

# TERMODINAMIKA TEKNIK

## VOLUME I



**UNIVERSITAS DARMA PERSADA – JAKARTA**

**2020**

**ASY'ARI DARYUS**

# **TERMODINAMIKA TEKNIK**

## **VOLUME 1**

Disusun Oleh:

**ASY'ARI DARYUS**

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik  
Universitas Darma Persada  
Jakarta.

***“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)***

## KATA PENGANTAR

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 merupakan jilid 1 dari dua jilid yang dibuat, disesuaikan dengan kebutuhan perkuliahan di Universitas Darma Persada dimana materi termodinamika dibagi atas dua semester.

Buku ini merupakan penyempurnaan dari buku/diktat sebelumnya, dimana telah dilakukan beberapa perbaikan dan penambahan isi. Dalam penyusunan buku ini penulis berusaha menyesuaikan formatnya dengan format e-book, mengingat saat ini pemakaian tablet pc atau hp android sudah merupakan peralatan yang banyak dipunyai oleh para mahasiswa dan umum. Sehingga pemakaian kertas dapat dikurangi yang pada gilirannya dapat menyelamatkan lingkungan.

Perlu ditekankan bahwa buku ini belum merupakan referensi lengkap dari pelajaran Termodinamika Teknik I, 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, April 2020

DR. IR. ASY'ARI DARYUS SE. MSc.

## DAFTAR ISI

- BAB 1. Pendahuluan. 1
- BAB 2. Sifat-sifat Gas Sempurna. 13
- BAB 3. Proses Termodinamika Gas Sempurna. 31
- BAB 4. Entropi Gas Sempurna. 57
- BAB 5. Sifat-sifat Zat Murni. 77
- BAB 6. Siklus Udara Termodinamika. 89

# 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

$u$  = kecepatan awal benda

$v$  = kecepatan akhir benda

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

Menurut hukum kedua Newton tentang gerak:

$$F \propto \frac{mv - mu}{t} \propto \frac{m(v - u)}{t} \quad (1.1)$$

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

dimana  $a$  = percepatan =  $(v-u) / t$

$k$  = 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  $45^\circ$ , 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  $1 \text{ cm/sec}^2$  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  $1 \text{ m/sec}^2$  pada arah gaya tersebut.

### Satuan Absolut dan Gravitasi dari Gaya

Jika sebuah benda massa  $1 \text{ kg}$  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  $1 \text{ kg}$  yang mengalami tarikan bumi dengan percepatan  $9,81 \text{ m/sec}^2$  adalah  $1 \text{ kg-berat}$ . 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 Newton Ketiga 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 dimiliki oleh benda untuk melakukan kerja karena *letaknya*,



sedangkan energi kinetik ada karena *massa* dan *kecepatan*.

#### 1.4.1. 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  $\text{kg/cm}^2$  dan  $\text{kg/m}^2$ . Kadang-kadang tekanan digunakan dengan satuan *atmosfir* dan ditulis dengan *ata*. Dimana  $1 \text{ ata} = 1 \text{ kg/cm}^2$ .

Pada sistem SI, satuan tekanan yang digunakan adalah  $\text{N/mm}^2$ ,  $\text{N/m}^2$ ,  $\text{kN/m}^2$ ,  $\text{MN/m}^2$  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

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

#### 1.5.1. 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  $1,01 \text{ bar}$  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 °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 °F).

Hubungan antara skala Centigrade dengan Fahrenheit diberikan oleh rumus:

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

### 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:

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

Skala absolut Fahrenheit disebut derajat Rankine (disingkat dengan °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:

$$1 \text{ pound} = 453,6 \text{ gram}$$

$$\text{sehingga : } 1 \text{ C.H.U} = 453,6 \text{ calori}$$

### 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 calori kadang-kadang disebut gram calori (gm-cal) dan satuan kalor centigrade disebut pound calori.

2. Pada sistem MKS, satuan kalor digunakan calori 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):

$$Q = mcT \quad \text{kcal}$$

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):

$$Q = mcT \quad \text{kJ}$$

#### 1.7.1. Ekuivalen Mekanik dari kalor

Kalor dan energi mekanik bisa saling berpindah. Dari eksperimen bahwa didapat

hubungan antara satuan kalor dan satuan kerja. Hubungan ini dituliskan dengan **J** (diambil dari nama Joule) dan dikenal sebagai ekivalen Joule atau ekivalen mekanik kalor, ditulis dengan:

$$1 \text{ kcal} = 427 \text{ kg-m} \quad (\text{dalam satuan MKS})$$

Pada sistem SI, satuan kerja adalah Joule atau kiloJoule, dan satuan kalor juga Joule atau kiloJoule, sehingga kita bisa secara langsung mengkonversikan satuan kalor ke satuan mekanikal dan sebaliknya.

### 1.7.2. Kalor Spesifik

Kalor spesifik suatu zat secara luas didefinisikan sebagai jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan temperatur satu satuan massa suatu zat sebesar  $1^\circ$ . Biasanya dinotasikan dengan  $c$ . Jika  $m$  kg suatu zat dengan kalor spesifik  $c$  diperlukan untuk menaikkan temperatur sebesar  $t^\circ$  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.

Tabel 1.1. Harga kalor spesifik beberapa zat.

<i>Padatan</i>	<i>Kalor Spesifik</i>	<i>Cairan</i>	<i>Kalors 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		

### 1.7.3. Kapasitas Kalor

Kapasitas kalor sebuah zat bisa didefinisikan sebagai kalor yang diperlukan untuk menaikkan seluruh massa zat sebesar  $1^\circ$ . Secara matematik:

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

dimana,  $m$  = massa zat dalam gram

$c$  = kalor spesifik zat

## 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.

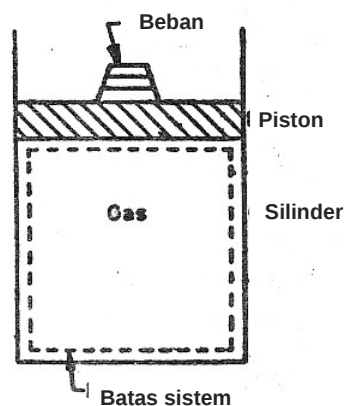
### 1.8.1. Klasifikasi Sistem Termodinamika

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 menempatinnya. 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.

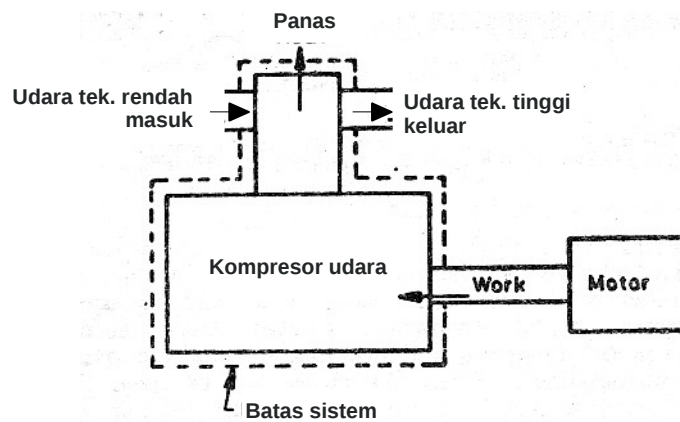


Gambar 1.1. Sistem termodinamika tertutup.

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.



Gambar 1.2. Sistem termodinamika terbuka.

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.

#### 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:

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. Keseimbangan 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 keseimbangan 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 keseimbangan termal dengan benda ketiga, maka benda-benda tersebut berada dalam keseimbangan 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,  $Q$  = kalor yang dipindahkan

$\Delta U$  = perubahan energi dalam

$W$  = 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 hukum Newton yang sangat berkaitan dengan termodinamika.
2. Elaskan perbedaan antara massa dan berat.
3. Jelaskan definisi dari kerja, daya dan energi.
4. Jelaskan definisi 1 kalori, dan konversinya ke dalam satuan SI.
5. Jelaskan pengertian sistem tertutup, terbuka dan terisolasi di dalam termodinamika.
6. Jelaskan perbedaan antara sifat ekstensif dan intensif suatu sistem termodinamika.
7. Jelaskan pengertian dari hukum termodinamika ke satu.
8. Kelvin-Planck membuat definisi, yaitu” adalah tidak mungkin membuat mesin yang bekerja dalam proses siklik yang tujuan tunggalnya untuk mengkonversi energi panas ke energi kerja”. Coba anda jelaskan maksudnya.

## 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 temperturnya 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 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:

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

atau:

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} = \frac{v_3}{T_3} = \dots = \text{konstan} \quad (2.4)$$

dimana 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  $0^\circ\text{C}$  untuk setiap perubahan temperatur sebesar  $1^\circ\text{C}$ , jika tekanan konstan".

Misalkan,  $v_0$  = volume massa gas pada  $0^\circ\text{C}$ , dan

$v_t$  = volume massa gas yang sama pada  $t^\circ\text{C}$

maka, sesuai dengan pernyataan di atas,

$$v_t = v_0 + \frac{1}{273} v_0 \cdot t = v_0 \left( \frac{273+t}{273} \right) = v_0 \cdot \frac{T}{T_0} \quad (2.5)$$

atau:

$$\frac{v_t}{T} = \frac{v_0}{T_0} \quad (2.6)$$

dimana,  $T$  = temperatur mutlak dari  $t^\circ\text{C}$

$T_0$  = temperatur mutlak dari  $0^\circ\text{C}$

Terlihat bahwa volume gas akan mengalami penurunan sebesar  $1/273$  dari volume awalnya pada setiap penurunan temperatur  $1^\circ\text{C}$ . Maka pada temperatur  $-273^\circ\text{C}$ , volume gas akan nol.<sup>1</sup> 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:

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

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

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

## 2.2. Persamaan Gas Umum

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

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

$$\square \quad pv \propto T \quad \text{atau} \quad pv = CT \quad (2.13)$$

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:

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

dimana,  $m$  = massa gas

$C$  = 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  $v_s$ ) 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:

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

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

Untuk sembarang massa  $m$  kg, persamaan gas karakteristik menjadi:

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

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

Catatan:

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

$$R = \frac{pv}{mT} = \frac{\text{kg/m}^2 \times \text{m}^3}{\text{kg} \times \text{K}} = \text{kg m per kg } ^\circ\text{K}$$

2. Pada satuan S.I., tekanan dalam  $\text{N/m}^2$ , sehingga:

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

3. Harga konstanta gas ( $R$ ) berbeda untuk gas yang berbeda. Harganya pada udara atmosfer diambil 29,27  $\text{kgm/kg } ^\circ\text{K}$  (atau 287  $\text{J/kg } ^\circ\text{K}$  atau 0,287  $\text{kJ/kg } ^\circ\text{K}$ ).

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  $\rho$  adalah kerapatan gas yang bersangkutan atau massa jenis..

#### Contoh Soal 2.1:

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

Jawab:

Diketahui:

$$\text{Volume awal, } v_1 = 0,105 \text{ m}^3$$

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

$$\begin{aligned} \text{Tekanan awal, } p_1 &= 1,5 \text{ ata} = 1,5 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 1,5 \times 10^4 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tekanan akhir, } p_2 &= 7,5 \text{ ata} = 7,5 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 7,5 \times 10^4 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Volume akhir, } v_2 = 0,04 \text{ m}^3$$

Jika  $T_2$  = temperatur akhir, maka:

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}$$

$$1,5 \times 10^4 \times 0,105 / 293 = 7,5 \times 10^4 \times 0,04 / T_2$$

$$T_2 = \frac{7,5 \times 10^4 \times 0,04 \times 293}{1,5 \times 10^4 \times 0,105} = 558,1 \text{ K}$$

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

### Contoh Soal 2.2:

Carilah massa gas yang menempati volume  $5,6 \text{ m}^3$  pada tekanan  $7 \text{ kg/cm}^2$  dan suhu  $200^\circ \text{ C}$ . Ambil harga  $R = 29,27 \text{ kg-m/kg}^\circ\text{K}$

Jawab:

Diketahui:

$$v = 5,6 \text{ m}^3$$

$$p = 7 \text{ kg/cm}^2 = 7 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$$

$$T = 200^\circ \text{ C} = 200^\circ + 273 = 473 \text{ K}$$

$$R = 29,27 \text{ kg-m/kg-K}$$

Maka:

$$pv = mRT$$

$$m = pv / RT = (7 \times 10^4 \times 5,6) / (29,27 \times 473) \text{ kg}$$

$$= 28,3 \text{ kg}$$

**Contoh soal 2.3:**

Carilah volume yang ditempati oleh 2 kg gas ideal pada 120 kPa dan 300<sup>o</sup> 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 iAvogadro berbunyi: "*volume yang sama dari gas-gas, pada temperatur dan tekanan yang sama, mengandung jumlah molekul yang sama*".

Maka, sesuai dengan hukum Avogadro, 1 m<sup>3</sup> oksigen (O<sub>2</sub>) akan mempunyai jumlah molekul yang sama dengan 1 m<sup>3</sup> hidrogen (H<sub>2</sub>) 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 m<sup>3</sup> 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<sup>o</sup> C dan 1,0332 kg/cm<sup>2</sup> absolut adalah 1,429 kg/m<sup>3</sup>.

□ Volume spesifik oksigen (pada 1 kg) pada NTP,

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

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

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

Dengan cara yang sama bisa dibuktikan bahwa volume 1 kg mol sembarang gas pada NTP adalah 22,4 m<sup>3</sup>.

**Catatan:** 1 gm mol (berat molekul dinyatakan dalam gm) dari semua gas akan menempati volume 22,4 liter (dm<sup>3</sup>) pada NTP.

Harga berat molekul dari beberapa gas diberikan oleh Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Berat molekul beberapa gas.

No	Gas	Berat molekul	No.	Gas	Berat Molekul
1.	Hidrogen (H <sub>2</sub> )	2	5.	Karbon dioksida (CO <sub>2</sub> )	44
2.	Oksigen (O <sub>2</sub> )	32	6.	Metana (CH <sub>4</sub> )	16
3.	Nitrogen (N <sub>2</sub> )	28	7.	Asetilen (C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> )	26
4.	Karbon monoksida (CO)	28	8.	Sulfur dioksida (SO <sub>2</sub> )	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,  $M$  = berat molekul gas yang dinyatakan dengan gm (yaitu gm-mol) atau kg (yaitu kg-mol)\*

$R$  = 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 848 kg-m/kg mol/K dalam MKS atau 8314 J/kg mol/K dalam SI.

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

$$p v = M R T \quad (2.22)$$



## 2.7. Kalor Spesifik Gas

Kalor spesifik suatu zat secara umum didefinisikan sebagai jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan temperatur per satuan massanya sebesar  $1^{\circ}$  C. Semua cairan dan padatan hanya mempunyai satu harga kalor spesifik. Tetapi gas bisa mempunyai banyak 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  $1^{\circ}$  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:

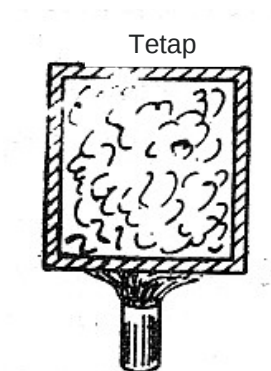
$Q = \text{massa} \times \text{kalor spesifik pada vol. Konstan} \times \text{kenaikan temperatur}$

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

dimana,  $m$  = massa gas

$T_1$  = temperatur awal gas

$T_2$  = temperatur akhir gas

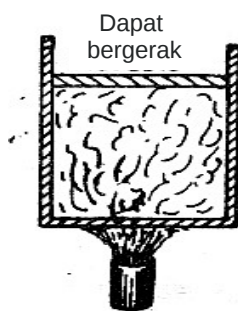


Gb. 2.1. Kalor diberikan pada volume tetap.

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<sup>o</sup> C, jika dipanaskan pada tekanan konstan. Biasanya dilambangkan dengan  $C_p$  atau  $K_p$ .



Gb.2.2. Kalor diberikan pada tekanan tetap.

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:

$$Q = m C_p (T_2 - T_1) = m C_p \Delta T \tag{2.24}$$

dimana,  $m$  = massa gas

$T_1$  = temperatur awal gas

$T_2$  = temperatur akhir gas

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:

$$Q_1 = m.C_v.(T_2 - T_1)$$

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

$$Q_2 = p(v_2 - v_1) = p. \Delta v \quad ;(\text{dalam kalor mekanik, kg-m}) \tag{2.25}$$

$$= \frac{p(v_2 - v_1)}{J} \quad ;(\text{dalam satuan kalor, cal}) \tag{2.26}$$

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

**Catatan:** 1. kerja luar yang dilakukan bisa juga dinyatakan dengan :

$$W = \frac{p(v_2 - v_1)}{J} = \frac{pv_2 - pv_1}{J} \quad (\text{dalam satuan kalor})$$

$$= \frac{mRT_2 - mRT_1}{J} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{J}$$

2. Dalam satuan S.I., persamaan di atas menjadi:

$$W = p(v_2 - v_1) = mR(T_2 - T_1)$$

### 2.7.3. Hubungan Antar Kalor Spesifik

Misalkan sebuah kotak dipanaskan pada tekanan konstan. Dan 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:

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

Kita tahu bahwa:

$$Q = W + \Delta U \quad \dots (iii)$$

Sehingga:

$$m C_p (T_2 - T_1) = p(v_2 - v_1) + m C_v (T_2 - T_1) \quad \dots (iv)$$

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

$$p v_1 = mRT_1$$

$$p v_2 = mRT_2$$

$$\square \quad p (v_2 - v_1) = mR (T_2 - T_1)$$

Substitusikan harga  $p(v_2 - v_1)$  pada persamaan (iv):

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

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

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

Persamaan di atas bisa 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  $\gamma$ . Rasio ini dikenal juga dengan indeks adiabatik. Karena  $C_p$  selalu lebih besar dari  $C_v$ , harga  $\gamma$  selalu lebih besar dari satu.

Seperti telah ditulis sebelumnya bahwa:

$$C_p = R + C_v$$

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

$$\gamma = \frac{R}{C_v} + 1 \quad (2.27)$$

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

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

No.	Nama gas	$C_p$		$C_v$		$\gamma = C_p/C_v$
		Satuan MKS	Satuan SI	Satuan MKS	Satuan SI	
		Kcal/kg °K	kJ/kg °K	Kcal/kg °K	kJ/kg °K	
1.	Udara	0,240	1,005	0,172	0,720	1,40
2.	Karbon dioksida (CO <sub>2</sub> )	0,202	0,846	0,157	0,657	1,29
3.	Oksigen (O <sub>2</sub> )	0,218	0,913	0,156	0,653	1,39
4.	Nitrogen (N <sub>2</sub> )	0,249	1,043	0,178	0,745	1,40
5.	Amonia (NH <sub>3</sub> )	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 <sub>2</sub> )	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 <sub>4</sub> )	0,518	2,169	0,394	1,650	1,31

**Contoh soal 2.4:**

Satu kg gas sempurna menempati volume sebesar 0,85 m<sup>3</sup> pada 15<sup>o</sup> 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:

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

$$v = 0,85 \text{ m}^3$$

$$T = 15^{\circ}\text{C} = 15^{\circ} + 273 = 288 \text{ K}$$

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

$$\gamma = 1,4$$

Kalor spesifik gas pada volume konstan:

$$pv = mRT$$

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

$$R = 295 \text{ J/kg-}^{\circ}\text{K} = 0,295 \text{ kJ/kg-K}$$

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

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

Kalor spesifik gas pada tekanan konstan:

$$\gamma = C_p / C_v$$

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

## 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  $R = 26,9 \text{ kg-m/kg-K}$  dan  $\gamma = 1,18$  untuk gas, carilah: (i) kalor spesifik, (ii) perubahan energi dalam, dan (iii) perubahan enthalpi.

Jawab:

Diketahui:

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

$$T_1 = 18,3^\circ \text{C} = 18,3^\circ + 273 = 291,3 \text{ K}$$

$$T_2 = 93,4^\circ \text{C} = 93,4^\circ + 273 = 366,4 \text{ K}$$

$$R = 26,9 \text{ kg-m/kg-K}$$

$$\gamma = C_p / C_v = 1,18$$

(i) Kalor spesifik:

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

$$= 26,9/427(1,18 - 1) = 0,35$$

$$C_p = \gamma \cdot C_v = 1,18 \times 0,35 = 0,413$$

(ii) Perubahan energi dalam:

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

$$= 1 \times 0,35 (366,4 - 291,3)$$

$$= 26,29 \text{ kcal}$$

(iii) Perubahan enthalpi:

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

$$= 1 \times 0,413 (366,4 - 291,3)$$

$$= 31,02 \text{ kcal}$$

### Contoh soal 2.6:

Suatu gas dengan massa 0,186 kg mempunyai tekanan, volume, dan temperatur awal masing-masingnya adalah 275 kN/m<sup>2</sup>; 0,09 m<sup>3</sup>; dan 185<sup>o</sup> C dikompresi pada tekanan konstan sampai temperatur 15<sup>o</sup> C. Hitunglah jumlah kalor yang dipindahkan dan kerja yang dilakukan selama proses. Ambil harga  $R = 290 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  dan  $C_p = 1,005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ .

Jawab:

Diketahui:

$$m = 0,186 \text{ kg}$$

$$p_1 = 275 \text{ kN/m}^2 = 275 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

$$v_1 = 0,09 \text{ m}^3$$

$$T_1 = 185^\circ \text{ C} = 185^\circ + 273 = 458 \text{ K}$$

$$T_2 = 15^\circ \text{ C} = 15^\circ + 273 = 288 \text{ K}$$

$$R = 290 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$C_p = 1,005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

Jumlah kalor yang dipindahkan:

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

$$= 0,186 \times 1,005 (268 - 488)$$

$$= - 31,78 \text{ kJ}$$

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  $1 \text{ kg-mol}$  gas  $N_2$  pada  $100^\circ \text{ C}$ . (i) hitunglah volume spesifik dan tekanan gas. (ii) jika gas didinginkan hingga temperatur  $30^\circ \text{ C}$ , hitunglah tekanan akhir, perubahan energi dalam spesifik dan enthalpi spesifik.

#### Jawab

Diketahui:

$$\begin{aligned} v &= 2,5 \text{ m}^3 \\ M &= 1 \text{ kg-mol} \\ T_1 &= 100^\circ \text{ C} = 100^\circ + 273 = 373 \text{ K} \\ T_2 &= 30^\circ \text{ C} = 30^\circ + 273 = 303 \text{ K} \end{aligned}$$

#### Volume spesifik gas

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

$$\begin{aligned} v_s &= \text{volume berat molekul} = 2,5 / 28 \text{ m}^3/\text{kg} \\ &= 0,080 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

#### Tekanan gas

$$\begin{aligned} p v &= M R T \\ p_1 \times 2,5 &= 848 \times 373 = 316\,300 \quad (MR = 848) \\ p_1 &= 126\,520 \text{ kg/m}^2 = 12,652 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

#### Tekanan akhir gas

$$\begin{aligned} p_1 v_1 / T_1 &= p_2 v_2 / T_2 \\ p_2 &= (p_1 / T_1) \times T_2 = (12,652 / 373) \times 303 \quad \dots (v_1 = v_2) \\ &= 10,28 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

#### Perubahan energi dalam spesifik

$$\begin{aligned} \text{Diasumsikan } C_p / C_v &= 1,4 = \gamma \\ R &= R_u M = 84828 = 30,3 \\ C_v &= R J (\gamma - 1) \end{aligned}$$



$$= 30,3 \times 427 \times (1,4 - 1) = 0,177$$

$$C_p = 1,4 \times 0,177 = 0,248$$

Perubahan energi dalam:

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

$$= 0,177 \times (303 - 373)$$

$$= -12,39 \text{ kcal/kg}$$

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

*Perubahan enthalpi spesifik*

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

$$= 0,248 \times (303 - 373)$$

$$= -17,36 \text{ kcal/kg}$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa enthalpi spesifik menurun setelah gas didinginkan.

**Soal-soal**

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

***“Engkau tak dapat meraih ilmu kecuali dengan enam hal yaitu cerdas, selalu ingin tahu, tabah, punya bekal dalam menuntut ilmu, bimbingan dari guru dan dalam waktu yang lama.” (Ali bin Abi Thalib )***

## 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.

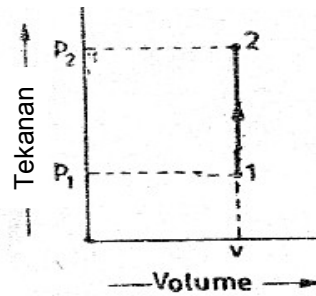
1. Proses volume konstan.
2. Proses tekanan konstan.
3. Proses hiperbolik.
4. Proses isothermal (proses temperatur konstan).
5. Proses adiabatik atau proses isentropik.
6. Proses politropik.
7. Proses ekspansi bebas.
8. Proses *Throttling*.

- 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  $2 \text{ kg/cm}^2$  dan temperatur  $77^\circ \text{C}$ . Gas dipanaskan pada volume konstan hingga tekanan  $7 \text{ kg/cm}^2$ . Carilah: (i) temperatur pada akhir proses, (ii) massa gas, dan (iii) perubahan energi dalam selama proses. Asumsikan  $C_p = 0,24$ ;  $C_v = 0,17$  dan  $R = 29,3 \text{ kg-m/kg}^\circ\text{C}$

Jawab

Diketahui:  $v_1 = 0,3 \text{ m}^3$

$$p_1 = 2 \text{ kg/cm}^2 = 2 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$$

$$T_1 = 77^\circ \text{C} = 77^\circ + 273 = 350 \text{ K}$$

$$p_2 = 7 \text{ kg/cm}^2 = 7 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$$

$$C_p = 0,24$$

$$C_v = 0,17$$

$$R = 29,3 \text{ kg-m/kg}^\circ\text{C}$$

(i) Temperatur pada akhir proses

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

$$T_2 = \frac{p_2}{p_1} \times T_1 = \frac{7 \times 10^4}{2 \times 10^4} \times 350^0 \text{ K}$$

$$= 1225 \text{ K} = 952^0 \text{ C}$$

(ii) Massa gas

$$p_1 v_1 = mRT_1$$

$$m = \frac{p_1 v_1}{RT_1} = \frac{(2 \times 10^4) \times 0,3}{29,3 \times 350} \text{ kg}$$

$$= 0,585 \text{ kg}$$

(iii) Perubahan energi dalam selama proses

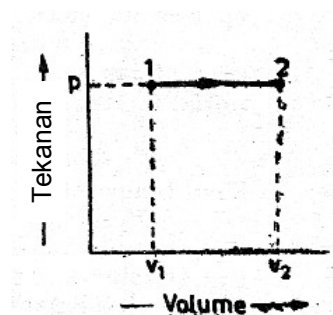
$$\Delta U = m \cdot C_v (T_2 - T_1)$$

$$= 0,585 \times 0,17 (1225 - 350)$$

$$= 87,02 \text{ kcal}$$

### 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:

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

Kenaikan energi dalam adalah:

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

Dan kerja yang dilakukan selama proses:

$W =$  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:

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

Penurunan energi dalam adalah:

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

Dan kerja yang dilakukan pada gas:

$$W = p(v_1 - v_2)$$

$$W = p(v_1 - v_2) = pv_1 - pv_2 = mR(T_1 - T_2)$$

### Contoh Soal 3.2:

Harga kalor spesifik pada tekanan konstan dan volume konstan masing-masingnya adalah 0,235 dan 0,174. Carilah harga konstanta gas karakteristik ( $R$ ) dan rasio kalor spesifik ( $\gamma$ ) gas.

Selanjutnya jika 1 kg gas ini dipanaskan pada tekanan konstan dari 25<sup>0</sup> C hingga 200<sup>0</sup> C, perkirakanlah kalor yang ditambahkan, kerja ideal dan perubahan energi dalam. Hitung juga tekanan awal dan volume akhir jika volume awal 2 m<sup>3</sup>.

#### Jawab

Diketahui:  $C_p = 0,235$

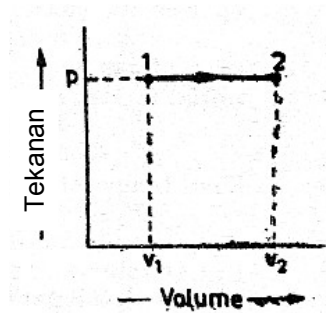
$$C_v = 0,174$$

$$T_1 = 25^0 \text{ C} = 25^0 + 273 = 298 \text{ K}$$

$$T_2 = 200^0 \text{ C} = 200^0 + 273 = 473 \text{ K}$$

$$v_1 = 2 \text{ m}^3$$

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



➤ Konstanta Gas Karakteristik

$$R = C_p - C_v$$

$$R = 0,235 - 0,174 = 0,061 \text{ kcal/kg-K}$$

$$\text{atau } R = 0,061 \times 427 = 26,05 \text{ kgm/kg-K}$$

➤ Rasio Kalor Spesifik

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{0,235}{0,174} = 1,351$$

➤ Kalor yang ditambahkan pada gas

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

$$= 1 \times 0,235 (473 - 298) = 41,13 \text{ kcal}$$

➤ Kerja ideal yang dilakukan gas

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

$$= 1 \times 0,061(473 - 298)$$

$$= 10,68 \text{ kcal}$$

➤ Perubahan Energi Dalam

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

$$= 1 \times 0,174 (473 - 298) = 30,45 \text{ kcal}$$

➤ Tekanan awal gas

$$p_1 v_1 = mRT_1$$



$$p_1 \times 2 = 1 \times 26,05 \times 298 = 7763$$

$$p_1 = 7763 / 2 = 3881,5 \text{ kg/m}^2 = 0,38815 \text{ kg/cm}^2$$

➤ 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  $p v = \text{konstan}$ . 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.

Kita tahu bahwa:

$$Q = \Delta U + W$$

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

$$Q = W$$

Sehingga selama ekspansi thermal:

**Kalor yang ditambahkan = Kerja yang dilakukan oleh gas**

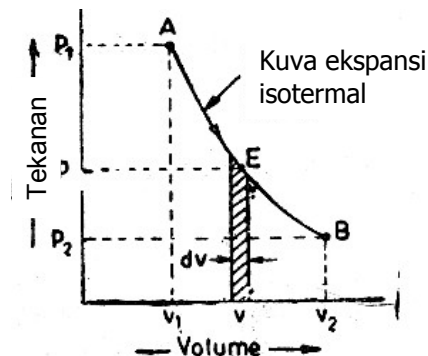
Dengan cara yang sama, selama kompresi isothermal:

### 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:

$$pV = p_1v_1$$

$$p = p_1 v_1 / v$$

Substitusi harga  $p$  ini ke persamaan (i),

$$W = \int_{v_1}^{v_2} \frac{p_1 v_1}{v} dv = p_1 v_1 \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v}$$

$$W = p_1 v_1 [\ln v]_{v_1}^{v_2} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (3.7)$$

atau 
$$W = p_1 v_1 \ln r \quad (3.8)$$

dimana:  $r = \frac{v_2}{v_1}$  dan dikenal dengan rasio ekspansi.

Kita tahu bahwa:  $p_1 v_1 = mRT$

Jadi kerja yang dilakukan:

$$W = mRT \ln \frac{v_2}{v_1} = MRT \ln r \quad (3.9)$$

Karena  $p_1 v_1 = p_2 v_2$  maka:  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1}{p_2}$

Maka kerja yang dilakukan:

$$W = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (3.10)$$

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

2. Rasio kompresi,  $r = \frac{\text{Volume pada awal kompresi}}{\text{Volume pada akhir kompresi}}$

3. Kalor yang diberikan selama proses ini bisa dicari dengan membagi kerja yang dilakukan dengan panas ekuivalen. (yaitu:  $W/J$ ).

### Contoh Soal 3.3 (SI):

0,1 m<sup>3</sup> udara pada tekanan 1,5 bar berekspansi secara isothermal hingga volumenya menjadi 0,5 m<sup>3</sup>. 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:

$$W = p_1 v_1 \ln r$$

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

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

$$= \frac{24,115}{4,187} = 5,76 \text{ kcal}$$

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

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

### 3.5. Proses Adiabatik atau Proses Isentropik<sup>1</sup>

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:

---

<sup>1</sup>

Proses adiabatik tanpa gesekan dikenal dengan proses isentropik.

$$Q = \Delta U + W$$

$$\therefore 0 = \Delta U + W$$

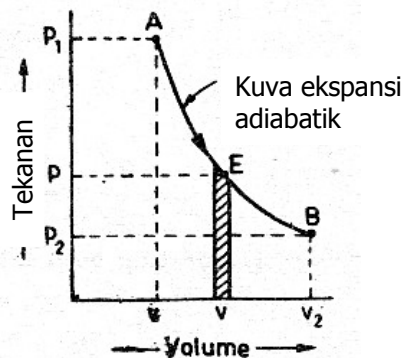
atau

$$\Delta U = -W$$

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 4.

Jika  $v_1$  = volume awal gas  
 $p_1$  = tekanan awal gas  
 $v_2$  = volume akhir gas  
 $p_2$  = tekanan akhir gas



Gambar 3.4. Proses adiabatik.

Kerja yang dilakukan selama perubahan ini (gambar 3.4a):

$$dW = p.dv$$

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

$$dU = m.C_v.dT$$

karena  $dU + dW = 0$

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

$$m.C_v.dT = -p.dV \quad (i)$$

karena  $pV = mRT$

Dengan mendiferensialkan persamaan ini, kita peroleh:

$$p.dv + v.dp = mR.dT \quad (\text{ii})$$

Sementara:  $R = (C_p - C_v)$

Dengan mensubstitusikan harga  $R$  ke persamaan (ii),

$$p.dv + v.dp = m(C_p - C_v) dT$$

$$m(C_p - C_v) dT = p.dv + v.dp \quad (\text{iii})$$

Bagi persamaan (iii) dengan (i)

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

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

atau

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

diperoleh  $\gamma = - \left( \frac{v}{dv} \times \frac{dp}{p} \right) \quad \left( \because \frac{C_p}{C_v} = \gamma \right)$

$$\therefore \gamma \times \frac{dv}{v} = - \frac{dp}{p}$$

$$\gamma \frac{dv}{v} + \frac{dp}{p} = 0$$

Dengan mengintegalkan kedua sisi persamaan:

$$\gamma. \ln v + \ln p = \text{konstan}$$

atau  $\ln pv^\gamma = \ln C$

$$pv^\gamma = C \quad (3.11)$$

atau  $p_1v_1^\gamma = p_2v_2^\gamma = \dots = C \quad (3.12)$

Persamaan di atas bisa juga dinyatakan dalam bentuk berikut:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^\gamma \quad (3.13)$$

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

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{\gamma-1} \quad (3.14)$$

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

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:

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p \cdot dv \quad (vii)$$

Proses ekspansi adiabatik gas mengikuti persamaan:

$$p v^\gamma = p_1 v_1^\gamma$$

$$p = \frac{p_1 v_1^\gamma}{v^\gamma}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan ini ke persamaan (vii),

$$\begin{aligned} W &= \int_{v_1}^{v_2} \frac{p_1 v_1^\gamma}{v^\gamma} dv = p_1 v_1^\gamma \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^\gamma} \\ &= p_1 v_1^\gamma \left[ \frac{v^{-\gamma+1}}{-\gamma+1} \right]_{v_1}^{v_2} \\ &= \frac{p_1 v_1^\gamma}{1-\gamma} \left[ v_2^{1-\gamma} - v_1^{1-\gamma} \right] \\ &= \frac{p_1 v_1^\gamma \cdot v_2^{1-\gamma} - p_1 v_1^\gamma \cdot v_1^{1-\gamma}}{1-\gamma} \end{aligned}$$

karena :  $p_1 v_1^\gamma = p_2 v_2^\gamma$

$$W = \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{1-\gamma} \quad (3.16)$$

atau 
$$W = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{\gamma - 1} \quad \dots \text{ untuk ekspansi} \quad (3.17)$$

dan 
$$W = \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{\gamma - 1} \quad \dots \text{ untuk kompresi} \quad (3.18)$$

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

(a) Kita tahu bahwa:  $p_1 v_1 = mRT_1$  dan  $p_2 v_2 = mRT_2$

Dengan mensubstitusikan harga-harga ini ke persamaan untuk ekspansi,

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

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

(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  $178,9^{\circ} \text{ C}$  berekspansi secara adiabatik hingga 3 kali volume awal. Dan temperaturnya turun ke  $15,6^{\circ} \text{ C}$ . Kerja selama ekspansi adalah 5.300 kg-m. Hitunglah harga kalor spesifik pada tekanan dan volume konstan.

Jawab

Diketahui:  $m = 0,45 \text{ kg}$

$$T_1 = 178,9^{\circ} \text{ C} = 178,9^{\circ} + 273 = 451,9 \text{ K}$$

$$v_2 = 3 \times \text{volume awal} = 3v_1$$

$$T_2 = 15,6^{\circ} \text{ C} = 15,6^{\circ} + 273 = 288,6 \text{ K}$$

$$W = 5.300 \text{ kg-m}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{\gamma - 1}$$



$$\frac{451,9}{288,6} = \left( \frac{3v_1}{v_1} \right)^{\gamma-1} = 3^{\gamma-1}$$

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

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

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

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

$$\gamma = 1,41$$

Dengan menggunakan persamaan:

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

$$5300 = \frac{0,45 \times R(451,9 - 288,6)}{1,41 - 1} = 179,2R$$

$$R = 29,58 \text{ kg-m/kg}^{\circ}\text{C}$$

Sehingga:

$$C_p - C_v = R$$

$$1,41C_v - C_v = \frac{29,58}{427} = 0,069 \quad (\because \gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,41)$$

$$C_v = \frac{0,069}{0,41} = 0,168$$

dan  $C_p = 1,41 \times 0,168 = 0,237$

### Contoh Soal 3.5:

Sebuah sistem berisikan  $0,15 \text{ m}^3$  gas dengan tekanan  $3,8 \text{ bar}$  dan temperatur  $150^\circ \text{ C}$ . Gas diekspansikan secara adiabatik hingga tekanan  $1,0 \text{ bar}$ . Gas kemudian dipanaskan pada tekanan konstan hingga enthalpinya naik sebesar  $70 \text{ kJ}$ . 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:

$$m = \frac{p_1 v_1}{RT_1} = \frac{3,8 \times 10^5 \times 0,15}{287 \times 423} = 0,47 \text{ kg}$$

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

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

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

Dan :

$$\frac{v_1}{v_2} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{1/\gamma}$$

$$\frac{0,15}{v_2} = \left( \frac{1,0 \times 10^5}{3,8 \times 10^5} \right)^{1/1,4} = 0,385$$

$$v_2 = 0,39 \text{ m}^3$$

➤ Proses tekanan konstan.

Kenaikan enthalpi:

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

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

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

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:

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{\gamma - 1} \\ &= \frac{(3,8 \times 10^5 \times 0,15) - (1,0 \times 10^5 \times 0,39)}{1,4 - 1} = 45.000 \text{ kJ} \end{aligned}$$

➤ 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 indeks  $\gamma$  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  $\gamma$  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 ( $p v^n = \text{konstan}$ ), 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

$p_2, v_2, T_2$  = bersesuaian dengan kondisi akhir gas.

Kerja yang dilakukan gas selama proses politropik:

$$W = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{J(n-1)} = \frac{mR(T_1 - T_2)}{J(n-1)} \quad (\text{dalam satuan kalor}) \quad (3.25)$$

Kenaikan energi dalam:

$$\Delta U = m.C_v (T_2 - T_1) \quad (\text{dalam satuan kalor})$$

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 untuk kalor juga bisa dinyatakan dengan:

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

$$(b). \quad Q = \frac{(\gamma - n)}{(\gamma - 1)} \times \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{(n - 1)}$$

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

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  $\gamma$ . Jika  $n$  lebih besar dari  $\gamma$ , 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  $\gamma$ .
4. Persamaan untuk kerja yang dilakukan bisa juga ditulis dengan:

$$W = \frac{p_1 v_1 (1 - r^{n-1})}{(n - 1)}$$

$$\text{dimana } \frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^n = r^n \quad \text{dan} \quad \frac{p_2 v_2}{p_1 v_1} = r^n \times \frac{1}{r} = r^{n-1}$$

### 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 satuan 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 kg/cm<sup>2</sup> abs dan 20<sup>0</sup> C pada suatu bejana tertutup dikompresi hingga 10 kg/cm<sup>2</sup> abs. Temperatur gas naik menjadi 180<sup>0</sup> C. Jika kompresi mengikuti persamaan  $p.v^n = C$ , carilah harga  $n$ .

**Jawab**

Diketahui:  $p_1 = 1,5 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$

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

$$p_2 = 10 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$$

$$T_2 = 180^\circ \text{ C} = 180^\circ + 273 = 453 \text{ K}$$

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  $1,25 \text{ bar}$  dan suhu  $25^\circ \text{ C}$ . Gas dikompresi hingga volumenya menjadi  $0,0042 \text{ m}^3$  sesuai dengan persamaan  $pV^{1,3} = C$ . 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:  $v_1 = 0,028 \text{ m}^3$

$$p_1 = 1,25 \text{ bar} = 1,25 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$T_1 = 25^\circ \text{ C} = 25^\circ + 273 = 298 \text{ K}$$

$$v_2 = 0,0042 \text{ m}^3$$

$$n = 1,3$$

*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*

$$\frac{p_1}{p_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^n$$

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

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

$$W = \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{n - 1}$$

$$= \frac{(14,72 \times 10^5 \times 0,028) - (1,25 \times 10^5 \times 0,0042)}{1,3 - 1} = 135.630 \text{ Nm}$$

$$= 135,63 \text{ kNm}$$

*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:

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

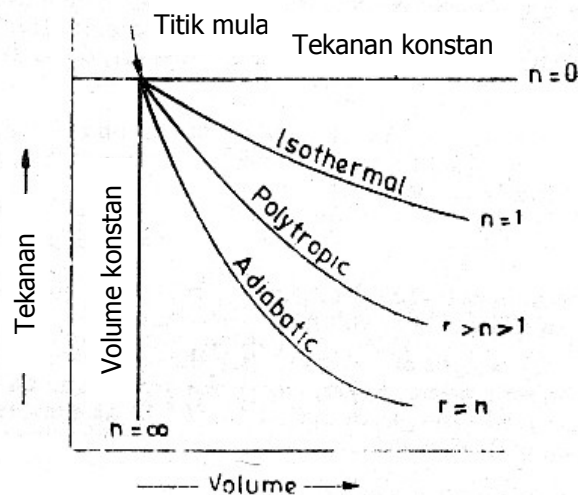
### 3.8. Proses Throttling

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:

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

### 3.9. Hukum Umum Ekspansi dan Kompresi



Gambar 3.4. Kurva untuk berbagai harga  $n$ .

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. Tetapi 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 isotermal 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  $100^\circ \text{C}$ . 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  $5 \text{ kg/cm}^2$  dan temperatur  $80^\circ \text{C}$ . Udara tersebut berekspansi di dalam sebuah siliner pada temperatur konstan hingga tekanan  $1 \text{ kg/cm}^2$ . Carilah besarnya kerja yang dihasilkan udara selama langkah ekspansi.
3.  $0,336 \text{ m}^3$  gas pada tekanan  $10 \text{ kg/cm}^2$  dan temperatur  $150^\circ \text{C}$  berekspansi secara adiabatik hingga tekanannya  $4 \text{ kg/cm}^2$ . 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  $55 \text{ cm}$ ; Panjang langkah (stroke)  $75 \text{ cm}$ ; rasio kompresi  $13,5$ . Pada akhir langkah hisap tekanannya adalah  $1,0 \text{ kg/cm}^2$  dan temperatur  $43^\circ \text{C}$ . Kompresi mengikuti persamaan  $pV^{1,37} = C$ . Carilah:
  - a. Tekanan dan temperatur pada akhir kompresi
  - b. Berat udara yang dihisap
  - c. Kerja selama langkah kopmpresi
  - 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  $14 \text{ kg/cm}^2$  abs, berapakah laju kalor yang diterima per detik pada kondisi ini.

6. Volume awal 0,18 kg suatu gas adalah 0,15 m<sup>3</sup> pada temperatur 15<sup>0</sup> C dan tekanan 1 kg/cm<sup>2</sup>. Setelah kompresi adiabatik ke volume 0,056 m<sup>3</sup>, didapat tekanan gas 4 kg/cm<sup>2</sup>. Carilah:
- Konstanta gas.
  - Berat molekul gas.
  - Rasio kalor spesifik.
  - Dua kalor spesifik, satu pada tekanan konstan dan satu pada volume konstan.
  - Perubahan energi dalam.
7. Suatu gas ideal pada 30<sup>0</sup> C dan 1 bar di kompresi secara adiabatik dari 5 m<sup>3</sup> ke 1 m<sup>3</sup>. Carilah temperatur, tekanan, dan kerja yang dihasilkan. Ambil  $\gamma = 1,4$ .
8. Udara pada 15<sup>0</sup> 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<sup>0</sup> 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<sup>0</sup> C di kompresi secara adiabatik hingga tekanan 6,86 bar. Kalor sebesar 460 kJ per kg udara sekarang ditambahkan pada volume konstan. Carilah:
- Rasio kompresi.
  - Temperatur pada akhir kompresi.
  - Temperatur pada akhir penambahan kalor.

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

***“Bencana akibat kebodohan adalah sebesar-besar musibah seorang manusia.” ( Al-Ghazali )***

## 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 perubahan entropi dari suatu zat. Secara matematis entropi dirumuskan:

$$dQ = T.ds \quad \text{atau} \quad ds = \frac{dQ}{T}$$

dimana:  $dQ$  = kalor yang diserap/dilepaskan

$T$  = temperatur absolut

$ds$  = kenaikan/penurunan entropi.

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 ( $T$ - $s$ ).

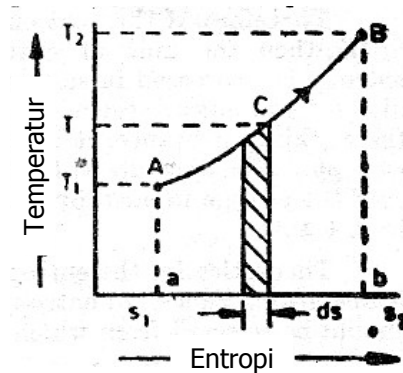
Kalor yang diberikan ke zat dirumuskan dengan:

$$dQ = T.ds \tag{4.1}$$

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 mengintegrasikan persamaan (i), sehingga:

$$\int T.ds = \int dQ \tag{4.2}$$

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-<sup>0</sup>K atau kJ/kg-<sup>0</sup>K.

## 4.2. Persamaan Umum Perubahan Entropi Gas Sempurna

Dengan notasi berikut:

$m$  = 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:

### 4.2.1. Dalam volume dan temperature absolut.

$$\begin{aligned} dQ &= dU + dW \\ &= mC_v dT + \frac{p \cdot dv}{J} \end{aligned} \quad \dots (i)$$

dimana,  $dT$  = perubahan kecil temperatur

$dv$  = perubahan kecil volume

Dengan membagi persamaan (i) dengan  $T$ ,

$$\frac{dQ}{T} = mC_v \cdot \frac{dT}{T} + \frac{p \cdot dv}{T}$$

karena  $pv = mRT$  atau  $\frac{p}{T} = \frac{mR}{v}$  dan  $\frac{dQ}{T} = ds$

maka 
$$ds = mC_v \frac{dT}{T} + \frac{m \cdot R}{vJ} dv \quad \dots \text{(ii)}$$

Integralkan persamaan (ii) dengan batas yang tepat,

$$\int_{s_1}^{s_2} ds = m \cdot C_v \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} + mR \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v}$$

$$\left[ s \right]_{s_1}^{s_2} = m \cdot C_v \left[ \ln T \right]_{T_1}^{T_2} + m \cdot R \left[ \ln v \right]_{v_1}^{v_2}$$

sehingga:

$$\begin{aligned} \Delta s = s_2 - s_1 &= m \cdot C_v (\ln T_2 - \ln T_1) + m \cdot R (\ln v_2 - \ln v_1) \\ &= m \cdot C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + m \cdot R \ln \frac{v_2}{v_1} \\ &= m \left[ C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \right] \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$= m \left[ C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + (C_p - C_v) \ln \frac{v_2}{v_1} \right] \quad (4.5)$$

#### 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 m<sup>3</sup> udara pada tekanan 8 kg/cm<sup>2</sup> dan temperatur 280<sup>0</sup> C berekspansi hingga volumenya 8 kali volume awal dan temperatur akhir setelah ekspansi adalah 25<sup>0</sup> C. Hitunglah perubahan entropi udara selama proses. Asumsikan harga  $C_p = 0,24$  ,  $C_v = 0,17$  dan  $R = 29,89$ .

Jawab:

Diketahui:  $v_1 = 0,05 \text{ m}^3$

$$p_1 = 8 \text{ kg/cm}^2 = 8 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$$

$$T_1 = 280^0 \text{ C} + 273 = 553 \text{ K}$$

$$v_2 = 8 v_1 = 8 \times 0,05 = 0,4 \text{ m}^3$$

$$T_2 = 25^0 \text{ C} + 273 = 298 \text{ K}$$

$$C_p = 0,24$$

$$C_v = 0,17$$

$$R = 29,89$$

$$p.v = m RT$$

$$m = \frac{p_1 v_1}{RT_1} = \frac{8 \times 10^4 \times 0,05}{29,89 \times 553} = 0,242 \text{ kg}$$

➤ perubahan entropi:

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= m \left[ C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + (C_p - C_v) \ln \frac{v_2}{v_1} \right] \\ &= 0,242 \left[ 0,17 \ln \frac{298}{553} + (0,24 - 0,17) \ln \frac{0,4}{0,05} \right] \\ &= 9,79 \times 10^{-3} \text{ satuan entropi} \end{aligned}$$

### 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*),

$$dQ = m.C_v.dT$$

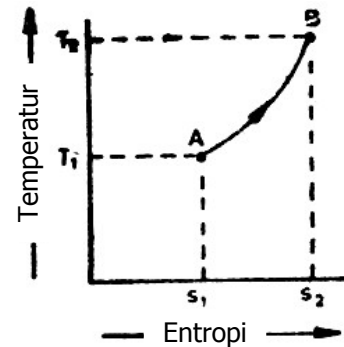
Dengan membagi kedua sisi persamaan dengan *T*,

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

$$ds = m.C_v \cdot \frac{dT}{T}$$

$$\int_{s_1}^{s_2} ds = m.C_v \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T}$$

$$s_2 - s_1 = m.C_v \ln \frac{T_2}{T_1} \tag{4.8}$$



Gambar 4.2. Kurva *T-s* pada proses volume konstan.

Persamaan di atas bisa dinyatakan dalam variabel tekanan.

$$s_2 - s_1 = m.C_v \ln \frac{p_2}{p_1} \tag{4.9}$$

#### Contoh soal 4.2:

Hitunglah perubahan entropi 2 kg udara, jika udara dipanaskan pada volume konstan dari 1 kg/cm<sup>2</sup> abs ke 4 kg/cm<sup>2</sup> abs. Diasumsikan *C<sub>v</sub>* = 0,169.

Jawab:

Diketahui: *m* = 2 kg; *p*<sub>1</sub> = 1 kg/cm<sup>2</sup>; *p*<sub>2</sub> = 4 kg/cm<sup>2</sup>; *C<sub>v</sub>* = 0,169

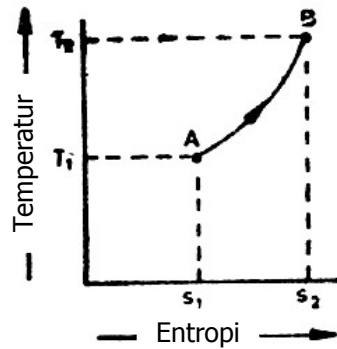
Perubahan entropi:

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= mC_v \ln \frac{p_2}{p_1} \\ &= 2 \times 0,169 \ln \frac{4}{1} \end{aligned}$$

= 0,468 satuan entropi

#### 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.



Gambar 4.3. Kurva  $T-s$  selama proses tekanan konstan.

Perubahan entropi dirumuskan dengan:

$$s_2 - s_1 = m.C_p \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (4.10)$$

Dalam variabel volume.

$$s_2 - s_1 = m.C_p \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (4.11)$$

#### Contoh soal 4.3:

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

Jawab:

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

➤ Perubahan entropi pada pemanasan tekanan konstan

$$s_2 - s_1 = mC_p \ln \frac{T_2}{T_1}$$

$$= 0,5 \times 1,0 \ln\left(\frac{573}{373}\right)$$

$$= 0,214 \text{ satuan entropi}$$

- perubahan entropi pada pendinginan volume konstan

$$s_3 - s_2 = mC_v \ln \frac{T_3}{T_2}$$

$$= 0,5 \times 0,72 \ln\left(\frac{373}{573}\right)$$

$$= -0,154 \text{ satuan entropi}$$

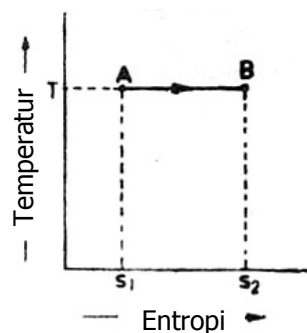
- perubahan entropi keseluruhan

$$s_3 - s_1 = (s_2 - s_1) + (s_3 - s_2) = 0,214 - 0,154$$

$$= 0,06 \text{ satuan entropi}$$

#### 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.



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

Perubahan entropi dirumuskan:

$$s_2 - s_1 = mR \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

atau:

$$s_2 - s_1 = m(C_p - C_v) \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) \quad (4.12)$$

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<sup>0</sup> 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:  $p_1 = 1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ;  $T_1 = 40^0 \text{ C} + 273 = 313 \text{ K}$ ;  $p_2 = 10 \text{ bar} = 10 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ .

➤ Kerja per kg gas

$$\begin{aligned} W &= mRT_1 \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) \\ &= 1 \times 287 \times 313 \ln\left(\frac{1 \times 10^5}{10 \times 10^5}\right) \\ &= -206.600 \text{ J/kg} = -206,6 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

➤ Perubahan entropi per kg gas

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= \frac{\text{k calor yang diserap}}{\text{temperatur mutlak}} = \frac{Q}{T} \\ Q &= W \\ s_2 - s_1 &= \frac{-206,6}{313} = -0,66 \text{ satuan entropi} \end{aligned}$$

#### 4.3.4. Perubahan entropi pada proses politropik ( $p v^n = \text{konstan}$ )

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  $p v^{1,25} = \text{konstan}$  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  $R = 287 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$ .

Jawab:

Diketahui:  $n = 1,25$  ;  $p_1 = 1 \text{ bar}$  ;  $v_1 = 0,9 \text{ m}^3$  ;  $v_2 = 0,6 \text{ m}^3$  ;  $\gamma = 1,4$  ;  $R = 287 \text{ J/kg-K}$ .

➤ 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

$$s_2 - s_1 = m \times \frac{\gamma - n}{\gamma - 1} \times R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$= 1 \times \frac{1,4 - 1,25}{1,4 - 1} \times 287 \ln\left(\frac{0,6}{0,9}\right)$$

$$= - 43,56 \text{ satuan entropi}$$

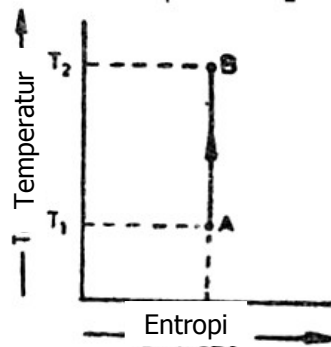
#### 4.3.5. Perubahan Entropi Selama Proses Adiabatik (Proses Isentropik)

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

$$dQ = 0$$

sehingga:

$$ds = 0 \quad \text{karena } ds = dQ/T$$



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  $2,0 \text{ kg/cm}^2$  abs. Gas diaduk hingga tekanannya berubah menjadi  $2,4 \text{ kg/cm}^2$  abs. Carilah: (i) kalor yang dipindahkan, (ii) kerja output, dan (iii) perubahan entropi per kg. Ambil  $C_v = 0,157 \text{ kcal/kg-K}$ ,  $R = 26,5 \text{ kg-m/kg-K}$ .

Jawab:

Diketahui:  $v = 0,568 \text{ m}^3$ ;  $p_1 = 2,0 \text{ kg/cm}^2 = 2,0 \times 10^5 \text{ kg/m}^2$ ;  $p_2 = 2,4 \text{ kg/cm}^2 = 2,4 \times 10^5 \text{ kg/m}^2$ ;  $C_v = 0,157$ ;  $R = 26,5 \text{ kg-m/kg}^0\text{K}$ .

(i) Kalor yang dipindahkan

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

(ii) Kerja output per kg

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

$$p v = mRT$$

$$T_1 = \frac{p_1 v}{mR} = \frac{2,0 \times 10^4 \times 0,568}{1 \times 26,5} = 428,7 \text{ K}$$

$$T_2 = \frac{p_2 v}{mR} = \frac{2,4 \times 10^4 \times 0,568}{1 \times 26,5} = 514,4 \text{ K}$$

Perubahan energi dalam

$$\begin{aligned} \Delta U &= C_v (T_2 - T_1) = 0,157 (515,4 - 428,7) \\ &= 13,5 \text{ kcal} \end{aligned}$$

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

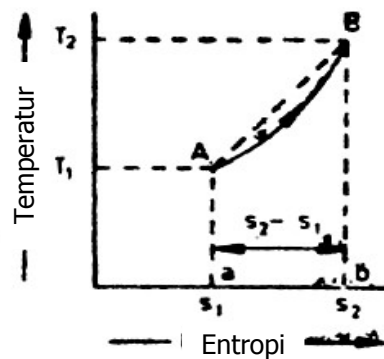
$$W = \Delta U = 13,5 \text{ kcal}$$

(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.



Gambar 4.6. Kalor yang diserap karena perubahan entropi.

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:

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



$$Q = (s_2 - s_1) \left( \frac{T_1 + T_2}{2} \right) \quad (4.18)$$

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  $100^\circ \text{C}$  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

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{n-1}$$

$$\frac{373}{T_2} = \left( \frac{1}{15} \right)^{1,3-1} = 0,4438$$

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

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= mC_v \frac{\gamma - n}{n - 1} \ln \frac{T_1}{T_2} \\ &= 1 \times 0,714 \times \frac{1,4 - 1,3}{1,3 - 1} \ln \frac{373}{840} \\ &= -0,1929 \text{ satuan entropi} \end{aligned}$$

Tanda negatif menunjukkan terjadinya penurunan entropi.

➤ Kalor yang ditransfer:

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{\gamma - n}{n - 1} \times m C_v (T_1 - T_2) \\
 &= \frac{1,4 - 1,3}{1,3 - 1} \times 1 \times 0,714 (373 - 840) \\
 &= - 111,15 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

Tanda negatif menunjukkan adanya panas yang dikeluarkan.

Perpindahan kalor dengan metode pendekatan:

$$\begin{aligned}
 Q &= (s_2 - s_1) \times \left( \frac{T_1 + T_2}{2} \right) \\
 -111,15 &= (s_2 - s_1) \times \left( \frac{373 + 840}{2} \right) = 606,5 (s_2 - s_1) \\
 s_2 - s_1 &= - 0,1833
 \end{aligned}$$

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:

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

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. Sehingga:

$$Q_H = -Q_C$$

$$\Delta s_H = \frac{Q_H}{T_H} = \frac{-Q_C}{T_H} \quad \text{dan} \quad \Delta s_C = \frac{Q_C}{T_C}$$

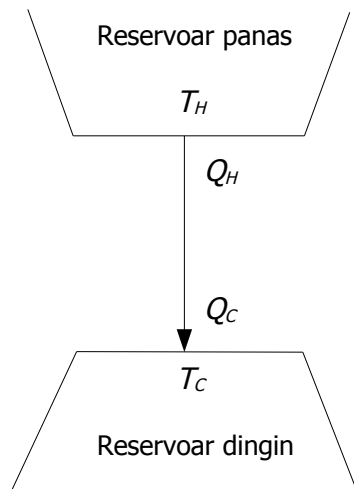
$$\Delta s_{total} = \Delta s_H + \Delta s_C = \frac{-Q_C}{T_H} + \frac{Q_C}{T_C} = Q_C \left( \frac{T_H - T_C}{T_H T_C} \right)$$

sesuai dengan hukum kedua termodinamika,  $\Delta s_{total}$  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  $T_C$ .



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

#### 4.5.1. Mesin Kalor

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

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.

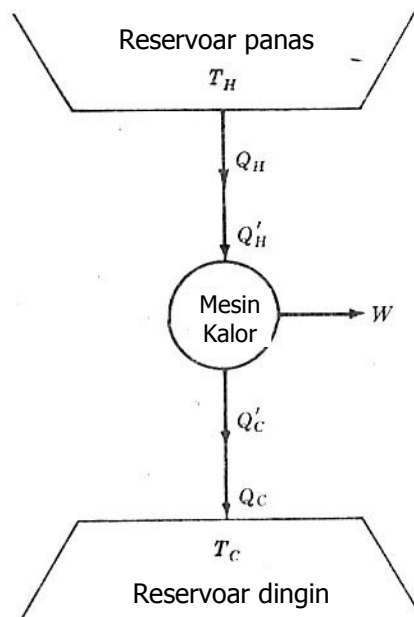
$$Q_H = - Q_H' \quad \text{dan} \quad Q_C = - Q_C'$$

Perubahan entropi total:

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

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

$$\Delta S_{total} = \frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_C}{T_C} \tag{4.18}$$



Gambar 4.8. Mesin Kalor.

Dari hukum pertama termodinamika untuk mesin:

$$\Delta U = Q - W$$

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

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

$$W = Q_H' + Q_C' = -Q_H - Q_C \tag{2}$$

Kombinasi (4.18) dan (2) :

$$W = -T_H \Delta S_{total} + Q_C \left( \frac{T_H}{T_C} - 1 \right) \tag{3}$$

Pada proses reversibel,  $\Delta S_{total}$  menjadi nol sehingga:

$$W = Q_C \left( \frac{T_H}{T_C} - 1 \right) \quad (4)$$

Supaya  $W$  positif, maka  $Q_C$  mesti positif.

Kombinasi (2) dan (4):

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

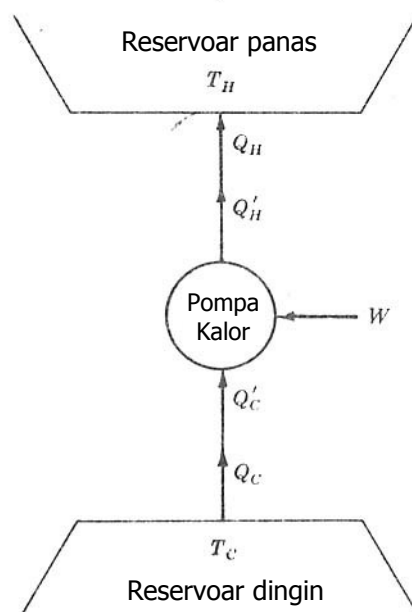
$$\frac{W}{-Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

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,  $\eta$  mesin kalor Carnot.



Gambar 4.9. Pompa Kalor.

### 4.5.2. Pompa Kalor

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

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*,  $\omega$ . 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

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

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  $2,5 \text{ m}^3$  berisikan  $1 \text{ kg-mol } N_2$  pada  $100^\circ \text{ C}$ . Jika gas didinginkan hingga temperatur  $30^\circ \text{ C}$ , hitunglah perubahan entropi spesifik.
2. Sebuah bejana dengan kapasitas  $3 \text{ m}^3$  berisikan udara pada tekanan  $1,5 \text{ kg/cm}^2$  abs dan temperatur  $25^\circ \text{ C}$ . Udara tambahan di pompa ke sistem hingga tekanan naik hingga  $30 \text{ kg/cm}^2$  abs dan temperatur meningkat hingga  $60^\circ \text{ C}$ . Carilah massa udara yang dipompa, dan nyatakan jumlahnya dalam volume pada tekanan  $1 \text{ kg/cm}^2$  abs dan temperatur  $25^\circ \text{ C}$ .

Jika bejana dibiarkan mendingin hingga temperatur kembali ke  $25^\circ \text{ C}$ , 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.

3. Jika bejana dibiarkan mendingin hingga temperatur kembali ke  $25^\circ \text{ C}$ , 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. Volume dengan volume tertentu pada  $46^\circ \text{ C}$  dan tekanan  $6,5 \text{ bar}$  berekspansi 4 kali dari volume awal, sesuai dengan persamaan  $p v^{1,25} = \text{konstan}$ . Carilah temperatur akhir gas dan perubahan entropi per kg gas dengan mengasumsikan  $C_p = 1,0$  dan  $C_v = 0,72$ .
5. Udara dengan massa  $9 \text{ kg}$  dan tekanan  $1,75 \text{ bar}$  dan temperatur  $13^\circ \text{ C}$  dikompresi hingga  $24,5 \text{ bar}$  sesuai dengan persamaan  $p v^{1,32} = \text{konstan}$ , dan kemudian didinginkan pada volume konstan hingga  $15^\circ \text{ C}$ . Carilah:
  - a. Volume dan temperatur pada akhir kompresi.
  - b. Perubahan entropi selama kompresi dan selama proses pendinginan pada volume konstan.
6. Sebanyak  $2 \text{ kg}$  udara pada tekanan  $2 \text{ bar}$  dan temperatur  $20^\circ \text{ C}$  berekspansi ke tekanan  $1 \text{ bar}$  dan  $103^\circ \text{ C}$ . Hitunglah perubahan entropi dengan mengasumsikan harga  $C_p = 1,0$  dan  $R = 287 \text{ J/kg } ^\circ\text{K}$ .
7. Hitunglah perubahan entropi jika  $1 \text{ kg}$  udara dipanaskan pada volume konstan dari  $1 \text{ bar}$  dan  $27^\circ \text{ C}$  ke tekanan  $5 \text{ bar}$ . Asumsikan harga  $C_v = 0,17$  dan  $R = 287 \text{ J/kg } ^\circ\text{K}$ .

8. Hitunglah perubahan entropi jika 0,14 kg gas yang awalnya mempunyai temperatur  $170^{\circ}\text{C}$  berekspansi dengan rasio volume 5,4 sesuai dengan persamaan  $p v^{1,24} = \text{konstan}$ . Ambil  $\gamma = 1,4$  dan  $R = 290 \text{ J/kg }^{\circ}\text{K}$ .

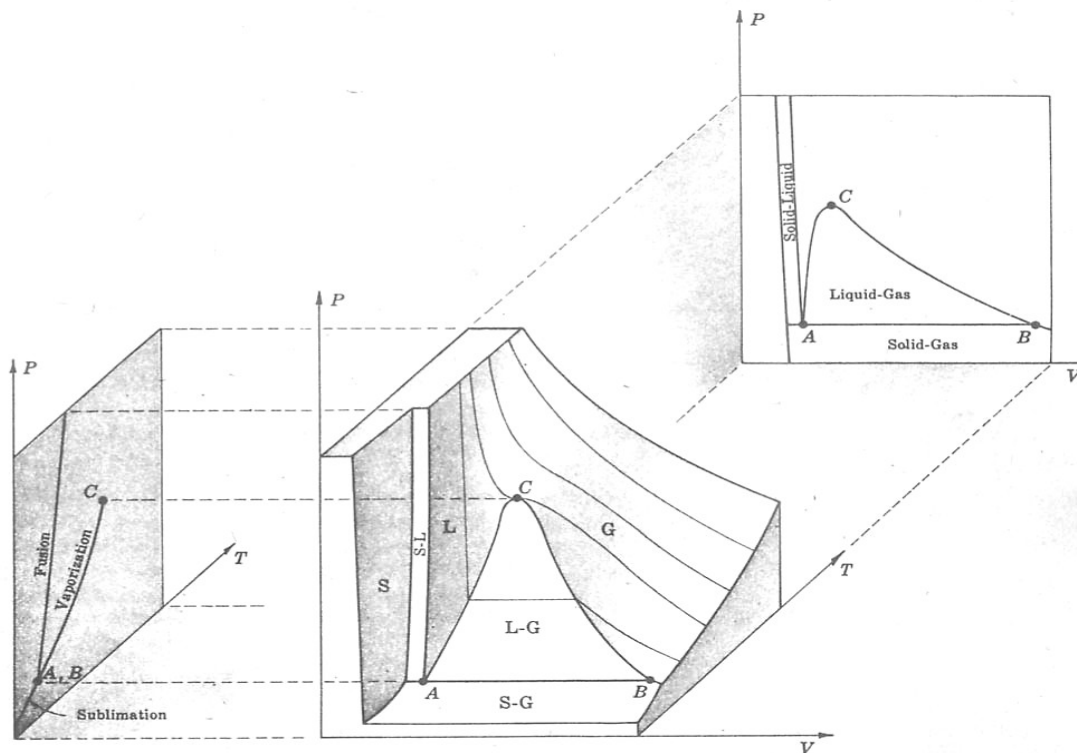


***“Ilmu pengetahuan tanpa agama lumpuh, agama tanpa ilmu pengetahuan buta.” (Albert Einstein)***

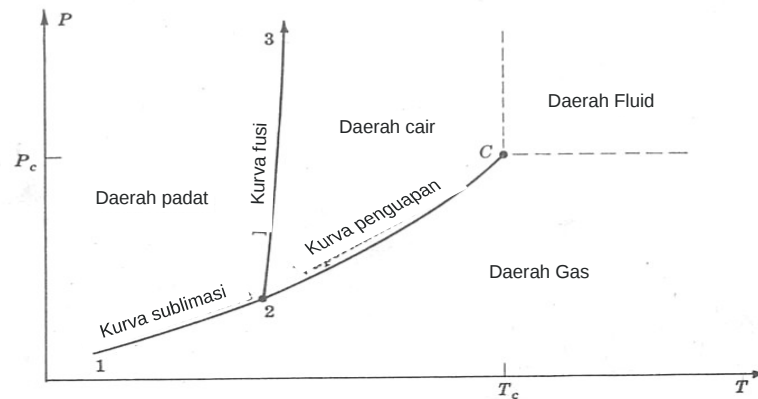
## BAB V

### 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 5.1.



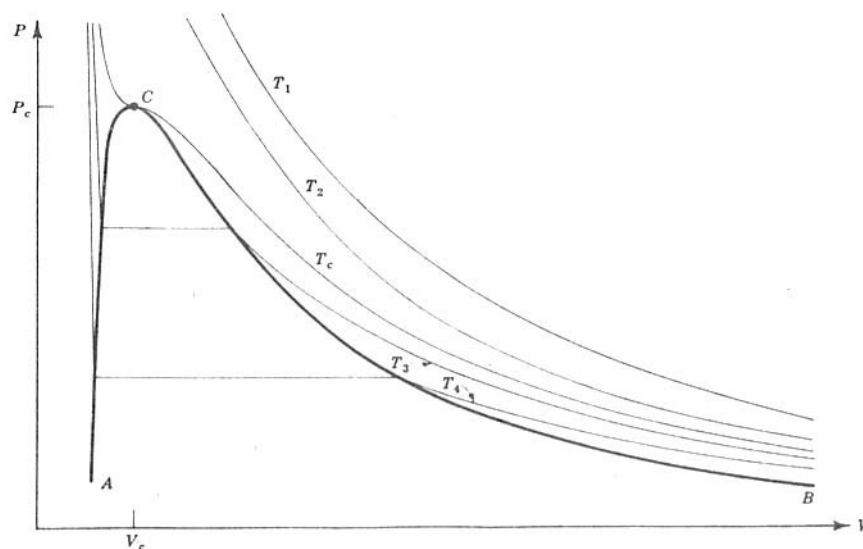
Gambar 5.1. Diagram  $p$ - $v$ - $T$  untuk zat murni.



Gambar 5.2. Diagram  $p$ - $T$  zat murni.

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 PT pada gambar 5.1, ditunjukkan oleh gambar 5.2 dengan skala yang lebih besar, dan daerah cair dan gas pada proyeksi PV ditunjukkan lebih detil oleh gambar 5.3.



Gambar 5.3. Diagram  $p$ - $v$ .

Garis pada gambar 5.2 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.

Kurva primer pada gambar 5.3, 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  $V_c$ .

### 5.1. 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 5.2. 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  $\alpha$  dan  $\beta$  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:

$$dG = -SdT + Vdp \quad (5.1)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 5.1 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=saturate=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:

$$\Delta Q = \Delta H^{\alpha\beta} = T \cdot \Delta S^{\alpha\beta} \quad (5.2)$$

Sehingga:

$$\frac{dp^{sat}}{dT} = \frac{\Delta H^{\alpha\beta}}{T\Delta V^{\alpha\beta}} \quad (\text{persamaan Clayperon}) \quad (5.3)$$

Persamaan ini berlaku pada perubahan semua perubahan fasa pada zat murni dan berkaitan dengan kemiringan kurva yang berkaitan 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 subsript ganda tanpa tanda  $\Delta$  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:

$$\text{Fusi:} \quad \frac{dp^{sat}}{dT} = \frac{H_{sf}}{TV_{sf}} = \frac{H_f - H_s}{T(V_f - V_s)} \quad (5.4)$$

$$\text{Penguapan:} \quad \frac{dp^{sat}}{dT} = \frac{H_{fg}}{TV_{fg}} = \frac{H_g - H_f}{T(V_g - V_f)} \quad (5.5)$$

$$\text{Sublimasi:} \quad \frac{dp^{sat}}{dT} = \frac{H_{sg}}{TV_{sg}} = \frac{H_g - H_s}{T(V_g - V_s)} \quad (5.6)$$

## 5.2. Tekanan Uap dan Kalor Laten

Persamaan Clayperon biasanya digunakan untuk menghitung kalor laten penguapan dan sublimasi dari data tekanan uap dan volumetrik.

$$\Delta H^{\alpha\beta} = T\Delta V^{\alpha\beta} \frac{dP^{sat}}{dT} \quad (5.7)$$

Untuk mendapatkan harga  $\Delta H^{\alpha\beta}$ , dibutuhkan harga  $P^{sat}$  sebagai fungsi  $T$  yang tepat. Plot harga  $\ln \Delta H^{\alpha\beta}$  terhadap  $1/T$  umumnya memberikan kurva garis yang mendekati linier. Hal ini memberikan persamaan tekanan-uap dalam bentuk:

$$\ln P^{sat} = A - \frac{B}{T} \quad (5.8)$$

dimana  $A$  dan  $B$  adalah konstanta. Persamaan ini berguna bagi berbagai tujuan, tetapi tidak memberikan data yang cukup baik untuk harga turunan.

Persamaan Antonie lebih baik dan memberikan penggunaan yang lebih luas:

$$\ln P^{sat} = A - \frac{B}{T + C} \quad (5.9)$$

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.

$$\ln P^{sat} = A - \frac{B}{T + C} + DT + E \ln T \quad (5.10)$$

dimana  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  dan  $E$  adalah konstanta.

### 5.3. 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  $\alpha$  ke  $\beta$ , keadaan intermediet sistem akan terdiri dari dua fasa  $\alpha$  dan  $\beta$ , dimana masing-masing fasa akan mempunyai sifat molar yang sama. Jika  $x$  adalah fraksi jumlah mol total (atau masa total) dari sistem dengan fasa  $\beta$ , maka sifat rata-rata sistem dua fasa diberikan oleh:

$$V = (1 - x)V^\alpha + xV^\beta \quad U = (1 - x)U^\alpha + xU^\beta$$

$$H = (1 - x)H^\alpha + xH^\beta \quad s = (1 - x)s^\alpha + xs^\beta$$

Secara umum persamaan tersebut bisa ditulis sebagai:

$$M = (1 - x)M^\alpha + xM^\beta \quad (5.11)$$

atau bisa ditulis sebagai:

$$M = M^\alpha + x(M^\beta - M^\alpha)$$

atau

$$M = M^{\alpha} + x\Delta M^{\alpha\beta} \quad (5.12)$$

### Contoh soal 5.1:

Uap pada tekanan 35 bar diketahui mempunyai volume spesifik 50 dm<sup>3</sup>/kg. Berapakah enthalpinya?

Jawab:

Diketahui:  $p = 35 \text{ bar}$  ;  $V = 50 \text{ dm}^3/\text{kg} = 50 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$

Dengan menggunakan tabel uap (tabel A-3 pada lampiran) harga  $V$  pada 35 bar menunjukkan bahwa  $V$  terletak antara  $V_f = 1,2347 \times 10^{-3}$  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  $x$ :

$$x = \frac{V - V_f}{V_{fg}} = \frac{50 \times 10^{-3} - 1,2347 \times 10^{-3}}{0,057 - 1,2347 \times 10^{-3}} = 0,874$$

Untuk 35 bar, dari tabel diperoleh:

$$H_f = 1049,7 \quad \text{dan} \quad H_{fg} = 1753,7 \text{ kJ/kg}$$

Maka enthalpi adalah:

$$H = H_f + x.H_{fg}$$

$$H = 1049,7 + (0,874 \times 1753,7) = 2582,4 \text{ kJ/kg}$$

### 5.4. Ekspansivitas Volume dan Kompresibilitas Isothermal Bahan Padat dan Cair

Kenaikan fraksi volume per satuan temperatur disebut ekspansivitas volume. Ekspansivitas volume dirumuskan:

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T}_P \quad (5.13)$$

dimana:  $\beta$  adalah ekspansivitas volume.

Kompresibilitas isothermal adalah besaran yang menyatakan perubahan volume relatif fluida karena adanya tekanan. Kompresibilitas isothermal didefinisikan dengan:

$$\kappa = - \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial P}_T \quad (5.14)$$

dimana:  $\kappa$  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:

$$\frac{dV}{V} = \beta dT - \kappa dP \quad (5.15)$$

### 5.5. 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:

$$C_p = a + bT + cT^2 \quad (5.16)$$

Atau 
$$C_p = a + bT + cT^{-2} \quad (5.17)$$

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:

$$C_p - C_v = \frac{TV\beta^2}{\kappa} \quad (5.18)$$

Perbedaan ini cukup signifikan, kecuali pada temperatur sangat rendah.

#### Contoh soal 5.2:

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:

$$C_p - C_v = \frac{TV\beta^2}{\kappa}$$

$$= \frac{300 \times 7,06 \times 10^{-6} \times (50,4 \times 10^{-6})^2}{7,78 \times 10^{-12}} = 0,692 \text{ J/mol K}$$

$$C_v = 24,5 - 0,69 = 23,8 \text{ J/mol K}$$

**Contoh soal 5.3:**

Kapasitas kalor kuarsa ( $\text{SiO}_2$ ) pada 100 kPa antara 298 dan 848 K diberikan oleh persamaan:

$$C_p = 46,98 + 34,33 \times 10^{-3} T - 11,3 \times 10^5 T^{-2} \text{ J/mol K}$$

Jika 1000 kg dipanaskan dari 300 K ke 700 K pada 100 kPa, berapa banyak dibutuhkan panas?

Jawab:

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  $\text{SiO}_2$  adalah 0,052 kg/mol, maka:

$$Q = \frac{23.506}{0,052} = 452.040 \text{ J/kg}$$

Total kalor yang diperlukan untuk memanaskan 1000 kg:

$$Q' = 1000 \times (452 \times 10^3) = 452 \times 10^6 \text{ J atau } 452 \text{ MJ}$$

## 5.6. 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:

$$C'_p = a + bT + cT^2 \quad (5.19)$$

$$C'_p = a + bT + cT^{-2} \quad (5.20)$$

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 5.4:

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  $R = 8,314$  J/mol K. Substitusi  $C'_p$  dan  $R$  menghasilkan:

$$Q = \int_{300_1}^{1000} (19,022 + 5,233 \times 10^{-3} T) dT$$

$$Q = 19,022 (T_2 - T_1) + 5,233 \times 10^{-3}/2 (T_2^2 - T_1^2)$$

$$= 19,022 (1000 - 300) + 5,233 \times 10^{-3}/2 (1000^2 - 300^2)$$

$$Q = 19,022 \times 700 + \frac{5,233 \times 10^{-3}}{2} \times 91 \times 10^4 = 15696 \text{ J}$$

### Soal-soal

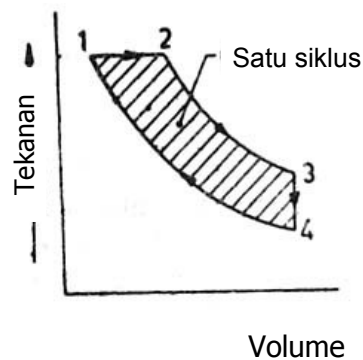
1. Coba anda jelaskan kegunaan dari fungsi Gibbs.
2. Jelaskan apa yang dimaksud dengan uap basah dan uap kering.
3. Apa yang dimaksud dengan cairan jenuh dan uap jenuh.
4. Sebuah tangki berisikan 1 kg H<sub>2</sub>O yang mempunyai fasa cair dan gas dalam keadaan setimbang pada 10 bar. Jika cairan dan uap air masing-masing menempati setengah volume tangki, berapakah enthalpi dari isi tangki.
5. Sebuah tangki mempunyai volume total 1 m<sup>3</sup> berisikan 0,05 m<sup>3</sup> air jenuh dan 0,95 m<sup>3</sup> uap air jenuh pada tekanan 1 bar. Berapakah kalor mesti ditambahkan ke air sehingga semua air menguap?

***“Pengetahuan tidaklah cukup, kita harus mengamalkannya. Niat tidaklah cukup, kita harus melakukannya. “ (Johann Wolfgang von Goethe)***

## BAB VI

### 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 6.1.



Gambar 1. Sebuah siklus termodinamika.

Pengetahuan mengenai siklus termodinamika adalah penting di dalam sistem pembangkit tenaga (seperti mesin bensin, diesel, turbin gas, dll). 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*.

#### 6.1. 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.

## 6.2. Klasifikasi Siklus Termodinamika

Siklus termodinamika, secara umum, bisa diklasifikasikan kedalam dua tipe:

1. Siklus reversibel,
2. Siklus irreversibel.

### 6.2.1. 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.

### 6.2.2. 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.

### 6.3. 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.

## 6.4. 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.

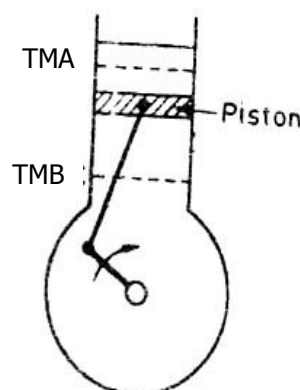
Namun fluida kerja pada mesin sebenarnya tidak mengalami siklus penuh, dan beroperasi pada siklus terbuka. Tetapi untuk kesederhaan analisis, kita mempelajarinya sebagai sebuah siklus tertutup (siklus ideal), dimana mendekati keadaan siklus terbuka.

## 6.5. Kerja Mesin Ideal

Mesin ideal bisa didefinisikan sebagai suatu peralatan yang menghasilkan kerja (yaitu tenaga) secara kontinu dengan bantuan fluida kerja, dimana fluida kerja mengalami proses siklik. Hal ini dilakukan dengan bantuan piston dan silinder seperti ditunjukkan gambar 6.2.

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;
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.



Gambar 6.2. Mesin Ideal.

## 6.6. 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 Clearance*

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:

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

$$v_s = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times l \quad (6.1)$$

dimana,  $d$  = diameter piston

### 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:

$$r = \frac{v_s + v_c}{v_c} = 1 + \frac{v_s}{v_c} \quad (6.2)$$

**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:

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

### 6.7. 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:

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

- 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*.

### 6.8. Jenis-jenis Siklus Termodinamika

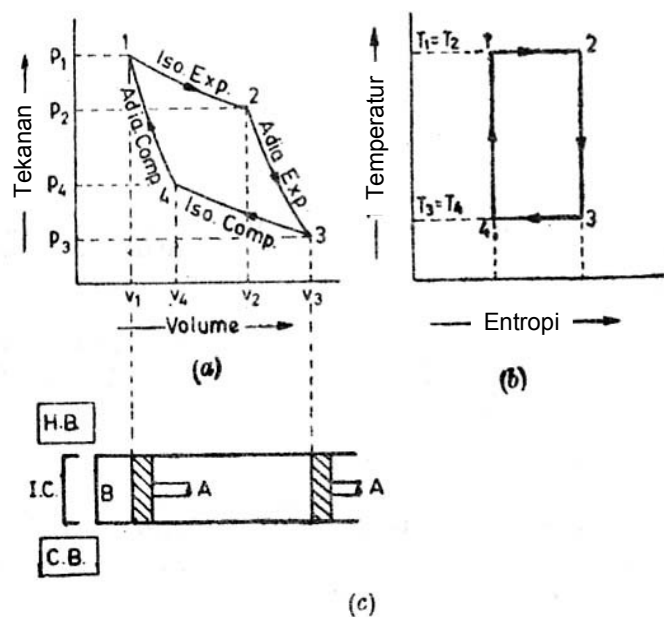
Ada banyak siklus termodinamika, namun siklus-siklus berikut termasuk siklus penting yang akan dibahas lebih lanjut.

1. Siklus Carnot.
2. Siklus Stirling.
3. Siklus Ericsson.

4. Siklus Joule.
5. Siklus Otto.
6. Siklus Diesel.
7. Siklus pembakaran dual.

**6.8.1. 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 operasi isothermal dan dua operasi adiabatik. Diagram  $p-v$  dan  $T-s$  dari siklus ditunjukkan gambar 6.3a dan b.



Gambar 6.3. Siklus Carnot.(a). Diagram  $p-v$ . (b) Diagram  $T-s$ . (c) Piston dan silinder mesin.

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  $IC$ . 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 tingkat 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.

### Tingkat Pertama

Sumber dengan temperatur tinggi (*hot body, H.B*) 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 isothermal 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.

Kalor yang diberikan = Kerja yang dilakukan pada ekspansi isothermal

$$Q_1 = p_1 v_1 \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = mRT_1 \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) \quad \dots (\because p_1 v_1 = mRT_1)$$

$$Q_1 = mRT_1 \ln r \quad \dots (\because r = \frac{v_2}{v_1} = \text{rasio ekspansi})$$

### Tingkat 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

$$\Delta U = \frac{p_2 v_2 - p_3 v_3}{\gamma - 1} = \frac{mRT_2 - mRT_3}{\gamma - 1} \quad \dots (\because pv = mRT)$$

$$\Delta U = \frac{mR(T_2 - T_3)}{\gamma - 1} \quad \dots (\because T_1 = T_2) \quad (6.4)$$

### Tingkat ketiga

Proses terjadi pada titik 3-4 pada kurva. Pada proses ini penutup  $IC$  diangkat dari dasar silinder dan sumber dingin (*cold body, CB*) 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

$$Q_2 = p_3 v_3 \ln \frac{v_3}{v_4}$$

$$Q_2 = mRT_3 \ln \frac{v_3}{v_4} \quad \dots (\because pv = mRT) \quad (6.5)$$

$$Q_2 = mRT_3 \ln r \quad \dots (\because r = \frac{v_3}{v_4} = \text{rasio kompresi}) \quad (6.6)$$

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

### Tingkat keempat

Proses ini terjadi pada titik 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

$$\Delta U = \frac{p_1 v_1 - p_4 v_4}{\gamma - 1} = \frac{mRT_1 - mRT_4}{\gamma - 1} \quad \dots (\because pv = mRT) \quad (6.7)$$

$$\Delta U = \frac{mR(T_1 - T_3)}{\gamma - 1} \quad \dots (\because T_3 = T_4) \quad (6.8)$$

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

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

$$W = mR \ln r (T_1 - T_3) \quad (6.9)$$

efisiensi siklus:

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

$$\eta = \frac{T_1 - T_3}{T_1} = 1 - \frac{T_3}{T_1} \quad (6.10)$$

Dari kompresi adiabatik:

$$\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_3}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{1}{r}\right)^{\gamma-1}$$

... (dimana  $\frac{v_3}{v_2} = r =$  rasio kompresi adiabatik)

$$\therefore \eta = 1 - \frac{T_3}{T_2} = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{\gamma-1} \quad (6.11)$$

### 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 6.1:

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:  $T_1 = 650$  K ;  $T_3 = 310$  K ;  $W = 150$  kJ

➤ Efisiensi termal

$$\eta = \frac{T_1 - T_3}{T_1}$$

$$= \frac{650 - 310}{650} = 0,523 = 52,3 \%$$

➤ Kalor yang ditambahkan selama proses

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

### Contoh soal 6.2:

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  $21 \text{ kg/cm}^2$ , carilah

- (i) temperatur minimum siklus,
- (ii) efisiensi termal siklus,
- (iii) tekanan pada semua titik,
- (iv) perubahan entropi selama ekspansi isothermal,
- (v) kerja yang dilakukan siklus, dan
- (vi) 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:

$$r = \frac{v_2}{v_1} = 2$$

$$v_1 = 0,3 \text{ m}^3 ; v_2 = 2 \times v_1 = 2 \times 0,3 = 0,6 \text{ m}^3 ; v_3 = 5 \times 0,6 = 3,0 \text{ m}^3 ;$$

$$T_1 = T_2 = 550 \text{ K} ; p_1 = 21 \text{ kg/cm}^2 = 21 \times 10^4 \text{ kg/m}^2 ; \gamma = 1,4$$

(i) Temperatur minimum siklus



$$\frac{T_1}{T_4} = \left( \frac{v_4}{v_1} \right)^{\gamma-1}$$

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

$$T_4 = 289 \text{ K} = 16^0 \text{ C}$$

(ii) Efisiensi termal siklus

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

(iii) Tekanan pada setiap titik

Pada ekspansi isotermal 1-2:

$$p_1 v_1 = p_2 v_2$$

$$p_2 = p_1 \times \frac{v_1}{v_2} = 21 \times \frac{1}{2} = 10,5 \text{ kg/cm}^2$$

Pada proses ekspansi isentropik 2-3:

$$\frac{p_3}{p_2} = \left( \frac{v_2}{v_3} \right)^{\gamma}$$

$$\frac{p_3}{10,5} = \left( \frac{1}{5} \right)^{1,4} = 0,1051$$

$$p_3 = 1,1 \text{ kg/cm}^2$$

Pada proses kompresi isentropik 4-1:

$$\frac{p_4}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_4} \right)^{\gamma}$$

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

$$p_4 = 2,2 \text{ kg/cm}^2$$

(iv) Perubahan entropi selama ekspansi isotermal

$$s_2 - s_1 = \frac{p_1 v_1}{JT_1} \ln r$$

$$= \frac{21 \times 10^4 \times 0,3}{427 \times 550} \ln(2) = 0,186 \text{ kcal/kg K}$$

(v) kerja yang dilakukan siklus

Kalor yang ditambahkan selama siklus:

$$\begin{aligned} Q_1 &= T_1(s_2 - s_1) = 550 \times 0,186 = 102,3 \text{ kcal} \\ &= 102,3 \times 427 = 43.680 \text{ kg-m} \end{aligned}$$

dan kalor yang dikeluarkan selama siklus:

$$\begin{aligned} Q_2 &= T_3(s_2 - s_1) = 289 \times 0,186 = 53,8 \text{ kcal} \\ &= 53,8 \times 427 = 22.970 \text{ kg-m} \end{aligned}$$

Kerja siklus:

$$\begin{aligned} W &= Q_1 - Q_2 = 43.680 - 22.970 \\ &= 20.710 \text{ kg-m} \end{aligned}$$

(vi) Tekanan efektif rata-rata

$$\text{Volume perpindahan} = v_3 - v_1 = 3,0 - 0,3 = 2,7 \text{ m}^3$$

$$\text{Tekanan efektif rata - rata} = \frac{\text{Kerja siklus}}{\text{volume perpindahan}}$$

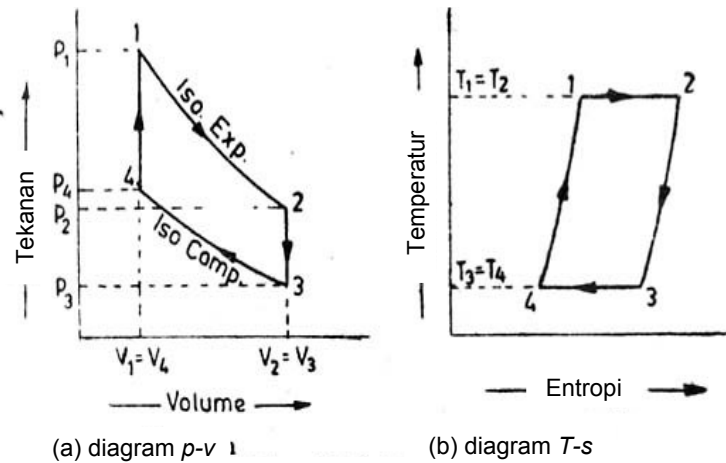
$$\begin{aligned} p_{eff} &= \frac{20.710}{2,7} = 0,767 \times 10^4 \text{ kg/m}^2 \\ &= 0,767 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

### 6.8.2. Siklus Stirling

Siklus ini ditemukan oleh Stirling, dimana terdiri dari dua proses isotermal 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 6.5.

#### Tingkat pertama

Proses terjadi pada titik 1-2. Udara berekspansi secara isotermal, pada temperatur konstan  $T_1$  dari  $v_1$  ke  $v_2$ . Kalor yang diberikan sumber eksternal diserap selama proses.



(a) diagram  $p-v$  (b) diagram  $T-s$

Gambar 6.5. Siklus Stirling.

∴ Kalor yang diberikan = kerja yang dilakukan selama proses isothermal

$$Q_1 = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (6.12)$$

$$Q_1 = mRT_1 \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (6.13)$$

$$Q_1 = mRT_1 \ln r \quad (6.14)$$

dimana ( $r = v_2 / v_1$ , rasio ekspansi)

### Tingkat kedua

Proses terjadi pada titik 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 dilepaskan ke generator =  $m C_v (T_2 - T_3)$

$$Q_2 = m C_v (T_2 - T_3) \quad (6.15)$$

### Tingkat ketiga

Udara dikompresi secara isothermal di dalam silinder mesin dari  $v_3$  ke  $v_4$ . Proses ini digambarkan oleh grafik 3-4 pada diagram  $p-v$  dan  $T-s$ . Pada proses ini kalor dibuang oleh udara.

∴ Kalor yang dilepaskan oleh udara:

$$Q_3 = p_3 v_3 \ln \frac{v_3}{v_4}$$

$$Q_3 = mRT_3 \ln \frac{v_3}{v_4} \quad (6.16)$$

$$Q_3 = mRT_3 \ln r \quad (6.17)$$

dimana ( $r = v_3 / v_4$ , rasio kompresi)

#### Tingkat 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.

∴ Kalor yang diserap oleh udara

$$Q_4 = m.C_v(T_1 - T_4) = m.C_v(T_1 - T_3) \quad (6.18)$$

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

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

$$W = mR \ln r (T_1 - T_3) \quad (6.19)$$

dan efisiensi:

$$\eta = \frac{\text{Kerja yang dilakukan}}{\text{Kalor yang disuplai}} = \frac{mR \ln r (T_1 - T_3)}{mRT_1 \ln r}$$

$$\eta = \frac{T_1 - T_3}{T_1} = 1 - \frac{T_3}{T_1} \quad (6.20)$$

#### **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  $\eta_r$ , maka kalor yang diambil dari regenerator selama proses 4-1 adalah:  $mC_v(T_1 - T_3)(1 - \eta_r)$ . Dalam hal ini:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{mR \ln r(T_1 - T_3)}{mRT_1 \ln r + mC_v(T_1 - T_3)(1 - \eta_r)} \\ &= \frac{R \ln r(T_1 - T_3)}{RT_1 \ln r + C_v(T_1 - T_3)(1 - \eta_r)}\end{aligned}\quad (6.21)$$

### Contoh soal 6.3:

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

Jawab:

Diketahui:  $T_3 = T_4 = 400^{\circ} + 273 = 673\text{ K}$

$$p_1 = 12\text{ bar}$$

$$p_3 = 2\text{ bar}$$

$$\text{rasio ekspansi: } v_3 / v_4 = v_2 / v_1 = 3$$

Pada proses isothermal ekspansi 1-2:

$$p_1 v_1 = p_2 v_2$$

$$p_2 = p_1 \times \frac{v_2}{v_1} = 12 \times \frac{1}{3} = 4\text{ bar}$$

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:

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

### 6.8.3. Siklus Ericsson

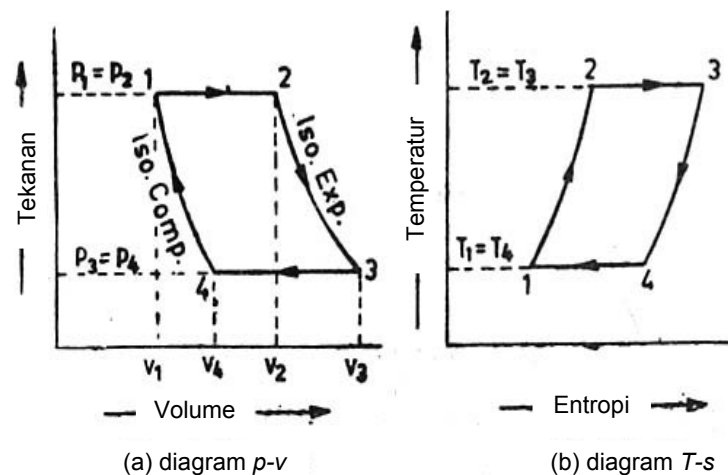
Siklus ini ditemukan oleh Ericsson, yang terdiri dari dua proses isotermal dan dua proses tekanan konstan. Diagram  $p-v$  dan  $T-s$  ditunjukkan oleh Gambar 6.6. Saat ini siklus Ericsson banyak digunakan dalam pembuatan turbin gas jenis siklus tertutup.

#### Tingkat pertama

Udara dipanaskan pada tekanan konstan dari temperatur awal  $T_1$  ke temperatur  $T_2$ , yang ditunjukkan oleh grafik 1-2 pada gambar 6.6.

∴ Kalor yang diberikan ke udara:

$$Q_1 = m.C_p (T_2 - T_1) \tag{6.22}$$



Gambar 6.6. Siklus Ericsson.

#### Tingkat kedua

Udara dibiarkan berekspansi secara isotermal (yaitu pada temperatur konstan  $T_2 = T_3$ ) dari volume awal  $v_2$  ke  $v_3$  yang ditunjukkan oleh grafik 2-3 pada gambar 6. Kerja pada ekspansi eksotermal memanfaatkan sebagian dari kalor yang diberikan pada tingkat pertama.

∴ Kalor yang dimanfaatkan selama ekspansi isotermal:

$$Q_2 = p_2 v_2 \ln (v_3/v_2)$$

$$Q_2 = mRT_2 \ln (v_3/v_2) = Q_2 = mRT_2 \ln r \tag{6.23}$$

dimana  $r = v_3/v_2 =$  rasio ekspansi

Tingkat ketiga

Sekarang udara didinginkan pada tekanan konstan dari temperatur awal  $T_3$  ke temperatur  $T_4$  yang ditunjukkan oleh grafik 3-4 pada gambar 6.6.

∴ Kalor yang dilepaskan oleh udara:

$$Q_3 = m.C_p (T_3 - T_4) \quad (6.24)$$

Tingkat keempat

Terakhir, udara di kompresi secara isothermal dari volume  $v_3$  ke  $v_4$  yang ditunjukkan oleh grafik 4-1 pada gambar 6.6. Pada proses ini sebagian kalor dibuang oleh udara untuk melakukan kerja pada udara.

∴ Kalor yang dilepaskan selama kompresi isothermal:

$$Q_4 = p_4 v_4 \ln \frac{v_4}{v_1}$$

$$Q_4 = mRT_4 \ln \frac{v_4}{v_1}$$

$$Q_4 = mRT_4 \ln r \quad (\because \frac{v_4}{v_1} = \text{rasio kompresi}) \quad (6.25)$$

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

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

$$W = mR \ln r (T_2 - T_4) \quad (6.26)$$

dan efisiensi:

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

$$\eta = \frac{T_2 - T_4}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad (6.27)$$

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

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

$$\eta = \frac{R \ln r (T_2 - T_4)}{RT_2 \ln r + C_p (T_4 - T_2)(1 - \eta_r)} \quad (6.28)$$

#### Contoh soal 6.4:

Sebuah mesin dengan siklus ericsson bekerja antara temperatur  $45^{\circ}$  C dan  $230^{\circ}$  C. Jika rasio ekspansi adalah 2, carilah:

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

Asumsikan  $R = 29,2$  kgm/kg-K

Jawab:

Diketahui:  $T_2 = T_3 = 230^{\circ} + 273 = 503$  K ;  $T_1 = T_4 = 45^{\circ} + 273 = 318$  K ;  $r = 2$

- (i) Kerja yang dilakukan per kg udara

$$W = m.R \ln r (T_2 - T_4)$$

$$= 1 \times 29,27 \times \ln 2 (503 - 318)$$

$$= 3750 \text{ kgm}$$

- (ii) Efisiensi siklus

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_3}$$

$$\eta = 1 - \frac{318}{503} = 0,368 \text{ atau } 36,8 \%$$

#### 6.8.4. Siklus Joule

Siklus ini terdiri dari dua proses tekanan konstan dan dua proses adiabatik. Diagram  $p-v$  dan  $T-s$  ditunjukkan oleh gambar 6.7.

##### Tingkat pertama

Udara dipanaskan pada tekanan konstan dari temperatur awal  $T_1$  ke temperatur  $T_2$ , yang ditunjukkan oleh grafik 1-2 pada gambar 6.7.

$\therefore$  Kalor yang diberikan ke udara:



$$Q_1 = m \cdot C_p (T_2 - T_1) \quad (6.29)$$

### Tingkat kedua

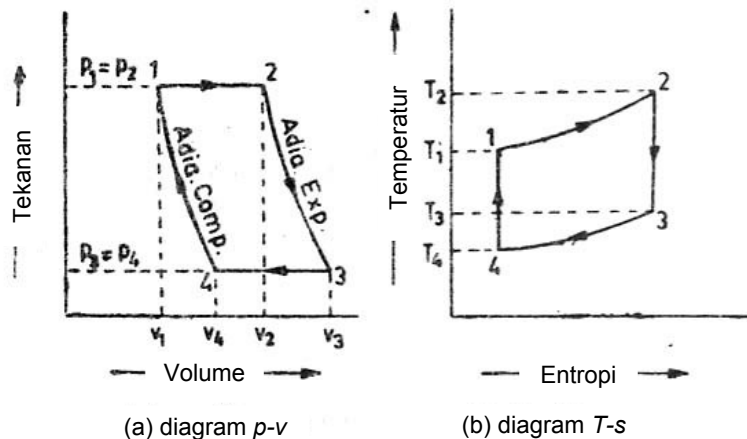
Udara dibiarkan berekspansi secara adiabatik dari  $v_2$  ke  $v_3$  yang ditunjukkan oleh grafik 2-3 pada gambar 6.7. Temperatur turun dari  $T_2$  ke  $T_3$ . Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dilepaskan oleh udara.

### Tingkat ketiga

Sekarang udara didinginkan pada tekanan konstan dari temperatur awal  $T_3$  ke temperatur  $T_4$  yang ditunjukkan oleh grafik 3-4 pada gambar 6.7.

∴ Kalor yang dilepaskan oleh udara:

$$Q_2 = m \cdot C_p (T_3 - T_4) \quad (6.30)$$



Gambar 6.7. Siklus Joule.

### Tingkat keempat

Udara sekarang dikompresikan secara adiabatik dari  $v_4$  ke  $v_1$  yang ditunjukkan oleh grafik 4-1 pada gambar 6.7. 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

$$W = mC_p (T_2 - T_1) - mC_p (T_3 - T_4) \quad (6.31)$$

dan efisiensi siklus:

$$\eta = \frac{\text{kerja yang dilakukan}}{\text{k calor yang diberikan}} = \frac{mC_p(T_2 - T_1) - mC_p(T_3 - T_4)}{mC_p(T_2 - T_1)}$$

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

setelah diturunkan, diperoleh:

$$\eta = 1 - \frac{T_3}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_1} \tag{6.32}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}} \tag{6.33}$$

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 6.5:**

Sebuah mesin bekerja mengikuti siklus Brayton/Joule dengan tekanan awal dan akhir masing-masingnya adalah 3 bar dan 1 bar. Jika temperatur sebelum kompresi adiabatik 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:  $p_1 = p_2 = 3 \text{ bar} = 3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  ;  $p_3 = p_4 = 1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  ;  $T_4 = 298 \text{ K}$  ;  $T_2 = 293 \text{ K}$  ;  $C_p = 1,0$  ;  $C_v = 0,715$

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

$$W = Q_1 - Q_2 = 521 - 386 = 135 \text{ kJ}$$

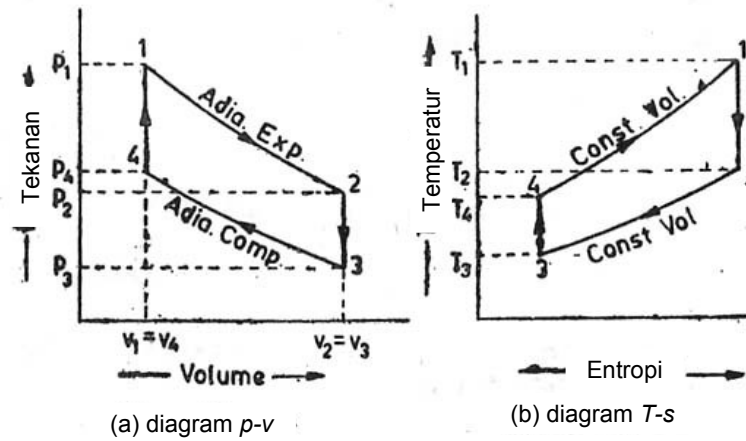
(iv) efisiensi mesin

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{W}{Q_1} = \frac{135}{521} \\ &= 0,259 \text{ atau } 25,9 \% \end{aligned}$$

### 6.8.5. 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 6.8.



Gambar 6.8. Siklus Otto.

Tingkat pertama

Udara diekspansikan secara adiabatik dari temperatur awal  $T_1$  ke temperatur  $T_2$  seperti ditunjukkan oleh grafik 1-2 pada gambar 6.8. Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dibuang oleh udara.

Tingkat kedua

Udara didinginkan pada volume konstan dari temperatur  $T_2$  ke temperatur  $T_3$  seperti yang ditunjukkan oleh grafik 2-3 pada gambar 6.8. Kalor yang dibuang oleh udara selama proses ini :

$$Q_2 = m.C_v(T_2 - T_3) \tag{6.34}$$

Tingkat ketiga

Udara dikompresikan secara adiabatik dari temperatur  $T_3$  ke temperatur  $T_4$ , seperti yang ditunjukkan oleh grafik 3-4 pada gambar 6.8. Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dilepaskan oleh udara.

Tingkat keempat

Udara sekarang dipanaskan pada volume konstan dari temperatur  $T_4$  ke temperatur  $T_1$ , seperti yang ditunjukkan oleh grafik 4-1 pada gambar 8. Kalor yang diserap selama proses:

$$Q_1 = m.C_v(T_1 - T_4) \tag{6.35}$$

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

$$W = m.C_v(T_1 - T_4) - m.C_v(T_2 - T_3) \quad (6.36)$$

Efisiensi ideal atau efisiensi standar udara:

$$\eta = 1 - \frac{T_3}{T_4} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (6.37)$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}} \quad (6.38)$$

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:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} ; \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma} ; \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/\gamma}$$

**Contoh soal 6.6:**

Sebuah mesin yang bekerja mengikuti siklus ideal Otto, pada awal kompresi adiabatik mempunyai temperatur 25<sup>o</sup> 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:  $T_3 = 25^0 + 273 = 298 \text{ K}$  ;  $p_3 = 1,5 \text{ bar}$  ;  $\gamma = 1,4$  ;  $\eta = 48\% = 0,48$

## ➤ Rasio kompresi

$$\eta = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}}$$

$$0,48 = 1 - \frac{1}{r^{1,4-1}} = 1 - \frac{1}{r^{0,4}}$$

$$\frac{1}{r^{0,4}} = 1 - 0,48 = 0,52$$

$$r^{0,4} = 1,923$$

$$r = (1,923)^{1/0,4} = (1,923)^{2,5} = 5,13$$

## ➤ 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

$$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^\gamma = r^\gamma$$

$$\frac{p_4}{1,5} = (5,13)^{1,4} = 9,865$$

$$p_4 = 14,8 \text{ bar}$$

**6.8.6. 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 6.9.

Tahap-tahap proses dijelaskan berikut ini.

Tingkat pertama

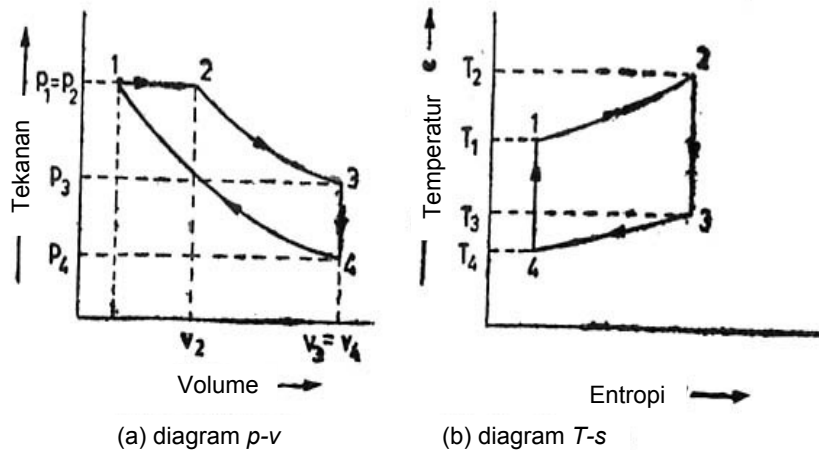
Udara dipanaskan pada tekanan konstan dari temperatur awal  $T_1$  ke temperatur  $T_2$  yang ditunjukkan oleh grafik 1-2 pada Gambar 6.9.

Kalor yang diberikan ke udara:

$$Q_1 = m \cdot C_p (T_2 - T_1) \quad (6.39)$$

Tingkat kedua

Udara diekspansikan secara adiabatik dari temperatur  $T_2$  ke temperatur  $T_3$  seperti yang ditunjukkan oleh grafik 2-3 pada gambar 6.9. Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dibuang oleh udara.



Gambar 6.9. Siklus Diesel.

Tingkat ketiga

Sekarang udara didinginkan pada volume konstan dari temperatur  $T_3$  ke temperatur  $T_4$ , seperti yang ditunjukkan oleh grafik 3-4 pada gambar 6.9. Kalor yang dilepas oleh udara:

$$Q_2 = m \cdot C_v (T_3 - T_4) \quad (6.40)$$

Tingkat keempat

Udara dikompresikan secara adiabatik dari temperatur  $T_4$  ke temperatur  $T_1$ , seperti yang ditunjukkan oleh grafik 4-1 pada gambar 6.9. 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

$$W = m.C_p(T_2 - T_1) - m.C_v(T_3 - T_4) \quad (6.41)$$

Efisiensi ideal atau efisiensi standar udara:

$$\eta = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}} \left[ \frac{\rho^\gamma - 1}{\gamma(\rho - 1)} \right] \quad (6.42)$$

dimana:  $r$  = rasio kompresi =  $r = \frac{v_4}{v_1}$

$$\rho = \text{rasio cut-off} = \rho = \frac{v_2}{v_1}$$

- 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 6.7:**

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,  $v_4 = 1 \times 13 = 13 \text{ m}^3$  ( $v_4 / v_1 = 13$ )

Volume langkah =  $13 - 1 = 12 \text{ m}^3$

Maka volume *cut-off* =  $1 + 0,08 \times 12 = 1,96 \text{ m}^3$

Rasio *cut-off* :

$$\rho = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1,96}{1,0} = 1,96$$

Efisiensi:



$$\eta = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}} \left[ \frac{\rho^\gamma - 1}{\gamma(\rho - 1)} \right]$$

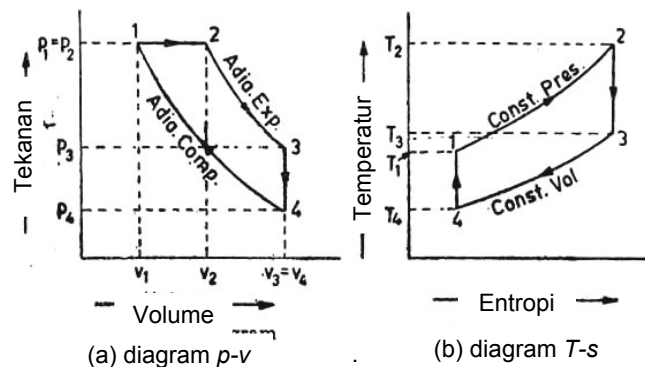
$$= 1 - \frac{1}{(13)^{1,4-1}} \left[ \frac{(1,96)^{1,4} - 1}{1,4(1,96 - 1)} \right] = 1 - 0,417$$

$$= 0,583 \text{ atau } 58,3 \%$$

**Contoh soal 6.8:**

Sebuah mesin dengan siklus diesel ideal mempunyai rasio kompresi 16 dengan temperatur dan tekanan paling rendah masing-masingnya adalah  $27^{\circ}\text{C}$  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:

$$p_4 v_4 = mRT_4$$

$$\text{dan } v_1 = \frac{v_4}{16} = \frac{0,861}{16} = 0,054 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \dots (v_4 / v_1 = 16)$$

• Pada proses kompresi adiabatik (4-1):

$$\frac{p_1}{p_4} = \left( \frac{v_4}{v_1} \right)^\gamma$$

$$\frac{p_1}{1} = (16)^{1,4} = 48,5$$

$$p_1 = 48,5 \text{ bar}$$

$$\frac{T_1}{T_4} = \left( \frac{v_4}{v_1} \right)^{\gamma-1}$$

$$\frac{T_1}{300} = (16)^{1,4-1} = (16)^{0,4} = 3,03$$

$$T_1 = 909 \text{ K} = 636^0 \text{ C}$$

- Pada proses tekanan konstan (1-2):

$$p_2 = p_1 = 48,5 \text{ bar}$$

$$Q_1 = m \cdot C_p (T_2 - T_1)$$

$$500 = 1 \times 1 (T_2 - 909)$$

$$T_2 = 1409 \text{ K} = 1136^0 \text{ C}$$

$$\begin{aligned} v_2 &= \frac{v_1}{T_1} \times T_2 = \frac{0,054}{909} \times 1409 \\ &= 0,084 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

- Pada proses ekspansi adiabatik (2-3):

$$\frac{T_2}{T_3} = \left( \frac{v_3}{v_2} \right)^{\gamma-1}$$

$$\frac{1136}{T_3} = \left( \frac{0,861}{0,084} \right)^{1,4-1} = (10,25)^{0,4} = 2,537 \quad \dots (v_2 = v_4)$$

$$T_3 = 448 \text{ K} = 175^0 \text{ C}$$

$$\frac{p_2}{p_3} = \left( \frac{v_3}{v_2} \right)^{\gamma}$$

$$\frac{48,5}{p_3} = \left( \frac{0,861}{0,084} \right)^{1,4} = 26$$

$$p_3 = 1,87 \text{ bar}$$

- (ii) Kerja yang dilakukan siklus per kg

Kalor yang dilepaskan selama proses volume konstan (3-4):

$$Q_2 = m \cdot C_v (T_3 - T_4)$$

$$= 1 \times 0,714 (448 - 300)$$

$$= 105,7 \text{ kJ/kg}$$

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:

$$v_L = v_4 - v_1 = 0,861 - 0,054 = 0,807 \text{ m}^3$$

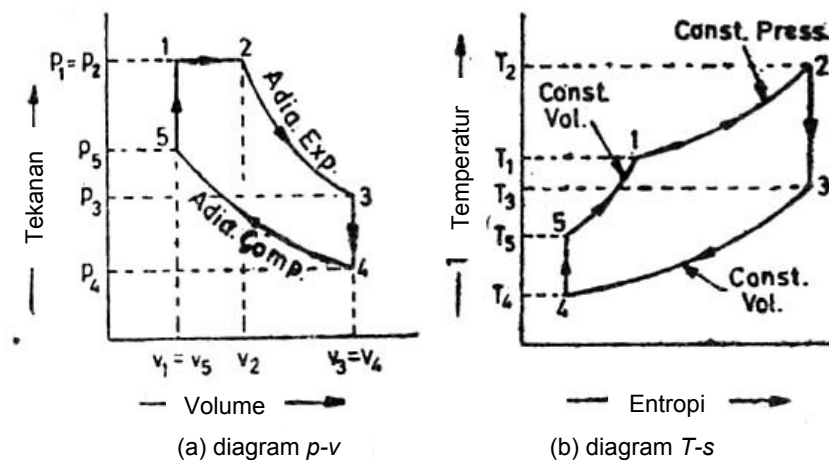
Tekanan efektif rata-rata:

$$p_{eff} = \frac{W}{v_L}$$

$$p_{eff} = \frac{394,3 \times 1000}{0,807} = 4,9 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 4,9 \text{ bar}$$

### 6.8.7. 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.



Gambar 6.10. Siklus Pembakaran Dual.

Siklus pembakaran dual terdiri dari dua buah proses adiabatik, dua proses volume konstan dan satu proses tekanan konstan. Proses ini ditunjukkan oleh gambar 10.

#### Tingkat pertama

Udara dipanaskan pada tekanan konstan dari temperatur awal  $T_1$  ke temperatur  $T_2$  yang ditunjukkan oleh grafik 1-2 pada Gambar 6.10.

Kalor yang diberikan ke udara:

$$Q_1 = m.C_p (T_2 - T_1) \quad (6.43)$$

#### Tingkat kedua

Udara diekspansikan secara adiabatik dari temperatur  $T_2$  ke temperatur  $T_3$  seperti yang ditunjukkan oleh grafik 2-3 pada gambar 6.10. Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dibuang oleh udara.

#### Tingkat ketiga

Sekarang udara didinginkan pada volume konstan dari temperatur  $T_3$  ke temperatur  $T_4$ , seperti yang ditunjukkan oleh grafik 3-4 pada gambar 6.10. Kalor yang dilepas oleh udara:

$$Q_2 = m.C_v (T_3 - T_4) \quad (6.44)$$

#### Tingkat keempat

Udara dikompresi secara adiabatik dari temperatur  $T_4$  ke temperatur  $T_5$ , seperti yang ditunjukkan oleh grafik 4-5 pada gambar 6.10. Pada proses ini tidak ada kalor yang diserap atau dibuang oleh udara.

#### Tingkat kelima

Udara terakhir dipanaskan pada volume konstan dari temperatur  $T_5$  ke temperatur  $T_1$ , seperti ditunjukkan oleh grafik 5-1 pada gambar 6.10.

Kalor yang diserap oleh udara :

$$Q_3 = m.C_v (T_1 - T_5) \quad (6.45)$$

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

$$W = [m.C_p (T_2 - T_1) + m.C_v (T_1 - T_5)] - m.C_v (T_3 - T_4) \quad (6.46)$$

Efisiensi ideal atau efisiensi standar udara:

$$\eta = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}} \left[ \frac{\alpha \cdot \rho^\gamma - 1}{(\alpha - 1) + \gamma \alpha (\rho - 1)} \right] \quad (6.47)$$

dimana:  $r =$  rasio kompresi  $= \frac{v_4}{v_5} = \frac{v_3}{v_1}$

$$\rho = \text{rasio cut-off} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_2}{v_5}$$

$$\alpha = \text{rasio ekspansi atau tekanan} = \frac{p_1}{p_5}$$

**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 6.9:

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:

$$\text{Volume langkah: } v_L = v_4 - v_5 = 10 \text{ liter} = 0,01 \text{ m}^3$$

$$r = v_4 / v_5 = 16$$

$$v_4 = 16 v_5$$

sehingga :  $16 v_5 - v_5 = 10$  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,  $\alpha$  :

$$\frac{p_5}{p_4} = \left( \frac{v_4}{v_5} \right)^\gamma = (16)^{1,4} = 48,5$$

$$p_5 = p_4 \times 48,5 = 1 \times 48,5 = 48,5 \text{ bar}$$

$$\text{dan } \alpha = \frac{p_1}{p_5} = \frac{70}{48,5} = 1,44$$

(ii) Rasio cut-off:

$$v_2 = v_1 + 5\% \text{ volume langkah ; ...}(v_1 = v_5)$$

$$= 0,67 + 0,05 \times 10 = 1,17 \text{ liter ; ...}(v_1 = v_5)$$

$$\rho = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1,17}{0,67} = 1,75$$

(iii) Massa udara dalam silinder

$$p_4 \cdot v_4 = m \cdot R \cdot T_4$$

$$m = \frac{p_4 \cdot v_4}{R \cdot T_4} = \frac{1 \times 10^5 \times 0,01067}{287 \times 300}$$

$$= 0,012 \text{ kg}$$

(iv) Kalor yang ditambahkan per siklus

Pada proses kompresi adiabatik (4-5):

$$\frac{T_5}{T_4} = \left( \frac{v_4}{v_5} \right)$$

$$\frac{T_5}{300} = (16)^{1,4-1} = 3,03$$

$$T_5 = 300 \times 3,03 = 909 \text{ K}$$

Dengan cara yang sama untuk proses volume konstan (5-1):

$$\frac{p_5}{T_5} = \frac{p_1}{T_1}$$

$$T_1 = \frac{T_5}{p_5} \times p_1 = \frac{909}{48,5} \times 70 = 1312 \text{ K}$$

dan pada proses tekanan konstan (1-2):

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$$

$$T_2 = \frac{T_1}{v_1} \times v_2 = \frac{1312}{0,67} \times 1,17 = 2291 \text{ K}$$

Kalor yang ditambahkan selama proses tekanan konstan (1-2):

$$\begin{aligned} Q_1 &= m \cdot C_p (T_2 - T_1) \\ &= 0,012 \times 1,0 (2291 - 1312) \\ &= 11,75 \text{ kJ} \end{aligned}$$

dan kalor yang ditambahkan selama proses volume konstan (5-1):

$$\begin{aligned} Q_2 &= m \cdot C_v (T_1 - T_5) \\ &= 0,012 \times 0,741 (1312 - 909) \\ &= 3,45 \text{ kJ} \end{aligned}$$

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):

$$\frac{T_2}{T_3} = \left( \frac{v_3}{v_2} \right)^{\gamma-1}$$

$$\frac{2291}{T_3} = \left( \frac{10,67}{1,17} \right)^{0,4} = 2,42$$

$$T_3 = 947 \text{ K}$$

sehingga kalor yang dilepaskan per siklus (selama proses volume konstan 3-4):

$$\begin{aligned}
 Q_3 &= m \cdot C_v (T_3 - T_4) \\
 &= 0,012 \times 0,714 (947 - 300) \\
 &= 5,54 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

(vi) Kerja per siklus

$$\begin{aligned}
 W &= Q - Q_3 \\
 &= 15,20 - 5,54 = 9,66 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

(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:

$$v_L = v_4 - v_5 = 10 \text{ liter} = 10 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Tekanan efektif rata-rata:

$$\begin{aligned}
 p_{eff} &= \frac{W}{v_L} \\
 p_{eff} &= \frac{9,66 \times 10^3}{10 \times 10^{-3}} = 0,966 \times 10^6 \text{ N/m}^2 \\
 &= 9,66 \text{ bar}
 \end{aligned}$$



**Soal-soal**

1. Carilah efisiensi sebuah mesin Carnot, dimana temperatur panas dan dinginnya masing-masing adalah  $154^{\circ}\text{C}$  dan  $15^{\circ}\text{C}$ .
2. Carilah efisiensi dari siklus regeneratif Stirling yang bekerja pada batas temperatur  $427^{\circ}\text{C}$  dan  $77^{\circ}\text{C}$ . Rasio ekspansi isothermal atau kompresi isothermal adalah 4.
3. Sebuah turbin gas yang bekerja mengikuti siklus Joule menerima udara pada tekanan  $1\text{ kg/cm}^2$  dan temperatur  $15^{\circ}\text{C}$ . Udara dikompresi hingga tekanan  $5\text{ kg/cm}^2$  dan kemudian dipanaskan pada tekanan konstan hingga temperatur  $800^{\circ}\text{C}$ . Udara panas kemudian mengalami ekspansi di turbin dan tekanannya kembali ke  $1\text{ kg/cm}^2$ . Carilah kerja yang dilakukan per kg udara dan efisiensi turbin. Diasumsikan  $\gamma = 1,4$  dan  $C_p = 0,24$ .
4. Jika sebuah mesin bekerja mengikuti siklus Otto mempunyai silinder dengan diameter  $17,8\text{ cm}$  dan langkah  $30,5\text{ cm}$ . Jika volume celah  $2210\text{ cm}^3$ , carilah efisiensi ideal siklus.
5. Rasio kompresi mesin diesel adalah 14 dan rasio *cut off* adalah 6% dari panjang langkah. Carilah efisiensi standar udara mesin.
6. 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 :  $55^{\circ}\text{C}$
  - Rasio tekanan : 1,5
  - Rasio *cut-off* : 1,6
  - Rasio kompresi : 11
  - Rasio kalor spesifik,  $\gamma = 1,4$

Carilah temperatur pada akhir setiap proses dan efisiensi mesin.

***“Ilmu itu ada dimana-mana, pengetahuan dimana-mana tersebar, kalau kita bersedia membaca, dan bersedia mendengar.” (Felix Siauw)***

***“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)***

**DAFTAR PUSTAKA**

1. Michael J. Moran, HN. Shapiro. *Fundamentals Of Engineering Thermodynamics., 2<sup>th</sup> edition*. John Wiley and Son, 1993.
2. R.S. Khurmi. *A Text Book of Mechanical Technology, Thermal Engineering*. S. Chand & Company LTD, 1995.
3. Abbott MM, HC. Van Ness, *Theory and problems of Thermodynamics*, Schaum's Outline Series McGraw-Hill International Book Company, 1981.

## LAMPIRAN

TABLE A-1 Atomic or Molecular Weights and Critical Properties of Some Common Elements and Compounds

Substance	Chemical formula	M	$T_c$ , K	$p_c$ , bars	$Z_c = \frac{p_c v_c}{RT_c}$
Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.04	309	62.8	0.274
Air (equivalent)	—	28.97	133	37.7	0.284
Ammonia	NH <sub>3</sub>	17.04	406	112.8	0.242
Argon	Ar	39.94	151	48.6	0.290
Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.11	563	49.3	0.274
Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.12	425	38.0	0.274
Carbon	C	12.01	—	—	—
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	44.01	304	73.9	0.276
Carbon monoxide	CO	28.01	133	35.0	0.294
Copper	Cu	63.54	—	—	—
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.07	305	48.8	0.285
Ethyl alcohol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46.07	516	63.8	0.249
Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.05	283	51.2	0.270
Helium	He	4.003	5.2	2.3	0.300
Hydrogen	H <sub>2</sub>	2.018	33.2	13.0	0.304
Methane	CH <sub>4</sub>	16.04	191	46.4	0.290
Methyl alcohol	CH <sub>3</sub> OH	32.05	513	79.5	0.220
Nitrogen	N <sub>2</sub>	28.01	126	33.9	0.291
Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.22	569	24.9	0.258
Oxygen	O <sub>2</sub>	32.00	154	50.5	0.290
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.09	370	42.7	0.276
Propylene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.08	365	46.2	0.276
Refrigerant 12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	120.92	385	41.2	0.278
Refrigerant 134a	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F	102.03	374	40.7	0.260
Sulfur dioxide	SO <sub>2</sub>	64.06	431	78.7	0.268
Water	H <sub>2</sub> 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).

TABLE A-2 Properties of Saturated Water (Liquid–Vapor): Temperature Table

Temp. °C	Press. bars	Specific Volume m <sup>3</sup> /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

H<sub>2</sub>O

TABLE A-2 (Continued)

Temp. °C	Press. bars	Specific Volume m <sup>3</sup> /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	.7038	8.0763	50
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.

TABLE A-3 Properties of Saturated Water (Liquid–Vapor): Pressure Table

Press. bars	Temp. °C	Specific Volume m <sup>3</sup> /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Press. bars
		Sat. Liquid v <sub>f</sub> × 10 <sup>3</sup>	Sat. Vapor v <sub>g</sub>	Sat. Liquid u <sub>f</sub>	Sat. Vapor u <sub>g</sub>	Sat. Liquid h <sub>f</sub>	Evap. h <sub>fg</sub>	Sat. Vapor h <sub>g</sub>	Sat. Liquid s <sub>f</sub>	Sat. Vapor s <sub>g</sub>	
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.

H<sub>2</sub>O



TABLE A-3 (Continued)

H <sub>2</sub> O	Press. bars	Temp. °C	Specific Volume m <sup>3</sup> /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Press. bars
			Sat. Liquid v <sub>f</sub> × 10 <sup>3</sup>	Sat. Vapor v <sub>g</sub>	Sat. Liquid u <sub>f</sub>	Sat. Vapor u <sub>g</sub>	Sat. Liquid h <sub>f</sub>	Evap. h <sub>fg</sub>	Sat. Vapor h <sub>g</sub>	Sat. Liquid s <sub>f</sub>	Sat. Vapor s <sub>g</sub>	
	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

TABLE A-4 Properties of Superheated Water Vapor

<i>T</i> °C	<i>v</i> m <sup>3</sup> /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m <sup>3</sup> /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	
<b><i>p</i> = 0.06 bar = 0.006 MPa (<i>T</i><sub>sat</sub> = 36.16°C)</b>				<b><i>p</i> = 0.35 bar = 0.035 MPa (<i>T</i><sub>sat</sub> = 72.69°C)</b>				H <sub>2</sub> O	
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
<b><i>p</i> = 0.70 bar = 0.07 MPa (<i>T</i><sub>sat</sub> = 89.95°C)</b>				<b><i>p</i> = 1.0 bar = 0.10 MPa (<i>T</i><sub>sat</sub> = 99.63°C)</b>					
Sat.	2.365	2494.5	2660.0	7.4797	1.694	2506.1	2675.5		
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	
<b><i>p</i> = 1.5 bars = 0.15 MPa (<i>T</i><sub>sat</sub> = 111.37°C)</b>				<b><i>p</i> = 3.0 bars = 0.30 MPa (<i>T</i><sub>sat</sub> = 133.55°C)</b>					
Sat.	1.159	2519.7	2693.6	7.2233	0.606	2543.6	2725.3		
120	1.188	2533.3	2711.4	7.2693					
160	1.317	2595.2	2792.8	7.4665	0.651	2587.1	2782.3		7.1276
200	1.444	2656.2	2872.9	7.6433	0.716	2650.7	2865.5		7.3115
240	1.570	2717.2	2952.7	7.8052	0.781	2713.1	2947.3		7.4774
280	1.695	2778.6	3032.8	7.9555	0.844	2775.4	3028.6		7.6299
320	1.819	2840.6	3113.5	8.0964	0.907	2838.1	3110.1		7.7722
360	1.943	2903.5	3195.0	8.2293	0.969	2901.4	3192.2		7.9061
400	2.067	2967.3	3277.4	8.3555	1.032	2965.6	3275.0		8.0330
440	2.191	3032.1	3360.7	8.4757	1.094	3030.6	3358.7		8.1538
500	2.376	3131.2	3487.6	8.6466	1.187	3130.0	3486.0	8.3251	
600	2.685	3301.7	3704.3	8.9101	1.341	3300.8	3703.2	8.5892	

TABLE A-4 (Continued)

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K
<b><math>p = 5.0</math> bars = 0.50 MPa (<math>T_{\text{sat}} = 151.86^\circ\text{C}</math>)</b>					<b><math>p = 7.0</math> bars = 0.70 MPa (<math>T_{\text{sat}} = 164.97^\circ\text{C}</math>)</b>			
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
<b><math>p = 10.0</math> bars = 1.0 MPa (<math>T_{\text{sat}} = 179.91^\circ\text{C}</math>)</b>					<b><math>p = 15.0</math> bars = 1.5 MPa (<math>T_{\text{sat}} = 198.32^\circ\text{C}</math>)</b>			
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
<b><math>p = 20.0</math> bars = 2.0 MPa (<math>T_{\text{sat}} = 212.42^\circ\text{C}</math>)</b>					<b><math>p = 30.0</math> bars = 3.0 MPa (<math>T_{\text{sat}} = 233.90^\circ\text{C}</math>)</b>			
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

TABLE A-4 (Continued)

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	
<b><math>p = 40 \text{ bars} = 4.0 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 250.4^\circ\text{C})</math></b>				<b><math>p = 60 \text{ bars} = 6.0 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 275.64^\circ\text{C})</math></b>				<b>H<sub>2</sub>O</b>	
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
<b><math>p = 80 \text{ bars} = 8.0 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 295.06^\circ\text{C})</math></b>				<b><math>p = 100 \text{ bars} = 10.0 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 311.06^\circ\text{C})</math></b>					
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	
<b><math>p = 120 \text{ bars} = 12.0 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 324.75^\circ\text{C})</math></b>				<b><math>p = 140 \text{ bars} = 14.0 \text{ MPa}</math></b> <b><math>(T_{\text{sat}} = 336.75^\circ\text{C})</math></b>					
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	

TABLE A-4 (Continued)

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K
<b><math>p = 160</math> bars = 16.0 MPa</b>				<b><math>p = 180</math> bars = 18.0 MPa</b>				
<b>(<math>T_{\text{sat}} = 347.44^\circ\text{C}</math>)</b>				<b>(<math>T_{\text{sat}} = 357.06^\circ\text{C}</math>)</b>				
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
<b><math>p = 200</math> bars = 20.0 MPa</b>				<b><math>p = 240</math> bars = 24.0 MPa</b>				
<b>(<math>T_{\text{sat}} = 365.81^\circ\text{C}</math>)</b>								
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
<b><math>p = 280</math> bars = 28.0 MPa</b>				<b><math>p = 320</math> bars = 32.0 MPa</b>				
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

TABLE A-5 Properties of Compressed Liquid Water

$T$ °C	$v \times 10^3$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v \times 10^3$ m <sup>3</sup> /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

H<sub>2</sub>O

TABLE A-6 Properties of Saturated Water (Solid–Vapor): Temperature Table

Temp. °C	Pressure kPa	Specific Volume m <sup>3</sup> /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.