0
20.0	212.4	1.1767	0.09963	906.44	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	6.3409	20.0
25.0	224.0	1.1973	0.07998	959.11	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	6.2575	25.0
30.0	233.9	1.2165	0.06668	1004.8	2604.1	1008.4	1795.7	2804.2	2.6457	6.1869	30.0
35.0	242.6	1.2347	0.05707	1045.4	2603.7	1049.8	1753.7	2803.4	2.7253	6.1253	35.0
40.0	250.4	1.2522	0.04978	1082.3	2602.3	1087.3	1714.1	2801.4	2.7964	6.0701	40.0
45.0	257.5	1.2692	0.04406	1116.2	2600.1	1121.9	1676.4	2798.3	2.8610	6.0199	45.0
50.0	264.0	1.2859	0.03944	1147.8	2597.1	1154.2	1640.1	2794.3	2.9202	5.9734	50.0
60.0	275.6	1.3187	0.03244	1205.4	2589.7	1213.4	1571.0	2784.3	3.0267	5.8892	60.0
70.0	285.9	1.3513	0.02737	1257.6	2580.5	1267.0	1505.1	2772.1	3.1211	5.8133	70.0
80.0	295.1	1.3842	0.02352	1305.6	2569.8	1316.6	1441.3	2758.0	3.2068	5.7432	80.0
90.0	303.4	1.4178	0.02048	1350.5	2557.8	1363.3	1378.9	2742.1	3.2858	5.6772	90.0
100.	311.1	1.4524	0.01803	1393.0	2544.4	1407.6	1317.1	2724.7	3.3596	5.6141	100.
110.	318.2	1.4886	0.01599	1433.7	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	5.5527	110.

H₂O

TABEL A-3 (Lanjutan)

H ₂ O	Press. bars	Temp. °C	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Press. bars
			Sat. Liquid v _f × 10 ³	Sat. Vapor v _g	Sat. Liquid u _f	Sat. Vapor u _g	Sat. Liquid h _f	Evap. h _{fg}	Sat. Vapor h _g	Sat. Liquid s _f	Sat. Vapor s _g	
	120.	324.8	1.5267	0.01426	1473.0	2513.7	1491.3	1193.6	2684.9	3.4962	5.4924	120.
	130.	330.9	1.5671	0.01278	1511.1	2496.1	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	5.4323	130.
	140.	336.8	1.6107	0.01149	1548.6	2476.8	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	5.3717	140.
	150.	342.2	1.6581	0.01034	1585.6	2455.5	1610.5	1000.0	2610.5	3.6848	5.3098	150.
	160.	347.4	1.7107	0.009306	1622.7	2431.7	1650.1	930.6	2580.6	3.7461	5.2455	160.
	170.	352.4	1.7702	0.008364	1660.2	2405.0	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	5.1777	170.
	180.	357.1	1.8397	0.007489	1698.9	2374.3	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	5.1044	180.
	190.	361.5	1.9243	0.006657	1739.9	2338.1	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	5.0228	190.
	200.	365.8	2.036	0.005834	1785.6	2293.0	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	4.9269	200.
	220.9	374.1	3.155	0.003155	2029.6	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	4.4298	220.9

TABEL A-4. Sifat-sifat Uap Air Panas Lanjut

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 0.06 \text{ bar} = 0.006 \text{ MPa}$ $(T_{\text{sat}} = 36.16^\circ\text{C})$				$p = 0.35 \text{ bar} = 0.035 \text{ MPa}$ $(T_{\text{sat}} = 72.69^\circ\text{C})$				
Sat.	23.739	2425.0	2567.4	8.3304	4.526	2473.0	2631.4	7.7158
80	27.132	2487.3	2650.1	8.5804	4.625	2483.7	2645.6	7.7564
120	30.219	2544.7	2726.0	8.7840	5.163	2542.4	2723.1	7.9644
160	33.302	2602.7	2802.5	8.9693	5.696	2601.2	2800.6	8.1519
200	36.383	2661.4	2879.7	9.1398	6.228	2660.4	2878.4	8.3237
240	39.462	2721.0	2957.8	9.2982	6.758	2720.3	2956.8	8.4828
280	42.540	2781.5	3036.8	9.4464	7.287	2780.9	3036.0	8.6314
320	45.618	2843.0	3116.7	9.5859	7.815	2842.5	3116.1	8.7712
360	48.696	2905.5	3197.7	9.7180	8.344	2905.1	3197.1	8.9034
400	51.774	2969.0	3279.6	9.8435	8.872	2968.6	3279.2	9.0291
440	54.851	3033.5	3362.6	9.9633	9.400	3033.2	3362.2	9.1490
500	59.467	3132.3	3489.1	10.1336	10.192	3132.1	3488.8	9.3194
$p = 0.70 \text{ bar} = 0.07 \text{ MPa}$ $(T_{\text{sat}} = 89.95^\circ\text{C})$				$p = 1.0 \text{ bar} = 0.10 \text{ MPa}$ $(T_{\text{sat}} = 99.63^\circ\text{C})$				
Sat.	2.365	2494.5	2660.0	7.4797	1.694	2506.1	2675.5	7.3594
100	2.434	2509.7	2680.0	7.5341	1.696	2506.7	2676.2	7.3614
120	2.571	2539.7	2719.6	7.6375	1.793	2537.3	2716.6	7.4668
160	2.841	2599.4	2798.2	7.8279	1.984	2597.8	2796.2	7.6597
200	3.108	2659.1	2876.7	8.0012	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
240	3.374	2719.3	2955.5	8.1611	2.359	2718.5	2954.5	7.9949
280	3.640	2780.2	3035.0	8.3162	2.546	2779.6	3034.2	8.1445
320	3.905	2842.0	3115.3	8.4504	2.732	2841.5	3114.6	8.2849
360	4.170	2904.6	3196.5	8.5828	2.917	2904.2	3195.9	8.4175
400	4.434	2968.2	3278.6	8.7086	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
440	4.698	3032.9	3361.8	8.8286	3.288	3032.6	3361.4	8.6636
500	5.095	3131.8	3488.5	8.9991	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
$p = 1.5 \text{ bars} = 0.15 \text{ MPa}$ $(T_{\text{sat}} = 111.37^\circ\text{C})$				$p = 3.0 \text{ bars} = 0.30 \text{ MPa}$ $(T_{\text{sat}} = 133.55^\circ\text{C})$				
Sat.	1.159	2519.7	2693.6	7.2233	0.606	2543.6	2725.3	6.9919
120	1.188	2533.3	2711.4	7.2693	0.651	2587.1	2782.3	7.1276
160	1.317	2595.2	2792.8	7.4665	0.716	2650.7	2865.5	7.3115
200	1.444	2656.2	2872.9	7.6433	0.781	2713.1	2947.3	7.4774
240	1.570	2717.2	2952.7	7.8052	0.844	2775.4	3028.6	7.6299
280	1.695	2778.6	3032.8	7.9555	0.907	2838.1	3110.1	7.7722
320	1.819	2840.6	3113.5	8.0964	0.969	2901.4	3192.2	7.9061
360	1.943	2903.5	3195.0	8.2293	1.032	2965.6	3275.0	8.0330
400	2.067	2967.3	3277.4	8.3555	1.094	3030.6	3358.7	8.1538
440	2.191	3032.1	3360.7	8.4757	1.187	3130.0	3486.0	8.3251
500	2.376	3131.2	3487.6	8.6466	1.341	3300.8	3703.2	8.5892
600	2.685	3301.7	3704.3	8.9101				

H₂O

TABEL A-4 (Lanjutan)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 5.0 \text{ bars} = 0.50 \text{ MPa}$				$p = 7.0 \text{ bars} = 0.70 \text{ MPa}$				
$(T_{\text{sat}} = 151.86^\circ\text{C})$				$(T_{\text{sat}} = 164.97^\circ\text{C})$				
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213	0.2729	2572.5	2763.5	6.7080
180	0.4045	2609.7	2812.0	6.9656	0.2847	2599.8	2799.1	6.7880
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592	0.2999	2634.8	2844.8	6.8865
240	0.4646	2707.6	2939.9	7.2307	0.3292	2701.8	2932.2	7.0641
280	0.5034	2771.2	3022.9	7.3865	0.3574	2766.9	3017.1	7.2233
320	0.5416	2834.7	3105.6	7.5308	0.3852	2831.3	3100.9	7.3697
360	0.5796	2898.7	3188.4	7.6660	0.4126	2895.8	3184.7	7.5063
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938	0.4397	2960.9	3268.7	7.6350
440	0.6548	3028.6	3356.0	7.9152	0.4667	3026.6	3353.3	7.7571
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0873	0.5070	3126.8	3481.7	7.9299
600	0.8041	3299.6	3701.7	8.3522	0.5738	3298.5	3700.2	8.1956
700	0.8969	3477.5	3925.9	8.5952	0.6403	3476.6	3924.8	8.4391
$p = 10.0 \text{ bars} = 1.0 \text{ MPa}$				$p = 15.0 \text{ bars} = 1.5 \text{ MPa}$				
$(T_{\text{sat}} = 179.91^\circ\text{C})$				$(T_{\text{sat}} = 198.32^\circ\text{C})$				
Sat.	0.1944	2583.6	2778.1	6.5865	0.1318	2594.5	2792.2	6.4448
200	0.2060	2621.9	2827.9	6.6940	0.1325	2598.1	2796.8	6.4546
240	0.2275	2692.9	2920.4	6.8817	0.1483	2676.9	2899.3	6.6628
280	0.2480	2760.2	3008.2	7.0465	0.1627	2748.6	2992.7	6.8381
320	0.2678	2826.1	3093.9	7.1962	0.1765	2817.1	3081.9	6.9938
360	0.2873	2891.6	3178.9	7.3349	0.1899	2884.4	3169.2	7.1363
400	0.3066	2957.3	3263.9	7.4651	0.2030	2951.3	3255.8	7.2690
440	0.3257	3023.6	3349.3	7.5883	0.2160	3018.5	3342.5	7.3940
500	0.3541	3124.4	3478.5	7.7622	0.2352	3120.3	3473.1	7.5698
540	0.3729	3192.6	3565.6	7.8720	0.2478	3189.1	3560.9	7.6805
600	0.4011	3296.8	3697.9	8.0290	0.2668	3293.9	3694.0	7.8385
640	0.4198	3367.4	3787.2	8.1290	0.2793	3364.8	3783.8	7.9391
$p = 20.0 \text{ bars} = 2.0 \text{ MPa}$				$p = 30.0 \text{ bars} = 3.0 \text{ MPa}$				
$(T_{\text{sat}} = 212.42^\circ\text{C})$				$(T_{\text{sat}} = 233.90^\circ\text{C})$				
Sat.	0.0996	2600.3	2799.5	6.3409	0.0667	2604.1	2804.2	6.1869
240	0.1085	2659.6	2876.5	6.4952	0.0682	2619.7	2824.3	6.2265
280	0.1200	2736.4	2976.4	6.6828	0.0771	2709.9	2941.3	6.4462
320	0.1308	2807.9	3069.5	6.8452	0.0850	2788.4	3043.4	6.6245
360	0.1411	2877.0	3159.3	6.9917	0.0923	2861.7	3138.7	6.7801
400	0.1512	2945.2	3247.6	7.1271	0.0994	2932.8	3230.9	6.9212
440	0.1611	3013.4	3335.5	7.2540	0.1062	3002.9	3321.5	7.0520
500	0.1757	3116.2	3467.6	7.4317	0.1162	3108.0	3456.5	7.2338
540	0.1853	3185.6	3556.1	7.5434	0.1227	3178.4	3546.6	7.3474
600	0.1996	3290.9	3690.1	7.7024	0.1324	3285.0	3682.3	7.5085
640	0.2091	3362.2	3780.4	7.8035	0.1388	3357.0	3773.5	7.6106
700	0.2232	3470.9	3917.4	7.9487	0.1484	3466.5	3911.7	7.7571

TABEL A-4 (Lanjutan)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	
$p = 40 \text{ bars} = 4.0 \text{ MPa}$ $(T_{\text{sat}} = 250.4^\circ\text{C})$				$p = 60 \text{ bars} = 6.0 \text{ MPa}$ $(T_{\text{sat}} = 275.64^\circ\text{C})$				H₂O	
Sat.	0.04978	2602.3	2801.4	6.0701	0.03244	2589.7	2784.3		5.8892
280	0.05546	2680.0	2901.8	6.2568	0.03317	2605.2	2804.2		5.9252
320	0.06199	2767.4	3015.4	6.4553	0.03876	2720.0	2952.6		6.1846
360	0.06788	2845.7	3117.2	6.6215	0.04331	2811.2	3071.1		6.3782
400	0.07341	2919.9	3213.6	6.7690	0.04739	2892.9	3177.2		6.5408
440	0.07872	2992.2	3307.1	6.9041	0.05122	2970.0	3277.3		6.6853
500	0.08643	3099.5	3445.3	7.0901	0.05665	3082.2	3422.2		6.8803
540	0.09145	3171.1	3536.9	7.2056	0.06015	3156.1	3517.0		6.9999
600	0.09885	3279.1	3674.4	7.3688	0.06525	3266.9	3658.4		7.1677
640	0.1037	3351.8	3766.6	7.4720	0.06859	3341.0	3752.6		7.2731
700	0.1110	3462.1	3905.9	7.6198	0.07352	3453.1	3894.1		7.4234
740	0.1157	3536.6	3999.6	7.7141	0.07677	3528.3	3989.2		7.5190
$p = 80 \text{ bars} = 8.0 \text{ MPa}$ $(T_{\text{sat}} = 295.06^\circ\text{C})$				$p = 100 \text{ bars} = 10.0 \text{ MPa}$ $(T_{\text{sat}} = 311.06^\circ\text{C})$					H₂O
Sat.	0.02352	2569.8	2758.0	5.7432	0.01803	2544.4	2724.7	5.6141	
320	0.02682	2662.7	2877.2	5.9489	0.01925	2588.8	2781.3	5.7103	
360	0.03089	2772.7	3019.8	6.1819	0.02331	2729.1	2962.1	6.0060	
400	0.03432	2863.8	3138.3	6.3634	0.02641	2832.4	3096.5	6.2120	
440	0.03742	2946.7	3246.1	6.5190	0.02911	2922.1	3213.2	6.3805	
480	0.04034	3025.7	3348.4	6.6586	0.03160	3005.4	3321.4	6.5282	
520	0.04313	3102.7	3447.7	6.7871	0.03394	3085.6	3425.1	6.6622	
560	0.04582	3178.7	3545.3	6.9072	0.03619	3164.1	3526.0	6.7864	
600	0.04845	3254.4	3642.0	7.0206	0.03837	3241.7	3625.3	6.9029	
640	0.05102	3330.1	3738.3	7.1283	0.04048	3318.9	3723.7	7.0131	
700	0.05481	3443.9	3882.4	7.2812	0.04358	3434.7	3870.5	7.1687	
740	0.05729	3520.4	3978.7	7.3782	0.04560	3512.1	3968.1	7.2670	
$p = 120 \text{ bars} = 12.0 \text{ MPa}$ $(T_{\text{sat}} = 324.75^\circ\text{C})$				$p = 140 \text{ bars} = 14.0 \text{ MPa}$ $(T_{\text{sat}} = 336.75^\circ\text{C})$				H₂O	
Sat.	0.01426	2513.7	2684.9	5.4924	0.01149	2476.8	2637.6		5.3717
360	0.01811	2678.4	2895.7	5.8361	0.01422	2617.4	2816.5		5.6602
400	0.02108	2798.3	3051.3	6.0747	0.01722	2760.9	3001.9		5.9448
440	0.02355	2896.1	3178.7	6.2586	0.01954	2868.6	3142.2		6.1474
480	0.02576	2984.4	3293.5	6.4154	0.02157	2962.5	3264.5		6.3143
520	0.02781	3068.0	3401.8	6.5555	0.02343	3049.8	3377.8		6.4610
560	0.02977	3149.0	3506.2	6.6840	0.02517	3133.6	3486.0		6.5941
600	0.03164	3228.7	3608.3	6.8037	0.02683	3215.4	3591.1		6.7172
640	0.03345	3307.5	3709.0	6.9164	0.02843	3296.0	3694.1		6.8326
700	0.03610	3425.2	3858.4	7.0749	0.03075	3415.7	3846.2	6.9939	
740	0.03781	3503.7	3957.4	7.1746	0.03225	3495.2	3946.7	7.0952	

TABEL A-4 (Lanjutan)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 160 \text{ bars} = 16.0 \text{ MPa}$				$p = 180 \text{ bars} = 18.0 \text{ MPa}$				
$(T_{\text{sat}} = 347.44^\circ\text{C})$				$(T_{\text{sat}} = 357.06^\circ\text{C})$				
Sat.	0.00931	2431.7	2580.6	5.2455	0.00749	2374.3	2509.1	5.1044
360	0.01105	2539.0	2715.8	5.4614	0.00809	2418.9	2564.5	5.1922
400	0.01426	2719.4	2947.6	5.8175	0.01190	2672.8	2887.0	5.6887
440	0.01652	2839.4	3103.7	6.0429	0.01414	2808.2	3062.8	5.9428
480	0.01842	2939.7	3234.4	6.2215	0.01596	2915.9	3203.2	6.1345
520	0.02013	3031.1	3353.3	6.3752	0.01757	3011.8	3378.0	6.2960
560	0.02172	3117.8	3465.4	6.5132	0.01904	3101.7	3444.4	6.4392
600	0.02323	3201.8	3573.5	6.6399	0.02042	3188.0	3555.6	6.5696
640	0.02467	3284.2	3678.9	6.7580	0.02174	3272.3	3663.6	6.6905
700	0.02674	3406.0	3833.9	6.9224	0.02362	3396.3	3821.5	6.8580
740	0.02808	3486.7	3935.9	7.0251	0.02483	3478.0	3925.0	6.9623
$p = 200 \text{ bars} = 20.0 \text{ MPa}$				$p = 240 \text{ bars} = 24.0 \text{ MPa}$				
$(T_{\text{sat}} = 365.81^\circ\text{C})$								
Sat.	0.00583	2293.0	2409.7	4.9269				
400	0.00994	2619.3	2818.1	5.5540	0.00673	2477.8	2639.4	5.2393
440	0.01222	2774.9	3019.4	5.8450	0.00929	2700.6	2923.4	5.6506
480	0.01399	2891.2	3170.8	6.0518	0.01100	2838.3	3102.3	5.8950
520	0.01551	2992.0	3302.2	6.2218	0.01241	2950.5	3248.5	6.0842
560	0.01689	3085.2	3423.0	6.3705	0.01366	3051.1	3379.0	6.2448
600	0.01818	3174.0	3537.6	6.5048	0.01481	3145.2	3500.7	6.3875
640	0.01940	3260.2	3648.1	6.6286	0.01588	3235.5	3616.7	6.5174
700	0.02113	3386.4	3809.0	6.7993	0.01739	3366.4	3783.8	6.6947
740	0.02224	3469.3	3914.1	6.9052	0.01835	3451.7	3892.1	6.8038
800	0.02385	3592.7	4069.7	7.0544	0.01974	3578.0	4051.6	6.9567
$p = 280 \text{ bars} = 28.0 \text{ MPa}$				$p = 320 \text{ bars} = 32.0 \text{ MPa}$				
400	0.00383	2223.5	2330.7	4.7494	0.00236	1980.4	2055.9	4.3239
440	0.00712	2613.2	2812.6	5.4494	0.00544	2509.0	2683.0	5.2327
480	0.00885	2780.8	3028.5	5.7446	0.00722	2718.1	2949.2	5.5968
520	0.01020	2906.8	3192.3	5.9566	0.00853	2860.7	3133.7	5.8357
560	0.01136	3015.7	3333.7	6.1307	0.00963	2979.0	3287.2	6.0246
600	0.01241	3115.6	3463.0	6.2823	0.01061	3085.3	3424.6	6.1858
640	0.01338	3210.3	3584.8	6.4187	0.01150	3184.5	3552.5	6.3290
700	0.01473	3346.1	3758.4	6.6029	0.01273	3325.4	3732.8	6.5203
740	0.01558	3433.9	3870.0	6.7153	0.01350	3415.9	3847.8	6.6361
800	0.01680	3563.1	4033.4	6.8720	0.01460	3548.0	4015.1	6.7966
900	0.01873	3774.3	4298.8	7.1084	0.01633	3762.7	4285.1	7.0372

TABEL A-5. Sifat-sifat Air Bertekanan

T °C	$v \times 10^3$ m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	$v \times 10^3$ m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 25 \text{ bars} = 2.5 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 223.99^\circ\text{C}$)					$p = 50 \text{ bars} = 5.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 263.99^\circ\text{C}$)			
20	1.0006	83.80	86.30	.2961	.9995	83.65	88.65	.2956
40	1.0067	167.25	169.77	.5715	1.0056	166.95	171.97	.5705
80	1.0280	334.29	336.86	1.0737	1.0268	333.72	338.85	1.0720
100	1.0423	418.24	420.85	1.3050	1.0410	417.52	422.72	1.3030
140	1.0784	587.82	590.52	1.7369	1.0768	586.76	592.15	1.7343
180	1.1261	761.16	763.97	2.1375	1.1240	759.63	765.25	2.1341
200	1.1555	849.9	852.8	2.3294	1.1530	848.1	853.9	2.3255
220	1.1898	940.7	943.7	2.5174	1.1866	938.4	944.4	2.5128
Sat.	1.1973	959.1	962.1	2.5546	1.2859	1147.8	1154.2	2.9202
$p = 75 \text{ bars} = 7.5 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 290.59^\circ\text{C}$)					$p = 100 \text{ bars} = 10.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 311.06^\circ\text{C}$)			
20	.9984	83.50	90.99	.2950	.9972	83.36	93.33	.2945
40	1.0045	166.64	174.18	.5696	1.0034	166.35	176.38	.5686
80	1.0256	333.15	340.84	1.0704	1.0245	332.59	342.83	1.0688
100	1.0397	416.81	424.62	1.3011	1.0385	416.12	426.50	1.2992
140	1.0752	585.72	593.78	1.7317	1.0737	584.68	595.42	1.7292
180	1.1219	758.13	766.55	2.1308	1.1199	756.65	767.84	2.1275
220	1.1835	936.2	945.1	2.5083	1.1805	934.1	945.9	2.5039
260	1.2696	1124.4	1134.0	2.8763	1.2645	1121.1	1133.7	2.8699
Sat.	1.3677	1282.0	1292.2	3.1649	1.4524	1393.0	1407.6	3.3596
$p = 150 \text{ bars} = 15.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 342.24^\circ\text{C}$)					$p = 200 \text{ bars} = 20.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 365.81^\circ\text{C}$)			
20	.9950	83.06	97.99	.2934	.9928	82.77	102.62	.2923
40	1.0013	165.76	180.78	.5666	.9992	165.17	185.16	.5646
80	1.0222	331.48	346.81	1.0656	1.0199	330.40	350.80	1.0624
100	1.0361	414.74	430.28	1.2955	1.0337	413.39	434.06	1.2917
140	1.0707	582.66	598.72	1.7242	1.0678	580.69	602.04	1.7193
180	1.1159	753.76	770.50	2.1210	1.1120	750.95	773.20	2.1147
220	1.1748	929.9	947.5	2.4953	1.1693	925.9	949.3	2.4870
260	1.2550	1114.6	1133.4	2.8576	1.2462	1108.6	1133.5	2.8459
300	1.3770	1316.6	1337.3	3.2260	1.3596	1306.1	1333.3	3.2071
Sat.	1.6581	1585.6	1610.5	3.6848	2.036	1785.6	1826.3	4.0139
$p = 250 \text{ bars} = 25 \text{ MPa}$					$p = 300 \text{ bars} = 30 \text{ MPa}$			
20	.9907	82.47	107.24	.2911	.9886	82.17	111.84	.2899
40	.9971	164.60	189.52	.5626	.9951	164.04	193.89	.5607
100	1.0313	412.08	437.85	1.2881	1.0290	410.78	441.66	1.2844
200	1.1344	834.5	862.8	2.2961	1.1302	831.4	865.3	2.2893
300	1.3442	1296.6	1330.2	3.1900	1.3304	1287.9	1327.8	3.1741

H₂O

TABEL A-6. Sifat-sifat Air Jenuh (Padat-Uap): Tabel Temperatur

Temp. °C	Pressure kPa	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg			Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		
		Sat. Solid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Solid u_f	Subl. u_{fg}	Sat. Vapor u_g	Sat. Solid h_f	Subl. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Solid s_f	Subl. s_{fg}	Sat. Vapor s_g
.01	.6113	1.0908	206.1	-333.40	2708.7	2375.3	-333.40	2834.8	2501.4	-1.221	10.378	9.156
0	.6108	1.0908	206.3	-333.43	2708.8	2375.3	-333.43	2834.8	2501.3	-1.221	10.378	9.157
-2	.5176	1.0904	241.7	-337.62	2710.2	2372.6	-337.62	2835.3	2497.7	-1.237	10.456	9.219
-4	.4375	1.0901	283.8	-341.78	2711.6	2369.8	-341.78	2835.7	2494.0	-1.253	10.536	9.283
-6	.3689	1.0898	334.2	-345.91	2712.9	2367.0	-345.91	2836.2	2490.3	-1.268	10.616	9.348
-8	.3102	1.0894	394.4	-350.02	2714.2	2364.2	-350.02	2836.6	2486.6	-1.284	10.698	9.414
-10	.2602	1.0891	466.7	-354.09	2715.5	2361.4	-354.09	2837.0	2482.9	-1.299	10.781	9.481
-12	.2176	1.0888	553.7	-358.14	2716.8	2358.7	-358.14	2837.3	2479.2	-1.315	10.865	9.550
-14	.1815	1.0884	658.8	-362.15	2718.0	2355.9	-362.15	2837.6	2475.5	-1.331	10.950	9.619
-16	.1510	1.0881	786.0	-366.14	2719.2	2353.1	-366.14	2837.9	2471.8	-1.346	11.036	9.690
-18	.1252	1.0878	940.5	-370.10	2720.4	2350.3	-370.10	2838.2	2468.1	-1.362	11.123	9.762
-20	.1035	1.0874	1128.6	-374.03	2721.6	2347.5	-374.03	2838.4	2464.3	-1.377	11.212	9.835
-22	.0853	1.0871	1358.4	-377.93	2722.7	2344.7	-377.93	2838.6	2460.6	-1.393	11.302	9.909
-24	.0701	1.0868	1640.1	-381.80	2723.7	2342.0	-381.80	2838.7	2456.9	-1.408	11.394	9.985
-26	.0574	1.0864	1986.4	-385.64	2724.8	2339.2	-385.64	2838.9	2453.2	-1.424	11.486	10.062
-28	.0469	1.0861	2413.7	-389.45	2725.8	2336.4	-389.45	2839.0	2449.5	-1.439	11.580	10.141
-30	.0381	1.0858	2943.	-393.23	2726.8	2333.6	-393.23	2839.0	2445.8	-1.455	11.676	10.221
-32	.0309	1.0854	3600.	-396.98	2727.8	2330.8	-396.98	2839.1	2442.1	-1.471	11.773	10.303
-34	.0250	1.0851	4419.	-400.71	2728.7	2328.0	-400.71	2839.1	2438.4	-1.486	11.872	10.386
-36	.0201	1.0848	5444.	-404.40	2729.6	2325.2	-404.40	2839.1	2434.7	-1.501	11.972	10.470
-38	.0161	1.0844	6731.	-408.06	2730.5	2322.4	-408.06	2839.0	2430.9	-1.517	12.073	10.556
-40	.0129	1.0841	8354.	-411.70	2731.3	2319.6	-411.70	2838.9	2427.2	-1.532	12.176	10.644

Source: J. H. Keenan, F. G. Keyes, P. G. Hill, and J. G. Moore, *Steam Tables*, Wiley, New York, 1978.

TABEL A-7. Kalor Spesifik Gas Ideal Beberapa Gas Umum (kJ/kg.K)

Temp. K	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k	Temp. K
	Air			Nitrogen, N ₂			Oxygen, O ₂			
250	1.003	0.716	1.401	1.039	0.742	1.400	0.913	0.653	1.398	250
300	1.005	0.718	1.400	1.039	0.743	1.400	0.918	0.658	1.395	300
350	1.008	0.721	1.398	1.041	0.744	1.399	0.928	0.668	1.389	350
400	1.013	0.726	1.395	1.044	0.747	1.397	0.941	0.681	1.382	400
450	1.020	0.733	1.391	1.049	0.752	1.395	0.956	0.696	1.373	450
500	1.029	0.742	1.387	1.056	0.759	1.391	0.972	0.712	1.365	500
550	1.040	0.753	1.381	1.065	0.768	1.387	0.988	0.728	1.358	550
600	1.051	0.764	1.376	1.075	0.778	1.382	1.003	0.743	1.350	600
650	1.063	0.776	1.370	1.086	0.789	1.376	1.017	0.758	1.343	650
700	1.075	0.788	1.364	1.098	0.801	1.371	1.031	0.771	1.337	700
750	1.087	0.800	1.359	1.110	0.813	1.365	1.043	0.783	1.332	750
800	1.099	0.812	1.354	1.121	0.825	1.360	1.054	0.794	1.327	800
900	1.121	0.834	1.344	1.145	0.849	1.349	1.074	0.814	1.319	900
1000	1.142	0.855	1.336	1.167	0.870	1.341	1.090	0.830	1.313	1000

Temp. K	Carbon dioxide, CO ₂			Carbon monoxide, CO			Hydrogen, H ₂			Temp. K
250	0.791	0.602	1.314	1.039	0.743	1.400	14.051	9.927	1.416	250
300	0.846	0.657	1.288	1.040	0.744	1.399	14.307	10.183	1.405	300
350	0.895	0.706	1.268	1.043	0.746	1.398	14.427	10.302	1.400	350
400	0.939	0.750	1.252	1.047	0.751	1.395	14.476	10.352	1.398	400
450	0.978	0.790	1.239	1.054	0.757	1.392	14.501	10.377	1.398	450
500	1.014	0.825	1.229	1.063	0.767	1.387	14.513	10.389	1.397	500
550	1.046	0.857	1.220	1.075	0.778	1.382	14.530	10.405	1.396	550
600	1.075	0.886	1.213	1.087	0.790	1.376	14.546	10.422	1.396	600
650	1.102	0.913	1.207	1.100	0.803	1.370	14.571	10.447	1.395	650
700	1.126	0.937	1.202	1.113	0.816	1.364	14.604	10.480	1.394	700
750	1.148	0.959	1.197	1.126	0.829	1.358	14.645	10.521	1.392	750
800	1.169	0.980	1.193	1.139	0.842	1.353	14.695	10.570	1.390	800
900	1.204	1.015	1.186	1.163	0.866	1.343	14.822	10.698	1.385	900
1000	1.234	1.045	1.181	1.185	0.888	1.335	14.983	10.859	1.380	1000

Source: Adapted from K. Wark, *Thermodynamics, 4th ed.*, McGraw-Hill, New York, 1983, as based on "Tables of Thermal Properties of Gases," NBS Circular 564, 1955.

TABEL A-8. Variasi c_p dengan Temperatur untuk Berbagai Gas Ideal.

$$\frac{\bar{c}_p}{\bar{R}} = \alpha + \beta T + \gamma T^2 + \delta T^3 + \epsilon T^4$$

T is in K, equations valid from 300 to 1000 K

Gas	α	$\beta \times 10^3$	$\gamma \times 10^6$	$\delta \times 10^9$	$\epsilon \times 10^{12}$
CO	3.710	-1.619	3.692	-2.032	0.240
CO ₂	2.401	8.735	-6.607	2.002	0
H ₂	3.057	2.677	-5.810	5.521	-1.812
H ₂ O	4.070	-1.108	4.152	-2.964	0.807
O ₂	3.626	-1.878	7.055	-6.764	2.156
N ₂	3.675	-1.208	2.324	-0.632	-0.226
Air	3.653	-1.337	3.294	-1.913	0.2763
SO ₂	3.267	5.324	0.684	-5.281	2.559
CH ₄	3.826	-3.979	24.558	-22.733	6.963
C ₂ H ₂	1.410	19.057	-24.501	16.391	-4.135
C ₂ H ₄	1.426	11.383	7.989	-16.254	6.749
Monatomic gases ^a	2.5	0	0	0	0

^a For monatomic gases, such as He, Ne, and Ar, \bar{c}_p is constant over a wide temperature range and is very nearly equal to $5/2 \bar{R}$.

Source: Adapted from K. Wark, *Thermodynamics*, 4th ed., McGraw-Hill, New York, 1983, as based on NASA SP-273, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1971.

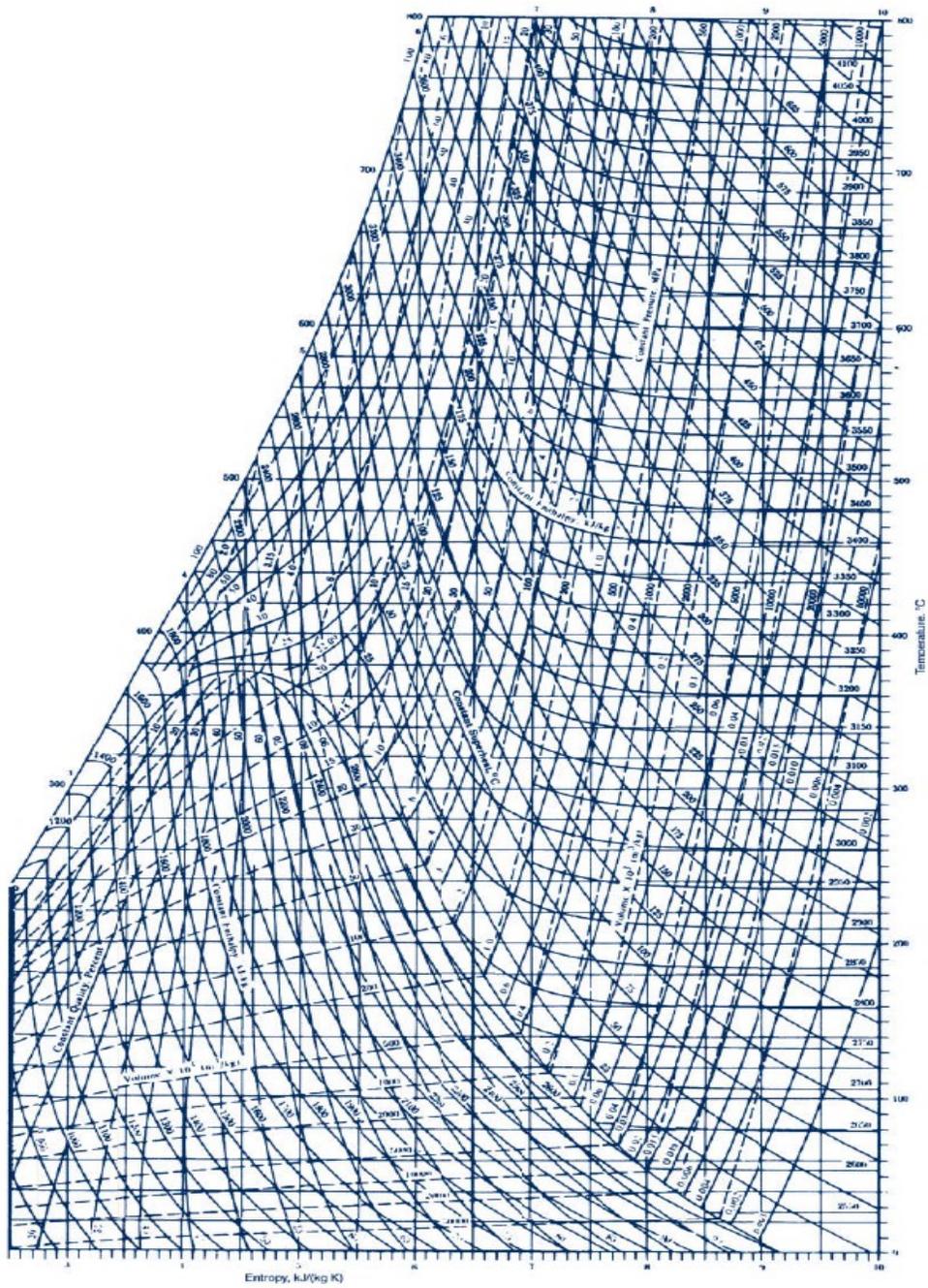
TABEL A-9. Sifat-sifat Gas Ideal Udara

T (K)	h (kJ/kg)	P _r	u (kJ/kg)	v _r	s ^o	T	h	P _r	u	v _r	s ^o
200	199.97	0.3363	142.56	1707.	1.29559	450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161
210	209.97	0.3987	149.69	1512.	1.34444	460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407
220	219.97	0.4690	156.82	1346.	1.39105	470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604
230	230.02	0.5477	164.00	1205.	1.43557	480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760
240	240.02	0.6355	171.13	1084.	1.47824	490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876
250	250.05	0.7329	178.28	979.	1.51917	500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	550	554.74	11.86	396.86	133.1	2.31809
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280

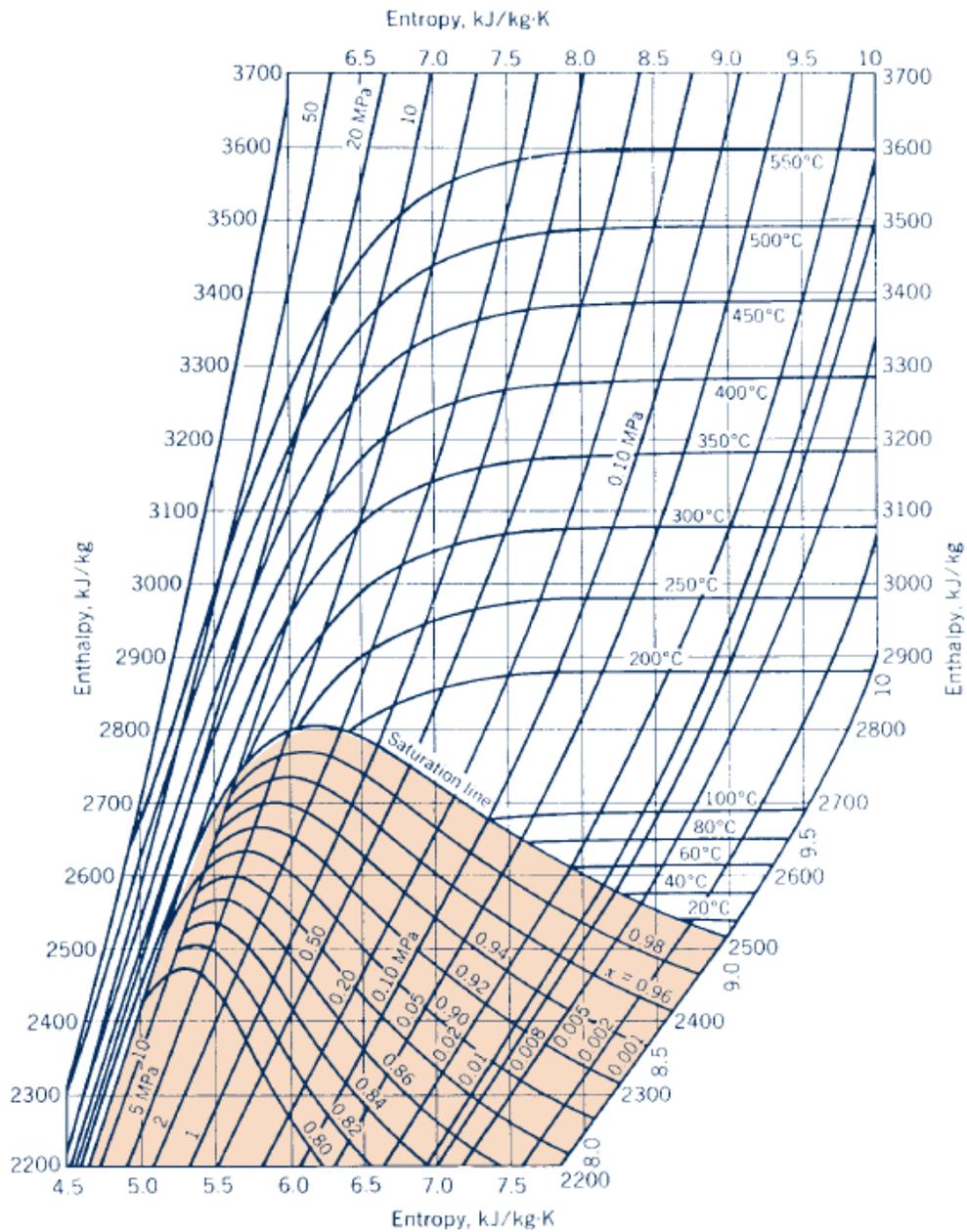
TABEL A-9 (lanjutan)

T (K), h and u (kJ/kg), s° (kJ/kg · K)											
T	h	P _r	u	v _r	s°	T	h	P _r	u	v _r	s°
750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737	1300	1395.97	330.9	1022.82	11.275	3.27345
760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176	1320	1419.76	352.5	1040.88	10.747	3.29160
770	789.11	41.31	568.07	53.39	2.67595	1340	1443.60	375.3	1058.94	10.247	3.30959
780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013	1360	1467.49	399.1	1077.10	9.780	3.32724
790	810.99	45.55	584.21	49.86	2.70400	1380	1491.44	424.2	1095.26	9.337	3.34474
800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787	1400	1515.42	450.5	1113.52	8.919	3.36200
820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504	1420	1539.44	478.0	1131.77	8.526	3.37901
840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170	1440	1563.51	506.9	1150.13	8.153	3.39586
860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783	1460	1587.63	537.1	1168.49	7.801	3.41247
880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344	1480	1611.79	568.8	1186.95	7.468	3.42892
900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856	1500	1635.97	601.9	1205.41	7.152	3.44516
920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324	1520	1660.23	636.5	1223.87	6.854	3.46120
940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748	1540	1684.51	672.8	1242.43	6.569	3.47712
960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128	1560	1708.82	710.5	1260.99	6.301	3.49276
980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468	1580	1733.17	750.0	1279.65	6.046	3.50829
1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770	1600	1757.57	791.2	1298.30	5.804	3.52364
1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034	1620	1782.00	834.1	1316.96	5.574	3.53879
1040	1091.85	133.3	793.36	22.39	3.01260	1640	1806.46	878.9	1335.72	5.355	3.55381
1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449	1660	1830.96	925.6	1354.48	5.147	3.56867
1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608	1680	1855.50	974.2	1373.24	4.949	3.58335
1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732	1700	1880.1	1025	1392.7	4.761	3.5979
1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825	1750	1941.6	1161	1439.8	4.328	3.6336
1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883	1800	2003.3	1310	1487.2	3.944	3.6684
1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916	1850	2065.3	1475	1534.9	3.601	3.7023
1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916	1900	2127.4	1655	1582.6	3.295	3.7354
1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888	1950	2189.7	1852	1630.6	3.022	3.7677
1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834	2000	2252.1	2068	1678.7	2.776	3.7994
1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751	2050	2314.6	2303	1726.8	2.555	3.8303
1260	1348.55	290.8	986.90	12.435	3.23638	2100	2377.4	2559	1775.3	2.356	3.8605
1280	1372.24	310.4	1004.76	11.835	3.25510	2150	2440.3	2837	1823.8	2.175	3.8901
						2200	2503.2	3138	1872.4	2.012	3.9191
						2250	2566.4	3464	1921.3	1.864	3.9474

Source: Adapted from K. Wark, *Thermodynamics, 4th ed.*, McGraw-Hill, New York, 1983, as based on J. H. Keenan and J. Kaye, "Gas Tables," Wiley, New York, 1945.



Gambar A-1. Diagram Temperatur-Entropi untuk air (Sistem SI).
 (Sumber: M.J. Moran, H.N. Shapiro, D.D. Boettner, M.B. Bailey, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, John Wiley & Son, 2014.)



Gambar A-2. Diagram Enthalpi-Entropi untuk air (Sistem SI).

(Sumber: M.J. Moran, H.N. Shapiro, D.D. Boettner, M.B. Bailey, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, John Wiley & Son, 2014.)