



**Program Studi Teknik Kimia S-1
UNIVERSITAS PAMULANG**



Redaksi
Jl. Surya Kencana No. 1 Pamulang
Tangerang Selatan, Banten
Telp/ Fax 021 741 2566
Email: unpampress@unpam.ac.id



THERMODINAMIKA 1

PRODI TEKNIK KIMIA S-1

ISBN: 978-623-6352-18-2



THERMODINAMIKA 1

**Mayang Gitta Pawitra
Ahmad Wibisana
Untung Nugroho Harwanto**

Program Studi Teknik Kimia S-1



Buku ini dicetak dan digandakan untuk kalangan sendiri, tidak untuk tujuan komersial

THERMODINAMIKA 1

Penyusun:

Mayang Gitta Pawitra

Rifkah Akmalina

Agustina Dyah Setyowati

Untung Nugroho Harwanto



Gd. A; R.212 Universitas Pamulang

Jl. Surya Kencana no.1 Pamulang | Tangerang Selatan | Banten

THERMODINAMIKA 1

Penyusun:

Mayang Gitta Pawitra
Rifkah Akmalina
Agustina Dyah Setyowati
Untung Nugroho Harwanto

ISBN: 978-623-6352-19-9

Editor:

Rifkah Akmalina
Agustina Dyah Setyowati

Desain Sampul:

Aden

Penerbit:

UNPAM Press
Jl. Surya Kencana no.1
R.212 Gd. A Universitas Pamulang
Pamulang | Tangerang Selatan | Banten
Tlp/Fax: 021. 7412566
Ext 1073
Email: unpampress@unpam.ac.id

Cetakan pertama, 5 Agustus 2021

Hak cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang memperbanyak karya tulis dalam bentuk cetak dengan cara apapun tanpa ijin tertulis dari penerbit.

DATA PUBLIKASI UNPAM PRESS
| Lembaga Penerbit dan Publikasi Universitas Pamulang

Gedung A, R.212 Kampus 1 Universitas Pamulang

Jalan Surya Kencana nomor 1, Pamulang Barat, Tangerang Selatan, Banten

Website: www.unpam.ac.id | email: unpampress@unpam.ac.id

Sistem Politik Indonesia / Mayang Gita Prawitra, Rifkah Akmalina, Agustina Dyah Setyowati, Untung Nugroho Harwanto -1STed

ISBN. 978-623-6352-19-9

1. Sistem Politik Indonesia I. Mayang Gitta Prawitra II. Rifkah Akmalina III. Agustina Dyah Setowati IV. Untung Nugroho Harwanto

M160-05082021-01

Ketua Unpam Press: Pranoto

Koordinator Editorial: Aden

Koordinator Bidang Hak Cipta: Susanto

Koordinator Bidang Produksi: Dameis Surya Anggara

Koordinator Publikasi dan Dokumentasi: Kusworo

Desain Cover: Aden

Cetakan pertama, 5 Agustus 2021

Hak cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa ijin penerbit.

MATA KULIAH THERMODINAMIKA 1

IDENTITAS MATA KULIAH

Program Studi	: S1 Teknik Kimia
Nama Mata Kuliah / Kode	: Termodinamika 1 / TKM0232
Jumlah Sks	: 2 Sks
Deskripsi Mata Kuliah	: Mata kuliah ini merupakan bagian dari Mata Kuliah wajib prodi yang bersifat wajib ditempuh mahasiswa Program Studi S1 Teknik Kimia FT UNPAM. mata kuliah ini menawarkan capaian pembelajaran sebagai berikut: 1) Mampu memahami konsep dan substansi termodinamika; 2) Mampu menganalisis dan menyelesaikan masalah terkait teknik kimia dengan memanfaatkan sifat termodinamika.
Mata Kuliah Prasyarat	: ---
Penyusun	: 1. Mayang Gitta Pawitra(Ketua) 2. Rifkah Akmalina (Anggota1) 3. Agustina Dyah Setowati (Anggota2) 4. Untung Nugroho Harwanto (Anggota 3)

Ketua Program Studi

Teknik Kimia

(Ir. Wiwik Indrawati., M.Pd)

NIDN: 0421108203

Ketua *Team Teaching*

Termodinamika 1

(Mayang Gitta Pawitra, S.T.,M.Sc)

NIDN: 0416069002

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kepada Allah subhanallahu wata'ala karena atas berkah dan limpahan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan bahan ajar mata kuliah Termodinamika 1 ini. Penulis menyadari bahwa penulisan bahan ajar ini masih banyak terdapat kekurangan dan kesalahan, untuk itu kritik dan saran akan diterima demi kesempurnaan bahan ajar ini.

Akhir kata, penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang terlibat dalam penyusunan bahan ajar ini, dan semoga bahan ajar ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Tangerang Selatan, Mei 2020

Tim Penyusun

DAFTAR ISI

COVER.....	i
DATA PUBLIKASI UNPAM PRESS	iii
IDENTITAS MATA KULIAH	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
PERTEMUAN 1	1
A. Tujuan Pembelajaran	1
B. Uraian Materi	1
1. Definisi Termodinamika.....	1
2. Penyelesaian Problem Termodinamika.....	2
3. Aplikasi Termodinamika dalam Industri.....	5
C. Latihan Soal.....	9
D. Daftar Pustaka.....	10
PERTEMUAN 2	12
A. Capaian Pembelajaran	12
B. Uraian Materi	12
1. Sistem Termodinamika	12
2. Proses dan Siklus Termodinamika.....	14
3. Variabel termodinamika	17
C. Latihan Soal.....	23
D. Daftar Pustaka.....	24
PERTEMUAN 3	25
A. Tujuan Pembelajaran	25
B. Uraian Materi	25
C. Latihan Soal.....	31
PERTEMUAN 4	39
A. Capaian Pembelajaran	40
B. Uraian Materi	40
1. Kalor	40
2. Kalor Laten.....	41

3. Kapasitas kalor Gas.....	41
E. Latihan Soal.....	43
F. Daftar Pustaka.....	52
PERTEMUAN 5	52
A. Capaian Pembelajaran	53
B. Uraian Materi	53
1. Menghitung Kerja Sistem Tertutup.....	55
2. Perhitungan Entalpi dan Kapasitas Panas untuk Gas Ideal.....	57
C. Latihan Soal.....	60
D. Daftar Pustaka.....	62
PERTEMUAN 6	64
D. Tujuan Pembelajaran	64
E. Uraian Materi	64
1. Proses Termodinamika	64
2. Penerapan proses termodinamika dalam kehidupan sehari-hari.....	71
F. Latihan Soal.....	73
G. Daftar Pustaka.....	74
PERTEMUAN 7	75
A. Tujuan Pembelajaran	75
B. Uraian Materi	75
1. Entalpi.....	75
C. Latihan Soal.....	85
D. Daftar Pustaka.....	87
PERTEMUAN 8	88
A. Tujuan Pembelajaran	88
B. Uraian Materi	88
PERTEMUAN 9	132
A. Capaian Pembelajaran	133
B. Uraian Materi	133
1. Tabel properti.....	134
C. Latihan Soal.....	144
D. Daftar Pustaka.....	144
PERTEMUAN 10	144
B. Uraian Materi	145
Tabel properti	145

PERTEMUAN 11	162
A. Capaian Pembelajaran	163
B. Uraian Materi	163
1. Diagram properti	165
2. Diagram P-V dan P-T fase padat, cair dan gas	166
3. Diagram Pressure-Enthalpy (P-H)	169
C. Daftar Pustaka.....	171
PERTEMUAN 11	171
C. Capaian Pembelajaran	172
D. Daftar Pustaka.....	181
PERTEMUAN 13	182
A. Capaian Pembelajaran	183
B. Uraian Materi	183
1. Definisi dan aplikasi Hukum II Termodinamika	183
2. Proses reversible, irreversible dan spontanitas reaksi.....	184
3. Entropi dan prinsip penambahan entropi	185
4. Menghitung perubahan entropi dalam proses reversibel	188
5. Menghitung perubahan entropi dalam proses irreversibel	189
6. Energi Gibbs	191
7. Hubungan antara besaran termodinamik dan suhu dalam kespontanan .	193
8. Perubahan Energi Bebas Gibbs standar.....	193
C. Latihan Soal.....	196
D. Daftar Pustaka.....	197
PERTEMUAN 14	198
A. Capaian Pembelajaran	198
B. Uraian Materi	198
1. Mesin Pendingin.....	199
2. Siklus Refrigerasi Kompresi Uap Ideal	201
3. Siklus Carnot	205
4. Perhitungan Mesin Carnot.....	206
5. Penjelasan proses pada siklus Carnot	208
C. Latihan Soal.....	209
D. Daftar Pustaka.....	211

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Besaran variabel termodinamika	17
Tabel 2. Tabel properti termodinamika untuk uap jenuh pada suhu tertentu.....	18
Tabel 3. Tabel properti termodinamika untuk uap jenuh pada suhu tertentu.....	19
Tabel 4. Harga Cp dan Cv beberapa gas pada temperature 15C	21
Tabel 5. Viskositas air pada suhu tertentu	22
Tabel 6. Massa jenis zat tertentu	23
Tabel 7. Proses termodinamika.....	72
Tabel 8. Hubungan ΔS , ΔH dan suhu dalam kespontanan reaksi	193
Tabel 9. Properti refrigerant 134a	204
Tabel 10. Properti refrigerant R22	204

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Aplikasi termodinamika dalam kehidupan sehari-hari	1
Gambar 2. Bagan penyelesaian problem termodinamika.....	2
Gambar 3. Boiler dalam industri.....	5
Gambar 4. Kompresor	6
Gambar 5. Teko listrik.....	6
Gambar 6. Alat pendingin pada industri migas.....	7
Gambar 7. Kondensor	8
Gambar 8. Dasar refrigerasi	8
Gambar 9. Sistem kerja turbin gas	9
Gambar 10. Sistem dan lingkungan	12
Gambar 11. Sistem termodinamika.....	14
Gambar 12. Proses dan siklus termodinamika	14
Gambar 13. (a) Siklus daya kalor, (b) Siklus pompa kalor.....	15
Gambar 14. Volume spesifik.....	19
Gambar 15. Hukum Pertama Termodinamika	53
Gambar 16. Hukum I Termodinamika	54
Gambar 17. Silinder piston.....	55
Gambar 18. Proses isobarik	65
Gambar 19. Proses isotermik	67
Gambar 20. Proses isokorik.....	68
Gambar 21. Proses adiabatik	70
Gambar 22. Mesin ketel uap (boiler)	71
Gambar 23. Kalorimeter	77
Gambar 24. Reaksi peruraian air	82
Gambar 25. Reaksi pembakaran gas metana	83
Gambar 26. Proses perubahan fase zat murni.....	133
Gambar 27. Diagram T-v.....	164
Gambar 28. Diagram T-v perubahan fase zat murni	165
Gambar 29. Diagram T-v zat murni	166
Gambar 30. Diagram P-v zat murni.....	166
Gambar 31. Diagram P-v zat murni yang menyusut saat membeku.....	167
Gambar 32. Diagram P-v zat murni yang mengembang saat membeku	167
Gambar 33. Diagram P-T zat murni (diagram fase).....	167
Gambar 34. Diagram P-T NaCl dan H ₂ O (diagram fase)	168
Gambar 35. Diagram P-H.....	170
Gambar 36. Foto Sadi Carnot, Rudolf Clausius dan William Thompson.....	184
Gambar 37. Entropi vs suhu dan Proses yang menghasilkan kenaikan entropi ($\Delta S > 0$)	186
Gambar 38. Grafik $\ln T_2/T_1$	190
Gambar 39. Skema mesin kalor.....	198
Gambar 40. Skema mesin pendingin	199
Gambar 41. Siklus Carnot.....	208

PERTEMUAN 1

PENGERTIAN THERMODINAMIKA

A. Tujuan Pembelajaran

Menguasai teori aplikasi materi secara mendalam tentang pengertian dasar termodinamika. Mampu mengidentifikasi aplikasi termodinamika dalam kehidupan sehari-hari maupun dalam dunia industri.

B. Uraian Materi

1. Definisi Termodinamika

Ilmu Termodinamika berkaitan erat dengan relasi antara kerja dan energi panas. Dalam suatu kegiatan dimana terdapat perpindahan energi, pasti melibatkan perhitungan termodinamika. Peristiwa termodinamika umum kita temukan dalam kehidupan sehari-hari seperti contoh mengeringkan pakaian dengan bantuan cahaya matahari, mendinginkan kopi yang panas dengan cara ditiup, memasak air. Aplikasi termodinamika dapat juga kita temukan pada perangkat elektronik seperti pendingin ruangan (AC), lemari es, microwave, setrika, thermos, pemasak bertekanan (presto) maupun mesin otomotif, mesin diesel dan mesin jet.



Gambar 1. Aplikasi termodinamika dalam kehidupan sehari-hari

Agar dapat mudah dipahami, mari kita lihat contoh yang lain dari aplikasi termodinamika yaitu pada tubuh manusia. Setiap hari manusia melakukan kerja, dan untuk dapat melakukan kerja tersebut membutuhkan energi. Proses pembentukan energi terjadi di dalam tubuh manusia dikenal dengan proses metabolisme. Proses ini merupakan representasi dari hukum 1 termodinamika

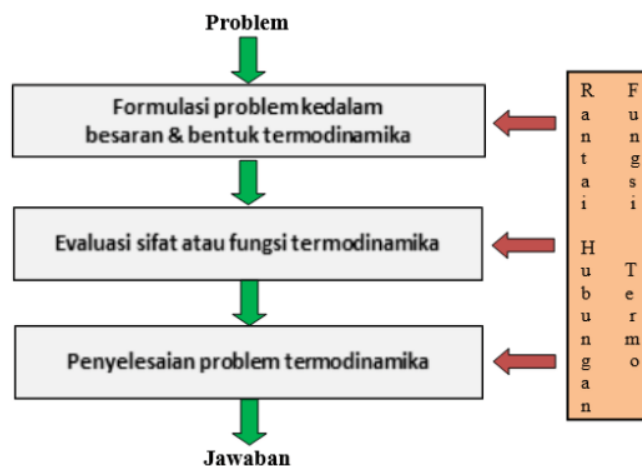
dimana energi yang dihasilkan merupakan hasil dari kerja yang dilakukan tubuh atau dirumuskan dengan $\Delta U = Q - W$.

Jika kita melakukan kerja terus menerus, semakin lama tubuh kita akan lelah sehingga memerlukan tambahan energi. Makanan dalam hal ini berperan sebagai sumber energi bagi tubuh manusia. Saat menyantap makanan berarti energi tersebut masuk ke dalam tubuh kita sehingga meningkatkan energy dalam total yang ada di tubuh. Energi inilah yang dipakai untuk bekerja atau melakukan usaha.

Akan tetapi energi dalam tubuh kita tidak dipertahankan oleh aliran kalor kedalam tubuh kita. Pada tubuh manusia dapat diasumsikan sebagai suatu sistem terbuka dimana energi dalam dapat mengalir secara bebas, keluar maupun ke dalam tubuh. Sehingga ketika suhu lingkungan lebih tinggi dari tubuh, tubuh menyerap kalor dari lingkungan.

2. Penyelesaian Problem Termodinamika

Penyelesaian suatu masalah termodinamika harus dilakukan secara cermat, melalui step-step yang dirinci secara sistematis agar didapat hasil yang optimal. Tahapan penyelesaian problem termodinamika melalui empat tahapan yang disusun secara berurutan seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Bagan penyelesaian problem thermodinamika

1) Diketahui:

Pada tahap ini, problem yang ada di formulasikan ke dalam besaran dan rumus termodinamika. Dengan kata lain, mengkonversi bahasa dalam masalah tersebut kedalam bahasa termodinamika kemudian merumuskan dengan pendekatan termodinamika.

2) Ditanyakan: Tuliskan secara singkat apa yang ditanyakan.

Pada tahap ini, gambarlah skema pada suatu system termodinamika yang akan di tinjau menggunakan data-data yang tersedia. Hal ini akan memudahkan kita untuk menganalisa dan mempermudah melakukan perhitungan. Dalam suatu perhitungan yang kompleks, jika diperlukan tentukan system tersebut merupakan system terbuka atau tertutup beserta batas sistem. Tandai diagram tersebut dengan informasi terkait sifat dan fungsi termodinamika dan perhatikan satuan yang digunakan untuk melakukan menghitung.

3) Asumsi-asumsi:

Dalam melakukan perhitungan termodinamika, diperlukan untuk menyusun asumsi-asumsi terkait permasalahan yang ada. Asumsi dibutuhkan untuk menyederhanakan problema tersebut berdasar dari keterangan yang ada sehingga mempermudah proses analisa dan perhitungan.

4) Analisis:

Tahap berikutnya adalah tahapan menganalisa. Pada tahap ini, penyelesaian masalah dilakukan berdasarkan dari asumsi yang disusun sebelumnya. Perhitungan matematis dilakukan untuk memperoleh hasil akhir yang valid. Tentukanlah data penunjang yang dibutuhkan berdasar pada data yang ada di table, grafik ataupun persamaan lainnya.

Keempat langkah tersebut merupakan dasar dari penyelesaian problem berbasis termodinamika

Contoh penyelesaian problem termodinamika

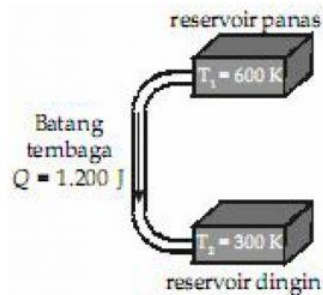
Sebuah mesin dialiri 1200 Joule kalor dari reservoir bersuhu 600K menuju reservoir dengan suhu yang lebih rendah bersuhu 300K. Hitung jumlah entropi dari sistem tersebut.

PenyelesaianDiketahui:

$$Q = 1200 \text{ J}$$

$$T_1 = 600 \text{ K}$$

$$T_2 = 300 \text{ K}$$

Ditanyakan:

Berapakah nilai ΔS ?

Asumsi:

Perubahan lain yang terjadi dalam proses tersebut dianggap tidak ada.

Jawab:

Pada reservoir panas, perubahan entropi dapat dirumuskan sebagai

$$\Delta S_1 = -Q_1/T = -1200/600 = -2 \text{ J/K}$$

Pada reservoir dingin, perubahan entropi dapat dirumuskan sebagai

$$\Delta S_2 = Q_2/T = 1200/300 = 4 \text{ J/K}$$

$$\text{Total perubahan entropi} = \Delta S_1 + \Delta S_2 = 2 \text{ J/K}$$

Dari perhitungan di atas, didapat total perubahan entropi dari alat tersebut sebesar 2 J/K.

3. Aplikasi Termodinamika dalam Industri

Berikut beberapa contoh alat-alat yang menerapkan prinsip termodinamika yang umum ditemukan dalam industri:

a. Boiler

Boiler adalah sebuah wadah tertutup yang berfungsi untuk memanaskan air maupun fluida cair lainnya. Prinsip kerjanya cukup sederhana yaitu mendidihkan. Dalam hal ini, air merupakan bagian dalam sistem, sedangkan wadah merupakan lapis batas dengan bahan bakar dan udara panas sebagai komponen dalam lingkungan yang terdapat pada boiler.



Gambar 3. Boiler dalam industri

Pada awal proses, energi panas dari gas hasil pembakaran dialirkan sepanjang pipa boiler hingga ke sisi luaran. Panas tersebut akan diserap permukaan boiler sepanjang perjalanan gas tersebut dan dialirkan secara konduksi ke pipa-pipa pada boiler. Secara bertahap, air akan berubah fase menjadi uap saturated (*saturated steam*) dan jika pemanasan dilanjutkan, air dapat berubah menjadi uap superheated (*superheated steam*).

b. Kompresor

Kompresor merupakan alat yang digunakan untuk menyimpan dan pembuat udara bertekanan. Terdapat beberapa macam kompresor di industri, namun salah satu jenis yang sering ditemukan adalah dengan jenis politropik.



Gambar 4. Kompresor

c. Heater

Teko pemanas air elektrik merupakan alat sederhana yang digunakan untuk memanaskan air ataupun merebus air. Teko pemanas listrik mempunyai heater sebagai komponen utama dengan lilitan filamen kawat nikel yang dibungkus di dalam pipa aluminium. Lilitan tersebut berfungsi mengubah energy listrik menjadi energy panas. Komponen lain yang tidak kalah pentingnya adalah penghantar listrik yang berupa kabel dimana pada ujungnya diberi steker untuk mencolokkan ke sumber listrik. Dan yang terakhir adalah wadah air, biasanya terbuat dari bahan plastik.

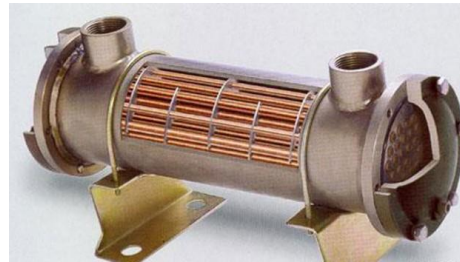


Gambar 5. Teko listrik

Prinsip kerja dari alat teko pemanas air elektrik sangat sederhana yakni pada saat kawat nikelin mendapatkan arus listrik, tahanan dalam kawat nikelin yang cukup kecil menyebabkan panas yang relatif besar. Pemanasan air di dalam wadah dilakukan menggunakan panas dari konversi arus listrik tersebut. Air panas memiliki komponen yang lebih renggang molekulnya sehingga memungkinkan air yang lebih dingin untuk mendekat ke heater sehingga terjadi pemanasan yang merata dalam wadah tersebut.

d. Cooler

Cooler adalah suatu alat yang berfungsi untuk mencegah terjadinya *over heating* (panas berlebihan) dengan cara mendinginkan suatu fraksi panas dengan menggunakan media cairan dingin, sehingga akan terjadi perpindahan panas dari fluida yang panas ke media pendingin tanpa adanya perubahan suhu.



Gambar 6. Alat pendingin pada industri migas

Sistem kerja alat cooler adalah menyedot udara dari luar, kemudian menyaringnya dengan filter dan menurunkan suhunya. Sistem ini memungkinkan terjadinya pertukaran udara. Udara panas dan debu di dalam ruangan akan terdorong keluar berganti dengan udara yang lebih dingin. Dapat terjadi pula peningkatan oksigen di waktu yang bersamaan dengan masuknya udara dingin ke dalam ruangan.

e. Kondensor

Kondensor merupakan contoh mesin penukar kalor atau dikenal dengan istilah *heat exchanger* yang berfungsi untuk mengkondensasikan fluida kerja. Pada sistem tenaga uap, fungsi utama kondensor adalah untuk mengembalikan *exhaust steam* dari turbin ke fase cairnya agar dapat dipompakan kembali ke boiler dan digunakan kembali.

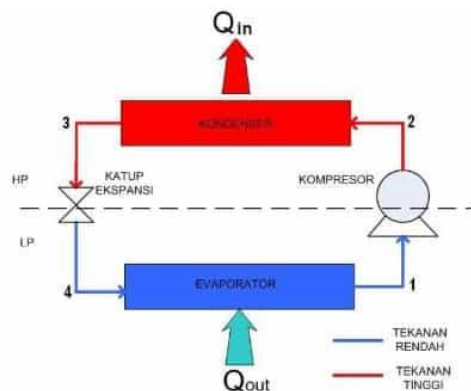
Pada exhaust turbin, kondensor juga dapat berfungsi untuk menciptakan *back pressure* yang rendah. Dengan *back pressure* yang rendah, maka efisiensi siklus dan kerja turbin akan meningkat.



Gambar 7. Kondensor

f. Mesin Pendingin

Refrigerasi adalah proses pemindahan panas dari temperatur rendah ke temperatur tinggi dengan menjaga temperatur tetap berada di bawah temperatur lingkungan. Siklus refrigerasi ini pada dasarnya adalah kebalikan dari siklus mesin panas (siklus Carnot). Efek dari siklus seperti itu adalah adanya absorpsi energi kerja dan transfer energi panas dari *heat reservoir* temperatur rendah ke *heat reservoir* temperatur tinggi.



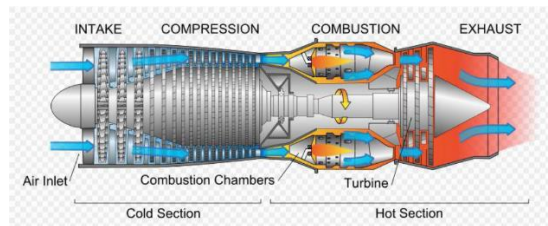
Gambar 8. Dasar refrigerasi

Perpindahan panas pada sistem refrigerasi ini mengikuti hukum kedua termodinamika, yang menurut Clausius, menyatakan bahwa tidak mungkin suatu *self-acting machine*, tanpa adanya kerja luar, untuk mentransfer panas dari satu tempat ke temperatur yang lebih tinggi. Sistem refrigerasi akan dibahas lebih lanjut dalam pertemuan kesembilan.

g. Turbin

Gas-turbine engine adalah suatu alat yang memanfaatkan gas sebagai fluida untuk memutar turbin dengan pembakaran internal. Didalam turbin gas, energi kinetik dikonversikan menjadi energi mekanik melalui udara bertekanan yang memutar roda turbin sehingga menghasilkan daya. Sistem turbin gas

yang paling sederhana terdiri dari tiga komponen yaitu kompresor, ruang bakar dan turbin gas.



Gambar 9. Sistem kerja turbin gas

Secara umum proses yang terjadi pada suatu sistem turbin gas dimulai dari udara masuk kedalam kompresor melalui saluran masuk udara (*inlet*). Kompresor berfungsi untuk menghisap dan menaikkan tekanan udara tersebut, sehingga temperatur udara juga meningkat. Kemudian udara bertekanan ini masuk kedalam ruang bakar. Di dalam ruang bakar dilakukan proses pembakaran dengan cara mencampurkan udara bertekanan dan bahan bakar. Proses pembakaran tersebut berlangsung dalam keadaan tekanan konstan sehingga dapat dikatakan ruang bakar hanya untuk menaikkan temperatur. Gas hasil pembakaran tersebut dialirkan ke turbin gas melalui suatu nozel yang berfungsi untuk mengarahkan aliran tersebut ke sudut-sudut turbin. Setelah melewati turbin ini gas tersebut akan dibuang keluar melalui saluran buang (*exhaust*).

C. Latihan Soal

Dalam pertemuan ini telah dibahas dengan rinci mengenai pengertian termodinamika dan aplikasinya dalam kehidupan sehari-hari. Untuk lebih memahami prinsip termodinamika, cermatilah soal berikut.

1. Carilah beberapa aplikasi hukum termodinamika yang Anda temukan dalam kehidupan sehari-hari
2. Jelaskan bagaimana hukum termodinamika digunakan dalam proses tersebut
3. Berikut adalah list alat-alat yang mengaplikasikan hukum termodinamika.
 - a. AC
 - b. Rice cooker
 - c. Generator listrik tenaga nuklir
 - d. Generator panas bumi
 - e. Mesin roket
 - f. Pesawat terbang

Pertanyaan:

- 1) Carilah bagaimana prinsip kerja mesin tersebut.
- 2) Bagaimana prinsip termodinamika digunakan didalamnya?

D. Daftar Pustaka

- Ahmad Abu Hamid. (2007). Modul Kalor dan Termodinamika. Fakultas Matematika dan IPA. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Hadiyanto. (2014). Dasar Termodinamika. Jurusan Teknik Kimia. Universitas Diponegoro.
- I Gusti Agung Putra Adnyana. (2014). Termodinamika. Fakultas Mipa. Universitas Udayana.
- J.M Smith, Henrick C Van Ness & Michael Abbott. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 6th edition. New York: McGraw-Hill publisher.

Paul Suparno. (2018). Pendalaman Materi Fisika: Teori Kinetik Gas dan Termodinamika. KemenristekDIKTI.

Rizki Pebriani. (2017). Termodinamika. Fakultas Teknik. Politeknik Negeri Sriwijaya

PERTEMUAN 2

KONSEP DASAR TERMODINAMIKA

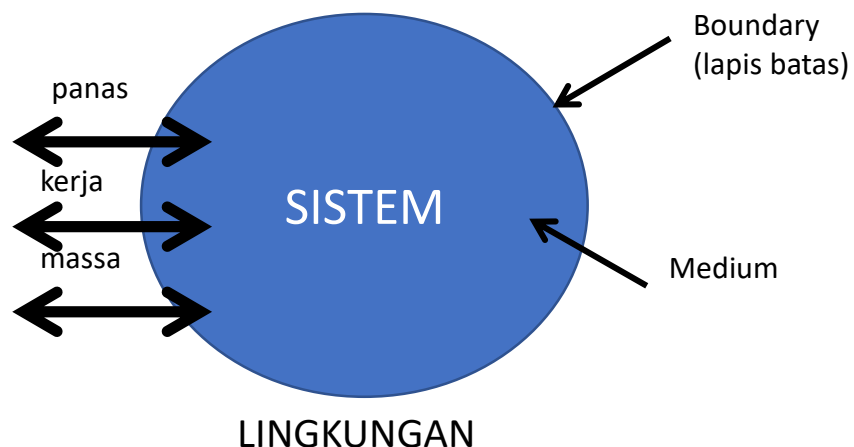
A. Capaian Pembelajaran

Menguasai teori aplikasi materi secara mendalam tentang konsep dasar termodinamika. Mampu membedakan sistem dan lingkungan dengan gambar yang benar, mampu menjelaskan sistem terbuka, tertutup dan terisolasi, dan mampu menjelaskan variabel intensif pada proses termodinamika.

B. Uraian Materi

1. Sistem Termodinamika

Apa yang dimaksud dengan sistem pada termodinamika? Sistem adalah suatu daerah yang dipilih untuk dianalisa. Daerah di sekitar sistem tersebut ditetapkan sebagai lingkungan. Antara sistem dan lingkungan, dibatasi oleh batas sistem atau yang dikenal dengan boundary, seperti yang tergambar pada gambar 10. Batasan sistem tidak mutlak, dapat bergerak dan dapat diam tergantung dari sistem yang akan ditinjau.



Gambar 10. Sistem dan lingkungan

Pada praktiknya, terdapat tiga jenis sistem dalam konsep termodinamika:

- a. Sistem terbuka adalah suatu sistem yang memungkinkan adanya interaksi antara sistem dengan lingkungan. Interaksi tersebut seperti yang dapat dilihat dari gambar 2 dapat berupa pertukaran energi, perpindahan massa, kerja dari sistem ke lingkungan maupun sebaliknya.

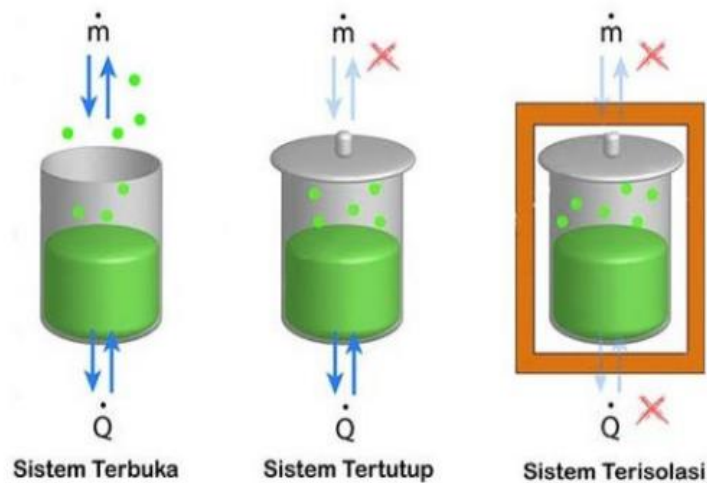
- b. Sistem tertutup adalah suatu sistem yang memungkinkan adanya pertukaran energi (panas dan kerja) tapi tidak terjadi pertukaran massa dengan lingkungan.

Partikel-partikel yang mencoba menerobos tidak

akan bisa memasuki dinding sistem ini. Sistem semacam ini mendeskripsikan nilai partikelnya yang konstan tetapi berkebalikan dengan energi yang dapat berubah. Sebagai gantinya, ketika terdapat kesetimbangan jumlah energi yang keluar masuk sistem, temperatur sistem dan lingkungan memiliki nilai temperatur yang sama. Contohnya, Green House yang didalamnya terjadi pertukaran kalor tetapi tidak terjadi pertukaran kerja dengan lingkungan.

- c. Sistem terisolasi adalah suatu sistem dimana tidak terjadi pertukaran panas, massa maupun kerja dengan lingkungan. Dinding pembatasnya tidak dapat ditembus oleh partikel maupun energi dan tidak berinteraksi dengan lingkungannya. Sistem inilah yang sangat cocok dengan konsep termodinamika. Dimana sistem ini akan menjaga kesetimbangan termodinamika suatu benda. Sistem semacam ini dicirikan dengan nilai total energi E , jumlah partikel N dan volume V yang tetap. Tetapi, sangat disayangkan, sistem ini hanyalah model, tidak ada sistem yang sebegitu uniknya dalam realita. Pengecualian terhadap sistem yang dinding pembatasnya sangat sulit ditembus. Peristiwa ini dapat dikelompokkan sebagai sistem terisolasi. Contohnya tabung gas.



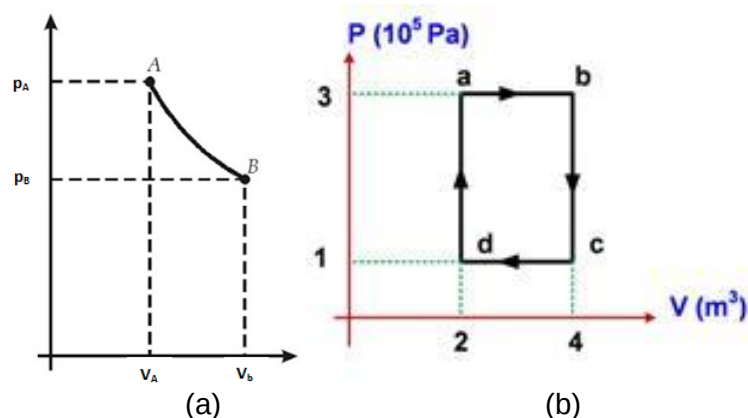


Gambar 11. Sistem termodinamika

2. Proses dan Siklus Termodinamika

Apa yang dimaksud dengan proses? Dan apa bedanya dengan siklus? Dalam termodinamika, proses dan siklus saling berkaitan erat. Sesuatu dapat dikatakan berproses apabila mengalami perubahan keadaan.

Pada awalnya berada pada suatu titik, lalu berpindah ke titik lainnya, hal tersebut dapat disebut proses. Pada termodinamika, terdapat 4 macam proses, proses isothermis, isobaris, proses isokhoris dan proses adiabatik yang akan dibahas lebih lanjut pada bab selanjutnya.



Gambar 12. Proses dan siklus termodinamika

Sedangkan siklus adalah kumpulan dari beberapa proses yang saling berhubungan. Secara umum siklus termodinamika dapat diklasifikasikan menjadi:

a. Siklus reversibel (bolak balik)

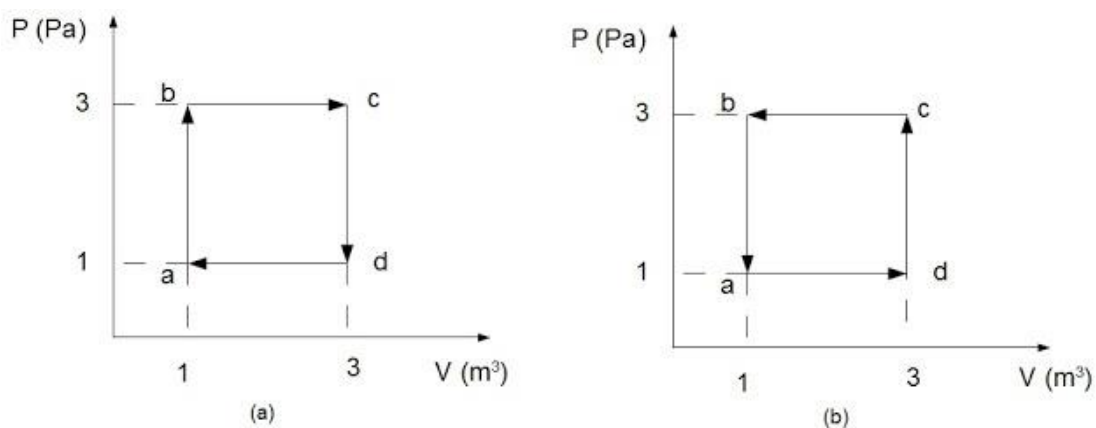
Siklus ini merupakan sebuah siklus dimana perubahan dapat dibalikkan ke keadaan semula tanpa mengubah keadaan sekelilingnya. Pada siklus reversibel, tidak ada transfer panas akibat gesekan maupun radiasi.

b. Siklus irreversibel

Siklus ini merupakan siklus yang tidak dapat dikembalikan ke keadaan semula secara spontan. Jika ingin dikembalikan ke keadaan semula, lingkungan dari sistem tersebut juga harus diubah. Pada siklus irreversible terdapat transfer panas karena proses fisik seperti gesekan, konduksi dan radiasi.

Pada aplikasinya, terdapat dua jenis siklus termodinamika yaitu siklus daya kalor dan pompa kalor. Pada siklus daya kalor, kerja siklus tersebut berasal dari konversi kalor seperti yang dapat dilihat pada mesin Otto dan diesel. Sedangkan pada siklus pompa kalor, kerja dari lingkungan luar yang menjadi dasar sistem refrigerasi sehingga dapat memberikan efek dingin dan panas seperti contoh pada lemari es dan pendingin ruangan (AC).

Perbedaan siklus daya kalor dan pompa kalor dalam diagram Tekanan - Volume dapat dilihat pada gambar 13 dibawah ini.



Gambar 13. (a) Siklus daya kalor, (b) Siklus pompa kalor

Gambar a merepresentasikan alur pada siklus daya. Siklus dapat bermula dari titik A, B, C maupun D dan berakhir pada titik yang sama. Pada sistem termodinamika, kerja yang dihasilkan sistem tersebut merupakan hal penting

untuk ditinjau. Kerja yang dilakukan suatu sistem dihitung dari masing-masing proses pada siklus tersebut. Dalam hal ini, siklus pada gambar di atas memiliki empat proses yaitu:

- Proses a-b merupakan proses isokhorik yang berlangsung dari tekanan 1 Pa ke tekanan 3 Pa. Dikarenakan tidak ada volume yang berubah ($V = 0$) maka bisa diartikan pada proses ini besarnya kerja bernilai 0.
- Proses b-c adalah proses isobarik yang berlangsung pada tekanan 3 Pa. Terjadi peningkatan volume dari volume 1 m³ ke 3 m³. Jika dirumuskan, besarnya kerja pada siklus ini adalah:

$$\begin{aligned} W &= \int_b^c P dV = P \int_b^c dV \\ &= P(V_c - V_b) \\ &= 3(3 - 1) \\ &= 6J \end{aligned}$$

- Proses c-d merupakan proses isokhorik pada volume 3 m³. Pada proses ini, terjadi perubahan dari tekanan 3 Pa ke 1 kPa. Proses ini juga tidak menghasilkan kerja karena tidak ada perubahan volume.
- Proses pada titik d kembali ke a (d-a) adalah proses isobarik berlangsung dengan kondisi operasi pada tekanan 1 kPa. Pada proses ini terdapat penyusutan volume dari volume 3 m³ ke 1 m³. Pada proses ini kerja yang dihasilkan adalah:

$$\begin{aligned} W &= \int_d^a P dV = P \int_d^a dV \\ &= P(V_a - V_d) \\ &= 1(1 - 3) \\ &= -2J \end{aligned}$$

Dari ke empat proses di atas, kerja siklus tersebut dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$W_{siklus} = \sum W$$

$$= 0 + 6 + 0 + (-2)$$

$$= 4 J$$

Dari perhitungan diatas, dapat disimpulkan bahwa dalam siklus daya ini diperoleh kerja sebesar 4 Joule dalam satu siklusnya. Dapat dilihat bahwa diperoleh nilai positif yang berarti bahwa sistem “melakukan” kerja ke lingkungan.

Siklus pada gambar 1b merepresentasikan siklus pada pompa kalor. Jika perhitungan diatas dilakukan untuk siklus pompa kalor maka akan diperoleh nilai kerja yang dilakukan siklus sebesar -4 Joule. Nilai negatif yang dihasilkan dari perhitungan siklus pompa kalor berarti bahwa sistem tersebut “menerima” kerja dari lingkungan.

Berilah contoh alat yang mengaplikasikan ketiga sistem dalam konsep termodinamika?

Carilah contoh proses dan siklus termodinamika dalam kehidupan sehari-hari.

3. Variabel termodinamika

Untuk menganalisa proses yang terjadi secara termodinamika ada beberapa variabel yang harus dipahami. Pada konsepnya termodinamika membahas tentang sistem yang berkaitan dengan fungsi keadaan. Secara garis besar, variabel termodinamika dikelompokkan menjadi 2: besaran intensif dan besaran ekstensif seperti yang dapat dilihat dalam tabel berikut.

Jenis besaran	Nilainya	Contoh
Intensif	Tidak bergantung pada jumlah sistem	$\rho, P, T, \eta, \gamma, c, c_m$
Ekstensif	Bergantung pada jumlah sistem	$m, V, \Delta U, \Delta H, \Delta S, \Delta G, C$

$\Delta U, \Delta H, \Delta S, \Delta G$  **Fungsi keadaan:** sifat sistem yang hanya ditentukan oleh keadaan (awal dan akhir) sistem dan tidak ditentukan oleh cara mencapai keadaan tersebut.

Tabel 1. Besaran variabel termodinamika

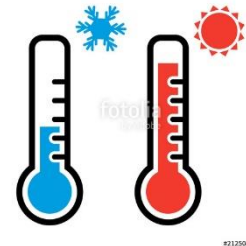
Variabel intensif adalah variabel yang tidak bergantung pada jumlah sistem seperti contoh tekanan, suhu, viskositas, kalor, dan volume spesifik. Variabel dalam kategori variabel ekstensif adalah variabel yang bergantung pada jumlah

sistem seperti perubahan energi dalam (ΔU), perubahan entalpi (ΔH), entropi (ΔS), energi Gibbs (ΔG) yang akan dibahas lebih lanjut pada pertemuan tiga.

Beberapa contoh variabel intensif:

a. Temperatur

Temperatur adalah variabel yang paling mudah diukur dan yang paling penting untuk menunjukkan seberapa panas atau dingin suatu benda. Satuan temperatur ada beberapa jenis seperti fahrenheit, celcius, reamur dan kelvin. Dalam termodinamika, satuan yang umum digunakan atau dikenal dengan satuan absolut dari temperatur adalah Kelvin. Satuan kelvin pula yang berkaitan langsung dengan energi kalor. Suhu (temperatur) berbeda dengan kalor (heat). Kalor adalah variabel energi yang berkaitan dengan temperatur.



8212040392

Temp., T °C	Sat. Press., P _{sat} , kPa	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg K		
		Sat Liquid, v _f	Sat vapor, v _g	Sat Liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat vapor, u _g	Sat Liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat vapor, h _g	Sat Liquid, s _f	Evap., s _{fg}	Sat vapor, s _g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.00	2374.9	2374.9	0.00	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.02	2360.8	2381.8	21.02	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.228	0.001000	106.32	42.02	2346.6	2388.7	42.02	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.706	0.001001	77.885	62.98	2332.5	2395.5	62.98	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.339	0.001002	57.762	83.91	2318.4	2402.3	83.91	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.170	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.247	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.629	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.385	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.595	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.35	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.76	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.95	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.04	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.20	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.60	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.42	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.87	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.18	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.61	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
360	18666	0.001895	0.006950	1726.16	625.7	2351.9	1761.53	720.1	2481.6	3.9165	1.1373	5.0537
365	19822	0.002015	0.006009	1777.22	526.4	2303.6	1817.16	605.5	2422.7	4.0004	0.9489	4.9493
370	21044	0.002217	0.004953	1844.53	385.6	2230.1	1891.19	443.1	2334.3	4.1119	0.6890	4.8009
373.95	22064	0.003106	0.003106	2015.8	0	2015.8	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Tabel 2. Tabel properti termodinamika untuk uap jenuh pada suhu tertentu

b. Tekanan

Tekanan adalah perbandingan antara gaya yang bekerja dengan luas permukaan dimana gaya tersebut bekerja. Tekanan memiliki satuan

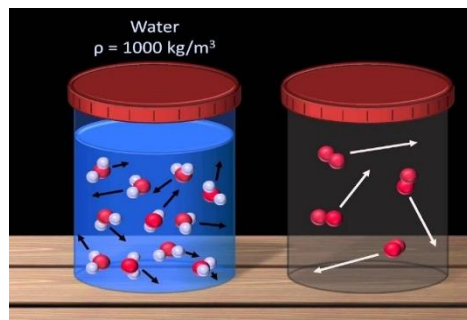
internasional Pascal yaitu N/m². Dalam satuan lain biasa ditemukan dalam psi.

Press. P kPa	Sat. Temp., T_{sat} °C	Specific volume, m^3/kg			Internal energy, kJ/kg		Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kgK		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_g	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_g	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_g	Sat. vapor, s_g
0.6117	0.01	0.001000	206.00	0.00	2374.9	2374.9	0.00	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.30	2355.2	2384.5	29.30	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.69	2338.1	2392.8	54.69	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.43	2325.5	2398.9	73.43	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.42	2315.4	2403.8	88.42	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8330	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
...												
...												
20,000	365.75	0.002038	0.003862	1785.84	509.0	2294.8	1826.59	585.5	2412.1	4.0146	0.9164	4.9310
21,000	369.83	0.002207	0.004994	1841.62	391.9	2233.5	1887.97	430.4	2338.4	4.1071	0.7005	4.8076
22,000	373.71	0.002703	0.006444	1951.65	140.8	2092.4	2011.12	161.5	2172.6	4.2942	0.2496	4.5439
22,064	373.95	0.003106	0.003106	2015.8	0	2015.8	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Tabel 3. Tabel properti termodinamika untuk uap jenuh pada suhu tertentu

c. Volume spesifik

Volume spesifik adalah besaran yang menunjukkan volume setiap satu satuan massa. Besaran ini berbanding terbalik dengan massa jenis (ρ). Uap air memiliki volume spesifik yang jauh lebih besar dibandingkan dengan air dalam fasa cair karena uap berfasa gas yang memiliki jarak antar molekul jauh lebih besar dibandingkan dengan fasa cair. Akibatnya fasa gas memiliki kerapatan yang sangat rendah yang berarti memiliki volume spesifik yang tinggi.



Gambar 14. Volume spesifik

d. Kalor

Kalor merupakan energi yang ditransfer dari sistem ke lingkungan maupun sebaliknya. Transfer kalor tersebut dikarenakan adanya perbedaan suhu antara sistem dan lingkungan. Kalor merupakan besaran yang kekal sehingga dapat diartikan tidak dapat dibuat maupun dihancurkan (hukum kekekalan energi). Namun, kalor dapat berpindah tempat dan ditransfer ke tempat lain. Kalor juga dapat diubah menjadi bentuk energi lainnya seperti contoh, turbin uap yang mengkonversikan panas menjadi energi kinetik. Contoh lain dalam kehidupan sehari-hari adalah energi panas yang dihasilkan oleh bola lampu. Bola lampu mengkonversi energi listrik jadi radiasi. Jika radiasi tersebut diserap oleh benda lain, maka akan berubah menjadi energi panas. Dalam perhitungannya, kalor bernilai positif jika sistem tersebut menyerap kalor. Sedangkan akan bernilai negative jika sistem itu melepas kalor.

e. Kapasitas Kalor (C)

Kapasitas kalor (C) adalah kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu sistem sebanyak satu derajat celcius.(J/C). Kapasitas kalor merupakan besaran ekstensif dari suatu sistem termodinamika. Dalam pendekatan matematis, kapasitas kalor dirumuskan sebagai:

- 1) Kapasitas kalor pada volume tetap (C_v) = $q_v \Delta t$

Pada volume tetap: $dV = 0$

$$C_v = \left(\frac{\partial q_v}{\partial t} \right) = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v$$

- 2) Kapasitas kalor pada tekanan tetap (C_p) = $q_p \Delta t$

Pada tekanan tetap $dp = 0$

$$C_p = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right) = P \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$$

Bila persamaan $H = U + PV$ dideferensialkan terhadap T pada tekanan tetap didapat

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right)_p$$

Hubungan C_v dan C_p dapat dituliskan dengan persamaan:

$$C_p - C_v = \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + P \right\} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$

$$C_p - C_v = \left\{ V - \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T \right\} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V$$

Untuk gas Ideal berlaku persamaan:

$$C_p - C_v = R$$

3) Pengaruh suhu terhadap kapasitas kalor

Pada umumnya kapasitas kalor merupakan fungsi dari suhu. Fungsi ini biasanya dinyatakan sebagai:

$$C_p = a + bT + cT^2$$

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

Tabel 4. Harga C_p dan C_v beberapa gas pada temperature 15C

f. Viskositas

Viskositas adalah istilah ilmiah yang menggambarkan resistensi terhadap aliran fluida. Fluida dalam ini biasa diartikan sebagai cairan walaupun dalam kasus tertentu, fluida dapat berupa gas.

Dalam kehidupan sehari-hari, air memiliki viskositas lebih rendah dibanding madu. Dalam hal ini madu memiliki tekstur yang lebih kental dan lebih sulit mengalir jika diletakkan pada sendok yang diposisikan miring.

Viskositas dipengaruhi oleh sejumlah faktor, termasuk ukuran dan bentuk molekul, interaksi di antara mereka, dan suhu.

Temp °C	Kerapatan ρ (kg/m ³)	Viscositas dinamis μ (m ² /det)	Viscositas kinematis ν (m ² /det)	Tegangan permukaan τ (N/m)	Tinggi tekanan uap p_u/γ (m)	Modulus elastisitas K (N/m ²)
0	999,87	1,787x10 ⁻³	1,787x10 ⁻⁶	0,0757	0.06	1,98x10 ⁹
1	999,93	1,728 x10 ⁻³	1,728 x10 ⁻⁶	0,0755		
2	999,97	1,671 x10 ⁻³	1,671 x10 ⁻⁶	0,0753		
3	999,99	1,618 x10 ⁻³	1,618 x10 ⁻⁶	0,751		
4	1000	1,567 x10 ⁻³	1,567 x10 ⁻⁶	0,0749		
5	999,99	1,519 x10 ⁻³	1,159 x10 ⁻⁶	0,0748	0.09	2,03x10 ⁹
6	999,97	1,472 x10 ⁻³	1,472 x10 ⁻⁶	0,0747		
8	999,88	1,386 x10 ⁻³	1,386 x10 ⁻⁶	0,0745		
10	999,73	1,307 x10 ⁻³	1,307 x10 ⁻⁶	0,0742	0.12	2,09x10 ⁹
12	999,52	1,234 x10 ⁻³	1,235 x10 ⁻⁶	0,0740		
14	999,27	1,168 x10 ⁻³	1,169 x10 ⁻⁶	0,0737		2,14x10 ⁹
16	998,97	1,108 x10 ⁻³	1,109 x10 ⁻⁶	0,0734		

Temp °C	Kerapatan ρ (kg/m ³)	Viscositas dinamis μ (m ² /det)	Viscositas kinematis ν (m ² /det)	Tegangan permukaan τ (N/m)	Tinggi tekanan uap p_u/γ (m)	Modulus elastisitas K (N/m ²)
18	998,62	1,052 x10 ⁻³	1,052 x10 ⁻⁶	0,0730		
20	998,23	1,000 x10 ⁻³	1,002 x10 ⁻⁶	0,0728	0.25	2,19x10 ⁹
25	997,08	0,887 x10 ⁻³	0,890 x10 ⁻⁶	0,0720	0.33	
30	995,68	0,795 x10 ⁻³	0,798 x10 ⁻⁶	0,0712	0.44	2,25x10 ⁹
35	994,06	0,715 x10 ⁻³	0,719 x10 ⁻⁶	0,0704	0.58	
40	992,25	0,648 x10 ⁻³	0,653 x10 ⁻⁶	0,0696	0.76	2,26x10 ⁹
45	990,25	0,590 x10 ⁻³	0,596 x10 ⁻⁶	0,0689	0.98	
50	988,07	0,540 x10 ⁻³	0,547 x10 ⁻⁶	0,0680	1.26	2,26 x10 ⁹
60	983,24	0,459 x10 ⁻³	0,467 x10 ⁻⁶	0,0661	2.03	2,25 x10 ⁹
70	977,81	0,395 x10 ⁻³	0,404 x10 ⁻⁶	0,0643	3.20	2,22 x10 ⁹
80	971,83	0,345 x10 ⁻³	0,355 x10 ⁻⁶	0,0626	4.86	2,17 x10 ⁹
90	965,34	0,304 x10 ⁻³	0,315 x10 ⁻⁶	0,0607	7.18	
100	958,38	0,270 x10 ⁻³	0,282 x10 ⁻⁶	0,0589	10.33	

Tabel 5. Viskositas air pada suhu tertentu

g. Massa jenis

Massa jenis merupakan ukuran massa dalam setiap volume benda. Dari data penelitian, didapat bahwa semakin tinggi massa jenis suatu benda, maka semakin besar pula massa benda tersebut pada setiap volumenya. Massa jenis rata-rata setiap benda merupakan total massa dibagi dengan total volumenya. Sebuah benda yang memiliki massa jenis lebih tinggi (misal besi) akan memiliki volume lebih rendah daripada benda bermassa sama yang memiliki massa jenis lebih rendah (misalnya air).

Tabel 6. Massa jenis zat tertentu

No	Nama Zat	Massa Jenis (g/cm³)	Massa Jenis (kg/m³)	Ket
1	Air	1,00	1.000	Zat cair
2	Aluminium	2,70	2.700	Zat padat
3	Alkohol	0,80	800	Zat cair
4	Besi	7,90	7.900	Zat padat
5	Bensin	0,70	700	Zat cair
6	Emas	19,30	19.300	Zat padat
7	Es	0,92	920	Zat padat
8	Hidrogen (gas)	0,00.009	0,0899	Zat Gas
9	Kuningan	8,40	8.400	Zat padat
10	Perak	10,50	10.500	Zat padat
11	Platina	21,45	21.450	Zat padat
12	Raksa	13,60	13.600	Zat cair
13	Seng	7,14	7.140	Zat padat
14	Tembaga	8,92	8.920	Zat padat
15	Udara (gas)	0,0013	1,29	Zat Gas

C. Latihan Soal

Diskusikan soal berikut:

- a. Salju yang meleleh
- b. Green house
- c. Dispenser
- d. Termos
- e. Rice cooker
- f. Ketika badan demam
- g. Setrika
- h. AC
- i. Lemari es

Jelaskan:

1. Apakah topik di atas termasuk sistem terbuka/tertutup/terisolasi
2. Bagaimana interaksinya dengan lingkungan
3. Variabel apa saja yang berpengaruh terhadap sistem tersebut.

D. Daftar Pustaka

J.M Smith, Henrick C Van Ness & Michael Abbott. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 6th edition. New York: McGraw-Hill publisher.

Ahmad Abu Hamid. (2007). Modul Kalor dan Termodinamika. Fakultas Matematika dan IPA. Universitas Negeri Yogyakarta.

Hadiyanto. (2014). Dasar Termodinamika. Jurusan Teknik Kimia. Universitas Diponegoro.

Paul Suparno. (2018). Pendalaman Materi Fisika: Teori Kinetik Gas dan Termodinamika. KemenristekDIKTI.

I Gusti Agung Putra Adnyana. (2014). Termodinamika. Fakultas Mipa. Universitas Udayana.

PERTEMUAN 3

PERSAMAAN KEADAAN

A. Tujuan Pembelajaran

Menguasai konsep dan penerapan persamaan gas ideal dan nyata. Mampu mengenal dan menghitung persamaan keadaan yang digunakan dalam bidang teknik kimia seperti persamaan Van der Waals, Redlich Kwong, Soave Redlich Kwong dan Peng Robinson.

B. Uraian Materi

Dalam termodinamika, istilah yang disebut fluida kerja adalah zat (cairan, uap maupun gas) atau campuran yang menempati suatu sistem. Fluida kerja tersebut memiliki sifat dan keadaan tertentu sesuai dengan kondisi keadaan sistem. Dalam perhitungan termodinamika, akan berkaitan langsung dengan sifat-sifat fluida tersebut seperti perubahan temperature, kenaikan tekanan, kapasitas panas, entropi, perubahan energy dalam dan entalpi.

1. Persamaan Gas Ideal

Kondisi ideal dalam ilmu termodinamika sebenarnya tidak ada, namun dimungkinkan gas-gas yang mempunyai tekanan rendah atau temperatur sangat rendah yang dinyatakan mendekati kondisi ideal. Sifat gas ideal mudah dimodelkan dan dapat dihitung dengan cepat sehingga sering digunakan untuk evaluasi awal proses nyatanya.

Jika dilihat dari rumus perubahan energy dalam dan entalpi sebagai berikut,

Energy dalam

$$\Delta U = C_v.dT$$

Entalpi

$$\Delta H = C_p.dT$$

Dapat disimpulkan bahwa energy dalam dan entalpi dari gas ideal merupakan fungsi dari perubahan temperatur. Kondisi tersebut tidak bergantung pada tekanan dan volume sistem.

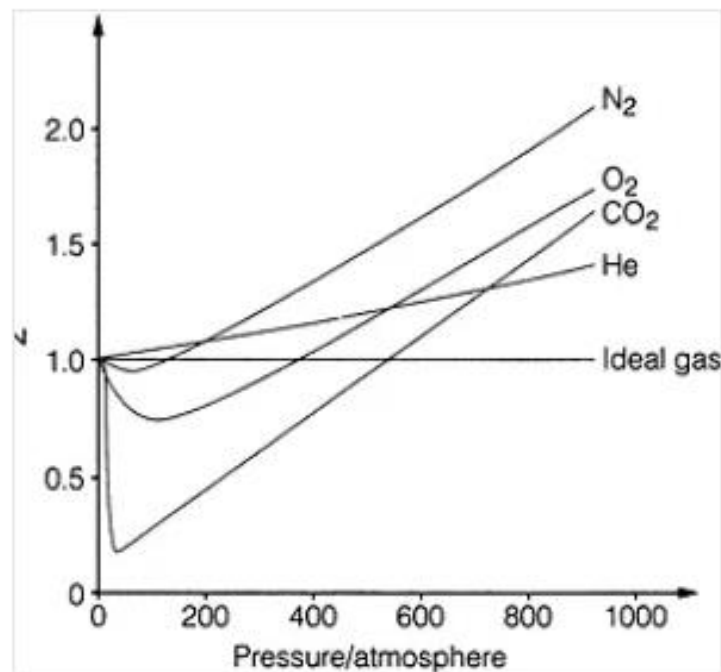
Secara matematis, persamaan gas ideal merupakan kombinasi antara Hukum Boyle dan Gay Lussac dengan menggunakan asumsi bahwa tekanan proporsional terhadap temperature dalam satuan Kelvin ($P \propto T(K)$). Dalam persamaan gas ideal, volume berbanding lurus dengan temperature, berbanding terbalik dengan tekanan dan mol. Pada tekanan rendah, persamaan gas ideal dapat dirumuskan sebagai berikut

$$PV = nRT$$

Pada persamaan gas nyata, persamaan tersebut tidak dapat digunakan karena terdapat beberapa penyimpangan. Penyimpangan tersebut dinotasikan dengan Z atau dikenal dengan factor kompresibilitas. Ketika nilai Z sama dengan 1 berarti gas tersebut menyerupai gas ideal.

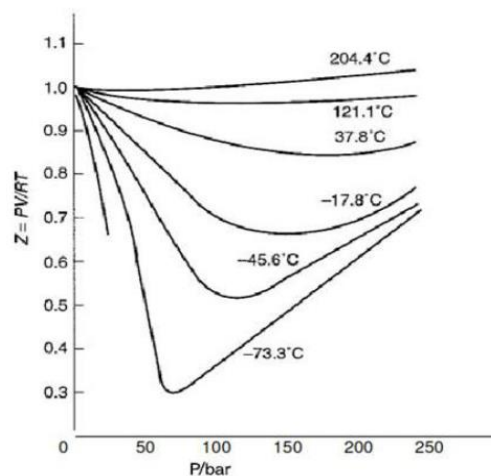
$$Z = PV.RT$$

Ketika nilai Z jauh dari 1, maka gas tersebut semakin menyimpang dari persamaan gas ideal. Dapat dilihat dari grafik dibawah terdapat beberapa jenis gas dengan variasi tekanan dan pengaruhnya terhadap factor kompresibilitas (nilai Z).



Gambar . Faktor kompresibilitas beberapa gas pada suhu 0°C

Dapat dilihat pada gas nyata seperti hydrogen, oksigen, helium, metana maupun ammonia, gas-gas yang sangat ringanpun memiliki factor kompresibilitas yang lebih dari 1. Nilai Z akan sangat bermanfaat untuk menghitung vapor liquid equilibrium dalam memodelkan kurva P-V-T untuk masing-masing gas tersebut. Perhitungan nilai Z menjadi penting untuk mengetahui kondisi kapan zat merupakan campuran cair dan gas, kapan sebagai gas dan fluida superkritik pada kurva (P-V-T).



Gambar . Faktor kompresibilitas gas Metana

Bagaimana menghitung nilai Z tersebut?

Perhitungan gas nyata dapat dimulai dengan menghitung persamaan van der Waals. Persamaan van der Waals memperhitungkan volume nyata partikel, mempertimbangkan gaya intermolecular yang saling tarik menarik yang mempengaruhi interaksi dari sistem dan sifat fisik sistem tersebut. Faktor koreksi utama pada persamaan van der Waals dinotasikan dengan a dan b seperti pada persamaan berikut

$$\left[P + \left(\frac{1}{v} \right)^2 \right] (V - b) = R.T$$

Pada persamaan van der Waals nilai a dan B dapat dihitung dari temperature kritik dan tekanan kritik masing-masing komponennya. Tekanan dan temperature kritik dapat ditemukan pada bagian akhir chapter ini.

Persamaan van der Waals memiliki keterbatasan untuk beberapa kondisi sehingga Redlich-Kwong merumuskan persamaan untuk menyempurnakan persamaan tersebut. Soave menambahkan factor alfa dimana alfa adalah fungsi dari temperature relatif (temperature sistem dibagi dengan temperature kritik). Pada tahun 1976, PengRobinson menyempurnakan persamaan sebelumnya dengan menambahkan nilai a, b, alfa dan kappanya. Persamaan Peng Robinson dapat digunakan untuk segala variasi gas dalam semua kondisi operasi. Persamaan tersebut umum digunakan untuk pemodelan yang kompleks dalam simulasi proses.

Tabel . Persamaan yang digunakan untuk korelasi Gas Nyata

	Persamaan	Parameters
Van der Waals	$P = \frac{R.T}{v-b} - \frac{a}{v^2}$	$a = 27 R^2 T_c^2 / 64 P_c$ $b = R.T_c / 8 P_c$
Redlich-Kwong	$P = \frac{R.T}{v-b} - \frac{a}{t^{0.5}v(v+b)}$	$a = 0.42748 R^2 T_c^{2.5} / P_c$ $b = 0.0866 R.T_c / P_c$
Soave Redlich Kwong	$P = \frac{R.T}{v-b} - \frac{a.\alpha}{v(v+b)}$	$a = 0.42748 R^2 T_c^2 / P_c$ $b = 0.0866 R.T_c / P_c$ $\alpha = \{1 + k(1 - Tr^{0.5})\}^2$ $k = 0.48508 + 1.5571\omega - 0.1561 \omega^2$
Peng Robinson	$P = \frac{R.T}{v-b} - \frac{a.\alpha}{v(v+b) + b(v-b)}$	$a = 0.45724 R^2 T_c^2 / P_c$ $b = 0.0778 R.T_c / P_c$ $\alpha = \{1 + k(1 - Tr^{0.5})\}^2$ $k = 0.37464 + 1.5422\omega - 0.26992 \omega^2$

C. Latihan Soal

1. Gas Nitrogen diekspansi dari tekanan awal 250 bar menjadi 50 bar pada temperature tetap. Bila volume mula-mula gas tersebut adalah 5dm^3 . Berapakah volume akhirnya?
2. Sejumlah gas ideal dengan volume 3,2 L pada suhu 70°C dan tekanan 10 atm. Gas tersebut memuai dan mengalami peningkatan volume menjadi 8.6 L. Bila temperature akhir 110°C , berapa tekanan akhir gas tersebut?
3. Jika gas hydrogen dianggap sebagai gas berperilaku ideal, hitung berat gas tersebut pada tekanan 0.5 atm dalam wadah bervolume 50 Liter pada suhu 200K.
4. Hitung volume molar ethylene glycol pada suhu 200 K dan tekanan 20 bar dengna menggunakan:
 - a. Persamaan gas ideal
 - b. Korelasi umum untuk Z
5. Tekanan uap isooctane 10.75 bar pada 250 K. Hitung volume molar pada kondisi uap jenuh dan cair jenuh dengan menggunakan persamaan RK
6. Tekanan uap isobutylene 9.3 bar pada 500 K. Hitung volume molar pada kondisi uap jenuh dan cair jenuh dengan menggunakan persamaan Peng Robinson
7. Hitung volume molar toluene pada suhu 100 K dan tekanan 10 bar dengan menggunakan:
 - a. Persamaan gas ideal
 - b. Korelasi umum untuk Z
8. Data yang diperoleh dari eksperimen untuk tekanan uap n-butana untuk temperature 373K adalah 5.9 atm. Hitung tekanan uap tersebut dengan menggunakan RK dan SRK

Table A.1: Conversion Factors

Quantity	Conversion
Length	1 m = 100 cm = 3.28084 (ft) = 39.3701 (in)
Mass	1 kg = 10 ³ g = 2.20462 (lb _m)
Force	1 N = 1 kg·m·s ⁻² = 10 ⁵ (dyne) = 0.224809 (lb _f)
Pressure	1 bar = 10 ⁵ kg·m ⁻¹ ·s ⁻² = 10 ⁵ N·m ⁻² = 10 ⁵ Pa = 10 ² kPa = 10 ⁶ (dyne)·cm ⁻² = 0.986923 (atm) = 14.5038 (psia) = 750.061 (torr)
Volume	1 m ³ = 10 ⁶ cm ³ = 10 ³ liters = 35.3147 (ft) ³ = 264.172 (gal)
Density	1 g·cm ⁻³ = 10 ³ kg·m ⁻³ = 62.4278 (lb _m)(ft) ⁻³
Energy	1 J = 1 kg·m ² ·s ⁻² = 1 N·m = 1 m ³ ·Pa = 10 ⁻⁵ m ³ ·bar = 10 cm ³ ·bar = 9.86923 cm ³ ·(atm) = 10 ⁷ (dyne)·cm = 10 ⁷ (erg) = 0.239006 (cal) = 5.12197 × 10 ⁻³ (ft) ³ (psia) = 0.737562 (ft)(lb _f) = 9.47831 × 10 ⁻⁴ (Btu) = 2.77778 × 10 ⁻⁷ kW·h
Power	1 kW = 10 ³ W = 10 ³ kg·m ² ·s ⁻³ = 10 ³ J·s ⁻¹ = 239.006 (cal)·s ⁻¹ = 737.562 (ft)(lb _f)·s ⁻¹ = 0.947831 (Btu)·s ⁻¹ = 1.34102 (hp)

Table A.2: Values of the Universal Gas Constant

$$\begin{aligned}
 R &= 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = 8.314 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \\
 &= 83.14 \text{ cm}^3 \cdot \text{bar} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = 8314 \text{ cm}^3 \cdot \text{kPa} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \\
 &= 82.06 \text{ cm}^3 \cdot (\text{atm}) \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = 62,356 \text{ cm}^3 \cdot (\text{torr}) \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \\
 &= 1.987 (\text{cal}) \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = 1.986 (\text{Btu})(\text{lb mole})^{-1}(\text{R})^{-1} \\
 &= 0.7302 (\text{ft})^3 (\text{atm})(\text{lb mol})^{-1}(\text{R})^{-1} = 10.73 (\text{ft})^3 (\text{psia})(\text{lb mol})^{-1}(\text{R})^{-1} \\
 &= 1545 (\text{ft})(\text{lb}_f)(\text{lb mol})^{-1}(\text{R})^{-1}
 \end{aligned}$$

Table B.1 Characteristic Properties of Pure Species

Listed here for various chemical species are values for the molar mass (molecular weight), acentric factor ω , critical temperature T_c , critical pressure P_c , critical compressibility factor Z_c , critical molar volume V_c , and normal boiling point T_n . Abstracted from Project 801, DIPPR[®], Design Institute for Physical Property Data of the American Institute of Chemical Engineers, they are reproduced with permission. The current full version of this database includes values for 34 constant properties and 15 temperature-dependent thermodynamic and transport properties for 2278 chemical species, and new species are added regularly.

Table B.2 Constants for the Antoine Equation for Vapor Pressures of Pure Species**Table B.1: Characteristic Properties of Pure Species**

	Molar mass	ω	T_c/K	P_c/bar	Z_c	V_c $\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$	T_n/K
Methane	16.043	0.012	190.6	45.99	0.286	98.6	111.4
Ethane	30.070	0.100	305.3	48.72	0.279	145.5	184.6
Propane	44.097	0.152	369.8	42.48	0.276	200.0	231.1
<i>n</i> -Butane	58.123	0.200	425.1	37.96	0.274	255.	272.7
<i>n</i> -Pentane	72.150	0.252	469.7	33.70	0.270	313.	309.2
<i>n</i> -Hexane	86.177	0.301	507.6	30.25	0.266	371.	341.9
<i>n</i> -Heptane	100.204	0.350	540.2	27.40	0.261	428.	371.6
<i>n</i> -Octane	114.231	0.400	568.7	24.90	0.256	486.	398.8
<i>n</i> -Nonane	128.258	0.444	594.6	22.90	0.252	544.	424.0
<i>n</i> -Decane	142.285	0.492	617.7	21.10	0.247	600.	447.3
Isobutane	58.123	0.181	408.1	36.48	0.282	262.7	261.4
Isooctane	114.231	0.302	544.0	25.68	0.266	468.	372.4

Table B.1 (Continued)

	Molar mass	ω	T_c/K	P_c/bar	Z_c	V_c $\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$	T_n/K
Cyclopentane	70.134	0.196	511.8	45.02	0.273	258.	322.4
Cyclohexane	84.161	0.210	553.6	40.73	0.273	308.	353.9
Methylcyclopentane	84.161	0.230	532.8	37.85	0.272	319.	345.0
Methylcyclohexane	98.188	0.235	572.2	34.71	0.269	368.	374.1
Ethylene	28.054	0.087	282.3	50.40	0.281	131.	169.4
Propylene	42.081	0.140	365.6	46.65	0.289	188.4	225.5
1-Butene	56.108	0.191	420.0	40.43	0.277	239.3	266.9
<i>cis</i> -2-Butene	56.108	0.205	435.6	42.43	0.273	233.8	276.9
<i>trans</i> -2-Butene	56.108	0.218	428.6	41.00	0.275	237.7	274.0
1-Hexene	84.161	0.280	504.0	31.40	0.265	354.	336.3
Isobutylene	56.108	0.194	417.9	40.00	0.275	238.9	266.3
1,3-Butadiene	54.092	0.190	425.2	42.77	0.267	220.4	268.7
Cyclohexene	82.145	0.212	560.4	43.50	0.272	291.	356.1
Acetylene	26.038	0.187	308.3	61.39	0.271	113.	189.4
Benzene	78.114	0.210	562.2	48.98	0.271	259.	353.2
Toluene	92.141	0.262	591.8	41.06	0.264	316.	383.8
Ethylbenzene	106.167	0.303	617.2	36.06	0.263	374.	409.4
Cumene	120.194	0.326	631.1	32.09	0.261	427.	425.6
<i>o</i> -Xylene	106.167	0.310	630.3	37.34	0.263	369.	417.6
<i>m</i> -Xylene	106.167	0.326	617.1	35.36	0.259	376.	412.3
<i>p</i> -Xylene	106.167	0.322	616.2	35.11	0.260	379.	411.5
Styrene	104.152	0.297	636.0	38.40	0.256	352.	418.3
Naphthalene	128.174	0.302	748.4	40.51	0.269	413.	491.2
Biphenyl	154.211	0.365	789.3	38.50	0.295	502.	528.2
Formaldehyde	30.026	0.282	408.0	65.90	0.223	115.	254.1
Acetaldehyde	44.053	0.291	466.0	55.50	0.221	154.	294.0
Methyl acetate	74.079	0.331	506.6	47.50	0.257	228.	330.1
Ethyl acetate	88.106	0.366	523.3	38.80	0.255	286.	350.2
Acetone	58.080	0.307	508.2	47.01	0.233	209.	329.4
Methyl ethyl ketone	72.107	0.323	535.5	41.50	0.249	267.	352.8
Diethyl ether	74.123	0.281	466.7	36.40	0.263	280.	307.6
Methyl <i>t</i> -butyl ether	88.150	0.266	497.1	34.30	0.273	329.	328.4
Methanol	32.042	0.564	512.6	80.97	0.224	118.	337.9
Ethanol	46.069	0.645	513.9	61.48	0.240	167.	351.4
1-Propanol	60.096	0.622	536.8	51.75	0.254	219.	370.4
1-Butanol	74.123	0.594	563.1	44.23	0.260	275.	390.8
1-Hexanol	102.177	0.579	611.4	35.10	0.263	381.	430.6
2-Propanol	60.096	0.668	508.3	47.62	0.248	220.	355.4
Phenol	94.113	0.444	694.3	61.30	0.243	229.	455.0

Table B.1 (Continued)

	Molar mass	ω	T_c/K	P_c/bar	Z_c	V_c $\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$	T_n/K
Ethylene glycol	62.068	0.487	719.7	77.00	0.246	191.0	470.5
Acetic acid	60.053	0.467	592.0	57.86	0.211	179.7	391.1
<i>n</i> -Butyric acid	88.106	0.681	615.7	40.64	0.232	291.7	436.4
Benzoic acid	122.123	0.603	751.0	44.70	0.246	344.	522.4
Acetonitrile	41.053	0.338	545.5	48.30	0.184	173.	354.8
Methylamine	31.057	0.281	430.1	74.60	0.321	154.	266.8
Ethylamine	45.084	0.285	456.2	56.20	0.307	207.	289.7
Nitromethane	61.040	0.348	588.2	63.10	0.223	173.	374.4
Carbon tetrachloride	153.822	0.193	556.4	45.60	0.272	276.	349.8
Chloroform	119.377	0.222	536.4	54.72	0.293	239.	334.3
Dichloromethane	84.932	0.199	510.0	60.80	0.265	185.	312.9
Methyl chloride	50.488	0.153	416.3	66.80	0.276	143.	249.1
Ethyl chloride	64.514	0.190	460.4	52.70	0.275	200.	285.4
Chlorobenzene	112.558	0.250	632.4	45.20	0.265	308.	404.9
Tetrafluoroethane	102.030	0.327	374.2	40.60	0.258	198.0	247.1
Argon	39.948	0.000	150.9	48.98	0.291	74.6	87.3
Krypton	83.800	0.000	209.4	55.02	0.288	91.2	119.8
Xenon	131.30	0.000	289.7	58.40	0.286	118.0	165.0
Helium 4	4.003	−0.390	5.2	2.28	0.302	57.3	4.2
Hydrogen	2.016	−0.216	33.19	13.13	0.305	64.1	20.4
Oxygen	31.999	0.022	154.6	50.43	0.288	73.4	90.2
Nitrogen	28.014	0.038	126.2	34.00	0.289	89.2	77.3
Air [†]	28.851	0.035	132.2	37.45	0.289	84.8	
Chlorine	70.905	0.069	417.2	77.10	0.265	124.	239.1
Carbon monoxide	28.010	0.048	132.9	34.99	0.299	93.4	81.7
Carbon dioxide	44.010	0.224	304.2	73.83	0.274	94.0	
Carbon disulfide	76.143	0.111	552.0	79.00	0.275	160.	319.4
Hydrogen sulfide	34.082	0.094	373.5	89.63	0.284	98.5	212.8
Sulfur dioxide	64.065	0.245	430.8	78.84	0.269	122.	263.1
Sulfur trioxide	80.064	0.424	490.9	82.10	0.255	127.	317.9
Nitric oxide (NO)	30.006	0.583	180.2	64.80	0.251	58.0	121.4
Nitrous oxide (N ₂ O)	44.013	0.141	309.6	72.45	0.274	97.4	184.7
Hydrogen chloride	36.461	0.132	324.7	83.10	0.249	81.	188.2
Hydrogen cyanide	27.026	0.410	456.7	53.90	0.197	139.	298.9
Water	18.015	0.345	647.1	220.55	0.229	55.9	373.2
Ammonia	17.031	0.253	405.7	112.80	0.242	72.5	239.7
Nitric acid	63.013	0.714	520.0	68.90	0.231	145.	356.2
Sulfuric acid	98.080	...	924.0	64.00	0.147	177.	610.0

[†] Pseudoparameters for $y_{\text{N}_2} = 0.79$ and $y_{\text{O}_2} = 0.21$. See Eqs. (6.78)–(6.80).

Table B.2: Constants for the Antoine Equation for Vapor Pressures of Pure Species

$$\ln P^{\text{sat}}/\text{kPa} = A - \frac{B}{t/^{\circ}\text{C} + C}$$

Latent heat of vaporization at the normal boiling point (ΔH_n), and normal boiling point (t_n)

Name	Formula	Parameters for Antoine Eqn.			Temp. Range °C	ΔH_n kJ/mol	$t_n/^{\circ}\text{C}$
		A [†]	B	C			
Acetone	C ₃ H ₆ O	14.3145	2756.22	228.060	−26—77	29.10	56.2
Acetic acid	C ₂ H ₄ O ₂	15.0717	3580.80	224.650	24—142	23.70	117.9
Acetonitrile*	C ₂ H ₃ N	14.8950	3413.10	250.523	−27—81	30.19	81.6
Benzene	C ₆ H ₆	13.7819	2726.81	217.572	6—104	30.72	80.0
<i>iso</i> -Butane	C ₄ H ₁₀	13.8254	2181.79	248.870	−83—7	21.30	−11.9
<i>n</i> -Butane	C ₄ H ₁₀	13.6608	2154.70	238.789	−73—19	22.44	−0.5
1-Butanol	C ₄ H ₁₀ O	15.3144	3212.43	182.739	37—138	43.29	117.6
2-Butanol*	C ₄ H ₁₀ O	15.1989	3026.03	186.500	25—120	40.75	99.5
<i>iso</i> -Butanol	C ₄ H ₁₀ O	14.6047	2740.95	166.670	30—128	41.82	107.8
<i>tert</i> -Butanol	C ₄ H ₁₀ O	14.8445	2658.29	177.650	10—101	39.07	82.3
Carbon tetrachloride	CCl ₄	14.0572	2914.23	232.148	−14—101	29.82	76.6
Chlorobenzene	C ₆ H ₅ Cl	13.8635	3174.78	211.700	29—159	35.19	131.7
1-Chlorobutane	C ₄ H ₉ Cl	13.7965	2723.73	218.265	−17—79	30.39	78.5
Chloroform	CHCl ₃	13.7324	2548.74	218.552	−23—84	29.24	61.1
Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	13.6568	2723.44	220.618	9—105	29.97	80.7
Cyclopentane	C ₅ H ₁₀	13.9727	2653.90	234.510	−35—71	27.30	49.2
<i>n</i> -Decane	C ₁₀ H ₂₂	13.9748	3442.76	193.858	65—203	38.75	174.1
Dichloromethane	CH ₂ Cl ₂	13.9891	2463.93	223.240	−38—60	28.06	39.7
Diethyl ether	C ₄ H ₁₀ O	14.0735	2511.29	231.200	−43—55	26.52	34.4
1,4-Dioxane	C ₄ H ₈ O ₂	15.0967	3579.78	240.337	20—105	34.16	101.3
<i>n</i> -Eicosane	C ₂₀ H ₄₂	14.4575	4680.46	132.100	208—379	57.49	343.6
Ethanol	C ₂ H ₆ O	16.8958	3795.17	230.918	3—96	38.56	78.2
Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	13.9726	3259.93	212.300	33—163	35.57	136.2
Ethylene glycol*	C ₂ H ₆ O ₂	15.7567	4187.46	178.650	100—222	50.73	197.3
<i>n</i> -Heptane	C ₇ H ₁₆	13.8622	2910.26	216.432	4—123	31.77	98.4
<i>n</i> -Hexane	C ₆ H ₁₄	13.8193	2696.04	224.317	−19—92	28.85	68.7
Methanol	CH ₄ O	16.5785	3638.27	239.500	−11—83	35.21	64.7
Methyl acetate	C ₃ H ₆ O ₂	14.2456	2662.78	219.690	−23—78	30.32	56.9
Methyl ethyl ketone	C ₄ H ₈ O	14.1334	2838.24	218.690	−8—103	31.30	79.6
Nitromethane*	CH ₃ NO ₂	14.7513	3331.70	227.600	56—146	33.99	101.2
<i>n</i> -Nonane	C ₉ H ₂₀	13.9854	3311.19	202.694	46—178	36.91	150.8
<i>iso</i> -Octane	C ₈ H ₁₈	13.6703	2896.31	220.767	2—125	30.79	99.2
<i>n</i> -Octane	C ₈ H ₁₈	13.9346	3123.13	209.635	26—152	34.41	125.6
<i>n</i> -Pentane	C ₅ H ₁₂	13.7667	2451.88	232.014	−45—58	25.79	36.0
Phenol	C ₆ H ₆ O	14.4387	3507.80	175.400	80—208	46.18	181.8
1-Propanol	C ₃ H ₈ O	16.1154	3483.67	205.807	20—116	41.44	97.2
2-Propanol	C ₃ H ₈ O	16.6796	3640.20	219.610	8—100	39.85	82.2

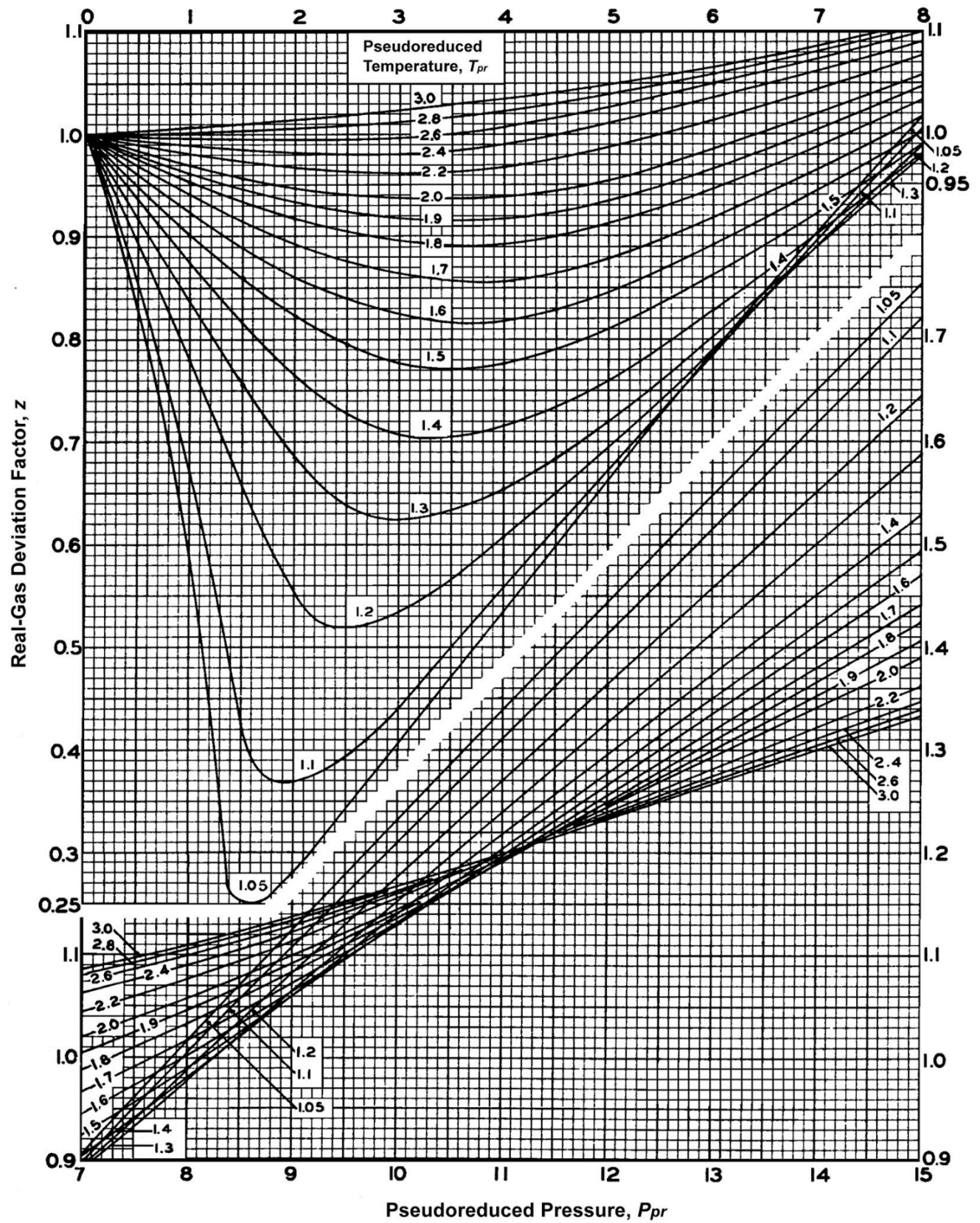
Table B.2 (Continued)

Name	Formula	Parameters for Antoine Eqn.			Temp. Range °C	ΔH_n kJ/mol	t_n /°C
		A [†]	B	C			
Toluene	C ₇ H ₈	13.9320	3056.96	217.625	13—136	33.18	110.6
Water	H ₂ O	16.3872	3885.70	230.170	0—200	40.66	100.0
<i>o</i> -Xylene	C ₈ H ₁₀	14.0415	3358.79	212.041	40—172	36.24	144.4
<i>m</i> -Xylene	C ₈ H ₁₀	14.1387	3381.81	216.120	35—166	35.66	139.1
<i>p</i> -Xylene	C ₈ H ₁₀	14.0579	3331.45	214.627	35—166	35.67	138.3

Based primarily on data presented by B. E. Poling, J. M. Prausnitz, and J. P. O'Connell, *The Properties of Gases and Liquids*, 5th ed., App. A, McGraw-Hill, New York, 2001.

*Antoine parameters adapted from J. Gmehling, U. Onken, and W. Arlt, *Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection* Chemistry Data Series, vol. I, parts 1–8, DECHEMA, Frankfurt/Main, 1974–1990.

[†]Antoine parameters *A* are adjusted to reproduce the listed values of t_n .



D. Daftar Pustaka

- J.M Smith, Henrick C Van Ness & Michael Abbott. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 6th edition. New York: McGraw-Hill publisher.
- Ahmad Abu Hamid. (2007). Modul Kalor dan Termodinamika. Fakultas Matematika dan IPA. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Hadiyanto. (2014). Dasar Termodinamika. Jurusan Teknik Kimia. Universitas Diponegoro.
- Paul Suparno. (2018). Pendalaman Materi Fisika: Teori Kinetik Gas dan Termodinamika. KemenristekDIKTI.
- I Gusti Agung Putra Adnyana. (2014). Termodinamika. Fakultas Mipa. Universitas Udayana.

PERTEMUAN 4

KAPASITAS KALOR PADA GAS IDEAL

A. Capaian Pembelajaran

Menguasai konsep kalor, kalor jenis, kalor laten dan kapasitas kalor pada gas ideal. Mengetahui hubungan antara kalor yang keluar dan masuk ke dalam sistem. Mampu melakukan perhitungan kapasitas kalor dan proses termodinamika untuk gas ideal.

B. Uraian Materi

1. Kalor

Apa yang dimaksud dengan kalor? Kalor dapat didefinisikan sebagai perpindahan energi dalam suatu sistem termodinamika. Kalor mengalir dari satu sistem ke sistem lainnya bergantung pada perbedaan temperature. Kalor merupakan salah satu bagian penting yang tidak bisa lepas dari sistem termodinamika dan sangat mempengaruhi perubahan keadaan sistem.

Pada sistem termodinamika, hubungan antara kalor yang masuk dan keluar sistem dirumuskan sebagai berikut:

$$dQ = C \cdot dT$$

Simbol C pada rumus tersebut adalah kapasitas panas dari sistem tersebut.

Dalam suatu proses, kita tidak bisa mengetahui dan menghitung perpindahan kalor saat proses berlangsung. Namun karena laju aliran Q merupakan fungsi waktu sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Q = \int_{T_2}^{T_1} C \cdot dT$$

2. Kalor Laten

Kalor laten berperan untuk menurunkan dan menaikkan suhu gas tanpa mengubah bentuk zat tersebut. Kalor laten dapat dirumuskan sebagai:

$$H = m \cdot c$$

Perubahan suhu pada suatu bahan dipengaruhi oleh aliran kalor antara lingkungan dan bahan. Ada kondisi dimana aliran kalor tersebut tidak berpengaruh pada kenaikan suhu melainkan mengubah fase zat tersebut. Hal ini dapat dilihat ketika proses mencair, mendidih dan mengembun. Kalor yang dilepaskan dan diserap untuk merubah wujud zat dapat dirumuskan sebagai:

$$Q = m \cdot L$$

Simbol L pada rumus diatas adalah kalor laten.

3. Kapasitas kalor Gas

Banyaknya kalor (Q) yang dibutuhkan untuk menaikkan temperature (1° Kelvin) dikenal dengan istilah kapasitas kalor. Kapasitas kalor dinotasikan dengan C. Secara matematis, kapasitas kalor gas dapat dirumuskan sebagai

$$C = Q / \Delta T \quad \text{atau} \quad Q = C \cdot \Delta T$$

Dimana: C = kapasitas kalor

Q = kalor

T = kenaikan temperature

Kapasitas kalor yang diberikan pada gas untuk meningkatkan temperature sistemnya dapat terjadi pada proses isobarik atau proses isokhorik sehingga terdapat dua jenis kapasitas kalor:

- Kapasitas kalor pada tekanan tetap
- Kapasitas kalor pada volume tetap

Penjelasannya sebagai berikut :

a. Kapasitas kalor pada tekanan tetap (C_p)

Notasi C_p dapat diartikan sebagai jumlah kalor yang diperlukan untuk meningkatkan temperature suatu zat pada proses isobaric. Dalam perhitungan C_p , tekanan sistem dijaga selalu konstan. Karena yang bernilai 0 (konstan) hanya tekanan, sehingga perhitungan dilakukan berdasarkan perubahan energy dalam, kalor dan kerja dari sistem tersebut.

Kapasitas kalor pada tekanan tetap dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}C_p &= Q / \Delta T = (5/2 P \cdot \Delta T) / \Delta T \\&= (5/2 n \cdot R \cdot \Delta V) / \Delta T \\C_p &= 5/2 n R\end{aligned}$$

b. Kapasitas kalor pada volume tetap (C_v)

Notasi C_v dapat diartikan sebagai jumlah kalor yang diperlukan untuk meningkatkan temperature suatu zat pada proses isokhorik. Dalam perhitungan C_v , volume sistem dijaga selalu konstan. Karena yang bernilai 0 (konstan) adalah volume, sistem tidak dapat memberikan kerja ke lingkungan begitu pula sebaliknya. Sehingga kalor yang ditambahkan ke sistem yang digunakan untuk meningkatkan energi pada sistem tersebut.

Kapasitas kalor pada volume tetap dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}C_v &= Q / \Delta T = (3/2 P \cdot \Delta T) / \Delta T \\&= (3/2 n \cdot R \cdot \Delta V) / \Delta T \\C_v &= 3/2 n R\end{aligned}$$

Dari persamaan kapasitas kalor pada tekanan tetap dan juga pada volume tetap diperoleh hubungan sebagai berikut

$$\begin{aligned}C_p - C_v &= 5/2 n R - 3/2 n R \\C_p - C_v &= n R\end{aligned}$$

Untuk gas monoatomic besarnya C_v dan C_p adalah

$$C_v = \frac{3}{2} nR$$

$$C_p = \frac{5}{2} nR$$

Untuk gas diatomic pada suhu rendah ($\pm 300K$) besarnya C_v dan C_p adalah

$$C_v = \frac{3}{2} nR$$

$$C_p = \frac{5}{2} nR$$

Untuk gas diatomic pada suhu rendah ($\pm 500K$) besarnya C_v dan C_p adalah

$$C_v = \frac{5}{2} nR$$

$$C_p = \frac{7}{2} nR$$

Untuk gas diatomic pada suhu rendah ($\pm 1000K$) besarnya C_v dan C_p adalah

$$C_v = \frac{7}{2} nR$$

$$C_p = \frac{9}{2} nR$$

C. Latihan Soal

1. 5 gram sebuah zat dengan kalor jenis 0.5 kal/gr.C diberi kalor 1500 kal. Dengan kalor lebur es 50 kal/gram . Hitung temperature akhir air;
2. Berapa kalor yang diperlukan untuk memanaskan air 400 cm^3 dari suhu 30°C menjadi 50°C ?
3. Berapakah $c_p \text{ N}_2$ jika berat molekul nitrogen adalah 28 kg/kmol ?
4. 0.5 mol gas nitrogen dinaikkan suhunya dari 20°C menjadi 64°C pada tekanan tetap. Jika konstanta $R = 8.314 \text{ J/mol K}$, tentukan:
 - a. perubahan energy dalam sistem tersebut
 - b. kapasitas kalor pada tekanan tetap
 - c. nilai C_v

Table C.1: Heat Capacities of Gases in the Ideal-Gas State[†]

Constants in equation $C_p^{ig}/R = A + BT + CT^2 + DT^{-2}$ for T (K) from 298 K to $T_{\max}$

Chemical species		$T_{\max}$	C_p^{ig}/R	A	$10^3 B$	$10^6 C$	$10^{-5} D$
Alkanes:							
Methane	CH ₄	1500	4.217	1.702	9.081	-2.164	.....
Ethane	C ₂ H ₆	1500	6.369	1.131	19.225	-5.561	.....
Propane	C ₃ H ₈	1500	9.011	1.213	28.785	-8.824	.....
<i>n</i> -Butane	C ₄ H ₁₀	1500	11.928	1.935	36.915	-11.402	.....
<i>iso</i> -Butane	C ₄ H ₁₀	1500	11.901	1.677	37.853	-11.945	.....
<i>n</i> -Pentane	C ₅ H ₁₂	1500	14.731	2.464	45.351	-14.111	.....
<i>n</i> -Hexane	C ₆ H ₁₄	1500	17.550	3.025	53.722	-16.791	.....
<i>n</i> -Heptane	C ₇ H ₁₆	1500	20.361	3.570	62.127	-19.486	.....
<i>n</i> -Octane	C ₈ H ₁₈	1500	23.174	4.108	70.567	-22.208	.....
1-Alkenes:							
Ethylene	C ₂ H ₄	1500	5.325	1.424	14.394	-4.392	.....
Propylene	C ₃ H ₆	1500	7.792	1.637	22.706	-6.915	.....
1-Butene	C ₄ H ₈	1500	10.520	1.967	31.630	-9.873	.....
1-Pentene	C ₅ H ₁₀	1500	13.437	2.691	39.753	-12.447	.....
1-Hexene	C ₆ H ₁₂	1500	16.240	3.220	48.189	-15.157	.....
1-Heptene	C ₇ H ₁₄	1500	19.053	3.768	56.588	-17.847	.....
1-Octene	C ₈ H ₁₆	1500	21.868	4.324	64.960	-20.521	.....
Miscellaneous organics:							
Acetaldehyde	C ₂ H ₄ O	1000	6.506	1.693	17.978	-6.158	.....
Acetylene	C ₂ H ₂	1500	5.253	6.132	1.952	.....	-1.299
Benzene	C ₆ H ₆	1500	10.259	-0.206	39.064	-13.301	.....
1,3-Butadiene	C ₄ H ₆	1500	10.720	2.734	26.786	-8.882	.....
Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	1500	13.121	-3.876	63.249	-20.928	.....
Ethanol	C ₂ H ₆ O	1500	8.948	3.518	20.001	-6.002	.....
Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	1500	15.993	1.124	55.380	-18.476	.....
Ethylene oxide	C ₂ H ₄ O	1000	5.784	-0.385	23.463	-9.296	.....
Formaldehyde	CH ₂ O	1500	4.191	2.264	7.022	-1.877	.....
Methanol	CH ₄ O	1500	5.547	2.211	12.216	-3.450	.....
Styrene	C ₈ H ₈	1500	15.534	2.050	50.192	-16.662	.....
Toluene	C ₇ H ₈	1500	12.922	0.290	47.052	-15.716	.....
Miscellaneous inorganics:							
Air		2000	3.509	3.355	0.575	.....	-0.016
Ammonia	NH ₃	1800	4.269	3.578	3.020	.....	-0.186
Bromine	Br ₂	3000	4.337	4.493	0.056	.....	-0.154
Carbon monoxide	CO	2500	3.507	3.376	0.557	.....	-0.031
Carbon dioxide	CO ₂	2000	4.467	5.457	1.045	.....	-1.157
Carbon disulfide	CS ₂	1800	5.532	6.311	0.805	.....	-0.906
Chlorine	Cl ₂	3000	4.082	4.442	0.089	.....	-0.344
Hydrogen	H ₂	3000	3.468	3.249	0.422	.....	0.083
Hydrogen sulfide	H ₂ S	2300	4.114	3.931	1.490	.....	-0.232
Hydrogen chloride	HCl	2000	3.512	3.156	0.623	.....	0.151
Hydrogen cyanide	HCN	2500	4.326	4.736	1.359	.....	-0.725
Nitrogen	N ₂	2000	3.502	3.280	0.593	.....	0.040
Nitrous oxide	N ₂ O	2000	4.646	5.328	1.214	.....	-0.928
Nitric oxide	NO	2000	3.590	3.387	0.629	.....	0.014
Nitrogen dioxide	NO ₂	2000	4.447	4.982	1.195	.....	-0.792
Dinitrogen tetroxide	N ₂ O ₄	2000	9.198	11.660	2.257	.....	-2.787
Oxygen	O ₂	2000	3.535	3.639	0.506	.....	-0.227
Sulfur dioxide	SO ₂	2000	4.796	5.699	0.801	.....	-1.015
Sulfur trioxide	SO ₃	2000	6.094	8.060	1.056	.....	-2.028
Water	H ₂ O	2000	4.038	3.470	1.450	.....	0.121

[†]Selected from H. M. Spencer, *Ind. Eng. Chem.*, vol. 40, pp. 2152–2154, 1948; K. K. Kelley, *U.S. Bur. Mines Bull.* 584, 1960; L. B. Pankratz, *U.S. Bur. Mines Bull.* 672, 1982.

Table C.2: Heat Capacities of Solids[†]Constants for the equation $C_p/R = A + BT + DT^{-2}$ for T (K) from 298 K to $T_{\max}$

Chemical species	$T_{\max}$	$C_{P_{298}}^{ig}/R$	A	$10^3 B$	$10^{-5} D$
CaO	2000	5.058	6.104	0.443	-1.047
CaCO ₃	1200	9.848	12.572	2.637	-3.120
Ca(OH) ₂	700	11.217	9.597	5.435	.....
CaC ₂	720	7.508	8.254	1.429	-1.042
CaCl ₂	1055	8.762	8.646	1.530	-0.302
C (graphite)	2000	1.026	1.771	0.771	-0.867
Cu	1357	2.959	2.677	0.815	0.035
CuO	1400	5.087	5.780	0.973	-0.874
Fe(α)	1043	3.005	-0.111	6.111	1.150
Fe ₂ O ₃	960	12.480	11.812	9.697	-1.976
Fe ₃ O ₄	850	18.138	9.594	27.112	0.409
FeS	411	6.573	2.612	13.286	.....
I ₂	386.8	6.929	6.481	1.502	.....
LiCl	800	5.778	5.257	2.476	-0.193
NH ₄ Cl	458	10.741	5.939	16.105	.....
Na	371	3.386	1.988	4.688	.....
NaCl	1073	6.111	5.526	1.963	.....
NaOH	566	7.177	0.121	16.316	1.948
NaHCO ₃	400	10.539	5.128	18.148	.....
S (rhombic)	368.3	3.748	4.114	-1.728	-0.783
SiO ₂ (quartz)	847	5.345	4.871	5.365	-1.001

[†]Selected from K. K. Kelley, *U.S. Bur. Mines Bull.* 584, 1960; L. B. Pankratz, *U.S. Bur. Mines Bull.* 672, 1982.**Table C.3: Heat Capacities of Liquids[†]**Constants for the equation $C_p/R = A + BT + CT^2$ for T from 273.15 to 373.15 K

Chemical species	$C_{P_{298}}^{ig}/R$	A	$10^3 B$	$10^6 C$
Ammonia	9.718	22.626	-100.75	192.71
Aniline	23.070	15.819	29.03	-15.80
Benzene	16.157	-0.747	67.96	-37.78
1,3-Butadiene	14.779	22.711	-87.96	205.79
Carbon tetrachloride	15.751	21.155	-48.28	101.14
Chlorobenzene	18.240	11.278	32.86	-31.90
Chloroform	13.806	19.215	-42.89	83.01
Cyclohexane	18.737	-9.048	141.38	-161.62
Ethanol	13.444	33.866	-172.60	349.17
Ethylene oxide	10.590	21.039	-86.41	172.28
Methanol	9.798	13.431	-51.28	131.13
<i>n</i> -Propanol	16.921	41.653	-210.32	427.20
Sulfur trioxide	30.408	-2.930	137.08	-84.73
Toluene	18.611	15.133	6.79	16.35
Water	9.069	8.712	1.25	-0.18

[†]Based on correlations presented by J. W. Miller, Jr., G. R. Schorr, and C. L. Yaws, *Chem. Eng.*, vol. 83(23), p. 129, 1976.

**Table C.4: Standard Enthalpies and Gibbs Energies of Formation
at 298.15 K[†]**

Joules per mole of the substance formed

Chemical species		State (Note 2)	$\Delta H_{f,298}^\circ$ (Note 1)	$\Delta G_{f,298}^\circ$ (Note 1)
Alkanes:				
Methane	CH ₄	(g)	−74,520	−50,460
Ethane	C ₂ H ₆	(g)	−83,820	−31,855
Propane	C ₃ H ₈	(g)	−104,680	−24,290
n-Butane	C ₄ H ₁₀	(g)	−125,790	−16,570
n-Pentane	C ₅ H ₁₂	(g)	−146,760	−8,650
n-Hexane	C ₆ H ₁₄	(g)	−166,920	150
n-Heptane	C ₇ H ₁₆	(g)	−187,780	8,260
n-Octane	C ₈ H ₁₈	(g)	−208,750	16,260
1-Alkenes:				
Ethylene	C ₂ H ₄	(g)	52,510	68,460
Propylene	C ₃ H ₆	(g)	19,710	62,205
1-Butene	C ₄ H ₈	(g)	−540	70,340
1-Pentene	C ₅ H ₁₀	(g)	−21,280	78,410
1-Hexene	C ₆ H ₁₂	(g)	−41,950	86,830
1-Heptene	C ₇ H ₁₄	(g)	−62,760	
Miscellaneous organics:				
Acetaldehyde	C ₂ H ₄ O	(g)	−166,190	−128,860
Acetic acid	C ₂ H ₄ O ₂	(l)	−484,500	−389,900
Acetylene	C ₂ H ₂	(g)	227,480	209,970
Benzene	C ₆ H ₆	(g)	82,930	129,665
Benzene	C ₆ H ₆	(l)	49,080	124,520
1,3-Butadiene	C ₄ H ₆	(g)	109,240	149,795
Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	(g)	−123,140	31,920
Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	(l)	−156,230	26,850
1,2-Ethanediol	C ₂ H ₆ O ₂	(l)	−454,800	−323,080
Ethanol	C ₂ H ₆ O	(g)	−235,100	−168,490
Ethanol	C ₂ H ₆ O	(l)	−277,690	−174,780
Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	(g)	29,920	130,890
Ethylene oxide	C ₂ H ₄ O	(g)	−52,630	−13,010
Formaldehyde	CH ₂ O	(g)	−108,570	−102,530
Methanol	CH ₄ O	(g)	−200,660	−161,960
Methanol	CH ₄ O	(l)	−238,660	−166,270
Methylcyclohexane	C ₇ H ₁₄	(g)	−154,770	27,480
Methylcyclohexane	C ₇ H ₁₄	(l)	−190,160	20,560
Styrene	C ₈ H ₈	(g)	147,360	213,900
Toluene	C ₇ H ₈	(g)	50,170	122,050
Toluene	C ₇ H ₈	(l)	12,180	113,630

Table C.4 (Continued)

Chemical species		State (Note 2)	ΔH_{f298}° (Note 1)	ΔG_{f298}° (Note 1)
Miscellaneous inorganics:				
Ammonia	NH ₃	(g)	-46,110	-16,400
Ammonia	NH ₃	(aq)		-26,500
Calcium carbide	CaC ₂	(s)	-59,800	-64,900
Calcium carbonate	CaCO ₃	(s)	-1,206,920	-1,128,790
Calcium chloride	CaCl ₂	(s)	-795,800	-748,100
Calcium chloride	CaCl ₂	(aq)		-8,101,900
Calcium chloride	CaCl ₂ ·6H ₂ O	(s)	-2,607,900	
Calcium hydroxide	Ca(OH) ₂	(s)	-986,090	-898,490
Calcium hydroxide	Ca(OH) ₂	(aq)		-868,070
Calcium oxide	CaO	(s)	-635,090	-604,030
Carbon dioxide	CO ₂	(g)	-393,509	-394,359
Carbon monoxide	CO	(g)	-110,525	-137,169
Hydrochloric acid	HCl	(g)	-92,307	-95,299
Hydrogen cyanide	HCN	(g)	135,100	124,700
Hydrogen sulfide	H ₂ S	(g)	-20,630	-33,560
Iron oxide	FeO	(s)	-272,000	
Iron oxide (hematite)	Fe ₂ O ₃	(s)	-824,200	-742,200
Iron oxide (magnetite)	Fe ₃ O ₄	(s)	-1,118,400	-1,015,400
Iron sulfide (pyrite)	FeS ₂	(s)	-178,200	-166,900
Lithium chloride	LiCl	(s)	-408,610	
Lithium chloride	LiCl·H ₂ O	(s)	-712,580	
Lithium chloride	LiCl·2H ₂ O	(s)	-1,012,650	
Lithium chloride	LiCl·3H ₂ O	(s)	-1,311,300	
Nitric acid	HNO ₃	(l)	-174,100	-80,710
Nitric acid	HNO ₃	(aq)		-111,250
Nitrogen oxides	NO	(g)	90,250	86,550
	NO ₂	(g)	33,180	51,310
	N ₂ O	(g)	82,050	104,200
	N ₂ O ₄	(g)	9,160	97,540
Sodium carbonate	Na ₂ CO ₃	(s)	-1,130,680	-1,044,440
Sodium carbonate	Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	(s)	-4,081,320	
Sodium chloride	NaCl	(s)	-411,153	-384,138
Sodium chloride	NaCl	(aq)		-393,133
Sodium hydroxide	NaOH	(s)	-425,609	-379,494
Sodium hydroxide	NaOH	(aq)		-419,150
Sulfur dioxide	SO ₂	(g)	-296,830	-300,194
Sulfur trioxide	SO ₃	(g)	-395,720	-371,060
Sulfur trioxide	SO ₃	(l)	-441,040	
Sulfuric acid	H ₂ SO ₄	(l)	-813,989	-690,003
Sulfuric acid	H ₂ SO ₄	(aq)		-744,530
Water	H ₂ O	(g)	-241,818	-228,572
Water	H ₂ O	(l)	-285,830	-237,129

[†]From *TRC Thermodynamic Tables—Hydrocarbons*, Thermodynamics Research Center, Texas A & M Univ. System, College Station, TX; "The NBS Tables of Chemical Thermodynamic Properties," *J. Phys. and Chem. Reference Data*, vol. 11, supp. 2, 1982.

Notes

1. The standard property changes of formation ΔH_{f298}° and ΔG_{f298}° are the changes occurring when 1 mol of the listed compound is formed from its elements with each substance in its standard state at 298.15 K (25°C).
2. Standard states: (a) Gases (g): pure ideal gas at 1 bar and 25°C. (b) Liquids (l) and solids (s): pure substance at 1 bar and 25°C. (c) Solutes in aqueous solution (aq): Hypothetical ideal 1-molal solution of solute in water at 1 bar and 25°C.

Table C.5: Standard Enthalpies and Gibbs Energies of Formation at 298.15 K for Substances in Dilute Aqueous Solution at Zero Ionic Strength[†]

Joules per mole of the substance formed			
Chemical species		ΔH_{f298}°	ΔG_{f298}°
Acetaldehyde	C_2H_4O	-212.2	-139.0
Acetate	$C_2H_2O_2^-$	-486.0	-369.3
Acetic acid	$C_2H_3O_2$	-485.8	-396.5
Acetone	C_3H_6O	-221.7	-159.7
Adenosine	$C_{10}H_{13}N_5O_4$	-621.3	-194.5
Adenosine cation	$C_{10}H_{14}N_5O_4^+$	-637.7	-214.3
Adenosine 5' diphosphate (ADP)	$C_{10}H_{12}N_5O_{10}P_2^{3-}$	-2626.5	-1906.1
	$C_{10}H_{13}N_5O_{10}P_2^{2-}$	-2620.9	-1947.1
	$C_{10}H_{14}N_5O_{10}P_2^-$	-2638.5	-1972.0
Adenosine 5' monophosphate (AMP)	$C_{10}H_{12}N_5O_{10}P^{2-}$	-1635.4	-1040.5
	$C_{10}H_{13}N_5O_{10}P^-$	-1630.0	-1078.9
	$C_{10}H_{14}N_5O_7P$	-1648.1	-1101.6
Adenosine 5' triphosphate (ATP)	$C_{10}H_{12}N_5O_{13}P_3^{4-}$	-3619.2	-2768.1
	$C_{10}H_{13}N_5O_{13}P_3^{3-}$	-3612.9	-2811.5
	$C_{10}H_{14}N_5O_{13}P_3^{2-}$	-3627.9	-2838.2
Alanine	$C_3H_7NO_2$	-554.8	-371.0
Ammonia	NH_3	-80.3	-26.5
Ammonium	NH_4^+	-132.5	-79.3
D-arabinose	$C_5H_{10}O_5$	-1043.8	-742.2
L-asparagine	$C_4H_8N_2O_3$	-766.1	-525.9
L-aspartate	$C_4H_7NO_4$	-943.4	-695.9
Citrate	$C_6H_5O_7^{3-}$	-1515.1	-1162.7
	$C_6H_6O_7^{2-}$	-1518.5	-1199.2
	$C_6H_7O_7^-$	-1520.9	-1226.3
Carbon dioxide	CO_2	-413.8	-386.0
Carbonate	CO_3^{2-}	-677.1	-527.8
Bicarbonate	CHO_3^-	-692.0	-586.8
Carbonic acid	CH_2O_3	-694.9	-606.3

Table C.5 (Continued)

Chemical species		ΔH_{f298}°	ΔG_{f298}°
Carbon monoxide	CO	-121.0	-119.9
Ethanol	C ₂ H ₆ O	-288.3	-181.6
Ethyl acetate	C ₄ H ₈ O ₂	-482.0	-337.7
Formate	CHO ₂ ⁻	-425.6	-351.0
D-fructose	C ₆ H ₁₂ O ₆	-1259.4	-915.5
D-fructose 6-phosphate	C ₆ H ₁₁ O ₉ P ²⁻	-2267.7*	-1760.8
	C ₆ H ₁₂ O ₉ P ⁻	-2265.9*	-1796.6
D-fructose 1,6-biphosphate	C ₆ H ₁₁ O ₁₂ P ₂ ³⁻	-3320.1*	-2639.4
	C ₆ H ₁₂ O ₁₂ P ₂ ²⁻	-3318.3*	-2673.9
Fumarate	C ₄ H ₂ O ₄ ²⁻	-777.4	-601.9
	C ₄ H ₃ O ₄ ⁻	-774.5	-628.1
	C ₄ H ₄ O ₄	-774.9	-645.8
D-galactose	C ₆ H ₁₂ O ₆	-1255.2	-908.9
D-glucose	C ₆ H ₁₂ O ₆	-1262.2	-915.9
D-glucose 6-phosphate	C ₆ H ₁₁ O ₉ P ²⁻	-2276.4	-1763.9
	C ₆ H ₁₂ O ₉ P ⁻	-2274.6	-1800.6
L-glutamate	C ₅ H ₈ NO ₄ ⁻	-979.9	-697.5
L-glutamine	C ₅ H ₁₀ N ₂ O ₃	-805.0	-528.0
Glycerol	C ₃ H ₈ O ₃	-676.6	-497.5
Glycine	C ₂ H ₅ NO ₂	-523.0	-379.9
Glycylglycine	C ₄ H ₈ N ₂ O ₃	-734.3	-520.2
Hydrogen	H ₂	-4.2	17.6
Hydrogen peroxide	H ₂ O ₂	-191.2	-134.0
Hydrogen ion (Note 2)	H ⁺	0.0	0.0
Indole	C ₈ H ₇ N	97.5	223.8
Lactate	C ₃ H ₅ O ₃ ⁻	-686.6	-516.7
Lactose	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	-2233.1	-1567.3
L-leucine	C ₆ H ₁₃ NO ₂	-643.4	-352.3
Maltose	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	-2238.1	-1574.7
D-mannose	C ₆ H ₁₂ O ₆	-1258.7	-910.0
Methane	CH ₄	-89.0	-34.3
Methanol	CH ₄ O	-245.9	-175.3
Methylammonium	CH ₆ N ⁺	-124.9	-39.9
Nitrogen	N ₂	-10.5	18.7
Nicotinamide-adenine dinucleotide (ox)	NAD ⁺ (Note 2)	0.0	0.0
Nicotinamide-adenine dinucleotide (red)	NADH (Note 2)	-31.9	22.7
Nicotinamide-adenine dinucleotide phosphate (ox)	NADP ⁺ (Note 2)	0.0	-835.2

Table C.5 (Continued)

Chemical species		ΔH_{f298}°	ΔG_{f298}°
Nicotinamide-adenine dinucleotide phosphate (red)	NADPH (Note 2)	-29.2	-809.2
Oxygen	O ₂	-11.7	16.4
Oxalate	C ₂ O ₄ ²⁻	-825.1	-673.9
Hydrogen phosphate	HPO ₄ ²⁻	-1299.0	-1096.1
Dihydrogen phosphate	H ₂ PO ₄ ⁻	-1302.6	-1137.3
2-propanol	C ₃ H ₈ O	-330.8	-185.2
Pyrophosphate	P ₂ O ₇ ⁴⁻	-2293.5	-1919.9
	HP ₂ O ₇ ³⁻	-2294.9	-1973.9
	H ₂ P ₂ O ₇ ²⁻	-2295.4	-2012.2
	H ₃ P ₂ O ₇ ⁻	-2290.4	-2025.1
	H ₄ P ₂ O ₇	-2281.2	-2029.9
Pyruvate	C ₃ H ₃ O ₃ ⁻	-596.2	-472.3
D-ribose	C ₅ H ₁₀ O ₅	-1034.0	-738.8
D-ribose 5-phosphate	C ₅ H ₉ O ₈ P ²⁻	-2041.5	-1582.6
	C ₅ H ₁₀ O ₈ P ⁻	-2030.2	-1620.8
D-ribulose	C ₅ H ₁₀ O ₅	-1023.0	-735.9
L-sorbose	C ₆ H ₁₂ O ₆	-1263.3	-912.0
Succinate	C ₄ H ₄ O ₄ ²⁻	-908.7	-690.4
	C ₄ H ₅ O ₄ ⁻	-908.8	-722.6
	C ₄ H ₆ O ₄	-912.2	-746.6
Sucrose	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	-2199.9	-1564.7
L-tryptophan	C ₁₁ H ₁₂ N ₂ O ₂	-405.2	-114.7
Urea	CH ₄ N ₂ O	-317.7	-202.8
L-valine	C ₅ H ₁₁ NO ₂	-612.0	-358.7
D-xylose	C ₅ H ₁₀ O ₅	-1045.9	-750.5
D-xylulose	C ₅ H ₁₀ O ₅	-1029.7	-746.2

*Estimated using data from R. N. Goldberg, Y. B. Tewari, and T. N. Bhat, *Thermodynamics of Enzyme Catalyzed Reactions*, NIST Standard Reference Database 74, http://xpdn.nist.gov/enzyme_thermodynamics.

†From Robert A. Alberty, *Thermodynamics of Biochemical Reactions*, Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, USA, 2003. Table 3.2, pp. 52–55 and Table 8.2, p. 151.

Notes

1. The standard property changes of formation ΔH_{f298}° and ΔG_{f298}° are the changes occurring when 1 mol of the listed compound is formed from its elements with each substance in its standard state at 298.15 K (25°C), except as noted in Note 2.
2. Conventions used in this table are that $\Delta G_{f298}^{\circ} = \Delta H_{f298}^{\circ} = 0$ for H⁺ and for oxidized nicotinamide-adenine dinucleotide (NAD_{ox}⁺). For the latter, and other NAD species, no molecular formula is provided because their properties are computed relative to this convention rather than relative to the elements in their standard states.

D. Daftar Pustaka

- J.M Smith, Henrick C Van Ness & Michael Abbott. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 6th edition. New York: McGraw-Hill publisher.
- Ahmad Abu Hamid. (2007). Modul Kalor dan Termodinamika. Fakultas Matematika dan IPA. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Hadiyanto. (2014). Dasar Termodinamika. Jurusan Teknik Kimia. Universitas Diponegoro.
- Paul Suparno. (2018). Pendalaman Materi Fisika: Teori Kinetik Gas dan Termodinamika. KemenristekDIKTI.
- I Gusti Agung Putra Adnyana. (2014). Termodinamika. Fakultas Mipa. Universitas Udayana.

PERTEMUAN 5

HUKUM I THERMODINAMIKA SISTEM TERTUTUP

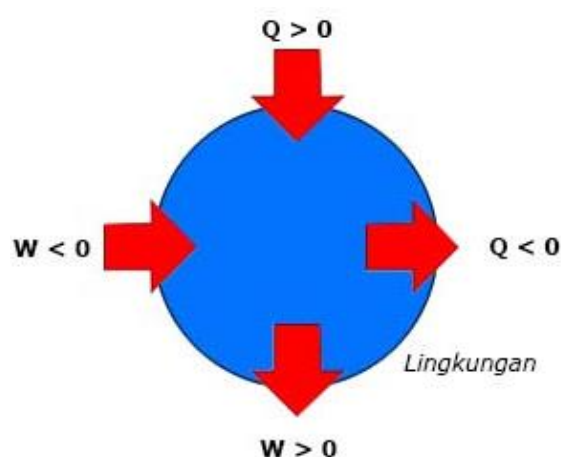
A. Capaian Pembelajaran

Menguasai teori aplikasi materi secara mendalam tentang definisi dan aplikasi hukum I termodinamika pada sistem tertutup. Mampu menyelesaikan perhitungan persoalan hukum I termodinamika pada sistem tertutup. Mampu memahami aplikasi energi dalam dan entalpi dalam hukum I termodinamika.

B. Uraian Materi

Mari kita mengulang sedikit tentang hukum I termodinamika. Hukum pertama termodinamika sebagai hukum kekekalan energi yang memiliki konsep bahwa energi secara konsep tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan. Namun, energi dapat diubah dari bentuk satu ke bentuk lainnya.

Contoh dari penerapan hukum I termodinamika adalah saat proses pemanasan suatu gas yang memiliki volume tetap, maka akan terjadi penambahan suhu gas. Penambahan temperatur gas mengakibatkan tubukan antar molekul dan dinding yang lebih intensif dan pergerakan molekul yang lebih rapid. Sebagai konsekuensinya, energi dan tekanan gas jadi meningkat.



Gambar 15. Hukum Pertama Termodinamika

Kalor (Q) memiliki peran penting untuk meningkatkan temperatur gas hingga tercapai temperatur yang diinginkan. Menurut rumus hukum 1 termodinamika,

Sistem akan menerima sejumlah kalor yang akan dikonversikan menjadi energi dalam dan usaha sistem tersebut seperti pada gambar berikut.



Gambar 16. Hukum I Termodinamika

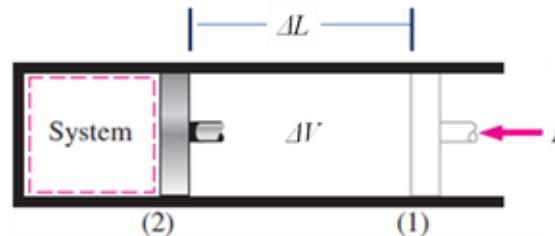
Keseluruhan energi molekul dalam suatu sistem dikenal dengan istilah energi dalam. Dari rumus diatas dapat terlihat untuk sistem tertutup, perubahan energi dalamnya adalah perbedaan antara panas yang diterima oleh sistem dengan usaha dari sistem tersebut. Jika kalor di transfer ke dalam sistem, maka sistem melakukan usaha, W positif (+). Sedangkan untuk hubungannya dengan energi dalam, energi tersebut akan berkurang jika sistem memberikan usaha ke lingkungan.

Agar diperoleh pemahaman yang lebih dalam tentang penerapan hukum termodinamika 1 dapat diambil contoh proses pemasakan popcorn. Pembuatan popcorn dimulai dengan memasukkan biji jagung ke dalam panci tertutup. Panci tersebut kemudian dipanasi dengan api kompor. Dengan adanya penambahan panas dari nyala api mengakibatkan biji popcorn meletup. Pada contoh ini, dapat dilihat sistem termodinamika diwakilkan oleh popcorn dengan panci sebagai pembatas antara sistem dan lingkungan udara luar. Sedangkan api pada kompor berperan menjadi lingkungan. Karena suhu di dalam sistem (biji popcorn) lebih rendah daripada suhu pada api kompor, menyebabkan kalor mengalir dari luar ke dalam menuju biji popcorn yang menyebabkan terjadinya pemuatan dan peletupan popcorn.

Proses peletupan dan pemuatan popcorn menandakan adanya perubahan pada sistem dari yang awalnya biji popcorn menjadi popcorn yang dapat dikonsumsi. Perubahan dalam sistem tersebut adalah contoh dari penerapan hukum I termodinamika sebagai dampak perpindahan energi antara sistem dan lingkungan.

1. Menghitung Kerja Sistem Tertutup

Pada gambar berikut, telah diilustrasikan proses pergerakan piston di dalam sebuah silinder. Gambar tersebut diharapkan dapat membantu agar dapat lebih mudah memahami cara menghitung kerja (W) dalam suatu sistem tertutup.



Gambar 17. Silinder piston

Hukum I termodinamika menyatakan bahwa faktor yang berpengaruh terhadap perubahan energi dalam ΔU pada sistem adalah kerja yang dilakukan sistem dan panas yang dilepas ke dari sistem ke lingkungan. Pada gambar diatas dapat dilihat saat terjadi pemampatan tekanan secara konstan ke piston mengakibatkan volume cairan berubah hingga mencapai tahapan dimana sistem diberikan panas yang mengakibatkan terjadinya proses ekspansi piston tersebut kembali ke keadaan awal.

Satu siklus proses tersebut merupakan contoh dari proses reversibel pada tekanan tetap dan volume tetap dan dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\text{Kerja (W)} = \text{Gaya (F)} \times \text{Jarak perpindahan (L)}$$

Dimana, $\text{Gaya (F)} = P \times A$, A merupakan luas penampang lintang piston yang bekerja pada cairan, sehingga kerja (W) dapat ditulis sebagai :

$$\text{Kerja } (\Delta W) = F \cdot A (\Delta L)$$

atau

$$(\Delta W) = F \cdot (\Delta V)$$

Untuk perubahan volume yang sangat kecil (dV), maka persamaan diatas dapat ditulis sebagai

$$dW = P \cdot dV$$

Integrasi persamaan tersebut akan menghasilkan :

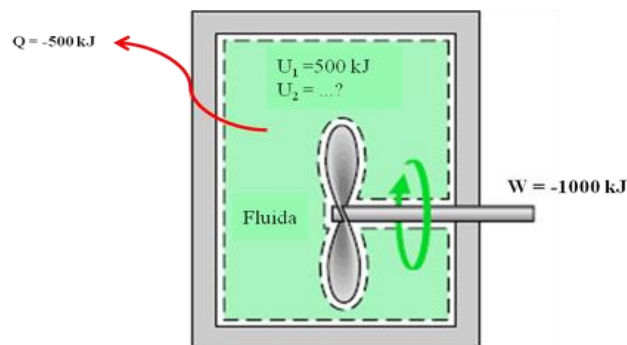
$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

Contoh soal 1

Penurunan temperatur akan dilakukan dengan proses pengadukan dalam sebuah tangki yang berisi air pada suhu 100C. Di awal proses, fluida tersebut memiliki energi sejumlah 800 kJ. Seiring berjalannya proses, fluida mengeluarkan kalor sebesar 500 kJ, dan kerja pengaduk ke fluida panas adalah 100 kJ. Berapa nilai perubahan energi dalam dalam proses tersebut?

Penyelesaian :

Gambar berikut merupakan ilustrasi dari persoalan di atas:



Analisis:

Dalam soal dapat dilihat tidak terjadi perpindahan massa dari sistem ke lingkungan maupun sebaliknya sehingga dapat disimpulkan bahwa proses terjadi pada sistem tertutup atau non flow system. Sistem dianggap konstan sehingga DE_p dan DE_k sama dengan nol, maka digunakan persamaan:

$$Q - W = \Delta U$$

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

Dengan memperhatikan tanda “ + “ dan “ – “ sistem, maka dapat dihitung:

$$-500 \text{ kJ} - (-100 \text{ kJ}) = U_2 - 800 \text{ kJ}$$

$$U_2 = 400 \text{ kJ}$$

Contoh soal 2

Dalam proses pemuatan suatu gas pada sistem tertutup, gas mengambil kalor dari lingkungan sebanyak 300 Joule. Dengan panas yang diterima, gas tersebut dapat melakukan usaha ke lingkungan sebanyak 200 J. Hitung kenaikan energi dalam gas.

Penyelesaian:

$$W = 200 \text{ J}$$

$$Q = 300 \text{ J}$$

Berapa U ?

Perubahan energi dalam dapat dicari dengan menggunakan hukum I termodinamika sebagai dasar perhitungan

$$Q = U + W$$

$$U = 300 \text{ J} - 200 \text{ J} = 100 \text{ J}$$

Dapat disimpulkan bahwa terdapat penambahan energi dalam gas sebanyak 100 Joule.

2. Perhitungan Entalpi dan Kapasitas Panas untuk Gas Ideal

Entalpi merupakan total dari energi yang diberikan sebuah sistem ke lingkungan. Dalam tinjauan matematis, entalpi dapat dirumuskan sebagai berikut

$$H = U + PV$$

keterangan : H = enthalpi

P = tekanan absolut

$V = \text{volume}$

dimana U , P dan V merupakan fungsi keadaan (*state functions*) sehingga jika persamaan tersebut diubah menjadi bentuk differensial dapat ditulis sebagai berikut :

$$dH = dU + d(PV)$$

Persamaan diatas ini digunakan apabila adanya suatu perubahan differensial pada suatu sistem. Integrasi persamaan tersebut akan menghasilkan :

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(PV)$$

Kapasitas panas merupakan besaran terukur untuk menunjukkan jumlah panas yang dibutuhkan untuk meningkatkan temperatur suatu zat pada suhu atau tekanan atau volume tertentu.

Kapasitas panas gas ideal pada **volume konstan** dapat dirumuskan:

$$C_V \equiv \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = \frac{dU}{dT} = C_V(T)$$

Kapasitas panas gas ideal pada **tekanan konstan** dapat dirumuskan:

$$C_P \equiv \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P = \frac{dH}{dT} = C_P(T)$$

Hubungan antar C_V dan C_P untuk gas ideal dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$C_P = \frac{dH}{dT} = \frac{d(U + RT)}{dT} = \frac{dU}{dT} + R$$

$$C_P = C_V + R$$

$$\begin{aligned} dU &= C_V dT & \longrightarrow & \Delta U = \int_{\text{awal}}^{\text{akhir}} C_V dT \\ dH &= C_P dT & \longrightarrow & \Delta H = \int_{\text{awal}}^{\text{akhir}} C_P dT \end{aligned}$$

Pada sistem tertutup, gas ideal akan mengalami proses reversibel. Relasi antara usaha dengan panas digambarkan dalam rumus matematis sebagai berikut:

$$\delta Q + \delta W = dU$$

Apabila ditambahkan dalam persamaan diatas menjadi

$$\delta Q + \delta W = C_V dT$$

Bisa disimpulkan dari rumus diatas, untuk sistem tertutup reversibel, kerja/usaha dapat dituliskan menjadi

$$\delta Q = C_V dT + P dV$$

Jika **P dieliminasi** dari persamaan diganti dengan $P = \frac{RT}{V}$ maka akan diperoleh:

$$\delta Q = C_V dT + RT \frac{dV}{V}$$

$$\delta W = - RT \frac{dV}{V}$$

Jika **V dieliminasi** dari persamaan diganti dengan $V = \frac{RT}{P}$ maka akan diperoleh

$$\begin{aligned} \delta Q &= C_V dT + P \left(\frac{R}{P} dT - \frac{RT}{P^2} dP \right) \\ &= C_V dT + R dT - \frac{RT}{P} dP = (C_V + R) dT - \frac{RT}{P} dP \end{aligned}$$

$$\delta Q = C_p dT - RT \frac{dP}{P}$$

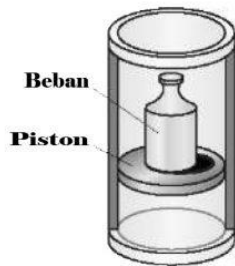
$$\delta W = -RdT - RT \frac{dP}{P}$$

Jika **T dieliminasi** dari persamaan diganti dengan $T = \frac{PV}{R}$ maka akan diperoleh

$$\begin{aligned}\delta Q &= C_v \left(\frac{V}{R} dP + \frac{P}{R} dV \right) + P dV \\ &= \frac{C_v V}{R} dP + \frac{C_v P}{R} dV + P dV = \frac{C_v V}{R} dP + \frac{P}{R} (C_v + R) dV \\ \delta Q &= \frac{C_v}{R} V dP + \frac{C_p}{R} P dV \\ \delta W &= -P dV\end{aligned}$$

C. Latihan Soal

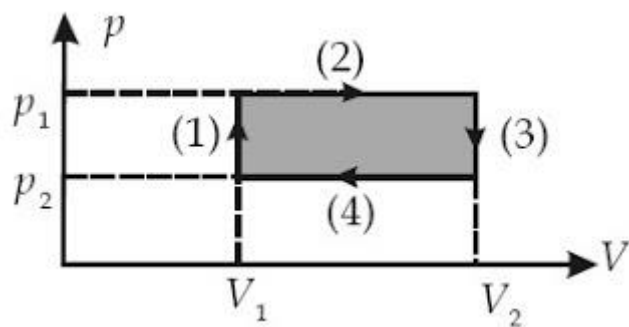
1. Pada proses pemuaian gas dalam sistem tertutup, gas tersebut menyerap menyerap panas sebanyak 150 Joule dan memberikan usaha ke lingkungan sebesar 300 Joule. Hitung perubahan energi dalam pada gas tersebut?
2. Perhatikan gambar di bawah ini.



Sebuah tabung memiliki volume 200 cm^3 . Dalam prosesnya, beban seberat 1 kg volume diberikan pada piston sehingga volume berubah menjadi 100 cm^3 . Pada piston terjadi pengurangan volume sebanyak 3 kalori dan piston tersebut berluas 5cm. Hitung ΔU

3. Sebanyak 1000 Joule panas diberikan pada sistem dan sistem tersebut memberikan usaha sebanyak 3000 Joule ke lingkungan. ΔU pada sistem adalah....
4. 3000 kalori usaha diberikan kepada suatu gas agar dapat menghasilkan usaha sebanyak 7000 J. Berapakah energi dalam pada gas? (1 kalori = 4,18 joule)
5. Dalam proses tekanan konstan, sebuah gas 0,01 mol memiliki suhu 10C. Seiring berjalannya proses suhu gas meningkat menjadi 70 C. Diketahui $R = 8.34 \text{ J/mol K}$. Berapa kalor yang dibutuhkan proses tersebut
6. Delapan mol gas ideal dipanaskan pada tekanan tetap sebesar $4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ sehingga volumenya berubah dari $0,06 \text{ m}^3$ menjadi $0,08 \text{ m}^3$. Jika gas mengalami perubahan energi dalam gas sebesar 1.500 J, berapakah kalor yang diterima gas tersebut.
7. Suatu sistem mengalami proses isobarik. Pada sistem dilakukan usaha sebesar 100 J. Jika perubahan energi dalam sistem ΔU dan kalor yang diserap sistem = 300 joule, berapakah besarnya ΔU ?

8. Pada tekanan konstan, terjadi pemuaian 10 mol gas ideal dari volume awalnya 0,05 m³ menjadi 0,3 m³. Jika gas mengalami perubahan energi dalam gas sebesar 1.500 J, berapakah kalor yang diterima gas tersebut?
9. Sebuah sistem diberikan kalor sebanyak 1500 Joule untuk melakukan kerja sebesar 500 Joule, berapakah perubahan energi dalam sistem?
10. Jika kalor sebanyak 4000 Joule meninggalkan sistem dan sistem melakukan kerja 8000 Joule, hitung nilai ΔU
11. Jika kalor sebanyak 500 Joule ditambahkan pada sistem dan kerja 100 Joule dilakukan pada sistem, berapa nilai ΔU
12. Siklus termodinamika pada gas ideal dapat diilustrasikan sebagai berikut



Tentukanlah usaha yang dilakukan gas:

- a. dari keadaan A ke B,
- b. dari B ke C,
- c. dari C ke D,
- d. dari D ke A, dan
- e. dari A kembali ke A melalui B, C, dan D

D. Daftar Pustaka

Academia. Tabel Termodinamika (diakses tanggal 5 Maret 2020) Tersedia pada https://www.academia.edu/38665807/TABEL_TERMODINAMIKA

Berlian Hasan. (2015). Termodinamika. Fakultas Teknik. Politeknik Negeri Ujung Pandang

I Gusti Agung Putra Adnyana. (2014). Termodinamika. Fakultas Mipa. Universitas Udayana.

- J.M Smith, Henrick C Van Ness & Michael Abbott. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 6th edition. New York: McGraw-Hill publisher.
- Pathur Ahli Hamzah. (2018). Termodinamika Teknik 1. Fakultas Teknik. Universitas Lambung Mangkurat.
- Rizki Pebriani. (2017). Termodinamika. Fakultas Teknik. Politeknik Negeri Sriwijaya
- Suprpto Broto Siswojo. (2007). Pengantar Fisika Statistik. Universitas Terbuka.
- Quipper. Termodinamika: Pengertian, Prinsip, Hukum dan keadaan (diakses tanggal 5 Maret 2020) Tersedia pada <https://www.quipper.com/id/blog/mapel/fisika/pengertian-termodinamika-lengkap/>
- Ruangguru. Prinsip dan hukum termodinamika (diakses tanggal 5 Maret 2020) Tersedia pada <https://blog.ruangguru.com/hukum-dan-prinsip-termodinamika>
- Wordpress. Tabel dan grafik termodinamika. (diakses tanggal 5 Maret 2020) Tersedia pada <https://nurulimantmunib.wordpress.com/tag/thermodinamika/>
- Seamolec. Termodinamika. (diakses tanggal 7 Maret 2020). Tersedia pada <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://sumberbelajar.seamolec.org/Media/Dokumen/5a583883865eacc372523abb/c0e181161c6210969033149ffce55788.pdf&ved=2ahUKEwiLmvqFy4voAhVJWX0KH WZECBM4ChAWMAJ6BAgCEAE&usq=AOvVaw0aHjEeXmTN8Yop-cf8B1GA>

PERTEMUAN 6

PROSES-PROSES TERMODINAMIKA

A. Tujuan Pembelajaran

Menguasai teori aplikasi materi secara mendalam tentang proses-proses termodinamika. Mampu mengidentifikasi aplikasi proses termodinamika dalam kehidupan sehari-hari. Mampu menyelesaikan perhitungan proses isobarik, isotermik, isokhorik dan adiabatik.

B. Uraian Materi

Proses termodinamika dikategorikan menjadi empat macam, tergantung dari kondisi operasi saat proses tersebut berlangsung. Proses termodinamika bergantung pada tekanan, volume dan suhu operasi. Keempat proses tersebut dapat diplotkan pada diagram P-V untuk mempermudah perhitungan. Untuk menghitung usaha pada proses termodinamika dapat dilakukan dengan menghitung luasan grafik tekanan-volume (grafik P-V).

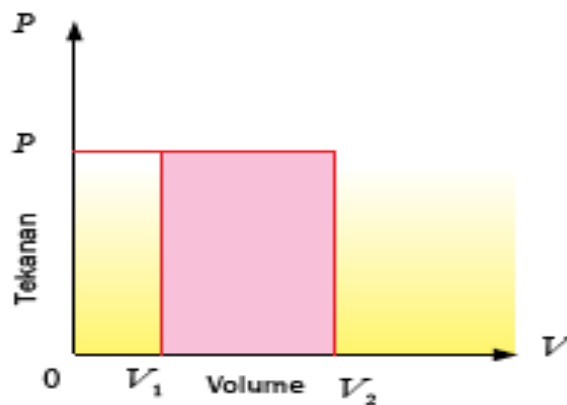
1. Proses Termodinamika

a. Proses Isobarik

Proses termodinamika yang berlangsung pada tekanan konstan ($\Delta P = 0$) disebut proses isobaric. Menurut hukum Charles, proses isobarik dapat dirumuskan melalui persamaan:

$$V/T = \text{Konstan}$$

$$V_1/T_1 = V_2/T_2$$



Gambar 18. Proses isobarik

Pada proses isobarik, tekanan dalam proses selalu konstan sedangkan volumenya sistemnya dapat berubah. Sehingga usaha yang dilakukan sistem dapat dirumuskan melalui persamaan:

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

Dari rumus diatas, dapat ditarik kesimpulan bahwa apabila terjadi penambahan volume akan menghasilkan usaha yang bernilai positif, namun sebaliknya jika volume berkurang, usaha yang dihasilkan akan bernilai negatif.

Untuk perhitungan kalornya, kalor dinyatakan dalam tekanan konstan Q_p . Berdasarkan hukum I termodinamika, pada proses isobarik berlaku:

$$Q_p = W + \Delta U$$

$$Q_v = \Delta U$$

$$W = Q_p - Q_v$$

Contoh soal:

Diketahui usaha dilakukan pada tekanan $3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ pada kondisi volume awal 1 m^3 hingga mencapai volume 5 m^3 . Tentukan usaha yang dilakukan pada proses tersebut.

Pembahasan:Diketahui :

$$\text{Tekanan (P)} = 3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$\text{Volume awal (V}_1\text{)} = 1 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume akhir (V}_2\text{)} = 5 \text{ m}^3$$

Ditanya :

Usaha yang dilakukan pada proses AB

Jawab :

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

$$W = (3 \times 10^5)(5 - 1) = (5 \times 10^5) (4)$$

$$W = 20 \times 10^5 = 2 \times 10^6 \text{ Joule}$$

b. Proses Isotermik

Proses termodinamika yang berlangsung pada suhu konstan ($\Delta T = 0$) disebut proses isotermik.

Pada proses ini, tidak ada perubahan energi dalam karena berlangsung pada suhu konstan. Menggunakan prinsip hukum I termodinamika, maka dapat dinyatakan bahwa kalor yang diberikan oleh sistem sama dengan usaha yang dilakukan sistem ($Q=W$).

Proses ini mengikuti hukum Boyle:

$$PV = \text{konstan}$$

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

Tekanan dalam volume sistem berubah dalam proses isotermik sehingga persamaan $W = p \cdot \Delta V$ (1) harus dimodifikasi dengan menggunakan cara integral seperti tertulis pada persamaan berikut.

$$W = \int dW = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

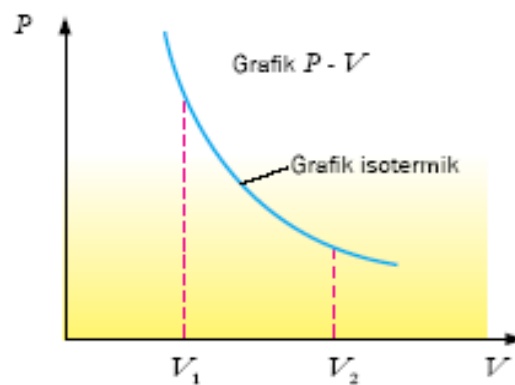
Dari persamaan gas ideal diketahui bahwa $p = nRT/V$, jika nilai n , R dan suhu (T) yang dinilai tetap dikeluarkan dari integral, maka diperoleh:

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

Dari persamaan diatas dapat disimpulkan bahwa usaha yang dilakukan sistem dalam proses isotermis dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$W = nRT \ln (V_2/V_1)$$

Besarnya usaha yang dilakukan pada proses isotermis dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 19. Proses isotermik

Contoh soal:

Pada suhu 50C, 5 mol gas helium memuai secara isotermal yang mengakibatkan volumenya memuai menjadi tiga kali volume semula. Berapa usaha yang dilakukan proses tersebut?

Pembahasan

Diketahui :

Suhu (T) = 50C = (50+273) = 320 K

Volume akhir (V₂) = 3V₁

Ditanya :

Usaha yang dilakukan pada proses AB

Jawab :

$$W = nRT \ln (V_2/V_1)$$

$$W = 5 \text{ mol } (8.31 \text{ J/mol})(320\text{K}) \ln (V_2/V_1)$$

$$W = 18,428 \text{ Joule}$$

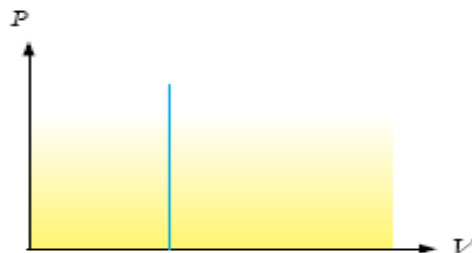
c. Proses Isokhorik

Proses isokhorik adalah proses termodinamika yang berlangsung pada volume konstan ($\Delta V = 0$). Oleh karena itu, usaha yang dilakukan gas pada proses isokhorik adalah nol.

Proses tersebut dapat dirumuskan:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_2 = V \\ W &= P(V_2 - V_1) \\ W &= 0 \end{aligned}$$

Jadi pada proses isokhorik, besarnya kalor yang digunakan untuk mengubah energi dalam dapat digambarkan seperti pada grafik berikut



Gambar 20. Proses isokhorik

Contoh soal:

Tabung dengan volume 3 l menyimpan 5 mol gas helium dengan tekanan 2×10^6 Pa. Jika dalam proses tekanan meningkat menjadi 4×10^6 Pa. Tentukan perubahan energi dalam dan kalor yang diserap pada proses tersebut

Diketahui :

Tekanan awal (P_1) = 2×10^6 Pa

Tekanan akhir (P_2) = 4×10^6 Pa

Volume (V) = 3l

Jawab :

Perubahan energi dalam dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\Delta U = (3/2) nRT$$

$$\Delta U = (3/2)(n R T_2 - n R T_1)$$

$$\Delta U = (3/2) (P_2 V_2 - P_1 V_1)$$

$$\Delta U = (3/2) (4 \times 10^6 - 2 \times 10^6) (3 \cdot 10^{-3})$$

$$\Delta U = (3/2) (400 - 240)$$

$$\Delta U = 240 \text{ joule}$$

Jumlah kalor yang diserap gas adalah:

$$Q = W + \Delta U$$

$$Q = 0 + 240$$

$$Q = 240 \text{ joule}$$

d. Proses Adiabatik

Proses gas dalam ruang tertutup disebut proses adiabatik. Proses ini berlangsung tanpa adanya pertukaran kalor atau panas antara sistem dan lingkungan ($Q = 0$)

Usaha dalam proses tersebut dapat dirumuskan:

$$Q = 0$$

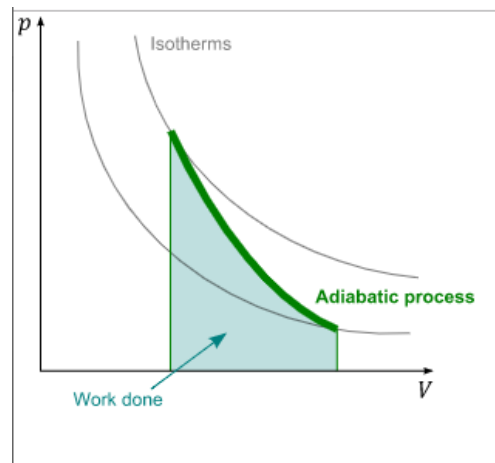
$$W = - \Delta U$$

$$W = \frac{1}{\gamma - 1} (P_1 V_1 - P_2 V_2)$$

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

Proses adiabatik terjadi melalui proses isolasi sistem dengan menggunakan bahan tertentu yang tidak mudah menghantarkan kalor

sehingga tidak terjadi transfer kalor ke lingkungan. Pada proses adiabatik terjadi perubahan suhu, tekanan dan volume seperti yang terlihat dalam kurva berikut.



Gambar 21.Proses adiabatik

Proses ini mengikuti rumus Poisson sebagai berikut.

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

$$T.V^{(\gamma-1)} = \text{konstan}$$

$$\gamma = C_p/C_v = f+2/f$$

Dimana C_p adalah panas spesifik komponen pada tekanan konstan. C_v adalah panas spesifik pada volume konstan, γ adalah indeks adiabatik dan f adalah derajat kebebasan (3 untuk gas monoatomik dan 5 untuk gas diatomik).

Contoh soal:

Tanpa ada perubahan kalor pada sistem, 5 mol gas ideal yang awalnya bersuhu 37C mengalami kenaikan suhu menjadi 62C. $R = 8,3124 \text{ J/K}$. Hitung ΔU nya?

Diketahui :

$$n = 2 \text{ mol}$$

$$\text{Suhu } (T_1) = 37^\circ\text{C}$$

$$\text{Suhu } (T_2) = 62^\circ\text{C}$$

$$R = 8,3124 \text{ J/K}$$

ΔU dihitung dengan rumus

$$\Delta U = (3/2) nRT$$

$$\Delta U = (3/2)(n R T_2 - n R T_1)$$

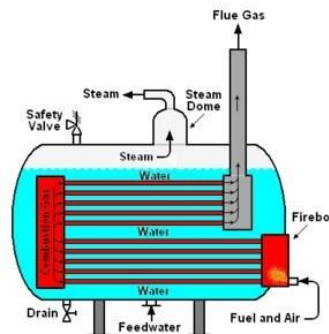
$$\Delta U = (3/2) (2 \times 8,314 \times (62-37))$$

$$\Delta U = 623.7 \text{ Joule}$$

2. Penerapan proses termodinamika dalam kehidupan sehari-hari

a. Proses Isobarik

Dalam industri, proses pemanasan air di dalam mesin ketel uap (boiler) menggunakan proses isobarik. Prosesnya dimulai dengan memanaskan uap hingga kondisi uap jenuh dan keseluruhan proses berlangsung pada tekanan konstan.



Gambar 22. Mesin ketel uap (boiler)

Pada mesin ketel uap (boiler), H₂O diletakkan di dalam sebuah tabung berbentuk silinder. Tabung tersebut dilengkapi sebuah pengisap yang dibebani dengan pasir untuk mempertahankan tekanan agar konstan selama proses berlangsung. Dalam prosesnya, kalor berpindah dari lingkungan masuk ke dalam sistem melalui proses pembakaran pada bunsen. Apabila proses tersebut berlangsung dalam rentan waktu yang cukup lama, air akan

mendidih dan berubah fase menjadi uap. Sistem tersebut beresekspansi secara kuasi statik tetapi tekanan yang dikerahkan sistem pada pengisap otomatis akan konstan.

b. Proses Isotermal

Dalam kehidupan sehari-hari, penerapan proses isotermal dapat dilihat dari sistem pada Air Conditioner. AC adalah alat yang difungsikan untuk mengkondisikan temperatur ruangan dengan suhu yang kita inginkan terutama jika menginginkan suhu ruangan menjadi lebih rendah dari suhu lingkungan sekitar.

c. Proses Isokhorik

Penerapan proses isokhorik dapat dilihat dari sebuah kipas berbaterai yang dikondisikan dalam sebuah ruang tertutup. Pada contoh ini, kipas, baterai dan udara yang berada di dalam ruang tersebut dianggap sebagai sistem. Perputaran kipas menandakan bahwa kipas tersebut melakukan kerja terhadap udara yang ada. Pada saat yang sama, energi kinetik kipas berubah menjadi energi dalam udara. Energi dalam udara merupakan konversi dari energi listrik pada baterai yang berkurang selama proses berlangsung. Pada contoh ini dapat terlihat bahwa pada proses isokhorik (volume konstan), kerja tetap dapat dilakukan oleh sistem walaupun tidak melibatkan perubahan volume.

d. Proses Adiabatik

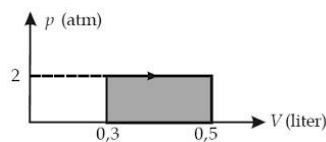
Prinsip kerja mesin diesel merupakan contoh real penerapan proses adiabatik dalam industri. Motor diesel dikategorikan dalam motor bakar torak dan mesin pembakaran dalam (internal combustion engine). Pada dasarnya, sistem motor diesel bekerja dengan merubah energi kimia menjadi energi mekanis. Energi kimia diperoleh melalui reaksi pembakaran bahan bakar dan udara di dalam ruang bakar.

Proses	Konstan	Perpindahan kalor (Q)	Usaha yang dilakukan (W)	Perubahan energy dalam (ΔU)	Bentuk hukum termodinamika
Isobarik	P (atau V/T)	$nC_p\Delta T$	$P\Delta V$	$3/2 nR\Delta T$	$Q = \Delta U + P\Delta V$
Isokhorik	V (atau P/T)	$nC_v\Delta T = 3/2 nR\Delta T$	0	$3/2 nR\Delta T$	$Q = \Delta U$
Isotermal	T (atau PV)	$nRT \ln V_2/V_1$	$nRT \ln V_2/V_1$	0	$Q = W$
Adiabatik	PV^γ atau $TV^{\gamma-1}$	0	$-3/2 nR\Delta T$	$3/2 nR\Delta T$	$\Delta U = -W$

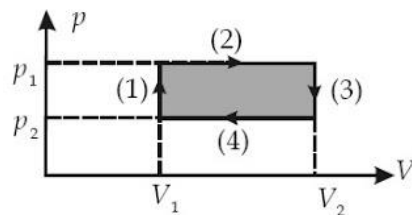
Tabel 7. Proses termodinamika

C. Latihan Soal

1. Diketahui 2 liter gas ditambahkan kalor pada tekanan tetap $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ dan volumenya meningkat menjadi 3 liter. Hitung usaha pada sistem tersebut
2. 5 mol gas ideal mengalami proses isobarik dan suhunya meningkat dua kali suhu semula. Jika diketahui suhu awal gas adalah 30°C . Berapa suhu akhir gas tersebut?
3. Suatu gas volumenya 1 m^3 melalui proses pemanasan pada tekanan tetap hingga volumenya menjadi 3 m^3 . Hitunglah tekanan gas apabila diketahui usaha yang dilakukan gas tersebut adalah sebesar $5 \times 10^5 \text{ Joule}$.
4. Tentukanlah usaha yang dilakukan gas. ($1 \text{ atm} = 105 \text{ N/m}^2$) bila diketahui gas tersebut dipanaskan pada tekanan tetap hingga memuai



5. Gambar berikut menunjukkan suatu siklus termodinamika dari suatu gas ideal.



Tentukanlah usaha yang dilakukan gas:

- a. dari keadaan A ke B,
 - b. dari B ke C,
 - c. dari C ke D,
 - d. dari D ke A, dan
 - e. dari A kembali ke A melalui B, C, dan D
6. Proses adiabatik untuk memampatkan 3 mol gas diatomik memerlukan usaha sebesar $4 \times 10^3 \text{ J}$. Pada akhir proses, suhunya meningkat menjadi 4 kali suhu awal. Jika konstanta umum gas $R = 8,31 \text{ J/mol K}$, tentukanlah suhu awal gas

D. Daftar Pustaka

- J.M Smith, Henrick C Van Ness & Michael Abbott. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 6th edition. New York: McGraw-Hill publisher.
- Ahmad Abu Hamid. (2007). Modul Kalor dan Termodinamika. Fakultas Matematika dan IPA. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Hadiyanto. (2014). Dasar Termodinamika. Jurusan Teknik Kimia. Universitas Diponegoro.
- Rizki Pebriani. (2017). Termodinamika. Fakultas Teknik. Politeknik Negeri Sriwijaya
- Suprpto Brotosiswojo. (2007). Pengantar Fisika Statistik. Universitas Terbuka.
- Berlian Hasan. (2015). Termodinamika. Fakultas Teknik. Politeknik Negeri Ujung Pandang
- Pathur Ahli Hamzah. (2018). Termodinamika Teknik 1. Fakultas Teknik. Universitas Lambung Mangkurat.
- Paulus Cahyono Tjiang. (2006) Efisiensi Siklus Carnot untuk Persamaan Gas. LPPM.Universitas Katolik Parahyangan.
- Quipper. Termodinamika: Pengertian, Prinsip, Hukum dan keadaan (diakses tanggal 5 Maret 2020) Tersedia pada <https://www.quipper.com/id/blog/mapel/fisika/pengertian-termodinamika-lengkap/>

PERTEMUAN 7

PENGERTIAN ENTALPI

A. Tujuan Pembelajaran

Menguasai teori aplikasi materi secara mendalam tentang variabel (besaran) ekstensif dalam proses termodinamika. Mampu menyelesaikan perhitungan perubahan entalpi. Mampu memahami Hukum Hess dan aplikasinya. Mampu menghitung entalpi penguraian standar ΔH°_d , entalpi pembentukan standar molar ΔH°_f dan entalpi pembakaran standar ΔH°_c

B. Uraian Materi

Dalam sistem termodinamika dikenal istilah keadaan sistem yaitu kondisi dimana sifat-sifat sistem bergantung pada instrument tertentu. Instrument tersebut berfungsi untuk menjaga sifat-sifat sistem pada kondisi yang diinginkan.

Fungsi dari keadaan tersebut berbasis pada sifat tersebut. Suatu sistem dinyatakan mencapai fungsi keadaan jika sistem tersebut sampai pada keadaan tertentu dan hanya bergantung pada keadaan awal dan akhirnya saja, tidak bergantung pada proses untuk mencapai keadaan tersebut.

Di dalam termodinamika, energi dalam (U), entalpi (H), energi Gibbs (G) dan energi bebas Helmholtz (A) merupakan fungsi keadaan dan akan dibahas dengan detail pada pertemuan ini.

1. Entalpi

Perubahan entalpi atau dikenal dengan istilah ΔH adalah selisih kalor pada reaksi yang berlangsung pada suhu dan tekanan yang tetap. ΔH dirumuskan dengan total entalpi dari zat hasil dikurangi total entalpi dari zat pereaktan.

$$\Delta H = H_h - H_r$$

Dimana ΔH : perubahan entalpi

H_h : entalpi hasil reaksi

H_r : entalpi zat reaktan

- Untuk reaksi eksoterm dan endoterm, perubahan entalpi (ΔH) pada reaksi dapat dirumuskan seperti pada bagan berikut.

- 1) Pada reaksi eksoterm, berlaku hubungan



Dimana A B merupakan zat awal, sedangkan zat hasil reaksi dilambangkan dengan huruf C dan besarnya panas reaksi dinotasikan dengan huruf x.

Berbasis pada hukum kekekalan energi dimana,

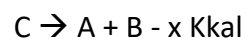
$$\text{Panas (A + B)} = \text{Panas C} + x \text{ Kkal}$$

$$H(A+B) = H(C)$$

$$H(C) - H(A+B) = -x \text{ Kkal}$$

$$\Delta H \rightarrow -x \text{ Kkal}$$

- 2) Untuk reaksi endoterm, berlaku hubungan



Berbasis pada hukum kekekalan energi dimana,

$$H(A+B) - H(C) = x \text{ Kkal}$$

$$\Delta H \rightarrow x \text{ Kkal}$$

Dari reaksi di atas didapat bahwa besar kecilnya perubahan entalpi ΔH berbanding lurus dengan banyak sedikitnya panas reaksi yang diserap oleh sistem namun dengan tanda yang berlawanan.

Contoh soal:

Reaksi pembakaran CH_4 (g) menjadi CO_2 (g) dan H_2O (g) berlangsung pada suhu 298K. Diketahui data properti pada suhu tersebut adalah sebagai berikut:

$$\Delta H. \text{CH}_4 = -74,873 \text{ KJ mol}^{-1}$$

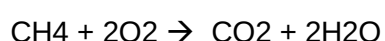
$$\Delta H. \text{O}_2 = 0,00 \text{ KJ mol}^{-1}$$

$$\Delta H. \text{H}_2\text{O} = -241,827 \text{ KJ mol}^{-1}$$

$$\Delta H. \text{CO}_2 = -393,522 \text{ KJ mol}^{-1}$$

Penyelesaian:

Tulis dan setarakan persamaan reaksinya



Masukan nilai ΔH masing-masing komponen

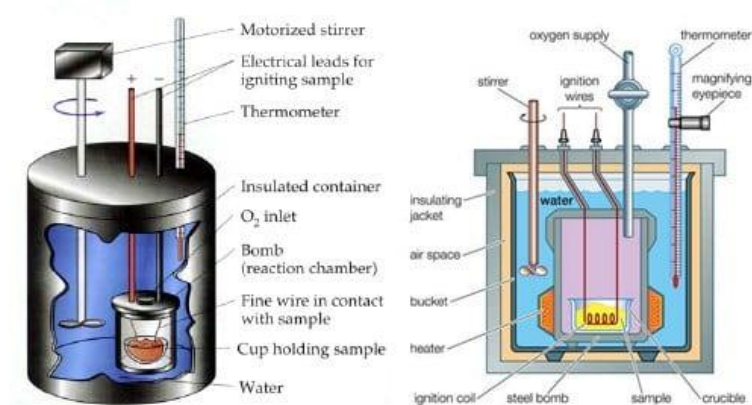
$$\Delta H = H \{CO_2 + (2 \times H_2O)\} - H \{CH_4 + (2 \times O_2)\}$$

$$\Delta H = \{-393,522 + (2 \times (-241,827))\} - \{-74,873 + (2 \times 0,000)\}$$

$$\Delta H = -802,303 \text{ KJ mol}^{-1}$$

Dari perhitungan didapat hasil akhir yang negatif. Hasil tersebut menandakan bahwa reaksi merupakan reaksi eksoterm

- b. Alat kalorimeter adalah alat yang digunakan untuk mengukur perubahan entalpi (ΔH) yang berlangsung untuk reaksi dalam larutan dan reaksi gas khusus. Sistem pada kalorimeter berada pada kondisi tekanan yang tetap.

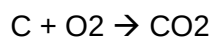


Gambar 23. Kalorimeter

Contoh soal:

Pada reaksi oksidasi dari 12 gram C (karbon) menjadi CO₂ berlangsung dengan temperatur awal reaksi 30°C. Seiring dengan waktu, suhu reaksi mengalami peningkatan sebesar 0,35°C. Jika diketahui panas jenis kalorimeter tersebut adalah 400 Kkal / gr derajat. Hitunglah ΔH dari tiap mol karbon yang dibakar ?

Penyelesaian:

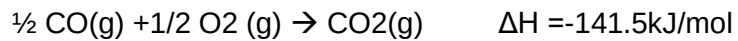
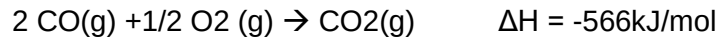
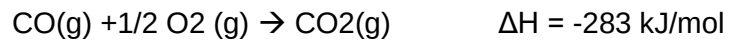
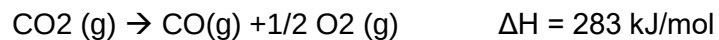
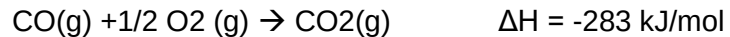


$$\Delta H = \frac{\text{Panas jenis kalorimeter} \times \Delta T}{\text{mol C}}$$

$$\Delta H = (400 \times 0.35) / (12/12)$$

$$\Delta H = 93.414 \text{ Kkal}$$

Sehingga dapat disimpulkan bahwa pada pembakaran 1 mol karbon dilepaskan panas sebesar 93.414 Kkal. Jadi $\Delta H = -93.414 \text{ Kkal}$

c. Hubungan yang melibatkan ΔH 1) ΔH sebagai besaran ekstensif2) ΔH akan berubah tanda bila arah reaksi berbalik

3) Hukum Hess

“Kalor reaksi dari suatu reaksi tidak bergantung apakah reaksi tersebut berlangsung satu tahap atau beberapa tahap”.

Hukum Hess sangat penting dalam perhitungan kalor reaksi yang tidak dapat ditentukan secara eksperimen. Dalam praktiknya, perhitungan entalpi selalu dilakukan berlandaskan teori Hukum Hess.

Contoh:

1. Reaksi langsung



2. Reaksi tidak langsung

a. Lewat A



b. Lewat B dan E

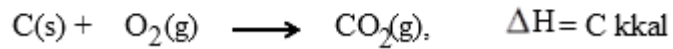
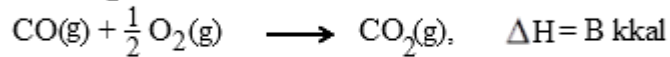
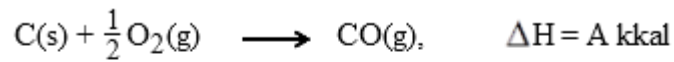


Maka diantara reaksi tersebut terjadi hubungan

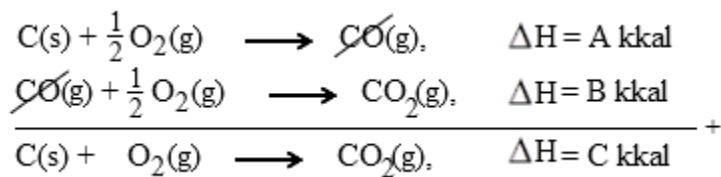
$$\Delta H_1 = \Delta H_2 + \Delta H_3 = \Delta H_4 + \Delta H_5 + \Delta H_6$$

Contoh soal:

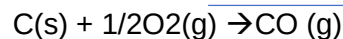
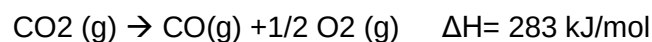
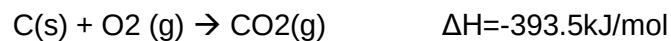
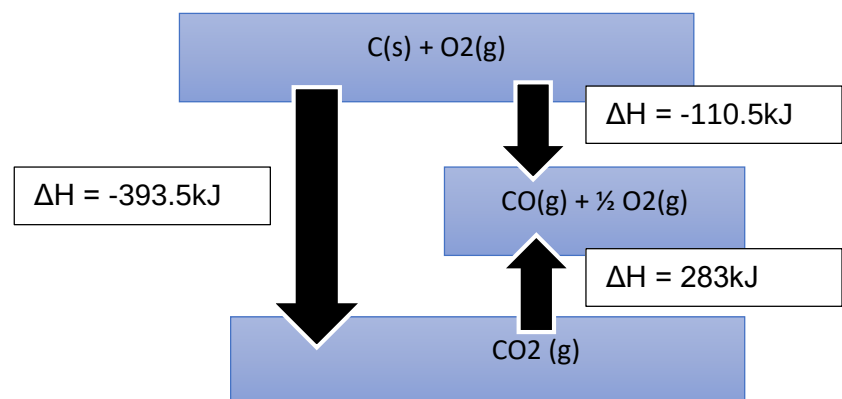
Pada reaksi berikut:



Tentukan hubungan A, B dan C pada reaksi di atas yang kaitannya dengan ΔH

Penyelesaian:

Sehingga hubungan A, B dan C adalah $C = A + B$



$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 = -110.5 \text{ kJ}$$

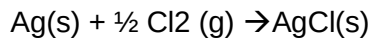
d. Entalpi Pembentukan Standar Molar ΔH°_f

Entalpi Pembentukan Standar Molar ΔH°_f adalah kondisi standar dari berbagai ΔH reaksi pada suhu 298 K dan tekanan 1 atm. Perubahan entalpi (ΔH) reaksi merupakan fungsi suhu dan tekanan sehingga perlu dicantumkan data tersebut dalam data termokimia. Data entalpi pembentukan standar

molar ΔH°_f untuk beberapa zat disajikan dalam bentuk tabel untuk mempermudah pembacaan.

Contoh:

Dapat dilihat dari tabel bahwa entalpi pembentukan standar AgCl sebesar - 127 kJ/mol



$$\Delta H = -127 \text{ kJ/mol}$$

TABEL ΔH°_f Beberapa Zat

Zat	ΔH°_f (KJ/Mol)
1. $\text{H}_2(\text{g})$	0
2. $\text{O}_2(\text{g})$	0
3. $\text{N}_2(\text{g})$	0
4. $\text{C}(\text{g})$	0
5. $\text{Fe}(\text{g})$	0
6. $\text{Si}(\text{g})$	0
7. $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	- 241,8
8. $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	- 285,8
9. $\text{CO}(\text{g})$	- 110,5
10. $\text{CO}_2(\text{g})$	- 393,5
11. $\text{CS}_2(\text{g})$	+ 177

Zat	ΔH°_f (KJ/Mol)
12. $\text{C}_2\text{H}_4(\text{g})$	+ 52,5
13. $\text{C}_6\text{H}_6(\text{l})$	+ 49,7
14. $\text{NO}(\text{g})$	+ 90,25
15. $\text{NO}_2(\text{g})$	+ 33,2
16. $\text{C}_2\text{H}_6(\text{g})$	- 84,7
17. $\text{CH}_3\text{OH}(\text{l})$	- 238,6
18. $\text{CCl}_4(\text{g})$	- 96
19. $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{l})$	- 277,6
20. $\text{SiO}_2(\text{g})$	- 910
21. $\text{PbO}(\text{s})$	- 219
22. $\text{NH}_3(\text{g})$	- 45,9

TABEL ΔH°_F Beberapa Zat

Zat	ΔH°_F (KJ/Mol)
23. $\text{SO}_2(\text{g})$	- 296,8
24. $\text{H}_2\text{S}(\text{g})$	- 20
25. $\text{HF}(\text{g})$	- 273
26. $\text{HCl}(\text{g})$	- 92,3
27. $\text{AgCl}(\text{s})$	- 127
28. $\text{AgBr}(\text{s})$	- 99,5
29. $\text{AgI}(\text{s})$	- 62,4
30. $\text{CH}_4(\text{g})$	- 74,9
31. $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{s})$	- 1668,24
32. $\text{MgO}(\text{s})$	- 601,08
33. $\text{CuO}(\text{s})$	- 155,08

Zat	ΔH°_F (KJ/Mol)
34. $\text{NaCl}(\text{s})$	- 411
35. $\text{Br}_2(\text{l})$	0
36. $\text{Br}_2(\text{g})$	+ 30,9
37. $\text{C}(\text{s})_{\text{intan}}$	+ 1,88
38. $\text{C}_2\text{H}_2(\text{g})$	+ 227
39. $\text{C}_3\text{H}_8(\text{g})$	- 104
40. $\text{CH}_3\text{CHO}(\text{g})$	- 167
41. $\text{HCOOH}(\text{g})$	- 363
42. $\text{CS}_2(\text{l})$	+ 89,5
43. $\text{CS}_2(\text{g})$	+ 117
44. $\text{CaO}(\text{s})$	- 635,5

TABEL ΔH°_F Beberapa Zat

Zat	ΔH°_F (KJ/Mol)
45. $\text{ZnSO}_4(\text{s})$	- 983
46. $\text{ZnS}(\text{s})$	- 206
47. $\text{ZnO}(\text{s})$	- 348
48. $\text{Zn}(\text{OH})_2(\text{s})$	- 642,2
49. $\text{HBr}(\text{g})$	- 36
50. $\text{HI}(\text{g})$	- 26
51. $\text{LiCl}(\text{s})$	- 408,8
52. $\text{MgCl}_2(\text{s})$	- 641,8
53. $\text{Mg}(\text{OH})_2(\text{s})$	- 924,7
54. $\text{NaF}(\text{s})$	- 571
55. $\text{NaBr}(\text{s})$	- 360

Zat	ΔH°_F (KJ/Mol)
56. $\text{NaI}(\text{s})$	- 288
57. $\text{Na}_2\text{O}_2(\text{s})$	- 504,6
58. $\text{NaOH}(\text{s})$	- 426,8
59. $\text{NaHCO}_3(\text{s})$	- 957,7
60. $\text{Na}_2\text{CO}_3(\text{s})$	- 1131
61. $\text{O}_3(\text{g})$	+ 143
62. $\text{PbO}_2(\text{s})$	- 277
63. $\text{PbSO}_4(\text{s})$	- 920,1
64. $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{l})$	- 813,8
65. $\text{SiH}_4(\text{g})$	+ 34
66. $\text{CH}_3\text{COOH}(\text{l})$	- 487

e. Entalpi Penguraian Standar ΔH°_d

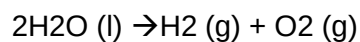
Perubahan entalpi penguraian standar ΔH°_d merupakan selisih entalpi pada proses penguraian 1 mol senyawa jadi unsur penyusunnya. Kondisi ini adalah kondisi yang berkebalikan dari perubahan entalpi pembentukan. Nilai ΔH°_d sama dengan nilai ΔH°_f namun dengan tanda yang berlawanan.

Contoh

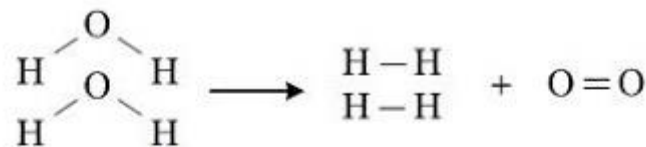
ΔH reaksi pembentukan standar H_2O ($\Delta H^\circ_f H_2O$)

$$\Delta H = -286 \text{ kJ}$$

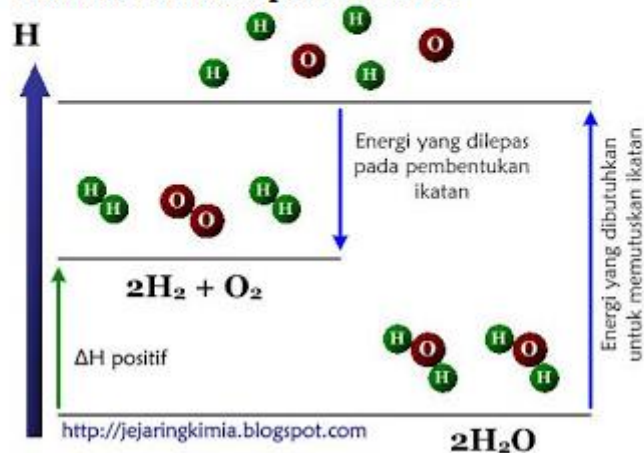
ΔH reaksi penguraian standar ($\Delta H^\circ_d H_2O$)



$$\Delta H = +286 \text{ kJ}$$



Gambar 1. Reaksi peruraian Air



Gambar 24. Reaksi peruraian air

Dari gambar diatas dapat dilihat terdapat 2 tahap reaksi peruraian air:

Tahap pertama adalah tahap pembentukan atom-atom H dan O dengan cara memutus rantai 2 ikatan H-O. Pada tahap ini, diperlukan energi sebesar Σ (energi ikatan pereaksi)

Tahap kedua adalah tahap pembentukan 2 ikatan H-H dan 1 ikatan O=O dari atom H dan O, energi yang dilepas sebesar Σ (energi ikatan produk reaksi)

Dapat dilihat bahwa Σ (energi ikatan produk reaksi) > Σ (energi ikatan pereaksi). Melalui perhitungan diperoleh ΔH reaksi adalah positif yang menandakan bahwa reaksi bersifat endoterm.

f. Entalpi Pembakaran Standar ΔH°_c

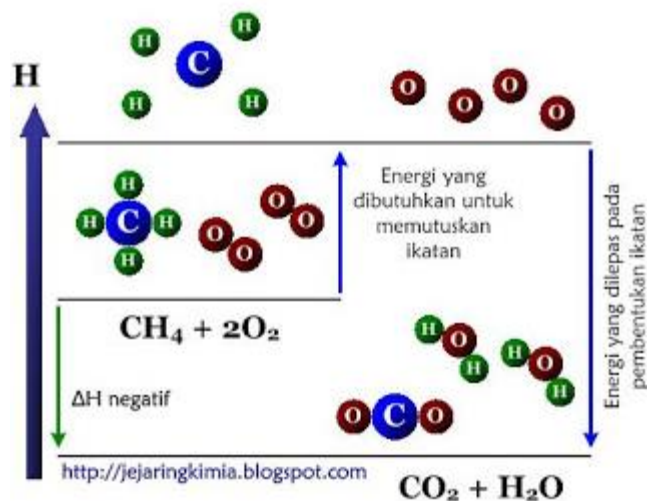
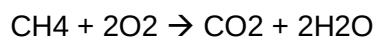
Suatu reaksi pembakaran terjadi apabila suatu zat yang mudah terbakar (unsur karbon, hidrogen, belerang) direaksikan dengan oksigen. Reaksi pembakaran dikategorikan menjadi pembakaran sempurna dan pembakaran tidak sempurna. Pembakaran dinyatakan sempurna apabila :

- Karbon (C) terbakar menjadi CO_2
- Hidrogen (H) terbakar menjadi H_2O
- Belerang (S) terbakar menjadi SO_2

Entalpi pembakaran standard adalah perubahan entalpi pada reaksi pembakaran sempurna dari 1 mol zat. Entalpi pembakaran standard (ΔH°_c) diukur pada temperatur 298 K dengan tekanan 1 atm. Entalpi pembakaran dituliskan dalam kJ mol^{-1} .

Contoh reaksi pembakaran CH_4

Reaksi pembakaran CH_4 dengan O_2 menghasilkan gas CO_2 dan gas H_2O dengan reaksi sebagai berikut



Gambar 25. Reaksi pembakaran gas metana

Dari gambar diatas dapat dilihat terdapat 2 tahap reaksi pembakaran gas metana yaitu:

- 1) Tahap pertama adalah tahap pembentukan atom-atom C,H dan O dengna proses memutuskan ikatan C-H dan ikatan rangkap O=O. Energi yang diperlukan pada proses tersebut adalah sebesar Σ (energi ikatan pereaksi)
- 2) Tahap kedua adalah pembentukan ikatan H-O dan ikatan C=O oleh atom C,H dan O. Energi yang dilepas pada reaksi tersebut adalah sebesar Σ (energi ikatan produk reaksi)

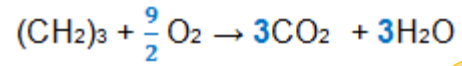
Dari diagram terlihat bahwa Σ (energi ikatan pereaksi) > Σ (energi ikatan produk reaksi). Melalui perhitungan diperoleh ΔH reaksi adalah negatif yang menandakan bahwa reaksi bersifat eksoterm.

Perlu diperhatikan bahwa tidak ada nilai ΔH_f untuk O_2 karena ΔH_f unsur bebas atau atom bebas yang terdiri dari atom-atom identik = 0

Nama Zat	ΔH_c (kJ/mol)	Persamaan reaksi pembakaran
Karbon	-393.5	$C (s) + O_2 (g) \rightarrow CO_2 (g)$
Hidrogen	-285.85	$H_2 (g) + \frac{1}{2}O_2 (g) \rightarrow H_2O (l)$
Hidrogen	-241.8	$H_2 (g) + \frac{1}{2}O_2 (g) \rightarrow H_2O (g)$
Belerang	-297	$S (s) + O_2 (g) \rightarrow SO_2 (g)$
Karbonmonoksida	-283	$CO (g) + \frac{1}{2}O_2 (g) \rightarrow CO_2 (g)$
Metana	-802	$CH_4 (g) + 2O_2 (g) \rightarrow CO_2 (g) + 2H_2O (g)$
Asetilen	-1256	$C_2H_2 (g) + 2\frac{1}{2}O_2 (g) \rightarrow 2CO_2 (g) + H_2O (g)$
Metanol	-638	$CH_3OH (l) + 1\frac{1}{2}O_2 (g) \rightarrow CO_2 (g) + 2H_2O (g)$
Isooktana	-5460	$C_8H_{18} (l) + 12O_2 (g) \rightarrow 8CO_2 (g) + 9H_2O (g)$
siklopropana	-2091.4	$(CH_2)_3 + \frac{9}{2} O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$

Contoh soal.

Reaksi pembakaran siklopropana ialah sebagai berikut



Jangan lupa
dikalikan koefisien

$$\Delta H_{\text{reaksi}} = -2091.4 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_f \text{ CO}_2 = -393.5 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_f \text{ H}_2\text{O} = -285.8 \text{ kJ/mol}$$

Penyelesaian:

$$\Delta H_{\text{reaksi}} = [(\text{koef} \times \Delta H_f) \text{ produk}] - [(\text{koef} \times \Delta H_f) \text{ reaktan}]$$

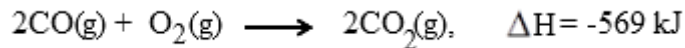
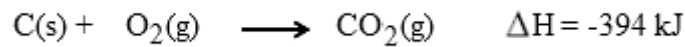
$$= (3 \times \Delta H_f \text{ CO}_2 + 3 \times \Delta H_f \text{ H}_2\text{O}) - (\Delta H_f (\text{CH}_2)_3)$$

$$-2091.4 \text{ kJ/mol} = (3 \times -393.5 \text{ kJ/mol}) + (3 \times -285.8 \text{ kJ/mol}) - (\Delta H_f (\text{CH}_2)_3)$$

$$(\Delta H_f (\text{CH}_2)_3) = +53.5 \text{ kJ/mol}$$

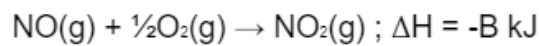
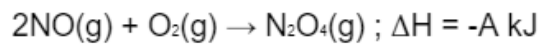
C. Latihan Soal

1. Pada reaksi berikut



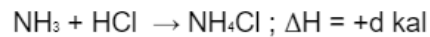
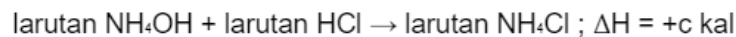
Hitung Entalpi Pembentukan Standar Molar ΔH°_f pada reaksi pembentukan 1 mol karbon monoksida.

2. Jika ΔH pembentukan $\text{NH}_3 = -46 \text{ kJ/mol}$, maka hitunglah entalpi reaksi dari $2\text{NH}_3\text{(g)} \rightarrow \text{N}_2\text{(g)} + 3 \text{H}_2\text{(g)}$
3. Pada persamaan berikut



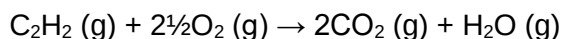
Hitunglah ΔH untuk reaksi $2 \text{NO}_2\text{(g)} \rightarrow \text{N}_2\text{O}_4\text{(g)}$

4. $\Delta H^\circ_f \text{H}_2\text{O (l)}$ adalah -285 kJ/mol , $\Delta H^\circ_f \text{CO}_2$ bernilai -393 kJ/mol dan C_2H_2 memiliki entalpi 227 kJ/mol . Hitunglah jumlah kalor yang dilepas dalam pembakaran 3 gram C_2H_2 ($M_r = 26$)
5. Dari reaksi berikut



Tentukanlah hubungan a, b, c, d dan e menurut hukum Hess

6. Pembakaran bensin merupakan salah satu contoh proses yang bersifat eksoterm. Dapat diasumsikan, isooktana C_8H_{18} merupakan komponen terbesar pada bensin. Hitunglah jumlah kalor yang dilepaskan pada pembakaran 1 liter bensin. Diketahui entalpi pembakaran isooktana = -5460 kJ/mol dan massa jenis isooktana = $0,7 \text{ kg/L}$. ($H=1$, $C=12$).
7. Diketahui



Tentukan:

- Entalpi pembakaran standar
 - Berapa kJ bila pembakaran 10L asetilena?
8. Dari reaksi: $\text{N}_2\text{(g)} + 3\text{H}_2\text{(g)} \rightarrow 2\text{NH}_3\text{(g)}$ diperoleh nilai ΔH sebesar -92.2 kJ . Berapakah entalpi pembentukan standar dari $\text{NH}_3\text{(g)}$?

9. Tentukanlah perubahan entalpi reaksi berikut
- $2\text{C}_2\text{H}_6(\text{g}) + 7\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 4\text{CO}_2(\text{g}) + 6\text{H}_2\text{O}(\text{g})$
 - $\text{C}_3\text{H}_8(\text{g}) + 5\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 3\text{CO}_2(\text{g}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l})$
10. Diketahui beberapa entalpi pembentukan standar (ΔH_f°).
- $\Delta H_f^\circ \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = -277,69 \text{ kJ/mol}$
- $\Delta H_f^\circ \text{CO}_2 = -393,51 \text{ kJ/mol}$
- $\Delta H_f^\circ \text{H}_2\text{O} = -241,82 \text{ kJ/mol}$
- Entalpi pembakaran 92 gram etanol adalah . . . (Mr etanol = 46)

D. Daftar Pustaka

- J.M Smith, Henrick C Van Ness & Michael Abbott. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 6th edition. New York: McGraw-Hill publisher.
- Ahmad Abu Hamid. (2007). Modul Kalor dan Termodinamika. Fakultas Matematika dan IPA. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Hadiyanto. (2014). Dasar Termodinamika. Jurusan Teknik Kimia. Universitas Diponegoro.
- Rizki Pebriani. (2017). Termodinamika. Fakultas Teknik. Politeknik Negeri Sriwijaya
- Suprpto Brotosiswojo. (2007). Pengantar Fisika Statistik. Universitas Terbuka.
- Berlian Hasan. (2015). Termodinamika. Fakultas Teknik. Politeknik Negeri Ujung Pandang
- Pathur Ahli Hamzah. (2018). Termodinamika Teknik 1. Fakultas Teknik. Universitas Lambung Mangkurat.
- Paulus Cahyono Tjiang. (2006) Efisiensi Siklus Carnot untuk Persamaan Gas. LPPM.Universitas Katolik Parahyangan.
- Quipper. Termodinamika: Pengertian, Prinsip, Hukum dan keadaan (diakses tanggal 5 Maret 2020) Tersedia pada <https://www.quipper.com/id/blog/mapel/fisika/pengertian-termodinamika-lengkap/>

PERTEMUAN 8

ENTALPI (lanjutan)

A. Tujuan Pembelajaran

Menguasai teori aplikasi materi secara mendalam tentang variabel (besaran) ekstensif dalam proses termodinamika. Mampu menyelesaikan perhitungan perubahan entalpi. Mampu memahami Hukum Hess dan aplikasinya. Mampu menghitung entalpi penguraian standar ΔH°_d , entalpi pembentukan standar molar ΔH°_f dan entalpi pembakaran standar ΔH°_c

B. Uraian Materi

Perubahan entalpi atau dikenal dengan istilah ΔH adalah selisih kalor pada reaksi yang berlangsung pada suhu dan tekanan yang tetap. ΔH dirumuskan dengan total entalpi dari zat hasil dikurangi total entalpi dari zat pereaktan. Pada pertemuan sebelumnya telah dibahas mengenai jenis-jenis entalpi dan perhitungannya. Pada pertemuan ini, akan dibahas lebih lanjut mengenai cara mendapatkan data entalpi dari tabel E (steam tabel).

Untuk mencari data entalpi steam dari tabel E, harus diketahui dulu tekanan atau temperatur operasi. Jika ketika diketahui tekanan atau temperature namun tidak ada angka tersebut pada tabel, dapat digunakan perhitungan interpolasi. Metode interpolasi menggunakan data entalpi yang terdekat dengan kondisi operasi yang ditanyakan. Misalnya jika ditanyakan data entalpi untuk suhu 141C namun pada tabel hanya ada data entalpi untuk suhu 140C dan 142C. Dengan metode interpolasi, data entalpi 141C dapat ditemukan dengan menggunakan data entalpi suhu 140C dan 142C. Untuk rumus interpolasi dan contohnya dapat dilihat pada pertemuan ini.

INTERPOLATION

When a value is required from a table at conditions which lie between listed values, interpolation is necessary. If M , the quantity sought, is a function of a single independent variable X and if linear interpolation is appropriate, as in the tables for saturated steam, then a direct proportionality exists between corresponding differences in M and in X . When M , the value at X , is intermediate between two given values, M_1 at X_1 and M_2 at X_2 , then:

$$M = \left(\frac{X_2 - X}{X_2 - X_1} \right) M_1 + \left(\frac{X - X_1}{X_2 - X_1} \right) M_2 \quad (\text{E.1})$$

For example, the enthalpy of saturated vapor steam at 140.8°C is intermediate between the following values taken from Table E.1:

t	H
$t_1 = 140^\circ\text{C}$	$H_1 = 2733.1 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
$t = 140.8^\circ\text{C}$	$H = ?$
$t_2 = 142^\circ\text{C}$	$H_2 = 2735.6 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$

Substitution of values into Eq. (E.1) with $M = H$ and $t = X$ yields:

$$H = \frac{1.2}{2}(2733.1) + \frac{0.8}{2}(2735.6) = 2734.1 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$$

When M is a function of two independent variables X and Y and linear interpolation is appropriate, as in the tables for superheated steam, then double linear interpolation is required. Data for quantity M at values of the independent variables X and Y adjacent to the given values are represented as follows:

	X_1	X	X_2
Y_1	$M_{1,1}$		$M_{1,2}$
Y		$M = ?$	
Y_2	$M_{2,1}$		$M_{2,2}$

Double linear interpolation between the given values of M is represented by:

$$M = \left[\left(\frac{X_2 - X}{X_2 - X_1} \right) M_{1,1} + \left(\frac{X - X_1}{X_2 - X_1} \right) M_{1,2} \right] \frac{Y_2 - Y}{Y_2 - Y_1} + \left[\left(\frac{X_2 - X}{X_2 - X_1} \right) M_{2,1} + \left(\frac{X - X_1}{X_2 - X_1} \right) M_{2,2} \right] \frac{Y - Y_1}{Y_2 - Y_1} \quad (\text{E.2})$$

Example E.1

From data in the steam tables, find:

- The specific volume of superheated steam at 816 kPa and 512°C.
- The temperature and specific entropy of superheated steam at $P = 2950$ kPa and $H = 3150.6$ kJ·kg⁻¹.

Solution E.1

(a) The following table shows specific volumes from Table E.2 for superheated steam at conditions adjacent to those specified:

P/kPa	$t = 500^\circ\text{C}$	$t = 512^\circ\text{C}$	$t = 550^\circ\text{C}$
800	443.17		472.49
816		$V = ?$	
825	429.65		458.10

Substitution of values in Eq. (E.2) with $M = V$, $X = t$, and $Y = P$ yields:

$$V = \left[\frac{38}{50}(443.17) + \frac{12}{50}(472.49) \right] \frac{9}{25} + \left[\frac{38}{50}(429.65) + \frac{12}{50}(458.10) \right] \frac{16}{25} = 441.42 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$$

(b) The following table shows enthalpy data from Table E.2 for superheated steam at conditions adjacent to those specified:

P/kPa	$t_1 = 350^\circ\text{C}$	$t = ?$	$t_2 = 375^\circ\text{C}$
2900	3119.7		3177.4
2950	H_{t_1}	$H = 3150.6$	H_{t_2}
3000	3117.5		3175.6

Here, the direct use of Eq. (E.2) is not convenient. Rather, for $P = 2950$ kPa, interpolate linearly at $t_1 = 350^\circ\text{C}$ for H_{t_1} and at $t_2 = 375^\circ\text{C}$ for H_{t_2} , applying Eq. (E.1) twice, first at t_1 and second at t_2 , with $M = H$ and $X = P$:

$$H_{t_1} = \frac{50}{100}(3119.7) + \frac{50}{100}(3117.5) = 3118.6$$

$$H_{t_2} = \frac{50}{100}(3177.4) + \frac{50}{100}(3175.6) = 3176.5$$

A third linear interpolation between these values with $M = t$ and $X = H$ in Eq. (E.1) yields:

$$t = \frac{3176.5 - 3150.6}{3176.5 - 3118.6}(350) + \frac{3150.6 - 3118.6}{3176.5 - 3118.6}(375) = 363.82^\circ\text{C}$$

Given this temperature, a table of entropy values can now be constructed:

P/kPa	$t = 350^\circ\text{C}$	$t = 363.82^\circ\text{C}$	$t = 375^\circ\text{C}$
2900	6.7654		6.8563
2950		$S = ?$	
3000	6.7471		6.8385

Application of Eq. (E.2) with $M = S$, $X = t$, and $Y = P$ yields:

$$S = \left[\frac{11.18}{25}(6.7654) + \frac{13.82}{25}(6.8563) \right] \frac{50}{100} + \left[\frac{11.18}{25}(6.7471) + \frac{13.82}{25}(6.8385) \right] \frac{50}{100} = 6.8066 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

As a check, one can apply Eq. (E.2) with $M = H$, $X = t$, and $Y = P$, confirming that doing so produces $H = 3150.6 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

TABLE E.1 Properties of Saturated Steam

t (°C)	T (K)	P (kPa)	$V = \text{SPECIFIC VOLUME cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$			$U = \text{SPECIFIC INTERNAL ENERGY kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$			$H = \text{SPECIFIC ENTHALPY kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$			$S = \text{SPECIFIC ENTROPY kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$		
			SPECIFIC VOLUME V			INTERNAL ENERGY U			ENTHALPY H			ENTROPY S		
			sat.	liq.	sat.	sat.	liq.	sat.	liq.	sat.	liq.	sat.	liq.	sat.
			evap.		vap.	evap.		vap.	evap.	vap.		evap.		vap.
0	273.15	0.611	1.000	206300.	206300.	−0.04	2375.7	2375.6	−0.04	2501.7	2501.6	0.0000	9.1578	9.1578
0.01	273.16	0.611	1.000	206200.	206200.	0.00	2375.6	2375.6	0.00	2501.6	2501.6	0.0000	9.1575	9.1575
1	274.15	0.657	1.000	192600.	192600.	4.17	2372.7	2376.9	4.17	2499.2	2503.4	0.0153	9.1158	9.1311
2	275.15	0.705	1.000	179900.	179900.	8.39	2369.9	2378.3	8.39	2496.8	2505.2	0.0306	9.0741	9.1047
3	276.15	0.757	1.000	168200.	168200.	12.60	2367.1	2379.7	12.60	2494.5	2507.1	0.0459	9.0326	9.0785
4	277.15	0.813	1.000	157300.	157300.	16.80	2364.3	2381.1	16.80	2492.1	2508.9	0.0611	8.9915	9.0526
5	278.15	0.872	1.000	147200.	147200.	21.01	2361.4	2382.4	21.01	2489.7	2510.7	0.0762	8.9507	9.0269
6	279.15	0.935	1.000	137800.	137800.	25.21	2358.6	2383.8	25.21	2487.4	2512.6	0.0913	8.9102	9.0014
7	280.15	1.001	1.000	129100.	129100.	29.41	2355.8	2385.2	29.41	2485.0	2514.4	0.1063	8.8699	8.9762
8	281.15	1.072	1.000	121000.	121000.	33.60	2353.0	2386.6	33.60	2482.6	2516.2	0.1213	8.8300	8.9513
9	282.15	1.147	1.000	113400.	113400.	37.80	2350.1	2387.9	37.80	2480.3	2518.1	0.1362	8.7903	8.9265
10	283.15	1.227	1.000	106400.	106400.	41.99	2347.3	2389.3	41.99	2477.9	2519.9	0.1510	8.7510	8.9020
11	284.15	1.312	1.000	99910.	99910.	46.18	2344.5	2390.7	46.19	2475.5	2521.7	0.1658	8.7119	8.8776
12	285.15	1.401	1.000	93840.	93840.	50.38	2341.7	2392.1	50.38	2473.2	2523.6	0.1805	8.6731	8.8536
13	286.15	1.497	1.001	88180.	88180.	54.56	2338.9	2393.4	54.57	2470.8	2525.4	0.1952	8.6345	8.8297
14	287.15	1.597	1.001	82900.	82900.	58.75	2336.1	2394.8	58.75	2468.5	2527.2	0.2098	8.5963	8.8060
15	288.15	1.704	1.001	77980.	77980.	62.94	2333.2	2396.2	62.94	2466.1	2529.1	0.2243	8.5582	8.7826
16	289.15	1.817	1.001	73380.	73380.	67.12	2330.4	2397.6	67.13	2463.8	2530.9	0.2388	8.5205	8.7593
17	290.15	1.936	1.001	69090.	69090.	71.31	2327.6	2398.9	71.31	2461.4	2532.7	0.2533	8.4830	8.7363
18	291.15	2.062	1.001	65090.	65090.	75.49	2324.8	2400.3	75.50	2459.0	2534.5	0.2677	8.4458	8.7135
19	292.15	2.196	1.002	61340.	61340.	79.68	2322.0	2401.7	79.68	2456.7	2536.4	0.2820	8.4088	8.6908
20	293.15	2.337	1.002	57840.	57840.	83.86	2319.2	2403.0	83.86	2454.3	2538.2	0.2963	8.3721	8.6684
21	294.15	2.485	1.002	54560.	54560.	88.04	2316.4	2404.4	88.04	2452.0	2540.0	0.3105	8.3356	8.6462
22	295.15	2.642	1.002	51490.	51490.	92.22	2313.6	2405.8	92.23	2449.6	2541.8	0.3247	8.2994	8.6241
23	296.15	2.808	1.002	48620.	48620.	96.40	2310.7	2407.1	96.41	2447.2	2543.6	0.3389	8.2634	8.6023
24	297.15	2.982	1.003	45920.	45920.	100.6	2307.9	2408.5	100.6	2444.9	2545.5	0.3530	8.2277	8.5806
25	298.15	3.166	1.003	43400.	43400.	104.8	2305.1	2409.9	104.8	2442.5	2547.3	0.3670	8.1922	8.5592
26	299.15	3.360	1.003	41030.	41030.	108.9	2302.3	2411.2	108.9	2440.2	2549.1	0.3810	8.1569	8.5379
27	300.15	3.564	1.003	38810.	38810.	113.1	2299.5	2412.6	113.1	2437.8	2550.9	0.3949	8.1218	8.5168
28	301.15	3.778	1.004	36730.	36730.	117.3	2296.7	2414.0	117.3	2435.4	2552.7	0.4088	8.0870	8.4959
29	302.15	4.004	1.004	34770.	34770.	121.5	2293.8	2415.3	121.5	2433.1	2554.5	0.4227	8.0524	8.4751

30	303.15	4.241	1.004	32930.	32930.	125.7	2291.0	2416.7	125.7	2430.7	2556.4	0.4365	8.0180	8.4546
31	304.15	4.491	1.005	31200.	31200.	129.8	2288.2	2418.0	129.8	2428.3	2558.2	0.4503	7.9839	8.4342
32	305.15	4.753	1.005	29570.	29570.	134.0	2285.4	2419.4	134.0	2425.9	2560.0	0.4640	7.9500	8.4140
33	306.15	5.029	1.005	28040.	28040.	138.2	2282.6	2420.8	138.2	2423.6	2561.8	0.4777	7.9163	8.3939
34	307.15	5.318	1.006	26600.	26600.	142.4	2279.7	2422.1	142.4	2421.2	2563.6	0.4913	7.8828	8.3740
35	308.15	5.622	1.006	25240.	25240.	146.6	2276.9	2423.5	146.6	2418.8	2565.4	0.5049	7.8495	8.3543
36	309.15	5.940	1.006	23970.	23970.	150.7	2274.1	2424.8	150.7	2416.4	2567.2	0.5184	7.8164	8.3348
37	310.15	6.274	1.007	22760.	22760.	154.9	2271.3	2426.2	154.9	2414.1	2569.0	0.5319	7.7835	8.3154
38	311.15	6.624	1.007	21630.	21630.	159.1	2268.4	2427.5	159.1	2411.7	2570.8	0.5453	7.7509	8.2962
39	312.15	6.991	1.007	20560.	20560.	163.3	2265.6	2428.9	163.3	2409.3	2572.6	0.5588	7.7184	8.2772
40	313.15	7.375	1.008	19550.	19550.	167.4	2262.8	2430.2	167.4	2406.9	2574.4	0.5721	7.6861	8.2583
41	314.15	7.777	1.008	18590.	18590.	171.6	2259.9	2431.6	171.6	2404.5	2576.2	0.5854	7.6541	8.2395
42	315.15	8.198	1.009	17690.	17690.	175.8	2257.1	2432.9	175.8	2402.1	2577.9	0.5987	7.6222	8.2209
43	316.15	8.639	1.009	16840.	16840.	180.0	2254.3	2434.2	180.0	2399.7	2579.7	0.6120	7.5905	8.2025
44	317.15	9.100	1.009	16040.	16040.	184.2	2251.4	2435.6	184.2	2397.3	2581.5	0.6252	7.5590	8.1842
45	318.15	9.582	1.010	15280.	15280.	188.3	2248.6	2436.9	188.4	2394.9	2583.3	0.6383	7.5277	8.1661
46	319.15	10.09	1.010	14560.	14560.	192.5	2245.7	2438.3	192.5	2392.5	2585.1	0.6514	7.4966	8.1481
47	320.15	10.61	1.011	13880.	13880.	196.7	2242.9	2439.6	196.7	2390.1	2586.9	0.6645	7.4657	8.1302
48	321.15	11.16	1.011	13230.	13230.	200.9	2240.0	2440.9	200.9	2387.7	2588.6	0.6776	7.4350	8.1125
49	322.15	11.74	1.012	12620.	12620.	205.1	2237.2	2442.3	205.1	2385.3	2590.4	0.6906	7.4044	8.0950
50	323.15	12.34	1.012	12040.	12050.	209.2	2234.3	2443.6	209.3	2382.9	2592.2	0.7035	7.3741	8.0776
51	324.15	12.96	1.013	11500.	11500.	213.4	2231.5	2444.9	213.4	2380.5	2593.9	0.7164	7.3439	8.0603
52	325.15	13.61	1.013	10980.	10980.	217.6	2228.6	2446.2	217.6	2378.1	2595.7	0.7293	7.3138	8.0432
53	326.15	14.29	1.014	10490.	10490.	221.8	2225.8	2447.6	221.8	2375.7	2597.5	0.7422	7.2840	8.0262
54	327.15	15.00	1.014	10020.	10020.	226.0	2222.9	2448.9	226.0	2373.2	2599.2	0.7550	7.2543	8.0093
55	328.15	15.74	1.015	9577.9	9578.9	230.2	2220.0	2450.2	230.2	2370.8	2601.0	0.7677	7.2248	7.9925
56	329.15	16.51	1.015	9157.7	9158.7	234.3	2217.2	2451.5	234.4	2368.4	2602.7	0.7804	7.1955	7.9759
57	330.15	17.31	1.016	8758.7	8759.8	238.5	2214.3	2452.8	238.5	2365.9	2604.5	0.7931	7.1663	7.9595
58	331.15	18.15	1.016	8379.8	8380.8	242.7	2211.4	2454.1	242.7	2363.5	2606.2	0.8058	7.1373	7.9431
59	332.15	19.02	1.017	8019.7	8020.8	246.9	2208.6	2455.4	246.9	2361.1	2608.0	0.8184	7.1085	7.9269
60	333.15	19.92	1.017	7677.5	7678.5	251.1	2205.7	2456.8	251.1	2358.6	2609.7	0.8310	7.0798	7.9108
61	334.15	20.86	1.018	7352.1	7353.2	255.3	2202.8	2458.1	255.3	2356.2	2611.4	0.8435	7.0513	7.8948
62	335.15	21.84	1.018	7042.7	7043.7	259.4	2199.9	2459.4	259.5	2353.7	2613.2	0.8560	7.0230	7.8790
63	336.15	22.86	1.019	6749.3	6749.3	263.6	2197.0	2460.7	263.6	2351.3	2614.9	0.8685	6.9948	7.8633
64	337.15	23.91	1.019	6468.0	6469.0	267.8	2194.1	2462.0	267.8	2348.8	2616.6	0.8809	6.9667	7.8477
65	338.15	25.01	1.020	6201.3	6202.3	272.0	2191.2	2463.2	272.0	2346.3	2618.4	0.8933	6.9388	7.8322
66	339.15	26.15	1.020	5947.2	5948.2	276.2	2188.3	2464.5	276.2	2343.9	2620.1	0.9057	6.9111	7.8168
67	340.15	27.33	1.021	5705.2	5706.2	280.4	2185.4	2465.8	280.4	2341.4	2621.8	0.9180	6.8835	7.8015
68	341.15	28.56	1.022	5474.6	5475.6	284.6	2182.5	2467.1	284.6	2338.9	2623.5	0.9303	6.8561	7.7864
69	342.15	29.84	1.022	5254.8	5255.8	288.8	2179.6	2468.4	288.8	2336.4	2625.2	0.9426	6.8288	7.7714

TABLE E.1 Properties of Saturated Steam (Continued)

t (°C)	T (K)	P (kPa)	SPECIFIC VOLUME V				INTERNAL ENERGY U				ENTHALPY H				ENTROPY S			
			sat. liq.	sat. vap.	evap.	sat. vap.	sat. liq.	evap.	sat. vap.	sat. liq.	evap.	sat. vap.	sat. liq.	evap.	sat. vap.			
70	343.15	31.16	1.023	5045.2	5046.3	292.9	2176.7	2469.7	293.0	2334.0	2626.9	0.9548	6.8017	7.7565				
71	344.15	32.53	1.023	4845.4	4846.4	297.1	2173.8	2470.9	297.2	2331.5	2628.6	0.9670	6.7747	7.7417				
72	345.15	33.96	1.024	4654.7	4655.7	301.3	2170.9	2472.2	301.4	2329.0	2630.3	0.9792	6.7478	7.7270				
73	346.15	35.43	1.025	4472.7	4473.7	305.5	2168.0	2473.5	305.5	2326.5	2632.0	0.9913	6.7211	7.7124				
74	347.15	36.96	1.025	4299.0	4300.0	309.7	2165.1	2474.8	309.7	2324.0	2633.7	1.0034	6.6945	7.6979				
75	348.15	38.55	1.026	4133.1	4134.1	313.9	2162.1	2476.0	313.9	2321.5	2635.4	1.0154	6.6681	7.6835				
76	349.15	40.19	1.027	3974.6	3975.7	318.1	2159.2	2477.3	318.1	2318.9	2637.1	1.0275	6.6418	7.6693				
77	350.15	41.89	1.027	3823.3	3824.3	322.3	2156.3	2478.5	322.3	2316.4	2638.7	1.0395	6.6156	7.6551				
78	351.15	43.65	1.028	3678.6	3679.6	326.5	2153.3	2479.8	326.5	2313.9	2640.4	1.0514	6.5896	7.6410				
79	352.15	45.47	1.029	3540.3	3541.3	330.7	2150.4	2481.1	330.7	2311.4	2642.1	1.0634	6.5637	7.6271				
80	353.15	47.36	1.029	3408.1	3409.1	334.9	2147.4	2482.3	334.9	2308.8	2643.8	1.0753	6.5380	7.6132				
81	354.15	49.31	1.030	3281.6	3282.6	339.1	2144.5	2483.5	339.1	2306.3	2645.4	1.0871	6.5123	7.5995				
82	355.15	51.33	1.031	3160.6	3161.6	343.3	2141.5	2484.8	343.3	2303.8	2647.1	1.0990	6.4868	7.5858				
83	356.15	53.42	1.031	3044.8	3045.8	347.5	2138.6	2486.0	347.5	2301.2	2648.7	1.1108	6.4615	7.5722				
84	357.15	55.57	1.032	2933.9	2935.0	351.7	2135.6	2487.3	351.7	2298.6	2650.4	1.1225	6.4362	7.5587				
85	358.15	57.80	1.033	2827.8	2828.8	355.9	2132.6	2488.5	355.9	2296.1	2652.0	1.1343	6.4111	7.5454				
86	359.15	60.11	1.033	2726.1	2727.2	360.1	2129.7	2489.7	360.1	2293.5	2653.6	1.1460	6.3861	7.5321				
87	360.15	62.49	1.034	2628.8	2629.8	364.3	2126.7	2490.9	364.3	2290.9	2655.3	1.1577	6.3612	7.5189				
88	361.15	64.95	1.035	2535.4	2536.5	368.5	2123.7	2492.2	368.5	2288.4	2656.9	1.1693	6.3365	7.5058				
89	362.15	67.49	1.035	2446.0	2447.0	372.7	2120.7	2493.4	372.7	2285.8	2658.5	1.1809	6.3119	7.4928				
90	363.15	70.11	1.036	2360.3	2361.3	376.9	2117.7	2494.6	376.9	2283.2	2660.1	1.1925	6.2873	7.4799				
91	364.15	72.81	1.037	2278.0	2279.1	381.1	2114.7	2495.8	381.1	2280.6	2661.7	1.2041	6.2629	7.4670				
92	365.15	75.61	1.038	2199.2	2200.2	385.3	2111.7	2497.0	385.4	2278.0	2663.4	1.2156	6.2387	7.4543				
93	366.15	78.49	1.038	2123.5	2124.5	389.5	2108.7	2498.2	389.6	2275.4	2665.0	1.2271	6.2145	7.4416				
94	367.15	81.46	1.039	2050.9	2051.9	393.7	2105.7	2499.4	393.8	2272.8	2666.6	1.2386	6.1905	7.4291				
95	368.15	84.53	1.040	1981.2	1982.2	397.9	2102.7	2500.6	398.0	2270.2	2668.1	1.2501	6.1665	7.4166				
96	369.15	87.69	1.041	1914.3	1915.3	402.1	2099.7	2501.8	402.2	2267.5	2669.7	1.2615	6.1427	7.4042				
97	370.15	90.94	1.041	1850.0	1851.0	406.3	2096.6	2503.0	406.4	2264.9	2671.3	1.2729	6.1190	7.3919				
98	371.15	94.30	1.042	1788.3	1789.3	410.5	2093.6	2504.1	410.6	2262.2	2672.9	1.2842	6.0954	7.3796				
99	372.15	97.76	1.043	1729.0	1730.0	414.7	2090.6	2505.3	414.8	2259.6	2674.4	1.2956	6.0719	7.3675				

100	373.15	101.33	1.044	1672.0	1673.0	419.0	2087.5	2506.5	419.1	2256.9	2676.0	1.3069	6.0485	7.3554
102	375.15	108.78	1.045	1564.5	1565.5	427.4	2081.4	2508.8	427.5	2251.6	2679.1	1.3294	6.0021	7.3315
104	377.15	116.68	1.047	1465.1	1466.2	435.8	2075.3	2511.1	435.9	2246.3	2682.2	1.3518	5.9560	7.3078
106	379.15	125.04	1.049	1373.1	1374.2	444.3	2069.2	2513.4	444.4	2240.9	2685.3	1.3742	5.9104	7.2845
108	381.15	133.90	1.050	1287.9	1288.9	452.7	2063.0	2515.7	452.9	2235.4	2688.3	1.3964	5.8651	7.2615
110	383.15	143.27	1.052	1208.9	1209.9	461.2	2056.8	2518.0	461.3	2230.0	2691.3	1.4185	5.8203	7.2388
112	385.15	153.16	1.054	1135.6	1136.6	469.6	2050.6	2520.2	469.8	2224.5	2694.3	1.4405	5.7758	7.2164
114	387.15	163.62	1.055	1067.5	1068.5	478.1	2044.3	2522.4	478.3	2219.0	2697.2	1.4624	5.7318	7.1942
116	389.15	174.65	1.057	1004.2	1005.2	486.6	2038.1	2524.6	486.7	2213.4	2700.2	1.4842	5.6881	7.1723
118	391.15	186.28	1.059	945.3	946.3	495.0	2031.8	2526.8	495.2	2207.9	2703.1	1.5060	5.6447	7.1507
120	393.15	198.54	1.061	890.5	891.5	503.5	2025.4	2529.0	503.7	2202.2	2706.0	1.5276	5.6017	7.1293
122	395.15	211.45	1.062	839.4	840.5	512.0	2019.1	2531.1	512.2	2196.6	2708.8	1.5491	5.5590	7.1082
124	397.15	225.04	1.064	791.8	792.8	520.5	2012.7	2533.2	520.7	2190.9	2711.6	1.5706	5.5167	7.0873
126	399.15	239.33	1.066	747.3	748.4	529.0	2006.3	2535.3	529.2	2185.2	2714.4	1.5919	5.4747	7.0666
128	401.15	254.35	1.068	705.8	706.9	537.5	1999.9	2537.4	537.8	2179.4	2717.2	1.6132	5.4330	7.0462
130	403.15	270.13	1.070	667.1	668.1	546.0	1993.4	2539.4	546.3	2173.6	2719.9	1.6344	5.3917	7.0261
132	405.15	286.70	1.072	630.8	631.9	554.5	1986.9	2541.4	554.8	2167.8	2722.6	1.6555	5.3507	7.0061
134	407.15	304.07	1.074	596.9	598.0	563.1	1980.4	2543.4	563.4	2161.9	2725.3	1.6765	5.3099	6.9864
136	409.15	322.29	1.076	565.1	566.2	571.6	1973.8	2545.4	572.0	2155.9	2727.9	1.6974	5.2695	6.9669
138	411.15	341.38	1.078	535.3	536.4	580.2	1967.2	2547.4	580.5	2150.0	2730.5	1.7182	5.2293	6.9475
140	413.15	361.38	1.080	507.4	508.5	588.7	1960.6	2549.3	589.1	2144.0	2733.1	1.7390	5.1894	6.9284
142	415.15	382.31	1.082	481.2	482.3	597.3	1953.9	2551.2	597.7	2137.9	2735.6	1.7597	5.1499	6.9095
144	417.15	404.20	1.084	456.6	457.7	605.9	1947.2	2553.1	606.3	2131.8	2738.1	1.7803	5.1105	6.8908
146	419.15	427.09	1.086	433.5	434.6	614.4	1940.5	2554.9	614.9	2125.7	2740.6	1.8008	5.0715	6.8723
148	421.15	451.01	1.089	411.8	412.9	623.0	1933.7	2556.8	623.5	2119.5	2743.0	1.8213	5.0327	6.8539
150	423.15	476.00	1.091	391.4	392.4	631.6	1926.9	2558.6	632.1	2113.2	2745.4	1.8416	4.9941	6.8358
152	425.15	502.08	1.093	372.1	373.2	640.2	1920.1	2560.3	640.8	2106.9	2747.7	1.8619	4.9558	6.8178
154	427.15	529.29	1.095	354.0	355.1	648.9	1913.2	2562.1	649.4	2100.6	2750.0	1.8822	4.9178	6.8000
156	429.15	557.67	1.098	336.9	338.0	657.5	1906.3	2563.8	658.1	2094.2	2752.3	1.9023	4.8800	6.7823
158	431.15	587.25	1.100	320.8	321.9	666.1	1899.3	2565.5	666.8	2087.7	2754.5	1.9224	4.8424	6.7648
160	433.15	618.06	1.102	305.7	306.8	674.8	1892.3	2567.1	675.5	2081.3	2756.7	1.9425	4.8050	6.7475
162	435.15	650.16	1.105	291.3	292.4	683.5	1885.3	2568.8	684.2	2074.7	2758.9	1.9624	4.7679	6.7303
164	437.15	683.56	1.107	277.8	278.9	692.1	1878.2	2570.4	692.9	2068.1	2761.0	1.9823	4.7309	6.7133
166	439.15	718.31	1.109	265.0	266.1	700.8	1871.1	2571.9	701.6	2061.4	2763.1	2.0022	4.6942	6.6964
168	441.15	754.45	1.112	252.9	254.0	709.5	1863.9	2573.4	710.4	2054.7	2765.1	2.0219	4.6577	6.6796

TABLE E.1 Properties of Saturated Steam (Continued)

t (°C)	T (K)	P (kPa)	SPECIFIC VOLUME V			INTERNAL ENERGY U			ENTHALPY H			ENTROPY S		
			sat. liq.	sat. vap.	evap.	sat. liq.	sat. vap.	evap.	sat. liq.	sat. vap.	evap.	sat. liq.	sat. vap.	evap.
170	443.15	792.02	1.114	242.6	241.4	718.2	1856.7	2574.9	719.1	2047.9	2767.1	2.0416	4.6214	6.6630
172	445.15	831.06	1.117	231.7	230.6	727.0	1849.5	2576.4	727.9	2041.1	2769.0	2.0613	4.5853	6.6465
174	447.15	871.60	1.120	220.3	221.5	735.7	1842.2	2577.8	736.7	2034.2	2770.9	2.0809	4.5493	6.6302
176	449.15	913.68	1.122	210.6	211.7	744.4	1834.8	2579.3	745.5	2027.3	2772.7	2.1004	4.5136	6.6140
178	451.15	957.36	1.125	201.4	202.5	753.2	1827.4	2580.6	754.3	2020.2	2774.5	2.1199	4.4780	6.5979
180	453.15	1002.7	1.128	192.7	193.8	762.0	1820.0	2581.9	763.1	2013.1	2776.3	2.1393	4.4426	6.5819
182	455.15	1049.6	1.130	184.4	185.5	770.8	1812.5	2583.2	772.0	2006.0	2778.0	2.1587	4.4074	6.5660
184	457.15	1098.3	1.133	176.5	177.6	779.6	1804.9	2584.5	780.8	1998.8	2779.6	2.1780	4.3723	6.5503
186	459.15	1148.8	1.136	169.0	170.2	788.4	1797.3	2585.7	789.7	1991.5	2781.2	2.1972	4.3374	6.5346
188	461.15	1201.0	1.139	161.9	163.1	797.2	1789.7	2586.9	798.6	1984.2	2782.8	2.2164	4.3026	6.5191
190	463.15	1255.1	1.142	155.2	156.3	806.1	1782.0	2588.1	807.5	1976.7	2784.3	2.2356	4.2680	6.5036
192	465.15	1311.1	1.144	148.8	149.9	814.9	1774.2	2589.2	816.5	1969.3	2785.7	2.2547	4.2336	6.4883
194	467.15	1369.0	1.147	142.6	143.8	823.8	1766.4	2590.2	825.4	1961.7	2787.1	2.2738	4.1993	6.4730
196	469.15	1428.9	1.150	136.8	138.0	832.7	1758.6	2591.3	834.4	1954.1	2788.4	2.2928	4.1651	6.4578
198	471.15	1490.9	1.153	131.3	132.4	841.6	1750.6	2592.3	843.4	1946.4	2789.7	2.3117	4.1310	6.4428
200	473.15	1554.9	1.156	126.0	127.2	850.6	1742.6	2593.2	852.4	1938.6	2790.9	2.3307	4.0971	6.4278
202	475.15	1621.0	1.160	121.0	122.1	859.5	1734.6	2594.1	861.4	1930.7	2792.1	2.3495	4.0633	6.4128
204	477.15	1689.3	1.163	116.2	117.3	868.5	1726.5	2595.0	870.5	1922.8	2793.2	2.3684	4.0296	6.3980
206	479.15	1759.8	1.166	111.6	112.8	877.5	1718.3	2595.8	879.5	1914.7	2794.3	2.3872	3.9961	6.3832
208	481.15	1832.6	1.169	107.2	108.4	886.5	1710.1	2596.6	888.6	1906.6	2795.3	2.4059	3.9626	6.3686
210	483.15	1907.7	1.173	103.1	104.2	895.5	1701.8	2597.3	897.7	1898.5	2796.2	2.4247	3.9293	6.3539
212	485.15	1985.2	1.176	99.09	100.26	904.5	1693.5	2598.0	906.9	1890.2	2797.1	2.4434	3.8960	6.3394
214	487.15	2065.1	1.179	95.28	96.46	913.6	1685.1	2598.7	916.0	1881.8	2797.9	2.4620	3.8629	6.3249
216	489.15	2147.5	1.183	91.65	92.83	922.7	1676.6	2599.3	925.2	1873.4	2798.6	2.4806	3.8298	6.3104
218	491.15	2232.4	1.186	88.17	89.36	931.8	1668.0	2599.8	934.4	1864.9	2799.3	2.4992	3.7968	6.2960
220	493.15	2319.8	1.190	84.85	86.04	940.9	1659.4	2600.3	943.7	1856.2	2799.9	2.5178	3.7639	6.2817
222	495.15	2409.9	1.194	81.67	82.86	950.1	1650.7	2600.8	952.9	1847.5	2800.5	2.5363	3.7311	6.2674
224	497.15	2502.7	1.197	78.62	79.82	959.2	1642.0	2601.2	962.2	1838.7	2800.9	2.5548	3.6984	6.2532
226	499.15	2598.2	1.201	75.71	76.91	968.4	1633.1	2601.5	971.5	1829.8	2801.4	2.5733	3.6657	6.2390
228	501.15	2696.5	1.205	72.92	74.12	977.6	1624.2	2601.8	980.9	1820.8	2801.7	2.5917	3.6331	6.2249

230	503.15	2797.6	1.209	70.24	71.45	986.9	1615.2	2602.1	990.3	1811.7	2802.0	2.6102	3.6006	6.2107
232	505.15	2901.6	1.213	67.68	68.89	996.2	1606.1	2602.3	999.7	1802.5	2802.2	2.6286	3.5681	6.1967
234	507.15	3008.6	1.217	65.22	66.43	1005.4	1597.0	2602.4	1009.1	1793.2	2802.3	2.6470	3.5356	6.1826
236	509.15	3118.6	1.221	62.86	64.08	1014.8	1587.7	2602.5	1018.6	1783.8	2802.3	2.6653	3.5033	6.1686
238	511.15	3231.7	1.225	60.60	61.82	1024.1	1578.4	2602.5	1028.1	1774.2	2802.3	2.6837	3.4709	6.1546
240	513.15	3347.8	1.229	58.43	59.65	1033.5	1569.0	2602.5	1037.6	1764.6	2802.2	2.7020	3.4386	6.1406
242	515.15	3467.2	1.233	56.34	57.57	1042.9	1559.5	2602.4	1047.2	1754.9	2802.0	2.7203	3.4063	6.1266
244	517.15	3589.8	1.238	54.34	55.58	1052.3	1549.9	2602.2	1056.8	1745.0	2801.8	2.7386	3.3740	6.1127
246	519.15	3715.7	1.242	52.41	53.66	1061.8	1540.2	2602.0	1066.4	1735.0	2801.4	2.7569	3.3418	6.0987
248	521.15	3844.9	1.247	50.56	51.81	1071.3	1530.5	2601.8	1076.1	1724.9	2801.0	2.7752	3.3096	6.0848
250	523.15	3977.6	1.251	48.79	50.04	1080.8	1520.6	2601.4	1085.8	1714.7	2800.4	2.7935	3.2773	6.0708
252	525.15	4113.7	1.256	47.08	48.33	1090.4	1510.6	2601.0	1095.5	1704.3	2799.8	2.8118	3.2451	6.0569
254	527.15	4253.4	1.261	45.43	46.69	1100.0	1500.5	2600.5	1105.3	1693.8	2799.1	2.8300	3.2129	6.0429
256	529.15	4396.7	1.266	43.85	45.11	1109.6	1490.4	2600.0	1115.2	1683.2	2798.3	2.8483	3.1807	6.0290
258	531.15	4543.7	1.271	42.33	43.60	1119.3	1480.1	2599.3	1125.0	1672.4	2797.4	2.8666	3.1484	6.0150
260	533.15	4694.3	1.276	40.86	42.13	1129.0	1469.7	2598.6	1134.9	1661.5	2796.4	2.8848	3.1161	6.0010
262	535.15	4848.8	1.281	39.44	40.73	1138.7	1459.2	2597.8	1144.9	1650.4	2795.3	2.9031	3.0838	5.9869
264	537.15	5007.1	1.286	38.08	39.37	1148.5	1448.5	2597.0	1154.9	1639.2	2794.1	2.9214	3.0515	5.9729
266	539.15	5169.3	1.291	36.77	38.06	1158.3	1437.8	2596.1	1165.0	1627.8	2792.8	2.9397	3.0191	5.9588
268	541.15	5335.5	1.297	35.51	36.80	1168.2	1426.9	2595.0	1175.1	1616.3	2791.4	2.9580	2.9866	5.9446
270	543.15	5505.8	1.303	34.29	35.59	1178.1	1415.9	2593.9	1185.2	1604.6	2789.9	2.9763	2.9541	5.9304
272	545.15	5680.2	1.308	33.11	34.42	1188.0	1404.7	2592.7	1195.4	1592.8	2788.2	2.9947	2.9215	5.9162
274	547.15	5858.7	1.314	31.97	33.29	1198.0	1393.4	2591.4	1205.7	1580.8	2786.5	3.0131	2.8889	5.9019
276	549.15	6041.5	1.320	30.88	32.20	1208.0	1382.0	2590.1	1216.0	1568.5	2784.6	3.0314	2.8561	5.8876
278	551.15	6228.7	1.326	29.82	31.14	1218.1	1370.4	2588.6	1226.4	1556.2	2782.6	3.0499	2.8233	5.8731
280	553.15	6420.2	1.332	28.79	30.13	1228.3	1358.7	2587.0	1236.8	1543.6	2780.4	3.0683	2.7903	5.8586
282	555.15	6616.1	1.339	27.81	29.14	1238.5	1346.8	2585.3	1247.3	1530.8	2778.1	3.0868	2.7573	5.8440
284	557.15	6816.6	1.345	26.85	28.20	1248.7	1334.8	2583.5	1257.9	1517.8	2775.7	3.1053	2.7241	5.8294
286	559.15	7021.8	1.352	25.93	27.28	1259.0	1322.6	2581.6	1268.5	1504.6	2773.2	3.1238	2.6908	5.8146
288	561.15	7231.5	1.359	25.03	26.39	1269.4	1310.2	2579.6	1279.2	1491.2	2770.5	3.1424	2.6573	5.7997
290	563.15	7446.1	1.366	24.17	25.54	1279.8	1297.7	2577.5	1290.0	1477.6	2767.6	3.1611	2.6237	5.7848
292	565.15	7665.4	1.373	23.33	24.71	1290.3	1284.9	2575.3	1300.9	1463.8	2764.6	3.1798	2.5899	5.7697
294	567.15	7889.7	1.381	22.52	23.90	1300.9	1272.0	2572.9	1311.8	1449.7	2761.5	3.1985	2.5560	5.7545
296	569.15	8118.9	1.388	21.74	23.13	1311.5	1258.9	2570.4	1322.8	1435.4	2758.2	3.2173	2.5218	5.7392
298	571.15	8353.2	1.396	20.98	22.38	1322.2	1245.6	2567.8	1333.9	1420.8	2754.7	3.2362	2.4875	5.7237

TABLE E.1 Properties of Saturated Steam (Continued)

t (°C)	T (K)	P (kPa)	SPECIFIC VOLUME V		INTERNAL ENERGY U		ENTHALPY H		ENTROPY S	
			sat. liq.	sat. vap.	sat. liq.	sat. vap.	sat. liq.	sat. vap.	sat. liq.	sat. vap.
300	573.15	8592.7	1.404	20.24	1333.0	1232.0	1345.1	1406.0	3.2552	2.4529
302	575.15	8837.4	1.412	19.53	1343.8	1218.3	1356.3	1390.9	3.2742	2.4182
304	577.15	9087.3	1.421	18.84	1354.8	1204.3	1367.7	1375.5	3.2933	2.3832
306	579.15	9342.7	1.430	18.17	1365.8	1190.1	1379.1	1359.8	3.3125	2.3479
308	581.15	9603.6	1.439	17.52	1376.9	1175.6	1390.7	1343.9	3.3318	2.3124
310	583.15	9870.0	1.448	16.89	1388.1	1161.0	1402.4	1327.6	3.3512	2.2766
312	585.15	10142.1	1.458	16.27	1399.4	1146.0	1414.2	1311.0	3.3707	2.2404
314	587.15	10420.0	1.468	15.68	1410.8	1130.8	1426.1	1294.1	3.3903	2.2040
316	589.15	10703.0	1.478	15.09	1422.3	1115.2	1438.1	1276.8	3.4101	2.1672
318	591.15	10993.4	1.488	14.53	1433.9	1099.4	1450.3	1259.1	3.4300	2.1300
320	593.15	11289.1	1.500	13.98	1445.7	1083.2	1462.6	1241.1	3.4500	2.0923
322	595.15	11591.0	1.511	13.44	1457.5	1066.7	1475.1	1222.6	3.4702	2.0542
324	597.15	11899.2	1.523	12.92	1469.5	1049.9	1487.7	1203.6	3.4906	2.0156
326	599.15	12213.7	1.535	12.41	1481.7	1032.6	1500.4	1184.2	3.5111	1.9764
328	601.15	12534.8	1.548	11.91	1494.0	1014.8	1513.4	1164.2	3.5319	1.9367
330	603.15	12862.5	1.561	11.43	1506.4	996.7	1526.5	1143.6	3.5528	1.8962
332	605.15	13197.0	1.575	10.95	1519.1	978.0	1539.9	1122.5	3.5740	1.8550
334	607.15	13538.3	1.590	10.49	1531.9	958.7	1553.4	1100.7	3.5955	1.8129
336	609.15	13886.7	1.606	10.03	1544.9	938.9	1567.2	1078.1	3.6172	1.7700
338	611.15	14242.3	1.622	9.58	1558.1	918.4	1581.2	1054.8	3.6392	1.7261
340	613.15	14605.2	1.639	9.14	1571.5	897.2	1595.5	1030.7	3.6616	1.6811
342	615.15	14975.5	1.657	8.71	1585.2	875.2	1610.0	1005.7	3.6844	1.6350
344	617.15	15353.5	1.676	8.286	1599.2	852.5	1624.9	979.7	3.7075	1.5877
346	619.15	15739.3	1.696	7.870	1613.5	828.9	1640.2	952.8	3.7311	1.5391
348	621.15	16133.1	1.718	7.461	1628.1	804.5	1655.8	924.8	3.7553	1.4891

350	623.15	16535.1	1.741	7.058	8.799	1643.0	779.2	2422.2	1671.8	895.9	2567.7	3.7801	1.4375	5.2177
352	625.15	16945.5	1.766	6.654	8.420	1659.4	751.5	2410.8	1689.3	864.2	2553.5	3.8071	1.3822	5.1893
354	627.15	17364.4	1.794	6.252	8.045	1676.3	722.4	2398.7	1707.5	830.9	2538.4	3.8349	1.3247	5.1596
356	629.15	17792.2	1.824	5.850	7.674	1693.4	692.2	2385.6	1725.9	796.2	2522.1	3.8629	1.2654	5.1283
358	631.15	18229.0	1.858	5.448	7.306	1710.8	660.5	2371.4	1744.7	759.9	2504.6	3.8915	1.2037	5.0953
360	633.15	18675.1	1.896	5.044	6.940	1728.8	627.1	2355.8	1764.2	721.3	2485.4	3.9210	1.1390	5.0600
361	634.15	18901.7	1.917	4.840	6.757	1738.0	609.5	2347.5	1774.2	701.0	2475.2	3.9362	1.1052	5.0414
362	635.15	19130.7	1.939	4.634	6.573	1747.5	591.2	2338.7	1784.6	679.8	2464.4	3.9518	1.0702	5.0220
363	636.15	19362.1	1.963	4.425	6.388	1757.3	572.1	2329.3	1795.3	657.8	2453.0	3.9679	1.0338	5.0017
364	637.15	19596.1	1.988	4.213	6.201	1767.4	552.0	2319.4	1806.4	634.6	2440.9	3.9846	0.9958	4.9804
365	638.15	19832.6	2.016	3.996	6.012	1778.0	530.8	2308.8	1818.0	610.0	2428.0	4.0021	0.9558	4.9579
366	639.15	20071.6	2.046	3.772	5.819	1789.1	508.2	2297.3	1830.2	583.9	2414.1	4.0205	0.9134	4.9339
367	640.15	20313.2	2.080	3.540	5.621	1801.0	483.8	2284.8	1843.2	555.7	2399.0	4.0401	0.8680	4.9081
368	641.15	20557.5	2.118	3.298	5.416	1813.8	457.3	2271.1	1857.3	525.1	2382.4	4.0613	0.8189	4.8801
369	642.15	20804.4	2.162	3.039	5.201	1827.8	427.9	2255.7	1872.8	491.1	2363.9	4.0846	0.7647	4.8492
370	643.15	21054.0	2.214	2.759	4.973	1843.6	394.5	2238.1	1890.2	452.6	2342.8	4.1108	0.7036	4.8144
371	644.15	21306.4	2.278	2.446	4.723	1862.0	355.3	2217.3	1910.5	407.4	2317.9	4.1414	0.6324	4.7738
372	645.15	21561.6	2.364	2.075	4.439	1884.6	306.6	2191.2	1935.6	351.4	2287.0	4.1794	0.5446	4.7240
373	646.15	21819.7	2.496	1.588	4.084	1916.0	238.9	2154.9	1970.5	273.5	2244.0	4.2325	0.4233	4.6559
374	647.15	22080.5	2.843	0.623	3.466	1983.9	95.7	2079.7	2046.7	109.5	2156.2	4.3493	0.1692	4.5185
374.15	647.30	22120.0	3.170	0.000	3.170	2037.3	0.0	2037.3	2107.4	0.0	2107.4	4.4429	0.0000	4.4429

TABLE E.2 Properties of Superheated Steam

P/kPa ($p_{\text{sat}}/^{\circ}\text{C}$)		TEMPERATURE: $t^{\circ}\text{C}$ (TEMPERATURE: T kelvins)										
		sat. liq.	sat. vap.	75 (348.15)	100 (373.15)	125 (398.15)	150 (423.15)	175 (448.15)	200 (473.15)	225 (498.15)	250 (523.15)	
1 (6.98)	V	1.000	129200.	160640.	172180.	183720.	195270.	206810.	218350.	229890.	241430.	
	U	29.334	2385.2	2480.8	2516.4	2552.3	2588.5	2624.9	2661.7	2698.8	2736.3	
	H	29.335	2514.4	2641.5	2688.6	2736.0	2783.7	2831.7	2880.1	2928.7	2977.7	
	S	0.1060	8.9767	9.3828	9.5136	9.6365	9.7527	9.8629	9.9679	10.0681	10.1641	
10 (45.83)	V	1.010	14670.	16030.	17190.	18350.	19510.	20660.	21820.	22980.	24130.	
	U	191.822	2438.0	2479.7	2515.6	2551.6	2588.0	2624.5	2661.4	2698.6	2736.1	
	H	191.832	2584.8	2640.0	2687.5	2735.2	2783.1	2831.2	2879.6	2928.4	2977.4	
	S	0.6493	8.1511	8.3168	8.4486	8.5722	8.6888	8.7994	8.9045	9.0049	9.1010	
20 (60.09)	V	1.017	7649.8	8000.0	8584.7	9167.1	9748.0	10320.	10900.	11480.	12060.	
	U	251.432	2456.9	2478.4	2514.6	2550.9	2587.4	2624.1	2661.0	2698.3	2735.8	
	H	251.453	2609.9	2638.4	2686.3	2734.2	2782.3	2830.6	2879.2	2928.0	2977.1	
	S	0.8321	7.9094	7.9933	8.1261	8.2504	8.3676	8.4785	8.5839	8.6844	8.7806	
30 (69.12)	V	1.022	5229.3	5322.0	5714.4	6104.6	6493.2	6880.8	7267.5	7653.8	8039.7	
	U	289.271	2468.6	2477.1	2513.6	2550.2	2586.8	2623.6	2660.7	2698.0	2735.6	
	H	289.302	2625.4	2636.8	2685.1	2733.3	2781.6	2830.0	2878.7	2927.6	2976.8	
	S	0.9441	7.7695	7.8024	7.9363	8.0614	8.1791	8.2903	8.3960	8.4967	8.5930	
40 (75.89)	V	1.027	3993.4	.....	4279.2	4573.3	4865.8	5157.2	5447.8	5738.0	6027.7	
	U	317.609	2477.1	.....	2512.6	2549.4	2586.2	2623.2	2660.3	2697.7	2735.4	
	H	317.650	2636.9	.....	2683.8	2732.3	2780.9	2829.5	2878.2	2927.2	2976.5	
	S	1.0261	7.6709	.....	7.8009	7.9268	8.0450	8.1566	8.2624	8.3633	8.4598	
50 (81.35)	V	1.030	3240.2	.....	3418.1	3654.5	3889.3	4123.0	4356.0	4588.5	4820.5	
	U	340.513	2484.0	.....	2511.7	2548.6	2585.6	2622.7	2659.9	2697.4	2735.1	
	H	340.564	2646.0	.....	2682.6	2731.4	2780.1	2828.9	2877.7	2926.8	2976.1	
	S	1.0912	7.5947	.....	7.6953	7.8219	7.9406	8.0526	8.1587	8.2598	8.3564	
75 (91.79)	V	1.037	2216.9	.....	2269.8	2429.4	2587.3	2744.2	2900.2	3055.8	3210.9	
	U	384.374	2496.7	.....	2509.2	2546.7	2584.2	2621.6	2659.0	2696.7	2734.5	
	H	384.451	2663.0	.....	2679.4	2728.9	2778.2	2827.4	2876.6	2925.8	2975.3	
	S	1.2131	7.4570	.....	7.5014	7.6300	7.7500	7.8629	7.9697	8.0712	8.1681	
100 (99.63)	V	1.043	1693.7	.....	1695.5	1816.7	1936.3	2054.7	2172.3	2289.4	2406.1	
	U	417.406	2506.1	.....	2506.6	2544.8	2582.7	2620.4	2658.1	2695.9	2733.9	
	H	417.511	2675.4	.....	2676.2	2726.5	2776.3	2825.9	2875.4	2924.9	2974.5	
	S	1.3027	7.3598	.....	7.3618	7.4923	7.6137	7.7275	7.8349	7.9369	8.0342	

101.325	V	1.044	1673.0	.....	1673.0	1792.7	1910.7	2027.7	2143.8	2259.3	2374.5
(100.00)	U	418.959	2506.5	.....	2506.5	2544.7	2582.6	2620.4	2658.1	2695.9	2733.9
	H	419.064	2676.0	.....	2676.0	2726.4	2776.2	2825.8	2875.3	2924.8	2974.5
	S	1.3069	7.3554	.....	7.3554	7.4860	7.6075	7.7213	7.8288	7.9308	8.0280
125	V	1.049	1374.6	.....	.....	1449.1	1545.6	1641.0	1735.6	1829.6	1923.2
(105.99)	U	444.224	2513.4	.....	.....	2542.9	2581.2	2619.3	2657.2	2695.2	2733.3
	H	444.356	2685.2	.....	.....	2724.0	2774.4	2824.4	2874.2	2923.9	2973.7
	S	1.3740	7.2847	.....	.....	7.3844	7.5072	7.6219	7.7300	7.8324	7.9300
150	V	1.053	1159.0	.....	.....	1204.0	1285.2	1365.2	1444.4	1523.0	1601.3
(111.37)	U	466.968	2519.5	.....	.....	2540.9	2579.7	2618.1	2656.3	2694.4	2732.7
	H	467.126	2693.4	.....	.....	2721.5	2772.5	2822.9	2872.9	2922.9	2972.9
	S	1.4336	7.2234	.....	.....	7.2953	7.4194	7.5352	7.6439	7.7468	7.8447
175	V	1.057	1003.34	.....	.....	1028.8	1099.1	1168.2	1236.4	1304.1	1371.3
(116.06)	U	486.815	2524.7	.....	.....	2538.9	2578.2	2616.9	2655.3	2693.7	2732.1
	H	487.000	2700.3	.....	.....	2719.0	2770.5	2821.3	2871.7	2921.9	2972.0
	S	1.4849	7.1716	.....	.....	7.2191	7.3447	7.4614	7.5708	7.6741	7.7724
200	V	1.061	885.44	.....	.....	897.47	959.54	1020.4	1080.4	1139.8	1198.9
(120.23)	U	504.489	2529.2	.....	.....	2536.9	2576.6	2615.7	2654.4	2692.9	2731.4
	H	504.701	2706.3	.....	.....	2716.4	2768.5	2819.8	2870.5	2920.9	2971.2
	S	1.5301	7.1268	.....	.....	7.1523	7.2794	7.3971	7.5072	7.6110	7.7096
225	V	1.064	792.97	.....	.....	795.25	850.97	905.44	959.06	1012.1	1064.7
(123.99)	U	520.465	2533.2	.....	.....	2534.8	2575.1	2614.5	2653.5	2692.2	2730.8
	H	520.705	2711.6	.....	.....	2713.8	2766.5	2818.2	2869.3	2919.9	2970.4
	S	1.5705	7.0873	.....	.....	7.0928	7.2213	7.3400	7.4508	7.5551	7.6540
250	V	1.068	718.44	.....	.....	.....	764.09	813.47	861.98	909.91	957.41
(127.43)	U	535.077	2536.8	.....	.....	.....	2573.5	2613.3	2652.5	2691.4	2730.2
	H	535.343	2716.4	.....	.....	.....	2764.5	2816.7	2868.0	2918.9	2969.6
	S	1.6071	7.0520	.....	.....	.....	7.1689	7.2886	7.4001	7.5050	7.6042
275	V	1.071	657.04	.....	.....	.....	693.00	738.21	782.55	826.29	869.61
(130.60)	U	548.564	2540.0	.....	.....	.....	2571.9	2612.1	2651.6	2690.7	2729.6
	H	548.858	2720.7	.....	.....	.....	2762.5	2815.1	2866.8	2917.9	2968.7
	S	1.6407	7.0201	.....	.....	.....	7.1211	7.2419	7.3541	7.4594	7.5590
300	V	1.073	605.56	.....	.....	.....	633.74	675.49	716.35	756.60	796.44
(133.54)	U	561.107	2543.0	.....	.....	.....	2570.3	2610.8	2650.6	2689.9	2729.0
	H	561.429	2724.7	.....	.....	.....	2760.4	2813.5	2865.5	2916.9	2967.9
	S	1.6716	6.9909	.....	.....	.....	7.0771	7.1990	7.3119	7.4177	7.5176

TABLE E.2 Properties of Superheated Steam (Continued)

		TEMPERATURE: $t^{\circ}\text{C}$ (TEMPERATURE: T kelvins)											
P/kPa ($p^{\text{sat}}/^{\circ}\text{C}$)		sat. liq.	sat. vap.	300 (573.15)	350 (623.15)	400 (673.15)	450 (723.15)	500 (773.15)	550 (823.15)	600 (873.15)	650 (923.15)		
1 (6.98)	V	1.000	129200	264500	287580	310660	333730	356810	379880	402960	426040		
	U	29.334	2385.2	2812.3	2889.9	2969.1	3049.9	3132.4	3216.7	3302.6	3390.3		
	H	29.335	2514.4	3076.8	3177.5	3279.7	3383.6	3489.2	3596.5	3705.6	3816.4		
	S	0.1060	8.9767	10.3450	10.5133	10.6711	10.8200	10.9612	11.0957	11.2243	11.3476		
10 (45.83)	V	1.010	14670	26440	28750	31060	33370	35670	37980	40290	42600		
	U	191.822	2438.0	2812.2	2889.8	2969.0	3049.8	3132.3	3216.6	3302.6	3390.3		
	H	191.832	2584.8	3076.6	3177.3	3279.6	3383.5	3489.1	3596.5	3705.5	3816.3		
	S	0.6493	8.1511	9.2820	9.4504	9.6083	9.7572	9.8984	10.0329	10.1616	10.2849		
20 (60.09)	V	1.017	7649.8	13210	14370	15520	16680	17830	18990	20140	21300		
	U	251.432	2456.9	2812.0	2889.6	2968.9	3049.7	3132.3	3216.5	3302.5	3390.2		
	H	251.453	2609.9	3076.4	3177.1	3279.4	3383.4	3489.0	3596.4	3705.4	3816.2		
	S	0.8321	7.9094	8.9618	9.1303	9.2882	9.4372	9.5784	9.7130	9.8416	9.9650		
30 (69.12)	V	1.022	5229.3	8810.8	9581.2	10350	11120	11890	12660	13430	14190		
	U	289.271	2468.6	2811.8	2889.5	2968.7	3049.6	3132.2	3216.5	3302.5	3390.2		
	H	289.302	2625.4	3076.1	3176.9	3279.3	3383.3	3488.9	3596.3	3705.4	3816.2		
	S	0.9441	7.7695	8.7744	8.9430	9.1010	9.2499	9.3912	9.5257	9.6544	9.7778		
40 (75.89)	V	1.027	3993.4	6606.5	7184.6	7762.5	8340.1	8917.6	9494.9	10070	10640		
	U	317.609	2477.1	2811.6	2889.4	2968.6	3049.5	3132.1	3216.4	3302.4	3390.1		
	H	317.650	2636.9	3075.9	3176.8	3279.1	3383.1	3488.8	3596.2	3705.3	3816.1		
	S	1.0261	7.6709	8.6413	8.8100	8.9680	9.1170	9.2583	9.3929	9.5216	9.6450		
50 (81.35)	V	1.030	3240.2	5283.9	5746.7	6209.1	6671.4	7133.5	7595.5	8057.4	8519.2		
	U	340.513	2484.0	2811.5	2889.2	2968.5	3049.4	3132.0	3216.3	3302.3	3390.1		
	H	340.564	2646.0	3075.7	3176.6	3279.0	3383.0	3488.7	3596.1	3705.2	3816.0		
	S	1.0912	7.5947	8.5380	8.7068	8.8649	9.0139	9.1552	9.2898	9.4185	9.5419		
75 (91.79)	V	1.037	2216.9	3520.5	3829.4	4138.0	4446.4	4754.7	5062.8	5370.9	5678.9		
	U	384.374	2496.7	2811.0	2888.9	2968.2	3049.2	3131.8	3216.1	3302.2	3389.9		
	H	384.451	2663.0	3075.1	3176.1	3278.6	3382.7	3488.4	3595.8	3705.0	3815.9		
	S	1.2131	7.4570	8.3502	8.5191	8.6773	8.8265	8.9678	9.1025	9.2312	9.3546		
100 (99.63)	V	1.043	1693.7	2638.7	2870.8	3102.5	3334.0	3565.3	3796.5	4027.7	4258.8		
	U	417.406	2506.1	2810.6	2888.6	2968.0	3049.0	3131.6	3216.0	3302.0	3389.8		
	H	417.511	2675.4	3074.5	3175.6	3278.2	3382.4	3488.1	3595.6	3704.8	3815.7		
	S	1.3027	7.3598	8.2166	8.3858	8.5442	8.6934	8.8348	8.9695	9.0982	9.2217		

V	1.044	1673.0	2604.2	2833.2	3061.9	3290.3	3518.7	3746.9	3975.0	4203.1
U	418.959	2506.5	2810.6	2888.5	2968.0	3048.9	3131.6	3215.9	3302.0	3389.8
H	419.064	2676.0	3074.4	3175.6	3278.2	3382.3	3488.1	3595.6	3704.8	3815.7
S	1.3069	7.3554	8.2105	8.3797	8.5381	8.6873	8.8287	8.9634	9.0922	9.2156
V	1.049	1374.6	2109.7	2295.6	2481.2	2666.5	2851.7	3036.8	3221.8	3406.7
U	444.224	2513.4	2810.2	2888.2	2967.7	3048.7	3131.4	3215.8	3301.9	3389.7
H	444.356	2685.2	3073.9	3175.2	3277.8	3382.0	3487.9	3595.4	3704.6	3815.5
S	1.3740	7.2847	8.1129	8.2823	8.4408	8.5901	8.7316	8.8663	8.9951	9.1186
V	1.053	1159.0	1757.0	1912.2	2066.9	2221.5	2375.9	2530.2	2684.5	2838.6
U	466.968	2519.5	2809.7	2887.9	2967.4	3048.5	3131.2	3215.6	3301.7	3389.5
H	467.126	2693.4	3073.3	3174.7	3277.5	3381.7	3487.6	3595.1	3704.4	3815.3
S	1.4336	7.2234	8.0280	8.1976	8.3562	8.5056	8.6472	8.7819	8.9108	9.0343
V	1.057	1003.34	1505.1	1638.3	1771.1	1903.7	2036.1	2168.4	2300.7	2432.9
U	486.815	2524.7	2809.3	2887.5	2967.1	3048.3	3131.0	3215.4	3301.6	3389.4
H	487.000	2700.3	3072.7	3174.2	3277.1	3381.4	3487.3	3594.9	3704.2	3815.1
S	1.4849	7.1716	7.9561	8.1259	8.2847	8.4341	8.5758	8.7106	8.8394	8.9630
V	1.061	885.44	1316.2	1432.8	1549.2	1665.3	1781.2	1897.1	2012.9	2128.6
U	504.489	2529.2	2808.8	2887.2	2966.9	3048.0	3130.8	3215.3	3301.4	3389.2
H	504.701	2706.3	3072.1	3173.8	3276.7	3381.1	3487.0	3594.7	3704.0	3815.0
S	1.5301	7.1268	7.8937	8.0638	8.2226	8.3722	8.5139	8.6487	8.7776	8.9012
V	1.064	792.97	1169.2	1273.1	1376.6	1479.9	1583.0	1686.0	1789.0	1891.9
U	520.465	2533.2	2808.4	2886.9	2966.6	3047.8	3130.6	3215.1	3301.2	3389.1
H	520.705	2711.6	3071.5	3173.3	3276.3	3380.8	3486.8	3594.4	3703.8	3814.8
S	1.5705	7.0873	7.8385	8.0088	8.1679	8.3175	8.4593	8.5942	8.7231	8.8467
V	1.068	718.44	1051.6	1145.2	1238.5	1331.5	1424.4	1517.2	1609.9	1702.5
U	535.077	2536.8	2808.0	2886.5	2966.3	3047.6	3130.4	3214.9	3301.1	3389.0
H	535.343	2716.4	3070.9	3172.8	3275.9	3380.4	3486.5	3594.2	3703.6	3814.6
S	1.6071	7.0520	7.7891	7.9597	8.1188	8.2686	8.4104	8.5453	8.6743	8.7980
V	1.071	657.04	955.45	1040.7	1125.5	1210.2	1294.7	1379.0	1463.3	1547.6
U	548.564	2540.0	2807.5	2886.2	2966.0	3047.3	3130.2	3214.7	3300.9	3388.8
H	548.858	2720.7	3070.3	3172.4	3275.5	3380.1	3486.2	3594.0	3703.4	3814.4
S	1.6407	7.0201	7.7444	7.9151	8.0744	8.2243	8.3661	8.5011	8.6301	8.7538
V	1.073	605.56	875.29	953.52	1031.4	1109.0	1186.5	1263.9	1341.2	1418.5
U	561.107	2543.0	2807.1	2885.8	2965.8	3047.1	3130.0	3214.5	3300.8	3388.7
H	561.429	2724.7	3069.7	3171.9	3275.2	3379.8	3486.0	3593.7	3703.2	3814.2
S	1.6716	6.9909	7.7034	7.8744	8.0338	8.1838	8.3257	8.4608	8.5898	8.7135

TABLE E.2 Properties of Superheated Steam (Continued)

		TEMPERATURE: $t^{\circ}\text{C}$ (TEMPERATURE: T kelvins)										
		150 (423.15)	175 (448.15)	200 (473.15)	220 (493.15)	240 (513.15)	260 (533.15)	280 (553.15)	300 (573.15)			
P/kPa ($t^{\text{sat}}/^{\circ}\text{C}$)		sat. vap.										
325 (136.29)	V	1.076	561.75	583.58	622.41	660.33	690.22	719.81	749.18	778.39	807.47	
	U	572.847	2545.7	2568.7	2609.6	2649.6	2681.2	2712.7	2744.0	2775.3	2806.6	
	H	573.197	2728.3	2758.4	2811.9	2864.2	2905.6	2946.6	2987.5	3028.2	3069.0	
	S	1.7004	6.9640	7.0363	7.1592	7.2729	7.3585	7.4400	7.5181	7.5933	7.6657	
350 (138.87)	V	1.079	524.00	540.58	576.90	612.31	640.18	667.75	695.09	722.27	749.33	
	U	583.892	2548.2	2567.1	2608.3	2648.6	2680.4	2712.0	2743.4	2774.8	2806.2	
	H	584.270	2731.6	2756.3	2810.3	2863.0	2904.5	2945.7	2986.7	3027.6	3068.4	
	S	1.7273	6.9392	6.9982	7.1222	7.2366	7.3226	7.4045	7.4828	7.5581	7.6307	
375 (141.31)	V	1.081	491.13	503.29	537.46	570.69	596.81	622.62	648.22	673.64	698.94	
	U	594.332	2550.6	2565.4	2607.1	2647.7	2679.6	2711.3	2742.8	2774.3	2805.7	
	H	594.737	2734.7	2754.1	2808.6	2861.7	2903.4	2944.8	2985.9	3026.9	3067.8	
	S	1.7526	6.9160	6.9624	7.0875	7.2027	7.2891	7.3713	7.4499	7.5254	7.5981	
400 (143.62)	V	1.084	462.22	470.66	502.93	534.26	558.85	583.14	607.20	631.09	654.85	
	U	604.237	2552.7	2563.7	2605.8	2646.7	2678.8	2710.6	2742.2	2773.7	2805.3	
	H	604.670	2737.6	2752.0	2807.0	2860.4	2902.3	2943.9	2985.1	3026.2	3067.2	
	S	1.7764	6.8943	6.9285	7.0548	7.1708	7.2576	7.3402	7.4190	7.4947	7.5675	
425 (145.82)	V	1.086	436.61	441.85	472.47	502.12	525.36	548.30	571.01	593.54	615.95	
	U	613.667	2554.8	2562.0	2604.5	2645.7	2678.0	2709.9	2741.6	2773.2	2804.8	
	H	614.128	2740.3	2749.8	2805.3	2859.1	2901.2	2942.9	2984.3	3025.5	3066.6	
	S	1.7990	6.8739	6.8965	7.0239	7.1407	7.2280	7.3108	7.3899	7.4657	7.5388	
450 (147.92)	V	1.088	413.75	416.24	445.38	473.55	495.59	517.33	538.83	560.17	581.37	
	U	622.672	2556.7	2560.3	2603.2	2644.7	2677.1	2709.2	2741.0	2772.7	2804.4	
	H	623.162	2742.9	2747.7	2803.7	2857.8	2900.2	2942.0	2983.5	3024.8	3066.0	
	S	1.8204	6.8547	6.8660	6.9946	7.1121	7.1999	7.2831	7.3624	7.4384	7.5116	
475 (149.92)	V	1.091	393.22	393.31	421.14	447.97	468.95	489.62	510.05	530.30	550.43	
	U	631.294	2558.5	2558.6	2601.9	2643.7	2676.3	2708.5	2740.4	2772.2	2803.9	
	H	631.812	2745.3	2745.5	2802.0	2856.5	2899.1	2941.1	2982.7	3024.1	3065.4	
	S	1.8408	6.8365	6.8369	6.9667	7.0850	7.1732	7.2567	7.3363	7.4125	7.4858	
500 (151.84)	V	1.093	374.68	.....	399.31	424.96	444.97	464.67	484.14	503.43	522.58	
	U	639.569	2560.2	.....	2600.6	2642.7	2675.5	2707.8	2739.8	2771.7	2803.5	
	H	640.116	2747.5	.....	2800.3	2855.1	2898.0	2940.1	2981.9	3023.4	3064.8	
	S	1.8604	6.8192	.....	6.9400	7.0592	7.1478	7.2317	7.3115	7.3879	7.4614	

V	1.095	357.84	.....	379.56	404.13	423.28	442.11	460.70	479.11	497.38
525	U	647.528	2561.8	2599.3	2641.6	2674.6	2707.1	2739.2	2771.2	2803.0
(153.69)	H	648.103	2749.7	2798.6	2853.8	2896.8	2939.2	2981.1	3022.7	3064.1
	S	1.8790	6.8027	6.9145	7.0345	7.1236	7.2078	7.2879	7.3645	7.4381
V	1.097	342.48	.....	361.60	385.19	403.55	421.59	439.38	457.00	474.48
550	U	655.199	2563.3	2598.0	2640.6	2673.8	2706.4	2738.6	2770.6	2802.6
(155.47)	H	655.802	27517	2796.8	2852.5	2895.7	2938.3	2980.3	3022.0	3063.5
	S	1.8970	6.7870	6.8900	7.0108	7.1004	7.1849	7.2653	7.3421	7.4158
V	1.099	328.41	.....	345.20	367.90	385.54	402.85	419.92	436.81	453.56
575	U	662.603	2564.8	2596.6	2639.6	2672.9	2705.7	2738.0	2770.1	2802.1
(157.18)	H	663.235	2753.6	2795.1	2851.1	2894.6	2937.3	2979.5	3021.3	3062.9
	S	1.9142	6.7720	6.8664	6.9880	7.0781	7.1630	7.2436	7.3206	7.3945
V	1.101	315.47	.....	330.16	352.04	369.03	385.68	402.08	418.31	434.39
600	U	669.762	2566.2	2595.3	2638.5	2672.1	2705.0	2737.4	2769.6	2801.6
(158.84)	H	670.423	2755.5	2793.3	2849.7	2893.5	2936.4	2978.7	3020.6	3062.3
	S	1.9308	6.7575	6.8437	6.9662	7.0567	7.1419	7.2228	7.3000	7.3740
V	1.103	303.54	.....	316.31	337.45	353.83	369.87	385.67	401.28	416.75
625	U	676.695	2567.5	2593.9	2637.5	2671.2	2704.2	2736.8	2769.1	2801.2
(160.44)	H	677.384	2757.2	2791.6	2848.4	2892.3	2935.4	2977.8	3019.9	3061.7
	S	1.9469	6.7437	6.8217	6.9451	7.0361	7.1217	7.2028	7.2802	7.3544
V	1.105	292.49	.....	303.53	323.98	339.80	355.29	370.52	385.56	400.47
650	U	683.417	2568.7	2592.5	2636.4	2670.3	2703.5	2736.2	2768.5	2800.7
(161.99)	H	684.135	2758.9	2789.8	2847.0	2891.2	2934.4	2977.0	3019.2	3061.0
	S	1.9623	6.7304	6.8004	6.9247	7.0162	7.1021	7.1835	7.2611	7.3355
V	1.106	282.23	.....	291.69	311.51	326.81	341.78	356.49	371.01	385.39
675	U	689.943	2570.0	2591.1	2635.4	2669.5	2702.8	2735.6	2768.0	2800.3
(163.49)	H	690.689	2760.5	2788.0	2845.6	2890.1	2933.5	2976.2	3018.5	3060.4
	S	1.9773	6.7176	6.7798	6.9050	6.9970	7.0833	7.1650	7.2428	7.3173
V	1.108	272.68	.....	280.69	299.92	314.75	329.23	343.46	357.50	371.39
700	U	696.285	2571.1	2589.7	2634.3	2668.6	2702.1	2735.0	2767.5	2799.8
(164.96)	H	697.061	2762.0	2786.2	2844.2	2888.9	2932.5	2975.4	3017.7	3059.8
	S	1.9918	6.7052	6.7598	6.8859	6.9784	7.0651	7.1470	7.2250	7.2997
V	1.110	263.77	.....	270.45	289.13	303.51	317.55	331.33	344.92	358.36
725	U	702.457	2572.2	2588.3	2633.2	2667.7	2701.3	2734.3	2767.0	2799.3
(166.38)	H	703.261	2763.4	2784.4	2842.8	2887.7	2931.5	2974.6	3017.0	3059.1
	S	2.0059	6.6932	6.7404	6.8673	6.9604	7.0474	7.1296	7.2078	7.2827

TABLE E.2 Properties of Superheated Steam (Continued)

P/kPa ($\mu\text{sat}/^\circ\text{C}$)		sat. liq.	sat. vap.	TEMPERATURE: $t/^\circ\text{C}$ (TEMPERATURE: T kelvins)											
				325 (598.15)	350 (623.15)	400 (673.15)	450 (723.15)	500 (773.15)	550 (823.15)	600 (873.15)	650 (923.15)				
325 (136.29)	V	1.076	561.75	843.68	879.78	951.73	1023.5	1095.0	1166.5	1237.9	1309.2				
	U	572.847	2545.7	2845.9	2885.5	2965.5	3046.9	3129.8	3214.4	3300.6	3388.6				
	H	573.197	2728.3	3120.1	3171.4	3274.8	3379.5	3485.7	3593.5	3702.9	3814.1				
	S	1.7004	6.9640	7.7530	7.8369	7.9965	8.1465	8.2885	8.4236	8.5527	8.6764				
350 (138.87)	V	1.079	524.00	783.01	816.57	883.45	950.11	1016.6	1083.0	1149.3	1215.6				
	U	583.892	2548.2	2845.6	2885.1	2965.2	3046.6	3129.6	3214.2	3300.5	3388.4				
	H	584.270	2731.6	3119.6	3170.9	3274.4	3379.2	3485.4	3593.3	3702.7	3813.9				
	S	1.7273	6.9392	7.7181	7.8022	7.9619	8.1120	8.2540	8.3892	8.5183	8.6421				
375 (141.31)	V	1.081	491.13	730.42	761.79	824.28	886.54	948.66	1010.7	1072.6	1134.5				
	U	594.332	2550.6	2845.2	2884.8	2964.9	3046.4	3129.4	3214.0	3300.3	3388.3				
	H	594.737	2734.7	3119.1	3170.5	3274.0	3378.8	3485.1	3593.0	3702.5	3813.7				
	S	1.7526	6.9160	7.6856	7.7698	7.9296	8.0798	8.2219	8.3571	8.4863	8.6101				
400 (143.62)	V	1.084	462.22	684.41	713.85	772.50	830.92	889.19	947.35	1005.4	1063.4				
	U	604.237	2552.7	2844.8	2884.5	2964.6	3046.2	3129.2	3213.8	3300.2	3388.2				
	H	604.670	2737.6	3118.5	3170.0	3273.6	3378.5	3484.9	3592.8	3702.3	3813.5				
	S	1.7764	6.8943	7.6552	7.7395	7.8994	8.0497	8.1919	8.3271	8.4563	8.5802				
425 (145.82)	V	1.086	436.61	643.81	671.56	726.81	781.84	836.72	891.49	946.17	1000.8				
	U	613.667	2554.8	2844.4	2884.1	2964.4	3045.9	3129.0	3213.7	3300.0	3388.0				
	H	614.128	2740.3	3118.0	3169.5	3273.3	3378.2	3484.6	3592.5	3702.1	3813.4				
	S	1.7990	6.8739	7.6265	7.7109	7.8710	8.0214	8.1636	8.2989	8.4282	8.5520				
450 (147.92)	V	1.088	413.75	607.73	633.97	686.20	738.21	790.07	841.83	893.50	945.10				
	U	622.672	2556.7	2844.0	2883.8	2964.1	3045.7	3128.8	3213.5	3299.8	3387.9				
	H	623.162	2742.9	3117.5	3169.1	3272.9	3377.9	3484.3	3592.3	3701.9	3813.2				
	S	1.8204	6.8547	7.5995	7.6840	7.8442	7.9947	8.1370	8.2723	8.4016	8.5255				
475 (149.92)	V	1.091	393.22	575.44	600.33	649.87	699.18	748.34	797.40	846.37	895.27				
	U	631.294	2558.5	2843.6	2883.4	2963.8	3045.4	3128.6	3213.3	3299.7	3387.7				
	H	631.812	2745.3	3116.9	3168.6	3272.5	3377.6	3484.0	3592.1	3701.7	3813.0				
	S	1.8408	6.8365	7.5739	7.6585	7.8189	7.9694	8.1118	8.2472	8.3765	8.5004				
500 (151.84)	V	1.093	374.68	546.38	570.05	617.16	664.05	710.78	757.41	803.95	850.42				
	U	639.569	2560.2	2843.2	2883.1	2963.5	3045.2	3128.4	3213.1	3299.5	3387.6				
	H	640.116	2747.5	3116.4	3168.1	3272.1	3377.2	3483.8	3591.8	3701.5	3812.8				
	S	1.8604	6.8192	7.5496	7.6343	7.7948	7.9454	8.0879	8.2233	8.3526	8.4766				

V	1.095	357.84	520.08	542.66	587.58	632.26	676.80	721.23	765.57	809.85
U	647.528	2561.8	2842.8	2882.7	2963.2	3045.0	3128.2	3213.0	3299.4	3387.5
H	648.103	2749.7	3115.9	3167.6	3271.7	3376.9	3483.5	3591.6	3701.3	3812.6
S	1.8790	6.8027	7.5264	7.6112	7.7719	7.9226	8.0651	8.2006	8.3299	8.4539
V	1.097	342.48	496.18	517.76	560.68	603.37	645.91	688.34	730.68	772.96
U	655.199	2563.3	2842.4	2882.4	2963.0	3044.7	3128.0	3212.8	3299.2	3387.3
H	655.802	2751.7	3115.3	3167.2	3271.3	3376.6	3483.2	3591.4	3701.1	3812.5
S	1.8970	6.7870	7.5043	7.5892	7.7500	7.9008	8.0433	8.1789	8.3083	8.4323
V	1.099	328.41	474.36	495.03	536.12	576.98	617.70	658.30	698.83	739.28
U	662.603	2564.8	2842.0	2882.1	2962.7	3044.5	3127.8	3212.6	3299.1	3387.2
H	663.235	2753.6	3114.8	3166.7	3271.0	3376.3	3482.9	3591.1	3700.9	3812.3
S	1.9142	6.7720	7.4831	7.5681	7.7290	7.8799	8.0226	8.1581	8.2876	8.4116
V	1.101	315.47	454.35	474.19	513.61	552.80	591.84	630.78	669.63	708.41
U	669.762	2566.2	2841.6	2881.7	2962.4	3044.3	3127.6	3212.4	3298.9	3387.1
H	670.423	2755.5	3114.3	3166.2	3270.6	3376.0	3482.7	3590.9	3700.7	3812.1
S	1.9308	6.7575	7.4628	7.5479	7.7090	7.8600	8.0027	8.1383	8.2678	8.3919
V	1.103	303.54	435.94	455.01	492.89	530.55	568.05	605.45	642.76	680.01
U	676.695	2567.5	2841.2	2881.4	2962.1	3044.0	3127.4	3212.2	3298.8	3386.9
H	677.384	2757.2	3113.7	3165.7	3270.2	3375.6	3482.4	3590.7	3700.5	3811.9
S	1.9469	6.7437	7.4433	7.5285	7.6897	7.8408	7.9836	8.1192	8.2488	8.3729
V	1.105	292.49	418.95	437.31	473.78	510.01	546.10	582.07	617.96	653.79
U	683.417	2568.7	2840.9	2881.0	2961.8	3043.8	3127.2	3212.1	3298.6	3386.8
H	684.135	2758.9	3113.2	3165.3	3269.8	3375.3	3482.1	3590.4	3700.3	3811.8
S	1.9623	6.7304	7.4245	7.5099	7.6712	7.8224	7.9652	8.1009	8.2305	8.3546
V	1.106	282.23	403.22	420.92	456.07	491.00	525.77	560.43	595.00	629.51
U	689.943	2570.0	2840.5	2880.7	2961.6	3043.6	3127.0	3211.9	3298.5	3386.7
H	690.689	2760.5	3112.6	3164.8	3269.4	3375.0	3481.8	3590.2	3700.1	3811.6
S	1.9773	6.7176	7.4064	7.4919	7.6534	7.8046	7.9475	8.0833	8.2129	8.3371
V	1.108	272.68	388.61	405.71	439.64	473.34	506.89	540.33	573.68	606.97
U	696.285	2571.1	2840.1	2880.3	2961.3	3043.3	3126.8	3211.7	3298.3	3386.5
H	697.061	2762.0	3112.1	3164.3	3269.0	3374.7	3481.6	3589.9	3699.9	3811.4
S	1.9918	6.7052	7.3890	7.4745	7.6362	7.7875	7.9305	8.0663	8.1959	8.3201
V	1.110	263.77	375.01	391.54	424.33	456.90	489.31	521.61	553.83	585.99
U	702.457	2572.2	2839.7	2880.0	2961.0	3043.1	3126.6	3211.5	3298.1	3386.4
H	703.261	2763.4	3111.5	3163.8	3268.7	3374.3	3481.3	3589.7	3699.7	3811.2
S	2.0059	6.6932	7.3721	7.4578	7.6196	7.7710	7.9140	8.0499	8.1796	8.3038

TABLE E.2 Properties of Superheated Steam (Continued)

P/kPa ($t^{\text{sat}}/^{\circ}\text{C}$)		sat. liq.	sat. vap.	TEMPERATURE: $t^{\circ}\text{C}$ (TEMPERATURE: T kelvins)									
				175 (448.15)	200 (473.15)	220 (493.15)	240 (513.15)	260 (533.15)	280 (553.15)	300 (573.15)	325 (598.15)		
750 (167.76)	V	1.112	255.43	260.88	279.05	293.03	306.65	320.01	333.17	346.19	362.32		
	U	708.467	2573.3	2586.9	2632.1	2666.8	2700.6	2733.7	2766.4	2798.9	2839.3		
	H	709.301	2764.8	2782.5	2841.4	2886.6	2930.6	2973.7	3016.3	3058.5	3111.0		
	S	2.0195	6.6817	6.7215	6.8494	6.9429	7.0303	7.1128	7.1912	7.2662	7.3558		
775 (169.10)	V	1.113	247.61	251.93	269.63	283.22	296.45	309.41	322.19	334.81	350.44		
	U	714.326	2574.3	2585.4	2631.0	2665.9	2699.8	2733.1	2765.9	2798.4	2838.9		
	H	715.189	2766.2	2780.7	2840.0	2885.4	2929.6	2972.9	3015.6	3057.9	3110.5		
	S	2.0328	6.6705	6.7031	6.8319	6.9259	7.0137	7.0965	7.1751	7.2502	7.3400		
800 (170.41)	V	1.115	240.26	243.53	260.79	274.02	286.88	299.48	311.89	324.14	339.31		
	U	720.043	2575.3	2584.0	2629.9	2665.0	2699.1	2732.5	2765.4	2797.9	2838.5		
	H	720.935	2767.5	2778.8	2838.6	2884.2	2928.6	2972.1	3014.9	3057.3	3109.9		
	S	2.0457	6.6596	6.6851	6.8148	6.9094	6.9976	7.0807	7.1595	7.2348	7.3247		
825 (171.69)	V	1.117	233.34	235.64	252.48	265.37	277.90	290.15	302.21	314.12	328.85		
	U	725.625	2576.2	2582.5	2628.8	2664.1	2698.4	2731.8	2764.8	2797.5	2838.1		
	H	726.547	2768.7	2776.9	2837.1	2883.1	2927.6	2971.2	3014.1	3056.6	3109.4		
	S	2.0583	6.6491	6.6675	6.7982	6.8933	6.9819	7.0653	7.1443	7.2197	7.3098		
850 (172.94)	V	1.118	226.81	228.21	244.66	257.24	269.44	281.37	293.10	304.68	319.00		
	U	731.080	2577.1	2581.1	2627.7	2663.2	2697.6	2731.2	2764.3	2797.0	2837.7		
	H	732.031	2769.9	2775.1	2835.7	2881.9	2926.6	2970.4	3013.4	3056.0	3108.8		
	S	2.0705	6.6388	6.6504	6.7820	6.8777	6.9666	7.0503	7.1295	7.2051	7.2954		
875 (174.16)	V	1.120	220.65	221.20	237.29	249.56	261.46	273.09	284.51	295.79	309.72		
	U	736.415	2578.0	2579.6	2626.6	2662.3	2696.8	2730.6	2763.7	2796.5	2837.3		
	H	737.394	2771.0	2773.1	2834.2	2880.7	2925.6	2969.5	3012.7	3055.3	3108.3		
	S	2.0825	6.6289	6.6336	6.7662	6.8624	6.9518	7.0357	7.1152	7.1909	7.2813		
900 (175.36)	V	1.121	214.81	.....	230.32	242.31	253.93	265.27	276.40	287.39	300.96		
	U	741.635	2578.8	.....	2625.5	2661.4	2696.1	2729.9	2763.2	2796.1	2836.9		
	H	742.644	2772.1	.....	2832.7	2879.5	2924.6	2968.7	3012.0	3054.7	3107.7		
	S	2.0941	6.6192	.....	6.7508	6.8475	6.9373	7.0215	7.1012	7.1771	7.2676		
925 (176.53)	V	1.123	209.28	.....	223.73	235.46	246.80	257.87	268.73	279.44	292.66		
	U	746.746	2579.6	.....	2624.3	2660.5	2695.3	2729.3	2762.6	2795.6	2836.5		
	H	747.784	2773.2	.....	2831.3	2878.3	2923.6	2967.8	3011.2	3054.1	3107.2		
	S	2.1055	6.6097	.....	6.7357	6.8329	6.9231	7.0076	7.0875	7.1636	7.2543		

950 (177.67)	V	1.124	204.03	.....	217.48	228.96	240.05	250.86	261.46	271.91	284.81
	U	751.754	2580.4	.....	2623.2	2659.5	2694.6	2728.7	2762.1	2795.1	2836.0
	H	752.822	2774.2	.....	2829.8	2877.0	2922.6	2967.0	3010.5	3053.4	3106.6
	S	2.1166	6.6005	.....	6.7209	6.8187	6.9093	6.9941	7.0742	7.1505	7.2413
975 (178.79)	V	1.126	199.04	.....	211.55	222.79	233.64	244.20	254.56	264.76	277.35
	U	756.663	2581.1	.....	2620.9	2658.6	2693.8	2728.0	2761.5	2794.6	2835.6
	H	757.761	2775.2	.....	2828.3	2875.8	2921.6	2966.1	3009.7	3052.8	3106.1
	S	2.1275	6.5916	.....	6.7064	6.8048	6.8958	6.9809	7.0612	7.1377	7.2286
1000 (179.88)	V	1.127	194.29	.....	205.92	216.93	227.55	237.89	248.01	257.98	270.27
	U	761.478	2581.9	.....	2620.9	2657.7	2693.0	2727.4	2761.0	2794.2	2835.2
	H	762.605	2776.2	.....	2826.8	2874.6	2920.6	2965.2	3009.0	3052.1	3105.5
	S	2.1382	6.5828	.....	6.6922	6.7911	6.8825	6.9680	7.0485	7.1251	7.2163
1050 (182.02)	V	1.130	185.45	.....	195.45	206.04	216.24	226.15	235.84	245.37	257.12
	U	770.843	2583.3	.....	2618.5	2655.8	2691.5	2726.1	2759.9	2793.2	2834.4
	H	772.029	2778.0	.....	2823.8	2872.1	2918.5	2963.5	3007.5	3050.8	3104.4
	S	2.1588	6.5659	.....	6.6645	6.7647	6.8569	6.9430	7.0240	7.1009	7.1924
1100 (184.07)	V	1.133	177.38	.....	185.92	196.14	205.96	215.47	224.77	233.91	245.16
	U	779.878	2584.5	.....	2616.2	2653.9	2689.9	2724.7	2758.8	2792.2	2833.6
	H	781.124	2779.7	.....	2820.7	2869.6	2916.4	2961.8	3006.0	3049.6	3103.3
	S	2.1786	6.5497	.....	6.6379	6.7392	6.8323	6.9190	7.0005	7.0778	7.1695
1150 (186.05)	V	1.136	169.99	.....	177.22	187.10	196.56	205.73	214.67	223.44	234.25
	U	788.611	2585.8	.....	2613.8	2651.9	2688.3	2723.4	2757.7	2791.3	2832.8
	H	789.917	2781.3	.....	2817.6	2867.1	2914.4	2960.0	3004.5	3048.2	3102.2
	S	2.1977	6.5342	.....	6.6122	6.7147	6.8086	6.8959	6.9779	7.0556	7.1476
1200 (187.96)	V	1.139	163.20	.....	169.23	178.80	187.95	196.79	205.40	213.85	224.24
	U	797.064	2586.9	.....	2611.3	2650.0	2686.7	2722.1	2756.5	2790.3	2832.0
	H	798.430	2782.7	.....	2814.4	2864.5	2912.2	2958.2	3003.0	3046.9	3101.0
	S	2.2161	6.5194	.....	6.5872	6.6909	6.7858	6.8738	6.9562	7.0342	7.1266
1250 (189.81)	V	1.141	156.93	.....	161.88	171.17	180.02	188.56	196.88	205.02	215.03
	U	805.259	2588.0	.....	2608.9	2648.0	2685.1	2720.8	2755.4	2789.3	2831.1
	H	806.685	2784.1	.....	2811.2	2861.9	2910.1	2956.5	3001.5	3045.6	3099.9
	S	2.2338	6.5050	.....	6.5630	6.6680	6.7637	6.8523	6.9353	7.0136	7.1064
1300 (191.61)	V	1.144	151.13	.....	155.09	164.11	172.70	180.97	189.01	196.87	206.53
	U	813.213	2589.0	.....	2606.4	2646.0	2683.5	2719.4	2754.3	2788.4	2830.3
	H	814.700	2785.4	.....	2808.0	2859.3	2908.0	2954.7	3000.0	3044.3	3098.8
	S	2.2510	6.4913	.....	6.5394	6.6457	6.7424	6.8316	6.9151	6.9938	7.0869

TABLE E.2 Properties of Superheated Steam (Continued)

P/kPa ($\mu\text{sat}/^\circ\text{C}$)		sat. liq.	sat. vap.	TEMPERATURE: $t/^\circ\text{C}$ (TEMPERATURE: T kelvins)										
				350 (623.15)	375 (648.15)	400 (673.15)	450 (723.15)	500 (773.15)	550 (833.15)	600 (873.15)	650 (923.15)			
750 (167.76)	V	1.112	255.43	378.31	394.22	410.05	441.55	472.90	504.15	535.30	566.40			
	U	708.467	2573.3	2879.6	2920.1	2960.7	3042.9	3126.3	3211.4	3298.0	3386.2			
	H	709.301	2764.8	3163.4	3215.7	3268.3	3374.0	3481.0	3589.5	3699.5	3811.0			
	S	2.0195	6.6817	7.4416	7.5240	7.6035	7.7550	7.8981	8.0340	8.1637	8.2880			
775 (169.10)	V	1.113	247.61	365.94	381.35	396.69	427.20	457.56	487.81	517.97	548.07			
	U	714.326	2574.3	2879.3	2919.8	2960.4	3042.6	3126.1	3211.2	3297.8	3386.1			
	H	715.189	2766.2	3162.9	3215.3	3267.9	3373.7	3480.8	3589.2	3699.3	3810.9			
	S	2.0328	6.6705	7.4259	7.5084	7.5880	7.7396	7.8827	8.0187	8.1484	8.2727			
800 (170.41)	V	1.115	240.26	354.34	369.29	384.16	413.74	443.17	472.49	501.72	530.89			
	U	720.043	2575.3	2878.9	2919.5	2960.2	3042.4	3125.9	3211.0	3297.7	3386.0			
	H	720.935	2767.5	3162.4	3214.9	3267.5	3373.4	3480.5	3589.0	3699.1	3810.7			
	S	2.0457	6.6596	7.4107	7.4932	7.5729	7.7246	7.8678	8.0038	8.1336	8.2579			
825 (171.69)	V	1.117	233.34	343.45	357.96	372.39	401.10	429.65	458.10	486.46	514.76			
	U	725.625	2576.2	2878.6	2919.1	2959.9	3042.2	3125.7	3210.8	3297.5	3385.8			
	H	726.547	2768.7	3161.9	3214.5	3267.1	3373.1	3480.2	3588.8	3698.8	3810.5			
	S	2.0583	6.6491	7.3959	7.4786	7.5583	7.7101	7.8533	7.9894	8.1192	8.2436			
850 (172.94)	V	1.118	226.81	333.20	347.29	361.31	389.20	416.93	444.56	472.09	499.57			
	U	731.080	2577.1	2878.2	2918.8	2959.6	3041.9	3125.5	3210.7	3297.4	3385.7			
	H	732.031	2769.9	3161.4	3214.0	3266.7	3372.7	3479.9	3588.5	3698.6	3810.3			
	S	2.0705	6.6388	7.3815	7.4643	7.5441	7.6960	7.8393	7.9754	8.1053	8.2296			
875 (174.16)	V	1.120	220.65	323.53	337.24	350.87	377.98	404.94	431.79	458.55	485.25			
	U	736.415	2578.0	2877.9	2918.5	2959.3	3041.7	3125.3	3210.5	3297.2	3385.6			
	H	737.394	2771.0	3161.0	3213.6	3266.3	3372.4	3479.7	3588.3	3698.4	3810.2			
	S	2.0825	6.6289	7.3676	7.4504	7.5303	7.6823	7.8257	7.9618	8.0917	8.2161			
900 (175.36)	V	1.121	214.81	314.40	327.74	341.01	367.39	393.61	419.73	445.76	471.72			
	U	741.635	2578.8	2877.5	2918.2	2959.0	3041.4	3125.1	3210.3	3297.1	3385.4			
	H	742.644	2772.1	3160.5	3213.2	3266.0	3372.1	3479.4	3588.1	3698.2	3810.0			
	S	2.0941	6.6192	7.3540	7.4370	7.5169	7.6689	7.8124	7.9486	8.0785	8.2030			
925 (176.53)	V	1.123	209.28	305.76	318.75	331.68	357.36	382.90	408.32	433.66	458.93			
	U	746.746	2579.6	2877.2	2917.9	2958.8	3041.2	3124.9	3210.1	3296.9	3385.3			
	H	747.784	2773.2	3160.0	3212.7	3265.6	3371.8	3479.1	3587.8	3698.0	3809.8			
	S	2.1055	6.6097	7.3408	7.4238	7.5038	7.6560	7.7995	7.9357	8.0657	8.1902			

V	1.124	204.03	297.57	310.24	322.84	347.87	372.74	397.51	422.19	446.81
U	751.754	2580.4	2876.8	2917.6	2958.5	3041.0	3124.7	3209.9	3296.7	3385.1
H	752.822	2774.2	3159.5	3212.3	3265.2	3371.5	3478.8	3587.6	3697.8	3809.6
S	2.1166	6.6005	7.3279	7.4110	7.4911	7.6433	7.7869	7.9232	8.0532	8.1777
V	1.126	199.04	289.81	302.17	314.45	338.86	363.11	387.26	411.32	435.31
U	756.663	2581.1	2876.5	2917.3	2958.2	3040.7	3124.5	3209.8	3296.6	3385.0
H	757.761	2775.2	3159.0	3211.9	3264.8	3371.1	3478.6	3587.3	3697.6	3809.4
S	2.1275	6.5916	7.3154	7.3986	7.4787	7.6310	7.7747	7.9110	8.0410	8.1656
V	1.127	194.29	282.43	294.50	306.49	330.30	353.96	377.52	400.98	424.38
U	761.478	2581.9	2876.1	2917.0	2957.9	3040.5	3124.3	3209.6	3296.4	3384.9
H	762.605	2776.2	3158.5	3211.5	3264.4	3370.8	3478.3	3587.1	3697.4	3809.3
S	2.1382	6.5828	7.3031	7.3864	7.4665	7.6190	7.7627	7.8991	8.0292	8.1537
V	1.130	185.45	268.74	280.25	291.69	314.41	336.97	359.43	381.79	404.10
U	770.843	2583.3	2875.4	2916.3	2957.4	3040.0	3123.9	3209.2	3296.1	3384.6
H	772.029	2778.0	3157.6	3210.6	3263.6	3370.2	3477.7	3586.6	3697.0	3808.9
S	2.1588	6.5659	7.2795	7.3629	7.4432	7.5958	7.7397	7.8762	8.0063	8.1309
V	1.133	177.38	256.28	267.30	278.24	299.96	321.53	342.98	364.35	385.65
U	779.878	2584.5	2874.7	2915.7	2956.8	3039.6	3123.5	3208.9	3295.8	3384.3
H	781.124	2779.7	3156.6	3209.7	3262.9	3369.5	3477.2	3586.2	3696.6	3808.5
S	2.1786	6.5497	7.2569	7.3405	7.4209	7.5737	7.7177	7.8543	7.9845	8.1092
V	1.136	169.99	244.91	255.47	265.96	286.77	307.42	327.97	348.42	368.81
U	788.611	2585.8	2874.0	2915.1	2956.2	3039.1	3123.1	3208.5	3295.5	3384.1
H	789.917	2781.3	3155.6	3208.9	3262.1	3368.9	3476.6	3585.7	3696.2	3808.2
S	2.1977	6.5342	7.2352	7.3190	7.3995	7.5525	7.6966	7.8333	7.9636	8.0883
V	1.139	163.20	234.49	244.63	254.70	274.68	294.50	314.20	333.82	353.38
U	797.064	2586.9	2873.3	2914.4	2955.7	3038.6	3122.7	3208.2	3295.2	3383.8
H	798.430	2782.7	3154.6	3208.0	3261.3	3368.2	3476.1	3585.2	3695.8	3807.8
S	2.2161	6.5194	7.2144	7.2983	7.3790	7.5323	7.6765	7.8132	7.9436	8.0684
V	1.141	156.93	224.90	234.66	244.35	263.55	282.60	301.54	320.39	339.18
U	805.259	2588.0	2872.5	2913.8	2955.1	3038.1	3122.3	3207.8	3294.9	3383.5
H	806.685	2784.1	3153.7	3207.1	3260.5	3367.6	3475.5	3584.7	3695.4	3807.5
S	2.2338	6.5050	7.1944	7.2785	7.3593	7.5128	7.6571	7.7940	7.9244	8.0493
V	1.144	151.13	216.05	225.46	234.79	253.28	271.62	289.85	307.99	326.07
U	813.213	2589.0	2871.8	2913.2	2954.5	3037.7	3121.9	3207.5	3294.6	3383.2
H	814.700	2785.4	3152.7	3206.3	3259.7	3366.9	3475.0	3584.3	3695.0	3807.1
S	2.2510	6.4913	7.1751	7.2594	7.3404	7.4940	7.6385	7.7754	7.9060	8.0309

TABLE E.2 Properties of Superheated Steam (Continued)

P/kPa ($p^{\text{sat}}/^\circ\text{C}$)		sat. liq.	sat. vap.	TEMPERATURE: $t^\circ\text{C}$ (TEMPERATURE: T kelvins)											
				200 (473.15)	225 (498.15)	250 (523.15)	275 (548.15)	300 (573.15)	325 (598.15)	350 (623.15)	375 (648.15)				
1350 (193.35)	V	1.146	145.74	148.79	159.70	169.96	179.79	189.33	198.66	207.85	216.93				
	U	820.944	2589.9	2603.9	2653.6	2700.1	2744.4	2787.4	2829.5	2871.1	2912.5				
	H	822.491	2786.6	2804.7	2869.2	2929.5	2987.1	3043.0	3097.7	3151.7	3205.4				
	S	2.2676	6.4780	6.5165	6.6493	6.7675	6.8750	6.9746	7.0681	7.1566	7.2410				
1400 (195.04)	V	1.149	140.72	142.94	153.57	163.55	173.08	182.32	191.35	200.24	209.02				
	U	828.465	2590.8	2601.3	2651.7	2698.6	2743.2	2786.4	2828.6	2870.4	2911.9				
	H	830.074	2787.8	2801.4	2866.7	2927.6	2985.5	3041.6	3096.5	3150.7	3204.5				
	S	2.2837	6.4651	6.4941	6.6285	6.7477	6.8560	6.9561	7.0499	7.1386	7.2233				
1450 (196.69)	V	1.151	136.04	137.48	147.86	157.57	166.83	175.79	184.54	193.15	201.65				
	U	835.791	2591.6	2598.7	2649.7	2697.1	2742.0	2785.4	2827.8	2869.7	2911.3				
	H	837.460	2788.9	2798.1	2864.1	2925.5	2983.9	3040.3	3095.4	3149.7	3203.6				
	S	2.2993	6.4526	6.4722	6.6082	6.7286	6.8376	6.9381	7.0322	7.1212	7.2061				
1500 (198.29)	V	1.154	131.66	132.38	142.53	151.99	161.00	169.70	178.19	186.53	194.77				
	U	842.933	2592.4	2596.1	2647.7	2695.5	2740.8	2784.4	2826.9	2868.9	2910.6				
	H	844.663	2789.9	2794.7	2861.5	2923.5	2982.3	3038.9	3094.2	3148.7	3202.8				
	S	2.3145	6.4406	6.4508	6.5885	6.7099	6.8196	6.9207	7.0152	7.1044	7.1894				
1550 (199.85)	V	1.156	127.55	127.61	137.54	146.77	155.54	164.00	172.25	180.34	188.33				
	U	849.901	2593.2	2593.5	2645.8	2694.0	2739.5	2783.4	2826.1	2868.2	2910.0				
	H	851.694	2790.8	2791.3	2858.9	2921.5	2980.6	3037.6	3093.1	3147.7	3201.9				
	S	2.3292	6.4289	6.4298	6.5692	6.6917	6.8022	6.9038	6.9986	7.0881	7.1733				
1600 (201.37)	V	1.159	123.69	.....	132.85	141.87	150.42	158.66	166.68	174.54	182.30				
	U	856.707	2593.8	.....	2643.7	2692.4	2738.3	2782.4	2825.2	2867.5	2909.3				
	H	858.561	2791.7	.....	2856.3	2919.4	2979.0	3036.2	3091.9	3146.7	3201.0				
	S	2.3436	6.4175	.....	6.5503	6.6740	6.7852	6.8873	6.9825	7.0723	7.1577				
1650 (202.86)	V	1.161	120.05	.....	128.45	137.27	145.61	153.64	161.44	169.09	176.63				
	U	863.359	2594.5	.....	2641.7	2690.9	2737.1	2781.3	2824.4	2866.7	2908.7				
	H	865.275	2792.6	.....	2853.6	2917.4	2977.3	3034.8	3090.8	3145.7	3200.1				
	S	2.3576	6.4065	.....	6.5319	6.6567	6.7687	6.8713	6.9669	7.0569	7.1425				
1700 (204.31)	V	1.163	116.62	.....	124.31	132.94	141.09	148.91	156.51	163.96	171.30				
	U	869.866	2595.1	.....	2639.6	2689.3	2735.8	2780.3	2823.5	2866.0	2908.0				
	H	871.843	2793.4	.....	2851.0	2915.3	2975.6	3033.5	3089.6	3144.7	3199.2				
	S	2.3713	6.3957	.....	6.5138	6.6398	6.7526	6.8557	6.9516	7.0419	7.1277				

1750 (205.72)	V	1.166	113.38	.....	120.39	128.85	136.82	144.45	151.87	159.12	166.27
	U	876.234	2595.7	.....	2637.6	2687.7	2734.5	2779.3	2822.7	2865.3	2907.4
	H	878.274	2794.1	.....	2848.2	2913.2	2974.0	3032.1	3088.4	3143.7	3198.4
	S	2.3846	6.3853	.....	6.4961	6.6233	6.7368	6.8405	6.9368	7.0273	7.1133
1800 (207.11)	V	1.168	110.32	.....	116.69	124.99	132.78	140.24	147.48	154.55	161.51
	U	882.472	2596.3	.....	2635.5	2686.1	2733.3	2778.2	2821.8	2864.5	2906.7
	H	884.574	2794.8	.....	2845.5	2911.0	2972.3	3030.7	3087.3	3142.7	3197.5
	S	2.3976	6.3751	.....	6.4787	6.6071	6.7214	6.8257	6.9223	7.0131	7.0993
1850 (208.47)	V	1.170	107.41	.....	113.19	121.33	128.96	136.26	143.33	150.23	157.02
	U	888.585	2596.8	.....	2633.3	2684.4	2732.0	2777.2	2820.9	2863.8	2906.1
	H	890.750	2795.5	.....	2842.8	2908.9	2970.6	3029.3	3086.1	3141.7	3196.6
	S	2.4103	6.3651	.....	6.4616	6.5912	6.7064	6.8112	6.9082	6.9993	7.0856
1900 (209.80)	V	1.172	104.65	.....	109.87	117.87	125.35	132.49	139.39	146.14	152.76
	U	894.580	2597.3	.....	2631.2	2682.8	2730.7	2776.2	2820.1	2863.0	2905.4
	H	896.807	2796.1	.....	2840.0	2906.7	2968.8	3027.9	3084.9	3140.7	3195.7
	S	2.4228	6.3554	.....	6.4448	6.5757	6.6917	6.7970	6.8944	6.9857	7.0723
1950 (211.10)	V	1.174	102.031	.....	106.72	114.58	121.91	128.90	135.66	142.25	148.72
	U	900.461	2597.7	.....	2629.0	2681.1	2729.4	2775.1	2819.2	2862.3	2904.8
	H	902.752	2796.7	.....	2837.1	2904.6	2967.1	3026.5	3083.7	3139.7	3194.8
	S	2.4349	6.3459	.....	6.4283	6.5604	6.6772	6.7831	6.8809	6.9725	7.0593
2000 (212.37)	V	1.177	99.536	.....	103.72	111.45	118.65	125.50	132.11	138.56	144.89
	U	906.236	2598.2	.....	2626.9	2679.5	2728.1	2774.0	2818.3	2861.5	2904.1
	H	908.589	2797.2	.....	2834.3	2902.4	2965.4	3025.0	3082.5	3138.6	3193.9
	S	2.4469	6.3366	.....	6.4120	6.5454	6.6631	6.7696	6.8677	6.9596	7.0466
2100 (214.85)	V	1.181	94.890	.....	98.147	105.64	112.59	119.18	125.53	131.70	137.76
	U	917.479	2598.9	.....	2622.4	2676.1	2725.4	2771.9	2816.5	2860.0	2902.8
	H	919.959	2798.2	.....	2828.5	2897.9	2961.9	3022.2	3080.1	3136.6	3192.1
	S	2.4700	6.3187	.....	6.3802	6.5162	6.6356	6.7432	6.8422	6.9347	7.0220
2200 (217.24)	V	1.185	90.652	.....	93.067	100.35	107.07	113.43	119.53	125.47	131.28
	U	928.346	2599.6	.....	2617.9	2672.7	2722.7	2769.7	2814.7	2858.5	2901.5
	H	930.953	2799.1	.....	2822.7	2893.4	2958.3	3019.3	3077.7	3134.5	3190.3
	S	2.4922	6.3015	.....	6.3492	6.4879	6.6091	6.7179	6.8177	6.9107	6.9985
2300 (219.55)	V	1.189	86.769	.....	88.420	95.513	102.03	108.18	114.06	119.77	125.36
	U	938.866	2600.2	.....	2613.3	2669.2	2720.0	2767.6	2812.9	2857.0	2900.2
	H	941.601	2799.8	.....	2816.7	2888.9	2954.7	3016.4	3075.3	3132.4	3188.5
	S	2.5136	6.2849	.....	6.3190	6.4605	6.5835	6.6935	6.7941	6.8877	6.9759

TABLE E.2 Properties of Superheated Steam (Continued)

P/kPa ($P^{\text{sat}}/^\circ\text{C}$)	sat. liq.	sat. vap.	TEMPERATURE: $t/^\circ\text{C}$ (TEMPERATURE: T kelvins)											
			400 (673.15)	425 (698.15)	450 (723.15)	475 (748.15)	500 (773.15)	550 (823.15)	600 (873.15)	650 (923.15)				
1350 (193.35)	V	1.146	225.94	234.88	243.78	252.63	261.46	279.03	296.51	313.93				
	U	820.944	2953.9	2995.5	3037.2	3079.2	3121.5	3207.1	3294.3	3383.0				
	H	822.491	3259.0	3312.6	3366.3	3420.2	3474.4	3583.8	3694.5	3806.8				
1400 (195.04)	S	2.2676	7.3221	7.4003	7.4759	7.5493	7.6205	7.7576	7.8882	8.0132				
	V	1.149	217.72	226.35	234.95	243.50	252.02	268.98	285.85	302.66				
	U	828.465	2953.4	2994.9	3036.7	3078.7	3121.1	3206.8	3293.9	3382.7				
1450 (196.69)	H	830.074	3258.2	3311.8	3365.6	3419.6	3473.9	3583.3	3694.1	3806.4				
	S	2.2837	7.3045	7.3828	7.4585	7.5319	7.6032	7.7404	7.8710	7.9961				
1500 (198.29)	V	1.151	210.06	218.42	226.72	234.99	243.23	259.62	275.93	292.16				
	U	835.791	2952.8	2994.4	3036.2	3078.3	3120.7	3206.4	3293.6	3382.4				
	H	837.460	3257.4	3311.1	3365.0	3419.0	3473.3	3582.9	3693.7	3806.1				
1550 (199.85)	S	2.2993	7.2874	7.3658	7.4416	7.5151	7.5865	7.7237	7.8545	7.9796				
	V	1.154	202.92	211.01	219.05	227.06	235.03	250.89	266.66	282.37				
	U	842.933	2952.2	2993.9	3035.8	3077.9	3120.3	3206.0	3293.3	3382.1				
1600 (201.37)	H	844.663	3256.6	3310.4	3364.3	3418.4	3472.8	3582.4	3693.3	3805.7				
	S	2.3145	7.2709	7.3494	7.4253	7.4989	7.5703	7.7077	7.8385	7.9636				
1650 (202.86)	V	1.156	196.24	204.08	211.87	219.63	227.35	242.72	258.00	273.21				
	U	849.901	2951.7	2993.4	3035.3	3077.4	3119.8	3205.7	3293.0	3381.9				
	H	851.694	3255.8	3309.7	3363.7	3417.8	3472.2	3581.9	3692.9	3805.3				
1700 (204.31)	S	2.3292	7.2550	7.3336	7.4095	7.4832	7.5547	7.6921	7.8230	7.9482				
	V	1.159	189.97	197.58	205.15	212.67	220.16	235.06	249.87	264.62				
	U	856.707	2951.1	2992.9	3034.8	3077.0	3119.4	3205.3	3292.7	3381.6				
1750 (206.81)	H	858.561	3255.0	3309.0	3363.0	3417.2	3471.7	3581.4	3692.5	3805.0				
	S	2.3436	7.2394	7.3182	7.3942	7.4679	7.5395	7.6770	7.8080	7.9333				
1800 (209.34)	V	1.161	184.09	191.48	198.82	206.13	213.40	227.86	242.24	256.55				
	U	863.359	2950.5	2992.3	3034.3	3076.5	3119.0	3205.0	3292.4	3381.3				
	H	865.275	3254.2	3308.3	3362.4	3416.7	3471.1	3581.0	3692.1	3804.6				
1850 (211.81)	S	2.3576	7.2244	7.3032	7.3794	7.4531	7.5248	7.6624	7.7934	7.9188				
	V	1.163	178.55	185.74	192.87	199.97	207.04	221.09	235.06	248.96				
	U	869.866	2949.9	2991.8	3033.9	3076.1	3118.6	3204.6	3292.1	3381.0				
1900 (214.29)	H	871.843	3253.5	3307.6	3361.7	3416.1	3470.6	3580.5	3691.7	3804.3				
	S	2.3713	7.2098	7.2887	7.3649	7.4388	7.5105	7.6482	7.7793	7.9047				

V	1.166	113.38	173.32	180.32	187.26	194.17	201.04	214.71	228.28	241.80
U	876.234	2595.7	2949.3	2991.3	3033.4	3075.7	3118.2	3204.3	3291.8	3380.8
H	878.274	2794.1	3252.7	3306.9	3361.1	3415.5	3470.0	3580.0	3691.3	3803.9
S	2.3846	6.3853	7.1955	7.2746	7.3509	7.4248	7.4965	7.6344	7.7656	7.8910
V	1.168	110.32	168.39	175.20	181.97	188.69	195.38	208.68	221.89	235.03
U	882.472	2596.3	2948.8	2990.8	3032.9	3075.2	3117.8	3203.9	3291.5	3380.5
H	884.574	2794.8	3251.9	3306.1	3360.4	3414.9	3469.5	3579.5	3690.9	3803.6
S	2.3976	6.3751	7.1816	7.2608	7.3372	7.4112	7.4830	7.6209	7.7522	7.8777
V	1.170	107.41	163.73	170.37	176.96	183.50	190.02	202.97	215.84	228.64
U	888.585	2596.8	2948.2	2990.3	3032.4	3074.8	3117.4	3203.6	3291.1	3380.2
H	890.750	2795.5	3251.1	3305.4	3359.8	3414.3	3468.9	3579.1	3690.4	3803.2
S	2.4103	6.3651	7.1681	7.2474	7.3239	7.3980	7.4698	7.6079	7.7392	7.8648
V	1.172	104.65	159.30	165.78	172.21	178.59	184.94	197.57	210.11	222.58
U	894.580	2597.3	2947.6	2989.7	3031.9	3074.3	3117.0	3203.2	3290.8	3380.0
H	896.807	2796.1	3250.3	3304.7	3359.1	3413.7	3468.4	3578.6	3690.0	3802.8
S	2.4228	6.3554	7.1550	7.2344	7.3109	7.3851	7.4570	7.5951	7.7265	7.8522
V	1.174	102.031	155.11	161.43	167.70	173.93	180.13	192.44	204.67	216.83
U	900.461	2597.7	2947.0	2989.2	3031.5	3073.9	3116.6	3202.9	3290.5	3379.7
H	902.752	2796.7	3249.5	3304.0	3358.5	3413.1	3467.8	3578.1	3689.6	3802.5
S	2.4349	6.3459	7.1421	7.2216	7.2983	7.3725	7.4445	7.5827	7.7142	7.8399
V	1.177	99.536	151.13	157.30	163.42	169.51	175.55	187.57	199.50	211.36
U	906.236	2598.2	2946.4	2988.7	3031.0	3073.5	3116.2	3202.5	3290.2	3379.4
H	908.589	2797.2	3248.7	3303.3	3357.8	3412.5	3467.3	3577.6	3689.2	3802.1
S	2.4469	6.3366	7.1296	7.2092	7.2859	7.3602	7.4323	7.5706	7.7022	7.8279
V	1.181	94.890	143.73	149.63	155.48	161.28	167.06	178.53	189.91	201.22
U	917.479	2598.9	2945.3	2987.6	3030.0	3072.6	3115.3	3201.8	3289.6	3378.9
H	919.959	2798.2	3247.1	3301.8	3356.5	3411.3	3466.2	3576.7	3688.4	3801.4
S	2.4700	6.3187	7.1053	7.1851	7.2621	7.3365	7.4087	7.5472	7.6789	7.8048
V	1.185	90.652	137.00	142.65	148.25	153.81	159.34	170.30	181.19	192.00
U	928.346	2599.6	2944.1	2986.6	3029.1	3071.7	3114.5	3201.1	3289.0	3378.3
H	930.953	2799.1	3245.5	3300.4	3355.2	3410.1	3465.1	3575.7	3687.6	3800.7
S	2.4922	6.3015	7.0821	7.1621	7.2393	7.3139	7.3862	7.5249	7.6568	7.7827
V	1.189	86.769	130.85	136.28	141.65	146.99	152.28	162.80	173.22	183.58
U	938.866	2600.2	2942.9	2985.5	3028.1	3070.8	3113.7	3200.4	3288.3	3377.8
H	941.601	2799.8	3243.9	3299.0	3353.9	3408.9	3464.0	3574.8	3686.7	3800.0
S	2.5136	6.2849	7.0598	7.1401	7.2174	7.2922	7.3646	7.5035	7.6355	7.7616

TABLE E.2 Properties of Superheated Steam (Continued)

P /kPa (t^{sat} /°C)		sat. liq.	sat. vap.	TEMPERATURE: t /°C (TEMPERATURE: T kelvins)									
				225 (498.15)	250 (523.15)	275 (548.15)	300 (573.15)	325 (598.15)	350 (623.15)	375 (648.15)	400 (673.15)		
2400 (221.78)	V	1.193	83.199	84.149	91.075	97.411	103.36	109.05	114.55	119.93	125.22		
	U	949.066	2600.7	2608.6	2665.6	2717.3	2765.4	2811.1	2855.4	2898.8	2941.7		
	H	951.929	2800.4	2810.6	2884.2	2951.1	3013.4	3072.8	3130.4	3186.7	3242.3		
	S	2.5343	6.2690	6.2894	6.4338	6.5586	6.6699	6.7714	6.8656	6.9542	7.0384		
2500 (223.94)	V	1.197	79.905	80.210	86.985	93.154	98.925	104.43	109.75	114.94	120.04		
	U	958.969	2601.2	2603.8	2662.0	2714.5	2763.1	2809.3	2853.9	2897.5	2940.6		
	H	961.962	2800.9	2804.3	2879.5	2947.4	3010.4	3070.4	3128.2	3184.8	3240.7		
	S	2.5543	6.2536	6.2604	6.4077	6.5345	6.6470	6.7494	6.8442	6.9333	7.0178		
2600 (226.04)	V	1.201	76.856	.....	83.205	89.220	94.830	100.17	105.32	110.33	115.26		
	U	968.597	2601.5	.....	2658.4	2711.7	2760.9	2807.4	2852.3	2896.1	2939.4		
	H	971.720	2801.4	.....	2874.7	2943.6	3007.4	3067.9	3126.1	3183.0	3239.0		
	S	2.5736	6.2387	.....	6.3823	6.5110	6.6249	6.7281	6.8236	6.9131	6.9979		
2700 (228.07)	V	1.205	74.025	.....	79.698	85.575	91.036	96.218	101.21	106.07	110.83		
	U	977.968	2601.8	.....	2654.7	2708.8	2758.6	2805.6	2850.7	2894.8	2938.2		
	H	981.222	2801.7	.....	2869.9	2939.8	3004.4	3065.4	3124.0	3181.2	3237.4		
	S	2.5924	6.2244	.....	6.3575	6.4882	6.6034	6.7075	6.8036	6.8935	6.9787		
2800 (230.05)	V	1.209	71.389	.....	76.437	82.187	87.510	92.550	97.395	102.10	106.71		
	U	987.100	2602.1	.....	2650.9	2705.9	2756.3	2803.7	2849.2	2893.4	2937.0		
	H	990.485	2802.0	.....	2864.9	2936.0	3001.3	3062.8	3121.9	3179.3	3235.8		
	S	2.6106	6.2104	.....	6.3331	6.4659	6.5824	6.6875	6.7842	6.8746	6.9601		
2900 (231.97)	V	1.213	68.928	.....	73.395	79.029	84.226	89.133	93.843	98.414	102.88		
	U	996.008	2602.3	.....	2647.1	2702.9	2754.0	2801.8	2847.6	2892.0	2935.8		
	H	999.524	2802.2	.....	2859.9	2932.1	2998.2	3060.3	3119.7	3177.4	3234.1		
	S	2.6283	6.1969	.....	6.3092	6.4441	6.5621	6.6681	6.7654	6.8563	6.9421		
3000 (233.84)	V	1.216	66.626	.....	70.551	76.078	81.159	85.943	90.526	94.969	99.310		
	U	1004.7	2602.4	.....	2643.2	2700.0	2751.6	2799.9	2846.0	2890.7	2934.6		
	H	1008.4	2802.3	.....	2854.8	2928.2	2995.1	3057.7	3117.5	3175.6	3232.5		
	S	2.6455	6.1837	.....	6.2857	6.4228	6.5422	6.6491	6.7471	6.8385	6.9246		
3100 (235.67)	V	1.220	64.467	.....	67.885	73.315	78.287	82.958	87.423	91.745	95.965		
	U	1013.2	2602.5	.....	2639.2	2697.0	2749.2	2797.9	2844.3	2889.3	2933.4		
	H	1017.0	2802.3	.....	2849.6	2924.2	2991.9	3055.1	3115.4	3173.7	3230.8		
	S	2.6623	6.1709	.....	6.2626	6.4019	6.5227	6.6307	6.7294	6.8212	6.9077		

3200 (237.45)	V	1.224	62.439	.....	65.380	70.721	75.593	80.158	84.513	88.723	92.829
	U	1021.5	2602.5	.....	2635.2	2693.9	2746.8	2796.0	2842.7	2887.9	2932.1
	H	1025.4	2802.3	.....	2844.4	2920.2	2988.7	3052.5	3113.2	3171.8	3229.2
	S	2.6786	6.1585	.....	6.2398	6.3815	6.5037	6.6127	6.7120	6.8043	6.8912
3300 (239.18)	V	1.227	60.529	.....	63.021	68.282	73.061	77.526	81.778	85.883	89.883
	U	1029.7	2602.5	.....	2631.1	2690.8	2744.4	2794.0	2841.1	2886.5	2930.9
	H	1033.7	2802.3	.....	2839.0	2916.1	2985.5	3049.9	3110.9	3169.9	3227.5
	S	2.6945	6.1463	.....	6.2173	6.3614	6.4851	6.5951	6.6952	6.7879	6.8752
3400 (240.88)	V	1.231	58.728	.....	60.796	65.982	70.675	75.048	79.204	83.210	87.110
	U	1037.6	2602.5	.....	2626.9	2687.7	2741.9	2792.0	2839.4	2885.1	2929.7
	H	1041.8	2802.1	.....	2833.6	2912.0	2982.2	3047.2	3108.7	3168.0	3225.9
	S	2.7101	6.1344	.....	6.1951	6.3416	6.4669	6.5779	6.6787	6.7719	6.8595
3500 (242.54)	V	1.235	57.025	.....	58.693	63.812	68.424	72.710	76.776	80.689	84.494
	U	1045.4	2602.4	.....	2622.7	2684.5	2739.5	2790.0	2837.8	2883.7	2928.4
	H	1049.8	2802.0	.....	2828.1	2907.8	2979.0	3044.5	3106.5	3166.1	3224.2
	S	2.7253	6.1228	.....	6.1732	6.3221	6.4491	6.5611	6.6626	6.7563	6.8443
3600 (244.16)	V	1.238	55.415	.....	56.702	61.759	66.297	70.501	74.482	78.308	82.024
	U	1053.1	2602.2	.....	2618.4	2681.3	2737.0	2788.0	2836.1	2882.3	2927.2
	H	1057.6	28017	.....	2822.5	2903.6	2975.6	3041.8	3104.2	3164.2	3222.5
	S	2.7401	6.1115	.....	6.1514	6.3030	6.4315	6.5446	6.6468	6.7411	6.8294
3700 (245.75)	V	1.242	53.888	.....	54.812	59.814	64.282	68.410	72.311	76.055	79.687
	U	1060.6	2602.1	.....	2614.0	2678.0	2734.4	2786.0	2834.4	2880.8	2926.0
	H	1065.2	2801.4	.....	2816.8	2899.3	2972.3	3039.1	3102.0	3162.2	3220.8
	S	2.7547	6.1004	.....	6.1299	6.2841	6.4143	6.5284	6.6314	6.7262	6.8149
3800 (247.31)	V	1.245	52.438	.....	53.017	57.968	62.372	66.429	70.254	73.920	77.473
	U	1068.0	2601.9	.....	2609.5	2674.7	2731.9	2783.9	2832.7	2879.4	2924.7
	H	1072.7	2801.1	.....	2811.0	2895.0	2968.9	3036.4	3099.7	3160.3	3219.1
	S	2.7689	6.0896	.....	6.1085	6.2654	6.3973	6.5126	6.6163	6.7117	6.8007
3900 (248.84)	V	1.249	51.061	.....	51.308	56.215	60.558	64.547	68.302	71.894	75.372
	U	1075.3	2601.6	.....	2605.0	2671.4	2729.3	2781.9	2831.0	2877.9	2923.5
	H	1080.1	2800.8	.....	2805.1	2890.6	2965.5	3033.6	3097.4	3158.3	3217.4
	S	2.7828	6.0789	.....	6.0872	6.2470	6.3806	6.4970	6.6015	6.6974	6.7868
4000 (250.33)	V	1.252	49.749	.....	54.546	58.833	62.759	66.446	69.969	73.376	
	U	1082.4	2601.3	.....	2668.0	2726.7	2779.8	2829.3	2876.5	2922.2	
	H	1087.4	2800.3	.....	2886.1	2962.0	3030.8	3095.1	3156.4	3215.7	
	S	2.7965	6.0685	.....	6.2288	6.3642	6.4817	6.5870	6.6834	6.7733	

TABLE E.2 Properties of Superheated Steam (Continued)

P/kPa ($\mu\text{sat}/^\circ\text{C}$)		sat. liq.	sat. vap.	TEMPERATURE: $t/^\circ\text{C}$ (TEMPERATURE: T kelvins)											
				425 (698.15)	450 (723.15)	475 (748.15)	500 (773.15)	525 (798.15)	550 (823.15)	600 (873.15)	650 (923.15)				
2400 (221.78)	V	1.193	83.199	130.44	135.61	140.73	145.82	150.88	155.91	165.92	175.86				
	U	949.066	2600.7	2984.5	3027.1	3069.9	3112.9	3156.1	3199.6	3287.7	3377.2				
	H	951.929	2800.4	3297.5	3352.6	3407.7	3462.9	3518.2	3573.8	3685.9	3799.3				
	S	2.5343	6.2690	7.1189	7.1964	7.2713	7.3439	7.4144	7.4830	7.6152	7.7414				
2500 (223.94)	V	1.197	79.905	125.07	130.04	134.97	139.87	144.74	149.58	159.21	168.76				
	U	958.969	2601.2	2983.4	3026.2	3069.0	3112.1	3155.4	3198.9	3287.1	3376.7				
	H	961.962	2800.9	3296.1	3351.3	3406.5	3461.7	3517.2	3572.9	3685.1	3798.6				
	S	2.5543	6.2536	7.0986	7.1763	7.2513	7.3240	7.3946	7.4633	7.5956	7.7220				
2600 (226.04)	V	1.201	76.856	120.11	124.91	129.66	134.38	139.07	143.74	153.01	162.21				
	U	968.597	2601.5	2982.3	3025.2	3068.1	3111.2	3154.6	3198.2	3286.5	3376.1				
	H	971.720	2801.4	3294.6	3349.9	3405.3	3460.6	3516.2	3571.9	3684.3	3797.9				
	S	2.5736	6.2387	7.0789	7.1568	7.2320	7.3048	7.3755	7.4443	7.5768	7.7033				
2700 (228.07)	V	1.205	74.025	115.52	120.15	124.74	129.30	133.82	138.33	147.27	156.14				
	U	977.968	2601.8	2981.2	3024.2	3067.2	3110.4	3153.8	3197.5	3285.8	3375.6				
	H	981.222	2801.7	3293.1	3348.6	3404.0	3459.5	3515.2	3571.0	3683.5	3797.1				
	S	2.5924	6.2244	7.0600	7.1381	7.2134	7.2863	7.3571	7.4260	7.5587	7.6853				
2800 (230.05)	V	1.209	71.389	111.25	115.74	120.17	124.58	128.95	133.30	141.94	150.50				
	U	987.100	2602.1	2980.2	3023.2	3066.3	3109.6	3153.1	3196.8	3285.2	3375.0				
	H	990.485	2802.0	3291.7	3347.3	3402.8	3458.4	3514.1	3570.0	3682.6	3796.4				
	S	2.6106	6.2104	7.0416	7.1199	7.1954	7.2685	7.3394	7.4084	7.5412	7.6679				
2900 (231.97)	V	1.213	68.928	107.28	111.62	115.92	120.18	124.42	128.62	136.97	145.26				
	U	996.008	2602.3	2979.1	3022.3	3065.5	3108.8	3152.3	3196.1	3284.6	3374.5				
	H	999.524	2802.2	3290.2	3346.0	3401.6	3457.3	3513.1	3569.1	3681.8	3795.7				
	S	2.6283	6.1969	7.0239	7.1024	7.1780	7.2512	7.3222	7.3913	7.5243	7.6511				
3000 (233.84)	V	1.216	66.626	103.58	107.79	111.95	116.08	120.18	124.26	132.34	140.36				
	U	1004.7	2602.4	2978.0	3021.3	3064.6	3107.9	3151.5	3195.4	3284.0	3373.9				
	H	1008.4	2802.3	3288.7	3344.6	3400.4	3456.2	3512.1	3568.1	3681.0	3795.0				
	S	2.6455	6.1837	7.0067	7.0854	7.1612	7.2345	7.3056	7.3748	7.5079	7.6349				
3100 (235.67)	V	1.220	64.467	100.11	104.20	108.24	112.24	116.22	120.17	128.01	135.78				
	U	1013.2	2602.5	2976.9	3020.3	3063.7	3107.1	3150.8	3194.7	3283.3	3373.4				
	H	1017.0	2802.3	3287.3	3343.3	3399.2	3455.1	3511.0	3567.2	3680.2	3794.3				
	S	2.6623	6.1709	6.9900	7.0689	7.1448	7.2183	7.2895	7.3588	7.4920	7.6191				

3200 (237.45)	V	1.224	62.439	96.859	100.83	104.76	108.65	112.51	116.34	123.95	131.48
	U	1021.5	2602.5	2975.9	3019.3	3062.8	3106.3	3150.0	3193.9	3282.7	3372.8
	H	1025.4	2802.3	3285.8	3342.0	3398.0	3454.0	3510.0	3566.2	3679.3	3793.6
	S	2.6786	6.1585	6.9738	7.0528	7.1290	7.2026	7.2739	7.3433	7.4767	7.6039
3300 (239.18)	V	1.227	60.529	93.805	97.668	101.49	105.27	109.02	112.74	120.13	127.45
	U	1029.7	2602.5	2974.8	3018.3	3061.9	3105.5	3149.2	3193.2	3282.1	3372.3
	H	1033.7	2802.3	3284.3	3340.6	3396.8	3452.8	3509.0	3565.3	3678.5	3792.9
	S	2.6945	6.1463	6.9580	7.0373	7.1136	7.1873	7.2588	7.3282	7.4618	7.5891
3400 (240.88)	V	1.231	58.728	90.930	94.692	98.408	102.09	105.74	109.36	116.54	123.65
	U	1037.6	2602.5	2973.7	3017.4	3061.0	3104.6	3148.4	3192.5	3281.5	3371.7
	H	1041.8	2802.1	3282.8	3339.3	3395.5	3451.7	3507.9	3564.3	3677.7	3792.1
	S	2.7101	6.1344	6.9426	7.0221	7.0986	7.1724	7.2440	7.3136	7.4473	7.5747
3500 (242.54)	V	1.235	57.025	88.220	91.886	95.505	99.088	102.64	106.17	113.15	120.07
	U	1045.4	2602.4	2972.6	3016.4	3060.1	3103.8	3147.7	3191.8	3280.8	3371.2
	H	1049.8	2802.0	3281.3	3338.0	3394.3	3450.6	3506.9	3563.4	3676.9	3791.4
	S	2.7253	6.1228	6.9277	7.0074	7.0840	7.1580	7.2297	7.2993	7.4332	7.5607
3600 (244.16)	V	1.238	55.415	85.660	89.236	92.764	96.255	99.716	103.15	109.96	116.69
	U	1053.1	2602.2	2971.5	3015.4	3059.2	3103.0	3146.9	3191.1	3280.2	3370.6
	H	1057.6	2801.7	3279.8	3336.6	3393.1	3449.5	3505.9	3562.4	3676.1	3790.7
	S	2.7401	6.1115	6.9131	6.9930	7.0698	7.1439	7.2157	7.2854	7.4195	7.5471
3700 (245.75)	V	1.242	53.888	83.238	86.728	90.171	93.576	96.950	100.30	106.93	113.49
	U	1060.6	2602.1	2970.4	3014.4	3058.2	3102.1	3146.1	3190.4	3279.6	3370.1
	H	1065.2	2801.4	3278.4	3335.3	3391.9	3448.4	3504.9	3561.5	3675.2	3790.0
	S	2.7547	6.1004	6.8989	6.9790	7.0559	7.1302	7.2021	7.2719	7.4061	7.5339
3800 (247.31)	V	1.245	52.438	80.944	84.353	87.714	91.038	94.330	97.596	104.06	110.46
	U	1068.0	2601.9	2969.3	3013.4	3057.3	3101.3	3145.4	3189.6	3279.0	3369.5
	H	1072.7	2801.1	3276.8	3333.9	3390.7	3447.2	3503.8	3560.5	3674.4	3789.3
	S	2.7689	6.0896	6.8849	6.9653	7.0424	7.1168	7.1888	7.2587	7.3931	7.5210
3900 (248.84)	V	1.249	51.061	78.767	82.099	85.383	88.629	91.844	95.033	101.35	107.59
	U	1075.3	2601.6	2968.2	3012.4	3056.4	3100.5	3144.6	3188.9	3278.3	3369.0
	H	1080.1	2800.8	3275.3	3332.6	3389.4	3446.1	3502.8	3559.5	3673.6	3788.6
	S	2.7828	6.0789	6.8713	6.9519	7.0292	7.1037	7.1759	7.2459	7.3804	7.5084
4000 (250.33)	V	1.252	49.749	76.698	79.958	83.169	86.341	89.483	92.598	98.763	104.86
	U	1082.4	2601.3	2967.0	3011.4	3055.5	3099.6	3143.8	3188.2	3277.7	3368.4
	H	1087.4	2800.3	3273.8	3331.2	3388.2	3445.0	3501.7	3558.6	3672.8	3787.9
	S	2.7965	6.0685	6.8581	6.9388	7.0163	7.0909	7.1632	7.2333	7.3680	7.4961

TABLE E.2 Properties of Superheated Steam (Continued)

		TEMPERATURE: $t^{\circ}\text{C}$ (TEMPERATURE: T kelvins)									
P/kPa ($p^{\text{sat}}/^{\circ}\text{C}$)		sat. liq.	sat. vap.	260 (533.15)	275 (548.15)	300 (573.15)	325 (598.15)	350 (623.15)	375 (648.15)	400 (673.15)	425 (698.15)
4100 (251.80)	V	1.256	48.500	50.150	52.955	57.191	61.057	64.680	68.137	71.476	74.730
	U	1089.4	2601.0	2624.6	2664.5	2724.0	2777.7	2827.6	2875.0	2920.9	2965.9
	H	1094.6	2799.9	2830.3	2881.6	2958.5	3028.0	3092.8	3154.4	3214.0	3272.3
	S	2.8099	6.0583	6.1157	6.2107	6.3480	6.4667	6.5727	6.6697	6.7600	6.8450
4200 (253.24)	V	1.259	47.307	48.654	51.438	55.625	59.435	62.998	66.392	69.667	72.856
	U	1096.3	2600.7	2620.4	2661.0	2721.4	2775.6	2825.8	2873.6	2919.7	2964.8
	H	1101.6	2799.4	2824.8	2877.1	2955.0	3025.2	3090.4	3152.4	3212.3	3270.8
	S	2.8231	6.0482	6.0962	6.1929	6.3320	6.4519	6.5587	6.6563	6.7469	6.8323
4300 (254.66)	V	1.262	46.168	47.223	49.988	54.130	57.887	61.393	64.728	67.942	71.069
	U	1103.1	2600.3	2616.2	2657.5	2718.7	2773.4	2824.1	2872.1	2918.4	2963.7
	H	1108.5	2798.9	2819.2	2872.4	2951.4	3022.3	3088.1	3150.4	3210.5	3269.3
	S	2.8360	6.0383	6.0768	6.1752	6.3162	6.4373	6.5450	6.6431	6.7341	6.8198
4400 (256.05)	V	1.266	45.079	45.853	48.601	52.702	56.409	59.861	63.139	66.295	69.363
	U	1109.8	2599.9	2611.8	2653.9	2716.0	2771.3	2822.3	2870.6	2917.1	2962.5
	H	1115.4	2798.3	2813.6	2867.8	2947.8	3019.5	3085.7	3148.4	3208.8	3267.7
	S	2.8487	6.0286	6.0575	6.1577	6.3006	6.4230	6.5315	6.6301	6.7216	6.8076
4500 (257.41)	V	1.269	44.037	44.540	47.273	51.336	54.996	58.396	61.620	64.721	67.732
	U	1116.4	2599.5	2607.4	2650.3	2713.2	2769.1	2820.5	2869.1	2915.8	2961.4
	H	1122.1	2797.7	2807.9	2863.0	2944.2	3016.6	3083.3	3146.4	3207.1	3266.2
	S	2.8612	6.0191	6.0382	6.1403	6.2852	6.4088	6.5182	6.6174	6.7093	6.7955
4600 (258.75)	V	1.272	43.038	43.278	46.000	50.027	53.643	56.994	60.167	63.215	66.172
	U	1122.9	2599.1	2602.9	2646.6	2710.4	2766.9	2818.7	2867.6	2914.5	2960.3
	H	1128.8	2797.0	2802.0	2858.2	2940.5	3013.7	3080.9	3144.4	3205.3	3264.7
	S	2.8735	6.0097	6.0190	6.1230	6.2700	6.3949	6.5050	6.6049	6.6972	6.7838
4700 (260.07)	V	1.276	42.081	.....	44.778	48.772	52.346	55.651	58.775	61.773	64.679
	U	1129.3	2598.6	.....	2642.9	2707.6	2764.7	2816.9	2866.1	2913.2	2959.1
	H	1135.3	2796.4	.....	2853.3	2936.8	3010.7	3078.5	3142.3	3203.6	3263.1
	S	2.8855	6.0004	.....	6.1058	6.2549	6.3811	6.4921	6.5926	6.6853	6.7722
4800 (261.37)	V	1.279	41.161	.....	43.604	47.569	51.103	54.364	57.441	60.390	63.247
	U	1135.6	2598.1	.....	2639.1	2704.8	2762.5	2815.1	2864.6	2911.9	2958.0
	H	1141.8	2795.7	.....	2848.4	2933.1	3007.8	3076.1	3140.3	3201.8	3261.6
	S	2.8974	5.9913	.....	6.0887	6.2399	6.3675	6.4794	6.5805	6.6736	6.7608

4900 (262.65)	V	1.282	40.278	.....	42.475	46.412	49.909	53.128	56.161	59.064	61.874
	U	1141.9	2597.6	.....	2635.2	2701.9	2760.2	2813.3	2863.0	2910.6	2956.9
	H	1148.2	2794.9	.....	2843.3	2929.3	3004.8	3073.6	3138.2	3200.0	3260.0
	S	2.9091	5.9823	.....	6.0717	6.2252	6.3541	6.4669	6.5685	6.6621	6.7496
5000 (263.91)	V	1.286	39.429	.....	41.388	45.301	48.762	51.941	54.932	57.791	60.555
	U	1148.0	2597.0	.....	2631.3	2699.0	2758.0	2811.5	2861.5	2909.3	2955.7
	H	1154.5	2794.2	.....	2838.2	2925.5	3001.8	3071.2	3136.2	3198.3	3258.5
	S	2.9206	5.9735	.....	6.0547	6.2105	6.3408	6.4545	6.5568	6.6508	6.7386
5100 (265.15)	V	1.289	38.611	.....	40.340	44.231	47.660	50.801	53.750	56.567	59.288
	U	1154.1	2596.5	.....	2627.3	2696.1	2755.7	2809.6	2860.0	2908.0	2954.5
	H	1160.7	2793.4	.....	2833.1	2921.7	2998.7	3068.7	3134.1	3196.5	3256.9
	S	2.9319	5.9648	.....	6.0378	6.1960	6.3277	6.4423	6.5452	6.6396	6.7278
5200 (266.37)	V	1.292	37.824	.....	39.330	43.201	46.599	49.703	52.614	55.390	58.070
	U	1160.1	2595.9	.....	2623.3	2693.1	2753.4	2807.8	2858.4	2906.7	2953.4
	H	1166.8	2792.6	.....	2827.8	2917.8	2995.7	3066.2	3132.0	3194.7	3255.4
	S	2.9431	5.9561	.....	6.0210	6.1815	6.3147	6.4302	6.5338	6.6287	6.7172
5300 (267.58)	V	1.296	37.066	.....	38.354	42.209	45.577	48.647	51.520	54.257	56.897
	U	1166.1	2595.3	.....	2619.2	2690.1	2751.0	2805.9	2856.9	2905.3	2952.2
	H	1172.9	2791.7	.....	2822.5	2913.8	2992.6	3063.7	3129.9	3192.9	3253.8
	S	2.9541	5.9476	.....	6.0041	6.1672	6.3018	6.4183	6.5225	6.6179	6.7067
5400 (268.76)	V	1.299	36.334	.....	37.411	41.251	44.591	47.628	50.466	53.166	55.768
	U	1171.9	2594.6	.....	2615.0	2687.1	2748.7	2804.0	2855.3	2904.0	2951.1
	H	1178.9	2790.8	.....	2817.0	2909.8	2989.5	3061.2	3127.8	3191.1	3252.2
	S	2.9650	5.9392	.....	5.9873	6.1530	6.2891	6.4066	6.5114	6.6072	6.6963
5500 (269.93)	V	1.302	35.628	.....	36.499	40.327	43.641	46.647	49.450	52.115	54.679
	U	1177.7	2594.0	.....	2610.8	2684.0	2746.3	2802.1	2853.7	2902.7	2949.9
	H	1184.9	2789.9	.....	2811.5	2905.8	2986.4	3058.7	3125.7	3189.3	3250.6
	S	2.9757	5.9309	.....	5.9705	6.1388	6.2765	6.3949	6.5004	6.5967	6.6862
5600 (271.09)	V	1.306	34.946	.....	35.617	39.434	42.724	45.700	48.470	51.100	53.630
	U	1183.5	2593.3	.....	2606.5	2680.9	2744.0	2800.2	2852.1	2901.3	2948.7
	H	1190.8	2789.0	.....	2805.9	2901.7	2983.2	3056.1	3123.6	3187.5	3249.0
	S	2.9863	5.9227	.....	5.9537	6.1248	6.2640	6.3834	6.4896	6.5863	6.6761
5700 (272.22)	V	1.309	34.288	.....	34.761	38.571	41.838	44.785	47.525	50.121	52.617
	U	1189.1	2592.6	.....	2602.1	2677.8	2741.6	2798.3	2850.5	2899.9	2947.5
	H	1196.6	2788.0	.....	2800.2	2897.6	2980.0	3053.5	3121.4	3185.6	3247.5
	S	2.9968	5.9146	.....	5.9369	6.1108	6.2516	6.3720	6.4789	6.5761	6.6663

TABLE E.2 Properties of Superheated Steam (Continued)

P/kPa ($p^{\text{sat}}/^\circ\text{C}$)		sat. liq.	sat. vap.	TEMPERATURE: $t/^\circ\text{C}$ (TEMPERATURE: T kelvins)										
				450 (723.15)	475 (748.15)	500 (773.15)	525 (798.15)	550 (823.15)	575 (848.15)	600 (873.15)	650 (923.15)			
4100 (251.80)	V	1.256	48.500	77.921	81.062	84.165	87.236	90.281	93.303	96.306	102.26			
	U	1089.4	2601.0	3010.4	3054.6	3098.8	3143.0	3187.5	3232.1	3277.1	3367.9			
	H	1094.6	2799.9	3329.9	3387.0	3443.9	3500.7	3557.6	3614.7	3671.9	3787.1			
	S	2.8099	6.0583	6.9260	7.0037	7.0785	7.1508	7.2210	7.2893	7.3558	7.4842			
4200 (253.24)	V	1.259	47.307	75.981	79.056	82.092	85.097	88.075	91.030	93.966	99.787			
	U	1096.3	2600.7	3009.4	3053.7	3097.9	3142.3	3186.8	3231.5	3276.5	3367.3			
	H	1101.6	2799.4	3328.5	3385.7	3442.7	3499.7	3556.7	3613.8	3671.1	3786.4			
	S	2.8231	6.0482	6.9135	6.9913	7.0662	7.1387	7.2090	7.2774	7.3440	7.4724			
4300 (254.66)	V	1.262	46.168	74.131	77.143	80.116	83.057	85.971	88.863	91.735	97.428			
	U	1103.1	2600.3	3008.4	3052.8	3097.1	3141.5	3186.0	3230.8	3275.8	3366.8			
	H	1108.5	2798.9	3327.1	3384.5	3441.6	3498.6	3555.7	3612.9	3670.3	3785.7			
	S	2.8360	6.0383	6.9012	6.9792	7.0543	7.1269	7.1973	7.2658	7.3324	7.4610			
4400 (256.05)	V	1.266	45.079	72.365	75.317	78.229	81.110	83.963	86.794	89.605	95.177			
	U	1109.8	2599.9	3007.4	3051.9	3096.3	3140.7	3185.3	3230.1	3275.2	3366.2			
	H	1115.4	2798.3	3325.8	3383.3	3440.5	3497.6	3554.7	3612.0	3669.5	3785.0			
	S	2.8487	6.0286	6.8892	6.9674	7.0426	7.1153	7.1858	7.2544	7.3211	7.4498			
4500 (257.41)	V	1.269	44.037	70.677	73.572	76.427	79.249	82.044	84.817	87.570	93.025			
	U	1116.4	2599.5	3006.3	3050.9	3095.4	3139.9	3184.6	3229.5	3274.6	3365.7			
	H	1122.1	2797.7	3324.4	3382.0	3439.3	3496.6	3553.8	3611.1	3668.6	3784.3			
	S	2.8612	6.0191	6.8774	6.9558	7.0311	7.1040	7.1746	7.2432	7.3100	7.4388			
4600 (258.75)	V	1.272	43.038	69.063	71.903	74.702	77.469	80.209	82.926	85.623	90.967			
	U	1122.9	2599.1	3005.3	3050.0	3094.6	3139.2	3183.9	3228.8	3273.9	3365.1			
	H	1128.8	2797.0	3323.0	3380.8	3438.2	3495.5	3552.8	3610.2	3667.8	3783.6			
	S	2.8735	6.0097	6.8659	6.9444	7.0199	7.0928	7.1636	7.2323	7.2991	7.4281			
4700 (260.07)	V	1.276	42.081	67.517	70.304	73.051	75.765	78.452	81.116	83.760	88.997			
	U	1129.3	2598.6	3004.3	3049.1	3093.7	3138.4	3183.1	3228.1	3273.3	3364.6			
	H	1135.3	2796.4	3321.6	3379.5	3437.1	3494.5	3551.9	3609.3	3667.0	3782.9			
	S	2.8855	6.0004	6.8545	6.9332	7.0089	7.0819	7.1527	7.2215	7.2885	7.4176			
4800 (261.37)	V	1.279	41.161	66.036	68.773	71.469	74.132	76.768	79.381	81.973	87.109			
	U	1135.6	2598.1	3003.3	3048.2	3092.9	3137.6	3182.4	3227.4	3272.7	3364.0			
	H	1141.8	2795.7	3320.3	3378.3	3435.9	3493.4	3550.9	3608.5	3666.2	3782.1			
	S	2.8974	5.9913	6.8434	6.9223	6.9981	7.0712	7.1422	7.2110	7.2781	7.4072			

4900 (262.65)	V	1.282	40.278	64.615	67.303	69.951	72.565	75.152	77.716	80.260	85.298
	U	1141.9	2597.6	3002.3	3047.2	3092.0	3136.8	3181.7	3226.8	3272.0	3363.5
	H	1148.2	2794.9	3318.9	3377.0	3434.8	3492.4	3549.9	3607.6	3665.3	3781.4
	S	2.9091	5.9823	6.8324	6.9115	6.9874	7.0607	7.1318	7.2007	7.2678	7.3971
5000 (263.91)	V	1.286	39.429	63.250	65.893	68.494	71.061	73.602	76.119	78.616	83.559
	U	1148.0	2597.0	3001.2	3046.3	3091.2	3136.0	3181.0	3226.1	3271.4	3362.9
	H	1154.5	2794.2	3317.5	3375.8	3433.7	3491.3	3549.0	3606.7	3664.5	3780.7
	S	2.9206	5.9735	6.8217	6.9009	6.9770	7.0504	7.1215	7.1906	7.2578	7.3872
5100 (265.15)	V	1.289	38.611	61.940	64.537	67.094	69.616	72.112	74.584	77.035	81.888
	U	1154.1	2596.5	3000.2	3045.4	3090.3	3135.3	3180.2	3225.4	3270.8	3362.4
	H	1160.7	2793.4	3316.1	3374.5	3432.5	3490.3	3548.0	3605.8	3663.7	3780.0
	S	2.9319	5.9648	6.8111	6.8905	6.9668	7.0403	7.1115	7.1807	7.2479	7.3775
5200 (266.37)	V	1.292	37.824	60.679	63.234	65.747	68.227	70.679	73.108	75.516	80.282
	U	1160.1	2595.9	2999.2	3044.5	3089.5	3134.5	3179.5	3224.7	3270.2	3361.8
	H	1166.8	2792.6	3314.7	3373.3	3431.4	3489.3	3547.1	3604.9	3662.8	3779.3
	S	2.9431	5.9561	6.8007	6.8803	6.9567	7.0304	7.1017	7.1709	7.2382	7.3679
5300 (267.58)	V	1.296	37.066	59.466	61.980	64.452	66.890	69.300	71.687	74.054	78.736
	U	1166.1	2595.3	2998.2	3043.5	3088.6	3133.7	3178.8	3224.1	3269.5	3361.3
	H	1172.9	2791.7	3313.3	3372.0	3430.2	3488.2	3546.1	3604.0	3662.0	3778.6
	S	2.9541	5.9476	6.7905	6.8703	6.9468	7.0206	7.0920	7.1613	7.2287	7.3585
5400 (268.93)	V	1.299	36.334	58.297	60.772	63.204	65.603	67.973	70.320	72.646	77.248
	U	1171.9	2594.6	2997.1	3042.6	3087.8	3132.9	3178.1	3223.4	3268.9	3360.7
	H	1178.9	2790.8	3311.9	3370.8	3429.1	3487.2	3545.1	3603.1	3661.2	3777.8
	S	2.9650	5.9392	6.7804	6.8604	6.9371	7.0110	7.0825	7.1519	7.2194	7.3493
5500 (269.93)	V	1.302	35.628	57.171	59.608	62.002	64.362	66.694	69.002	71.289	75.814
	U	1177.7	2594.0	2996.1	3041.7	3086.9	3132.1	3177.3	3222.7	3268.3	3360.2
	H	1184.9	2789.9	3310.5	3369.5	3427.9	3486.1	3544.2	3602.2	3660.4	3777.1
	S	2.9757	5.9309	6.7705	6.8507	6.9275	7.0015	7.0731	7.1426	7.2102	7.3402
5600 (271.09)	V	1.306	34.946	56.085	58.486	60.843	63.165	65.460	67.731	69.981	74.431
	U	1183.5	2593.3	2995.0	3040.7	3086.1	3131.3	3176.6	3222.0	3267.6	3359.6
	H	1190.8	2789.0	3309.1	3368.2	3426.8	3485.1	3543.2	3601.3	3659.5	3776.4
	S	2.9863	5.9227	6.7607	6.8411	6.9181	6.9922	7.0639	7.1335	7.2011	7.3313
5700 (272.22)	V	1.309	34.288	55.038	57.403	59.724	62.011	64.270	66.504	68.719	73.096
	U	1189.1	2592.6	2994.0	3039.8	3085.2	3130.5	3175.9	3221.3	3267.0	3359.1
	H	1196.6	2788.0	3307.7	3367.0	3425.6	3484.0	3542.2	3600.4	3658.7	3775.7
	S	2.9968	5.9146	6.7511	6.8316	6.9088	6.9831	7.0549	7.1245	7.1923	7.3226

TABLE E.2 Properties of Superheated Steam (Continued)

P/kPa ($f^{\text{sat}}/^{\circ}\text{C}$)		sat. liq.	sat. vap.	TEMPERATURE: $t^{\circ}\text{C}$ (TEMPERATURE: T kelvins)										
				280 (553.15)	290 (563.15)	300 (573.15)	325 (598.15)	350 (623.15)	375 (648.15)	400 (673.15)	425 (698.15)			
5800 (273.35)	V	1.312	33.651	34.756	36.301	37.736	40.982	43.902	46.611	49.176	51.638			
	U	1194.7	2591.9	2614.4	2645.7	2674.6	2739.1	2796.3	2848.9	2898.6	2946.4			
	H	1202.3	2787.0	2816.0	2856.3	2893.5	2976.8	3051.0	3119.3	3183.8	3245.9			
	S	3.0071	5.9066	5.9592	6.0314	6.0969	6.2393	6.3608	6.4683	6.5660	6.6565			
5900 (274.46)	V	1.315	33.034	33.953	35.497	36.928	40.154	43.048	45.728	48.262	50.693			
	U	1200.3	2591.1	2610.2	2642.1	2671.4	2736.7	2794.4	2847.3	2897.2	2945.2			
	H	1208.0	2786.0	2810.5	2851.5	2889.3	2973.6	3048.4	3117.1	3182.0	3244.3			
	S	3.0172	5.8986	5.9431	6.0166	6.0830	6.2272	6.3496	6.4578	6.5560	6.6469			
6000 (275.55)	V	1.319	32.438	33.173	34.718	36.145	39.353	42.222	44.874	47.379	49.779			
	U	1205.8	2590.4	2605.9	2638.4	2668.1	2734.2	2792.4	2845.7	2895.8	2944.0			
	H	1213.7	2785.0	2804.9	2846.7	2885.0	2970.4	3045.8	3115.0	3180.1	3242.6			
	S	3.0273	5.8908	5.9270	6.0017	6.0692	6.2151	6.3386	6.4475	6.5462	6.6374			
6100 (276.63)	V	1.322	31.860	32.415	33.962	35.386	38.577	41.422	44.048	46.524	48.895			
	U	1211.2	2589.6	2601.5	2634.6	2664.8	2731.7	2790.4	2844.1	2894.5	2942.8			
	H	1219.3	2783.9	2799.3	2841.8	2880.7	2967.1	3043.1	3112.8	3178.3	3241.0			
	S	3.0372	5.8830	5.9108	5.9869	6.0555	6.2031	6.3277	6.4373	6.5364	6.6280			
6200 (277.70)	V	1.325	31.300	31.679	33.227	34.650	37.825	40.648	43.248	45.697	48.039			
	U	1216.6	2588.8	2597.1	2630.8	2661.5	2729.2	2788.5	2842.4	2893.1	2941.6			
	H	1224.8	2782.9	2793.5	2836.8	2876.3	2963.8	3040.5	3110.6	3176.4	3239.4			
	S	3.0471	5.8753	5.8946	5.9721	6.0418	6.1911	6.3168	6.4272	6.5268	6.6188			
6300 (278.75)	V	1.328	30.757	30.962	32.514	33.935	37.097	39.898	42.473	44.895	47.210			
	U	1221.9	2588.0	2592.6	2626.9	2658.1	2726.7	2786.5	2840.8	2891.7	2940.4			
	H	1230.3	2781.8	2787.6	2831.7	2871.9	2960.4	3037.8	3108.4	3174.5	3237.8			
	S	3.0568	5.8677	5.8783	5.9573	6.0281	6.1793	6.3061	6.4172	6.5173	6.6096			
6400 (279.79)	V	1.332	30.230	30.265	31.821	33.241	36.390	39.170	41.722	44.119	46.407			
	U	1227.2	2587.2	2587.9	2623.0	2654.7	2724.2	2784.4	2839.1	2890.3	2939.2			
	H	1235.7	2780.6	2781.6	2826.6	2867.5	2957.1	3035.1	3106.2	3172.7	3236.2			
	S	3.0664	5.8601	5.8619	5.9425	6.0144	6.1675	6.2955	6.4072	6.5079	6.6006			
6500 (280.82)	V	1.335	29.719	.....	31.146	32.567	35.704	38.465	40.994	43.366	45.629			
	U	1232.5	2586.3	.....	2619.0	2651.2	2721.6	2782.4	2837.5	2888.9	2938.0			
	H	1241.1	2779.5	.....	2821.4	2862.9	2953.7	3032.4	3103.9	3170.8	3234.5			
	S	3.0759	5.8527	.....	5.9277	6.0008	6.1558	6.2849	6.3974	6.4986	6.5917			

V	1.338	29.223	.....	30.490	31.911	35.038	37.781	40.287	42.636	44.874
U	1237.6	2585.5	.....	2614.9	2647.7	2719.0	2780.4	2835.8	2887.5	2936.7
H	1246.5	2778.3	.....	2816.1	2858.4	2950.2	3029.7	3101.7	3168.9	3232.9
S	3.0853	5.8452	.....	5.9129	5.9872	6.1442	6.2744	6.3877	6.4894	6.5828
V	1.342	28.741	.....	29.850	31.273	34.391	37.116	39.601	41.927	44.141
U	1242.8	2584.6	.....	2610.8	2644.2	2716.4	2778.3	2834.1	2886.1	2935.5
H	1251.8	2777.1	.....	2810.8	2853.7	2946.8	3027.0	3099.5	3167.0	3231.3
S	3.0946	5.8379	.....	5.8980	5.9736	6.1326	6.2640	6.3781	6.4803	6.5741
V	1.345	28.272	.....	29.226	30.652	33.762	36.470	38.935	41.239	43.430
U	1247.9	2583.7	.....	2606.6	2640.6	2713.7	2776.2	2832.4	2884.7	2934.3
H	1257.0	2775.9	.....	2805.3	2849.0	2943.3	3024.2	3097.2	3165.1	3229.6
S	3.1038	5.8306	.....	5.8830	5.9599	6.1211	6.2537	6.3686	6.4713	6.5655
V	1.351	27.373	.....	28.024	29.457	32.556	35.233	37.660	39.922	42.068
U	1258.0	2581.8	.....	2597.9	2633.2	2708.4	2772.1	2829.0	2881.8	2931.8
H	1267.4	2773.5	.....	2794.1	2839.4	2936.3	3018.7	3092.7	3161.2	3226.3
S	3.1219	5.8162	.....	5.8530	5.9327	6.0982	6.2333	6.3497	6.4536	6.5485
V	1.358	26.522	.....	26.878	28.321	31.413	34.063	36.454	38.676	40.781
U	1267.9	2579.9	.....	2589.0	2625.6	2702.9	2767.8	2825.6	2878.9	2929.4
H	1277.6	2770.9	.....	2782.5	2829.5	2929.1	3013.1	3088.1	3157.4	3223.0
S	3.1397	5.8020	.....	5.8226	5.9054	6.0755	6.2132	6.3312	6.4362	6.5319
V	1.364	25.715	.....	25.781	27.238	30.328	32.954	35.312	37.497	39.564
U	1277.6	2578.0	.....	2579.7	2617.8	2697.3	2763.5	2822.1	2876.0	2926.9
H	1287.7	2768.3	.....	2770.5	2819.3	2921.8	3007.4	3083.4	3153.5	3219.6
S	3.1571	5.7880	.....	5.7919	5.8779	6.0530	6.1933	6.3130	6.4190	6.5156
V	1.371	24.949	.....	.....	26.204	29.297	31.901	34.229	36.380	38.409
U	1287.2	2575.9	.....	.....	2609.7	2691.7	2759.2	2818.6	2873.1	2924.3
H	1297.6	2765.5	.....	.....	2808.8	2914.3	3001.6	3078.7	3149.6	3216.3
S	3.1742	5.7742	.....	.....	5.8503	6.0306	6.1737	6.2950	6.4022	6.4996
V	1.378	24.220	.....	.....	25.214	28.315	30.900	33.200	35.319	37.314
U	1296.7	2573.8	.....	.....	2601.3	2685.9	2754.8	2815.1	2870.1	2921.8
H	1307.4	2762.8	.....	.....	2798.0	2906.7	2995.8	3074.0	3145.6	3212.9
S	3.1911	5.7605	.....	.....	5.8224	6.0082	6.1542	6.2773	6.3857	6.4839
V	1.384	23.525	.....	.....	24.264	27.378	29.948	32.222	34.310	36.273
U	1306.0	2571.7	.....	.....	2592.7	2679.9	2750.3	2811.5	2867.1	2919.3
H	1317.1	2759.9	.....	.....	2786.8	2899.0	2989.9	3069.2	3141.6	3209.5
S	3.2076	5.7471	.....	.....	5.7942	5.9860	6.1349	6.2599	6.3694	6.4684

TABLE E.2 Properties of Superheated Steam (Continued)

P/kPa ($\text{psia}/^\circ\text{C}$)		sat. liq.	sat. vap.	TEMPERATURE: $^\circ\text{C}$ (TEMPERATURE: T kelvins)										
				450 (723.15)	475 (748.15)	500 (773.15)	525 (798.15)	550 (823.15)	575 (848.15)	600 (873.15)	650 (923.15)			
5800 (273.35)	V	1.312	33.651	54.026	56.357	58.644	60.896	63.120	65.320	67.500	71.807			
	U	1194.7	2591.9	2992.9	3038.8	3084.4	3129.8	3175.2	3220.7	3266.4	3358.5			
	H	1202.3	2787.0	3306.3	3365.7	3424.5	3483.0	3541.2	3599.5	3657.9	3775.0			
	S	3.0071	5.9066	6.7416	6.8223	6.8996	6.9740	7.0460	7.1157	7.1835	7.3139			
5900 (274.46)	V	1.315	33.034	53.048	55.346	57.600	59.819	62.010	64.176	66.322	70.563			
	U	1200.3	2591.1	2991.9	3037.9	3083.5	3129.0	3174.4	3220.0	3265.7	3357.9			
	H	1208.0	2786.0	3304.9	3364.4	3423.3	3481.9	3540.3	3598.6	3657.0	3774.3			
	S	3.0172	5.8986	6.7322	6.8132	6.8906	6.9652	7.0372	7.1070	7.1749	7.3054			
6000 (275.55)	V	1.319	32.438	52.103	54.369	56.592	58.778	60.937	63.071	65.184	69.359			
	U	1205.8	2590.4	2990.8	3036.9	3082.6	3128.2	3173.7	3219.3	3265.1	3357.4			
	H	1213.7	2785.0	3303.5	3363.2	3422.2	3480.8	3539.3	3597.7	3656.2	3773.5			
	S	3.0273	5.8908	6.7230	6.8041	6.8818	6.9564	7.0285	7.0985	7.1664	7.2971			
6100 (276.63)	V	1.322	31.860	51.189	53.424	55.616	57.771	59.898	62.001	64.083	68.196			
	U	1211.2	2589.6	2989.8	3036.0	3081.8	3127.4	3173.0	3218.6	3264.5	3356.8			
	H	1219.3	2783.9	3302.0	3361.9	3421.0	3479.8	3538.3	3596.8	3655.4	3772.8			
	S	3.0372	5.8830	6.7139	6.7952	6.8730	6.9478	7.0200	7.0900	7.1581	7.2889			
6200 (277.70)	V	1.325	31.300	50.304	52.510	54.671	56.797	58.894	60.966	63.018	67.069			
	U	1216.6	2588.8	2988.7	3035.0	3080.9	3126.6	3172.2	3218.0	3263.8	3356.3			
	H	1224.8	2782.9	3300.6	3360.6	3419.9	3478.7	3537.4	3595.9	3654.5	3772.1			
	S	3.0471	5.8753	6.7049	6.7864	6.8644	6.9393	7.0116	7.0817	7.1498	7.2808			
6300 (278.75)	V	1.328	30.757	49.447	51.624	53.757	55.853	57.921	59.964	61.986	65.979			
	U	1221.9	2588.0	2987.7	3034.1	3080.1	3125.8	3171.5	3217.3	3263.2	3355.7			
	H	1230.3	2781.8	3299.2	3359.3	3418.7	3477.7	3536.4	3595.0	3653.7	3771.4			
	S	3.0568	5.8677	6.6960	6.7778	6.8559	6.9309	7.0034	7.0735	7.1417	7.2728			
6400 (279.79)	V	1.332	30.230	48.617	50.767	52.871	54.939	56.978	58.993	60.987	64.922			
	U	1227.2	2587.2	2986.6	3033.1	3079.2	3125.0	3170.8	3216.6	3262.6	3355.2			
	H	1235.7	2780.6	3297.7	3358.0	3417.6	3476.6	3535.4	3594.1	3652.9	3770.7			
	S	3.0664	5.8601	6.6872	6.7692	6.8475	6.9226	6.9952	7.0655	7.1337	7.2649			
6500 (280.82)	V	1.335	29.719	47.812	49.935	52.012	54.053	56.065	58.052	60.018	63.898			
	U	1232.5	2586.3	2985.5	3032.2	3078.3	3124.2	3170.0	3215.9	3261.9	3354.6			
	H	1241.1	2779.5	3296.3	3356.8	3416.4	3475.6	3534.4	3593.2	3652.1	3770.0			
	S	3.0759	5.8527	6.6786	6.7608	6.8392	6.9145	6.9871	7.0575	7.1258	7.2572			

6600 (281.84)	V	1.338	29.223	47.031	49.129	51.180	53.194	55.179	57.139	59.079	62.905
	U	1237.6	2585.5	2984.5	3031.2	3077.4	3123.4	3169.3	3215.2	3261.3	3354.1
	H	1246.5	2778.3	3294.9	3355.5	3415.2	3474.5	3533.5	3592.3	3651.2	3769.2
	S	3.0853	5.8452	6.6700	6.7524	6.8310	6.9064	6.9792	7.0497	7.1181	7.2495
6700 (282.84)	V	1.342	28.741	46.274	48.346	50.372	52.361	54.320	56.254	58.168	61.942
	U	1242.8	2584.6	2983.4	3030.3	3076.6	3122.6	3168.6	3214.5	3260.7	3353.5
	H	1251.8	2777.1	3293.4	3354.2	3414.1	3473.4	3532.5	3591.4	3650.4	3768.5
	S	3.0946	5.8379	6.6616	6.7442	6.8229	6.8985	6.9714	7.0419	7.1104	7.2420
6800 (283.84)	V	1.345	28.272	45.539	47.587	49.588	51.552	53.486	55.395	57.283	61.007
	U	1247.9	2583.7	2982.3	3029.3	3075.7	3121.8	3167.8	3213.9	3260.0	3353.0
	H	1257.0	2775.9	3292.0	3352.9	3412.9	3472.4	3531.5	3590.5	3649.6	3767.8
	S	3.1038	5.8306	6.6532	6.7361	6.8150	6.8907	6.9636	7.0343	7.1028	7.2345
7000 (285.79)	V	1.351	27.373	44.131	46.133	48.086	50.003	51.889	53.750	55.590	59.217
	U	1258.0	2581.8	2980.1	3027.4	3074.0	3120.2	3166.3	3212.5	3258.8	3351.9
	H	1267.4	2773.5	3289.1	3350.3	3410.6	3470.2	3529.6	3588.7	3647.9	3766.4
	S	3.1219	5.8162	6.6368	6.7201	6.7993	6.8753	6.9485	7.0193	7.0880	7.2200
7200 (287.70)	V	1.358	26.522	42.802	44.759	46.668	48.540	50.381	52.197	53.991	57.527
	U	1267.9	2579.9	2978.0	3025.4	3072.2	3118.6	3164.9	3211.1	3257.5	3350.7
	H	1277.6	2770.9	3286.1	3347.7	3408.2	3468.1	3527.6	3586.9	3646.2	3764.9
	S	3.1397	5.8020	6.6208	6.7044	6.7840	6.8602	6.9337	7.0047	7.0735	7.2058
7400 (289.57)	V	1.364	25.715	41.544	43.460	45.327	47.156	48.954	50.727	52.478	55.928
	U	1277.6	2578.0	2975.8	3023.5	3070.4	3117.0	3163.4	3209.8	3256.2	3349.6
	H	1287.7	2768.3	3283.2	3345.1	3405.9	3466.0	3525.7	3585.1	3644.5	3763.5
	S	3.1571	5.7880	6.6050	6.6892	6.7691	6.8456	6.9192	6.9904	7.0594	7.1919
7600 (291.41)	V	1.371	24.949	40.351	42.228	44.056	45.845	47.603	49.335	51.045	54.413
	U	1287.2	2575.9	2973.6	3021.5	3068.7	3115.4	3161.9	3208.4	3254.9	3348.5
	H	1297.6	2765.5	3280.3	3342.5	3403.5	3463.8	3523.7	3583.3	3642.9	3762.1
	S	3.1742	5.7742	6.5896	6.6742	6.7545	6.8312	6.9051	6.9765	7.0457	7.1784
7800 (293.21)	V	1.378	24.220	39.220	41.060	42.850	44.601	46.320	48.014	49.686	52.976
	U	1296.7	2573.8	2971.4	3019.6	3066.9	3113.8	3160.4	3207.0	3253.7	3347.4
	H	1307.4	2762.8	3277.3	3339.8	3401.1	3461.7	3521.7	3581.5	3641.2	3760.6
	S	3.1911	5.7605	6.5745	6.6596	6.7402	6.8172	6.8913	6.9629	7.0322	7.1652
8000 (294.97)	V	1.384	23.525	38.145	39.950	41.704	43.419	45.102	46.759	48.394	51.611
	U	1306.0	2571.7	2969.2	3017.6	3065.1	3112.2	3158.9	3205.6	3252.4	3346.3
	H	1317.1	2759.9	3274.3	3337.2	3398.8	3459.5	3519.7	3579.7	3639.5	3759.2
	S	3.2076	5.7471	6.5597	6.6452	6.7262	6.8035	6.8778	6.9496	7.0191	7.1523

TABLE E.2 Properties of Superheated Steam (Continued)

P/kPa ($p^{\text{sat}}/^\circ\text{C}$)		sat. liq.	sat. vap.	TEMPERATURE: $t/^\circ\text{C}$ (TEMPERATURE: T kelvins)										
				300 (573.15)	320 (593.15)	340 (613.15)	360 (633.15)	380 (653.15)	400 (673.15)	425 (698.15)	450 (723.15)			
8200 (296.70)	V	1.391	22.863	23.350	25.916	28.064	29.968	31.715	33.350	35.282	37.121			
	U	1315.2	2569.5	2583.7	2657.7	2718.5	2771.5	2819.5	2864.1	2916.7	2966.9			
	H	1326.6	2757.0	2775.2	2870.2	2948.6	3017.2	3079.5	3137.6	3206.0	3271.3			
	S	3.2239	5.7338	5.7656	5.9288	6.0588	6.1689	6.2659	6.3534	6.4532	6.5452			
8400 (298.39)	V	1.398	22.231	22.469	25.058	27.203	29.094	30.821	32.435	34.337	36.147			
	U	1324.3	2567.2	2574.4	2651.1	2713.4	2767.3	2816.0	2861.1	2914.1	2964.7			
	H	1336.1	2754.0	2763.1	2861.6	2941.9	3011.7	3074.8	3133.5	3202.6	3268.3			
	S	3.2399	5.7207	5.7366	5.9056	6.0388	6.1509	6.2491	6.3376	6.4383	6.5309			
8600 (300.06)	V	1.404	21.627	.....	24.236	26.380	28.258	29.968	31.561	33.437	35.217			
	U	1333.3	2564.9	.....	2644.3	2708.1	2763.1	2812.4	2858.0	2911.5	2962.4			
	H	1345.4	2750.9	.....	2852.7	2935.0	3006.1	3070.1	3129.4	3199.1	3265.3			
	S	3.2557	5.7076	.....	5.8823	6.0189	6.1330	6.2326	6.3220	6.4236	6.5168			
8800 (301.70)	V	1.411	21.049	.....	23.446	25.592	27.459	29.153	30.727	32.576	34.329			
	U	1342.2	2562.6	.....	2637.3	2702.8	2758.8	2808.8	2854.9	2908.9	2960.1			
	H	1354.6	2747.8	.....	2843.6	2928.0	3000.4	3065.3	3125.3	3195.6	3262.2			
	S	3.2713	5.6948	.....	5.8590	5.9990	6.1152	6.2162	6.3067	6.4092	6.5030			
9000 (303.31)	V	1.418	20.495	.....	22.685	24.836	26.694	28.372	29.929	31.754	33.480			
	U	1351.0	2560.1	.....	2630.1	2697.4	2754.4	2805.2	2851.8	2906.3	2957.8			
	H	1363.7	2744.6	.....	2834.3	2920.9	2994.7	3060.5	3121.2	3192.0	3259.2			
	S	3.2867	5.6820	.....	5.8355	5.9792	6.0976	6.2000	6.2915	6.3949	6.4894			
9200 (304.89)	V	1.425	19.964	.....	21.952	24.110	25.961	27.625	29.165	30.966	32.668			
	U	1359.7	2557.7	.....	2622.7	2691.9	2750.0	2801.5	2848.7	2903.6	2955.5			
	H	1372.8	2741.3	.....	2824.7	2913.7	2988.9	3055.7	3117.0	3188.5	3256.1			
	S	3.3018	5.6694	.....	5.8118	5.9594	6.0801	6.1840	6.2765	6.3808	6.4760			
9400 (306.44)	V	1.432	19.455	.....	21.245	23.412	25.257	26.909	28.433	30.212	31.891			
	U	1368.2	2555.2	.....	2615.1	2686.3	2745.6	2797.8	2845.5	2900.9	2953.2			
	H	1381.7	2738.0	.....	2814.8	2906.3	2983.0	3050.7	3112.8	3184.9	3253.0			
	S	3.3168	5.6568	.....	5.7879	5.9397	6.0627	6.1681	6.2617	6.3669	6.4628			
9600 (307.97)	V	1.439	18.965	.....	20.561	22.740	24.581	26.221	27.731	29.489	31.145			
	U	1376.7	2552.6	.....	2607.3	2680.5	2741.0	2794.1	2842.3	2898.2	2950.9			
	H	1390.6	2734.7	.....	2804.7	2898.8	2977.0	3045.8	3108.5	3181.3	3249.9			
	S	3.3315	5.6444	.....	5.7637	5.9199	6.0454	6.1524	6.2470	6.3532	6.4498			

V	1.446	18.494	.....	19.899	22.093	23.931	25.561	27.056	28.795	30.429
U	1385.2	2550.0	.....	2599.2	2674.7	2736.4	2790.3	2839.1	2895.5	2948.6
H	1399.3	2731.2	.....	2794.3	2891.2	2971.0	3040.8	3104.2	3177.7	3246.8
S	3.3461	5.6321	.....	5.7393	5.9001	6.0282	6.1368	6.2325	6.3397	6.4369
V	1.453	18.041	.....	19.256	21.468	23.305	24.926	26.408	28.128	29.742
U	1393.5	2547.3	.....	2590.9	2668.7	2731.8	2786.4	2835.8	2892.8	2946.2
H	1408.0	2727.7	.....	2783.5	2883.4	2964.8	3035.7	3099.9	3174.1	3243.6
S	3.3605	5.6198	.....	5.7145	5.8803	6.0110	6.1213	6.2182	6.3264	6.4243
V	1.460	17.605	.....	18.632	20.865	22.702	24.315	25.785	27.487	29.081
U	1401.8	2544.6	.....	2582.3	2662.6	2727.0	2782.6	2832.6	2890.0	2943.9
H	1416.7	2724.2	.....	2772.3	2875.4	2958.6	3030.6	3095.6	3170.4	3240.5
S	3.3748	5.6076	.....	5.6894	5.8604	5.9940	6.1059	6.2040	6.3131	6.4118
V	1.467	17184	.....	18.024	20.282	22.121	23.726	25.185	26.870	28.446
U	1410.0	25418	.....	2573.4	2656.3	2722.2	2778.7	2829.3	2887.3	2941.5
H	1425.2	2720.6	.....	2760.8	2867.2	2952.3	3025.4	3091.2	3166.7	3237.3
S	3.3889	5.5955	.....	5.6638	5.8404	5.9769	6.0907	6.1899	6.3001	6.3994
V	1.474	16.778	.....	17.432	19.717	21.560	23.159	24.607	26.276	27.834
U	1418.1	2539.0	.....	2564.1	2649.9	2717.4	2774.7	2825.9	2884.5	2939.1
H	1433.7	2716.9	.....	2748.9	2858.9	2945.9	3020.2	3086.8	3163.0	3234.1
S	3.4029	5.5835	.....	5.6376	5.8203	5.9599	6.0755	6.1759	6.2872	6.3872
V	1.481	16.385	.....	16.852	19.170	21.018	22.612	24.050	25.703	27.245
U	1426.2	2536.2	.....	2554.5	2643.4	2712.4	2770.7	2822.6	2881.7	2936.7
H	1442.2	2713.1	.....	2736.5	2850.4	2939.4	3014.9	3082.3	3159.3	3230.9
S	3.4167	5.5715	.....	5.6109	5.8000	5.9429	6.0604	6.1621	6.2744	6.3752
V	1.489	16.006	.....	16.285	18.639	20.494	22.083	23.512	25.151	26.676
U	1434.2	2533.2	.....	2544.4	2636.7	2707.4	2766.7	2819.2	2878.9	2934.3
H	1450.6	2709.3	.....	2723.5	2841.7	2932.8	3009.6	3077.8	3155.5	3227.7
S	3.4304	5.5595	.....	5.5835	5.7797	5.9259	6.0454	6.1483	6.2617	6.3633
V	1.496	15.639	.....	15.726	18.124	19.987	21.573	22.993	24.619	26.128
U	1442.1	2530.3	.....	2533.8	2629.8	2702.2	2762.6	2815.8	2876.0	2931.8
H	1458.9	2705.4	.....	2710.0	2832.8	2926.1	3004.2	3073.3	3151.7	3224.5
S	3.4440	5.5476	.....	5.5553	5.7591	5.9090	6.0305	6.1347	6.2491	6.3515
V	1.504	15.284	.....	.....	17.622	19.495	21.079	22.492	24.104	25.599
U	1450.0	2527.2	.....	.....	2622.7	2697.0	2758.4	2812.3	2873.1	2929.4
H	1467.2	2701.5	.....	.....	2823.6	2919.3	2998.7	3068.7	3147.9	3221.2
S	3.4575	5.5357	.....	.....	5.7383	5.8920	6.0156	6.1211	6.2367	6.3399

TABLE E.2 Properties of Superheated Steam (Continued)

P/kPa ($\text{psia}/^\circ\text{C}$)		sat. liq.	sat. vap.	TEMPERATURE: $t/^\circ\text{C}$ (TEMPERATURE: T kelvins)										
				475 (748.15)	500 (773.15)	525 (798.15)	550 (823.15)	575 (848.15)	600 (873.15)	625 (898.15)	650 (923.15)			
8200 (296.70)	V	1.391	22.863	38.893	40.614	42.295	43.943	45.566	47.166	48.747	50.313			
	U	1315.2	2569.5	3015.6	3063.3	3110.5	3157.4	3204.3	3251.1	3298.1	3345.2			
	H	1326.6	2757.0	3334.5	3396.4	3457.3	3517.8	3577.9	3637.9	3697.8	3757.7			
	S	3.2239	5.7338	6.6311	6.7124	6.7900	6.8646	6.9365	7.0062	7.0739	7.1397			
8400 (298.39)	V	1.398	22.231	37.887	39.576	41.224	42.839	44.429	45.996	47.544	49.076			
	U	1324.3	2567.2	3013.6	3061.6	3108.9	3155.9	3202.9	3249.8	3296.9	3344.1			
	H	1336.1	2754.0	3331.9	3394.0	3455.2	3515.8	3576.1	3636.2	3696.2	3756.3			
	S	3.2399	5.7207	6.6173	6.6990	6.7769	6.8516	6.9238	6.9936	7.0614	7.1274			
8600 (300.06)	V	1.404	21.627	36.928	38.586	40.202	41.787	43.345	44.880	46.397	47.897			
	U	1333.3	2564.9	3011.6	3059.8	3107.3	3154.4	3201.5	3248.5	3295.7	3342.9			
	H	1345.4	2750.9	3329.2	3391.6	3453.0	3513.8	3574.3	3634.5	3694.7	3754.9			
	S	3.2557	5.7076	6.6037	6.6858	6.7639	6.8390	6.9113	6.9813	7.0492	7.1153			
8800 (301.70)	V	1.411	21.049	36.011	37.640	39.228	40.782	42.310	43.815	45.301	46.771			
	U	1342.2	2562.6	3009.6	3058.0	3105.6	3152.9	3200.1	3247.2	3294.5	3341.8			
	H	1354.6	2747.8	3326.5	3389.2	3450.8	3511.8	3572.4	3632.8	3693.1	3753.4			
	S	3.2713	5.6948	6.5904	6.6728	6.7513	6.8265	6.8990	6.9692	7.0373	7.1035			
9000 (303.31)	V	1.418	20.495	35.136	36.737	38.296	39.822	41.321	42.798	44.255	45.695			
	U	1351.0	2560.1	3007.6	3056.1	3104.0	3151.4	3198.7	3246.0	3293.3	3340.7			
	H	1363.7	2744.6	3323.8	3386.8	3448.7	3509.8	3570.6	3631.1	3691.6	3752.0			
	S	3.2867	5.6820	6.5773	6.6600	6.7388	6.8143	6.8870	6.9574	7.0256	7.0919			
9200 (304.89)	V	1.425	19.964	34.298	35.872	37.405	38.904	40.375	41.824	43.254	44.667			
	U	1359.7	2557.7	3005.6	3054.3	3102.3	3149.9	3197.3	3244.7	3292.1	3339.6			
	H	1372.8	2741.3	3321.1	3384.4	3446.5	3507.8	3568.8	3629.5	3690.0	3750.5			
	S	3.3018	5.6694	6.5644	6.6475	6.7266	6.8023	6.8752	6.9457	7.0141	7.0806			
9400 (306.44)	V	1.432	19.455	33.495	35.045	36.552	38.024	39.470	40.892	42.295	43.682			
	U	1368.2	2555.2	3003.5	3052.5	3100.7	3148.4	3195.9	3243.4	3290.9	3338.5			
	H	1381.7	2738.0	3318.4	3381.9	3444.3	3505.9	3566.9	3627.8	3688.4	3749.1			
	S	3.3168	5.6568	6.5517	6.6352	6.7146	6.7906	6.8637	6.9343	7.0029	7.0695			
9600 (307.97)	V	1.439	18.965	32.726	34.252	35.734	37.182	38.602	39.999	41.377	42.738			
	U	1376.7	2552.6	3001.5	3050.7	3099.0	3146.9	3194.5	3242.1	3289.7	3337.4			
	H	1390.6	2734.7	3315.6	3379.5	3442.1	3503.9	3565.1	3626.1	3686.9	3747.6			
	S	3.3315	5.6444	6.5392	6.6231	6.7028	6.7790	6.8523	6.9231	6.9918	7.0585			

V	1.446	18.494	31.988	33.491	34.949	36.373	37.769	39.142	40.496	41.832
U	1385.2	2550.0	2999.4	3048.8	3097.4	3145.4	3193.1	3240.8	3288.5	3336.2
H	1399.3	2731.2	3312.9	3377.0	3439.9	3501.9	3563.3	3624.4	3685.3	3746.2
S	3.3461	5.6321	6.5268	6.6112	6.6912	6.7676	6.8411	6.9121	6.9810	7.0478
V	1.453	18.041	31.280	32.760	34.196	35.597	36.970	38.320	39.650	40.963
U	1393.5	2547.3	2997.4	3047.0	3095.7	3143.9	3191.7	3239.5	3287.3	3335.1
H	1408.0	2727.7	3310.1	3374.6	3437.7	3499.8	3561.4	3622.7	3683.8	3744.7
S	3.3605	5.6198	6.5147	6.5994	6.6797	6.7564	6.8302	6.9013	6.9703	7.0373
V	1.460	17.605	30.599	32.058	33.472	34.851	36.202	37.530	38.837	40.128
U	1401.8	2544.6	2995.3	3045.2	3094.0	3142.3	3190.3	3238.2	3286.1	3334.0
H	1416.7	2724.2	3307.4	3372.1	3435.5	3497.8	3559.6	3621.0	3682.2	3743.3
S	3.3748	5.6076	6.5027	6.5879	6.6685	6.7454	6.8194	6.8907	6.9598	7.0269
V	1.467	17.184	29.943	31.382	32.776	34.134	35.464	36.770	38.056	39.325
U	1410.0	2541.8	2993.2	3043.3	3092.4	3140.8	3188.9	3236.9	3284.8	3332.9
H	1425.2	2720.6	3304.6	3369.7	3433.2	3495.8	3557.8	3619.3	3680.6	3741.8
S	3.3889	5.5955	6.4909	6.5765	6.6574	6.7346	6.8087	6.8803	6.9495	7.0167
V	1.474	16.778	29.313	30.732	32.106	33.444	34.753	36.039	37.304	38.552
U	1418.1	2539.0	2991.1	3041.4	3090.7	3139.3	3187.5	3235.6	3283.6	3331.7
H	1433.7	2716.9	3301.8	3367.2	3431.0	3493.8	3555.9	3617.6	3679.1	3740.4
S	3.4029	5.5835	6.4793	6.5652	6.6465	6.7239	6.7983	6.8700	6.9394	7.0067
V	1.481	16.385	28.706	30.106	31.461	32.779	34.069	35.335	36.580	37.808
U	1426.2	2536.2	2989.0	3039.6	3089.0	3137.8	3186.1	3234.3	3282.4	3330.6
H	1442.2	2713.1	3299.0	3364.7	3428.8	3491.8	3554.1	3615.9	3677.5	3738.9
S	3.4167	5.5715	6.4678	6.5542	6.6357	6.7134	6.7880	6.8599	6.9294	6.9969
V	1.489	16.006	28.120	29.503	30.839	32.139	33.410	34.656	35.882	37.091
U	1434.2	2533.2	2986.9	3037.7	3087.3	3136.2	3184.7	3233.0	3281.2	3329.5
H	1450.6	2709.3	3296.2	3362.2	3426.5	3489.7	3552.2	3614.2	3675.9	3737.5
S	3.4304	5.5595	6.4564	6.5432	6.6251	6.7031	6.7779	6.8499	6.9196	6.9872
V	1.496	15.639	27.555	28.921	30.240	31.521	32.774	34.002	35.210	36.400
U	1442.1	2530.3	2984.8	3035.8	3085.6	3134.7	3183.3	3231.7	3280.0	3328.4
H	1458.9	2705.4	3293.4	3359.7	3424.3	3487.7	3550.4	3612.5	3674.4	3736.0
S	3.4440	5.5476	6.4452	6.5324	6.6147	6.6929	6.7679	6.8401	6.9099	6.9777
V	1.504	15.284	27.010	28.359	29.661	30.925	32.160	33.370	34.560	35.733
U	1450.0	2527.2	2982.6	3033.9	3083.9	3133.1	3181.9	3230.4	3278.8	3327.2
H	1467.2	2701.5	3290.5	3357.2	3422.1	3485.7	3548.5	3610.8	3672.8	3734.6
S	3.4575	5.5357	6.4341	6.5218	6.6043	6.6828	6.7580	6.8304	6.9004	6.9683

C. Soal Latihan/ Tugas

1. Carilah nilai energy dalam, entalpi, dan entropi superheated steam pada kondisi berikut:
 - a. $P = 8400\text{kPa}$ pada suhu 550 C
 - b. $P = 6100\text{kPa}$ pada suhu 450 C
 - c. $P = 4400\text{kPa}$ pada suhu 300 C
2. Carilah nilai energy dalam, entalpi, dan entropi saturated steam pada kondisi berikut:
 - a. Suhu 180 C
 - b. Suhu 30 C
 - c. Suhu 70 C
 - d. Suhu 340 C

D. Daftar Pustaka

- J.M Smith, Henrick C Van Ness & Michael Abbott. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 6th edition. New York: McGraw-Hill publisher.
- Ahmad Abu Hamid. (2007). Modul Kalor dan Termodinamika. Fakultas Matematika dan IPA. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Hadiyanto. (2014). Dasar Termodinamika. Jurusan Teknik Kimia. Universitas Diponegoro.
- Rizki Pebriani. (2017). Termodinamika. Fakultas Teknik. Politeknik Negeri Sriwijaya
- Suprpto Brotosiswojo. (2007). Pengantar Fisika Statistik. Universitas Terbuka.
- Berlian Hasan. (2015). Termodinamika. Fakultas Teknik. Politeknik Negeri Ujung Pandang
- Pathur Ahli Hamzah. (2018). Termodinamika Teknik 1. Fakultas Teknik. Universitas Lambung Mangkurat.
- Paulus Cahyono Tjiang. (2006) Efisiensi Siklus Carnot untuk Persamaan Gas. LPPM.Universitas Katolik Parahyangan.
- Quipper. Termodinamika: Pengertian, Prinsip, Hukum dan keadaan (diakses tanggal 5 Maret 2020) Tersedia pada <https://www.quipper.com/id/blog/mapel/fisika/pengertian-termodinamika-lengkap/>

PERTEMUAN 9

TABEL PROPERTI TERMODINAMIKA

A. Capaian Pembelajaran

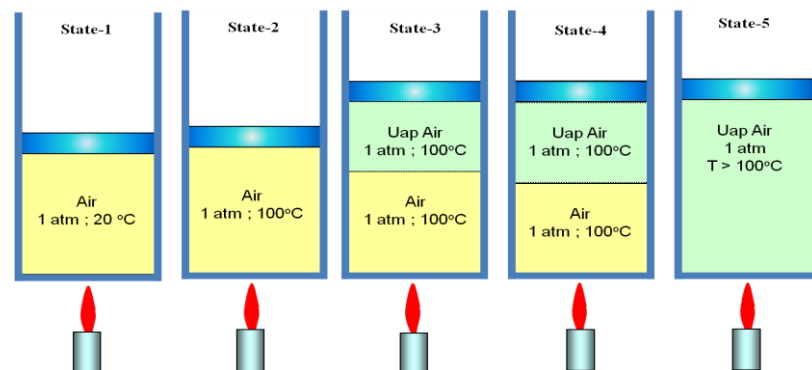
Menguasai definisi perubahan fase pada zat murni yang berkaitan dengan istilah cair tekan (compressed liquid), cair jenuh (saturation liquid), campuran air-uap, uap jenuh (saturated liquid) dan uap panas lanjut (superheated vapor). Dapat membaca dan menjelaskan tabel properti termodinamika (steam table).

B. Uraian Materi

Pada pertemuan ini akan dibahas secara detail tentang perubahan fase pada zat murni. Perubahan fase pada zat murni ditinjau dengan menggunakan air sebagai zat yang dianalisis karena air dapat berada pada keadaan campuran antara cair dan uap. Ada beberapa keadaan yang dilalui air hingga berubah fase menjadi uap, keadaan tersebut meliputi:

1. Cair tekan (Compressed liquid)

Kondisi pertama yang dilalui air saat dipanaskan adalah kondisi cair tekan (compressed liquid), kondisi awal dimana cairan belum siap menguap. Contohnya adalah ketika anda menuangkan air pada sebuah silinder pada suhu ruangan 20°C (293.15 K) dan tekanan 1 atm . Saat silinder dipanaskan, akan terjadi peningkatan suhu air dan diikuti dengan penambahan volume dari sistem tersebut. Pada kondisi ini volume bertambah dengan massa air yang tetap, menandakan bahwa terjadi peningkatan specific volume seperti pada gambar 1.



Gambar 26. Proses perubahan fase zat murni

2. Cair jenuh (Saturation liquid)

Kondisi kedua adalah kondisi cair jenuh (saturation liquid), dimana bila kita terus menerus menambahkan kalor pada sistem maka suhu akan meningkat. Pada titik tersebut, akan terjadi proses penguapan air. Titik dimana air mulai menguap dikenal dengan sebutan saturated liquid.

3. Campuran Air-Uap (Liquid – Vapor Mixture)

Dalam fase ini, temperatur akan konstan hingga seluruh cairan berubah menjadi uap.

Pada gambar dapat terlihat bahwa toraks terdorong ke atas. Hal tersebut dikarenakan volume fluida yang meningkat karena terjadinya perubahan fase, sehingga volume spesifik uap lebih besar dari cair yang menyebabkan terdorongnya toraks tersebut.

4. Uap jenuh (Saturated Vapor)

Jika sistem tersebut ditambahkan panas terus menerus maka akan menghasilkan uap dengan jumlah yang semakin banyak. Tetapi kondisi sistem tersebut (suhu dan tekanannya) tetap konstan. Pada kondisi ini hanya specific volume yang bertambah. Kondisi yang sama berlangsung hingga berubah sepenuhnya menjadi uap. Keadaan tersebut disebut saturated vapor. Kondisi dimana air ada diantara dua fasa secara bersamaan dikenal dengan sebutan **saturated liquid-vapor mixture**.

5. Uap panas jenuh (Superheated vapor)

Pada kondisi terakhir, dimana seluruh cairan telah berubah menjadi fase uap, suhu akan meingkat seiring dengan bertambahnya panas pada sistem tersebut. Keadaan ini dikenal dengan istilah superheated vapor.

Perbedaan antara uap jenuh dengan uap panas jenuh adalah kalau kita ambil kalor yang ada dari sistem, sistem tersebut akan mengembun. Di sisi lain pada fase uap panas jenuh, kalau kita kurangi suhunya tidak dapat merubah fasanya, hanya akan menurunkan suhu uap saja.

1. Tabel properti

Properti dari suatu zat biasanya ditampilkan dalam bentuk tabel. Properti termodinamika pada tabel tersebut digunakan dalam perhitungan beberapa masalah termodinamika. Untuk masing-masing zat, properti termodinamika

ditampilkan lebih dari satu tabel. Berikut beberapa contoh tabel properti zat yang umum digunakan dalam perhitungan termodinamika.

TABLE A – 1

Molar mass, gas constant, and critical-point properties

Substance	Formula	Molar mass, <i>M</i> kg/kmol	Gas constant, <i>R</i> kJ/kg · K*	Critical-point properties		
				Temperature, K	Pressure, MPa	Volume, m ³ /kmol
Air	—	28.97	0.2870	132.5	3.77	0.0883
Ammonia	NH ₃	17.03	0.4882	405.5	11.28	0.0724
Argon	Ar	39.948	0.2081	151	4.86	0.0749
Benzene	C ₆ H ₆	78.115	0.1064	562	4.92	0.2603
Bromine	Br ₂	159.808	0.0520	584	10.34	0.1355
<i>n</i> -Butane	C ₄ H ₁₀	58.124	0.1430	425.2	3.80	0.2547
Carbon dioxide	CO ₂	44.01	0.1889	304.2	7.39	0.0943
Carbon monoxide	CO	28.011	0.2968	133	3.50	0.0930
Carbon tetrachloride	CCl ₄	153.82	0.05405	556.4	4.56	0.2759
Chlorine	Cl ₂	70.906	0.1173	417	7.71	0.1242
Chloroform	CHCl ₃	119.38	0.06964	536.6	5.47	0.2403
Dichlorodifluoromethane (R-12)	CCl ₂ F ₂	120.91	0.06876	384.7	4.01	0.2179
Dichlorofluoromethane (R-21)	CHCl ₂ F	102.92	0.08078	451.7	5.17	0.1973
Ethane	C ₂ H ₆	30.070	0.2765	305.5	4.48	0.1480
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH	46.07	0.1805	516	6.38	0.1673
Ethylene	C ₂ H ₄	28.054	0.2964	282.4	5.12	0.1242
Helium	He	4.003	2.0769	5.3	0.23	0.0578
<i>n</i> -Hexane	C ₆ H ₁₄	86.179	0.09647	507.9	3.03	0.3677
Hydrogen (normal)	H ₂	2.016	4.1240	33.3	1.30	0.0649
Krypton	Kr	83.80	0.09921	209.4	5.50	0.0924
Methane	CH ₄	16.043	0.5182	191.1	4.64	0.0993
Methyl alcohol	CH ₃ OH	32.042	0.2595	513.2	7.95	0.1180
Methyl chloride	CH ₃ Cl	50.488	0.1647	416.3	6.68	0.1430
Neon	Ne	20.183	0.4119	44.5	2.73	0.0417
Nitrogen	N ₂	28.013	0.2968	126.2	3.39	0.0899
Nitrous oxide	N ₂ O	44.013	0.1889	309.7	7.27	0.0961
Oxygen	O ₂	31.999	0.2598	154.8	5.08	0.0780
Propane	C ₃ H ₈	44.097	0.1885	370	4.26	0.1998
Propylene	C ₃ H ₆	42.081	0.1976	365	4.62	0.1810
Sulfur dioxide	SO ₂	64.063	0.1298	430.7	7.88	0.1217
Tetrafluoroethane (R-134a)	CF ₃ CH ₂ F	102.03	0.08149	374.2	4.059	0.1993
Trichlorofluoromethane (R-11)	CCl ₃ F	137.37	0.06052	471.2	4.38	0.2478
Water	H ₂ O	18.015	0.4615	647.1	22.06	0.0560
Xenon	Xe	131.30	0.06332	289.8	5.88	0.1186

*The unit kJ/kg · K is equivalent to kPa · m³/kg · K. The gas constant is calculated from $R = R_u/M$, where $R_u = 8.31447$ kJ/kmol · K and M is the molar mass.

Source: K. A. Kobe and R. E. Lynn, Jr., *Chemical Review* 52 (1953), pp. 117–236; and ASHRAE, *Handbook of Fundamentals* (Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993), pp. 16.4 and 36.1.

Tabel A-1 menjabarkan massa molar beberapa zat beserta properti kritisnya (suhu kritis, tekanan kritis dan volume kritis) masing-masing zat.

TABLE A-2

Ideal-gas specific heats of various common gases

(a) At 300 K

Gas	Formula	Gas constant, R kJ/kg · K	c_p kJ/kg · K	c_v kJ/kg · K	k
Air	—	0.2870	1.005	0.718	1.400
Argon	Ar	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Butane	C_4H_{10}	0.1433	1.7164	1.5734	1.091
Carbon dioxide	CO_2	0.1889	0.846	0.657	1.289
Carbon monoxide	CO	0.2968	1.040	0.744	1.400
Ethane	C_2H_6	0.2765	1.7662	1.4897	1.186
Ethylene	C_2H_4	0.2964	1.5482	1.2518	1.237
Helium	He	2.0769	5.1926	3.1156	1.667
Hydrogen	H_2	4.1240	14.307	10.183	1.405
Methane	CH_4	0.5182	2.2537	1.7354	1.299
Neon	Ne	0.4119	1.0299	0.6179	1.667
Nitrogen	N_2	0.2968	1.039	0.743	1.400
Octane	C_8H_{18}	0.0729	1.7113	1.6385	1.044
Oxygen	O_2	0.2598	0.918	0.658	1.395
Propane	C_3H_8	0.1885	1.6794	1.4909	1.126
Steam	H_2O	0.4615	1.8723	1.4108	1.327

TABLE A-2

Ideal-gas specific heats of various common gases (Continued)

(b) At various temperatures

Temperature, K	c_p kJ/kg · K	c_v kJ/kg · K	k	c_p kJ/kg · K	c_v kJ/kg · K	k	c_p kJ/kg · K	c_v kJ/kg · K	k
	<i>Air</i>			<i>Carbon dioxide, CO_2</i>			<i>Carbon monoxide, CO</i>		
250	1.003	0.716	1.401	0.791	0.602	1.314	1.039	0.743	1.400
300	1.005	0.718	1.400	0.846	0.657	1.288	1.040	0.744	1.399
350	1.008	0.721	1.398	0.895	0.706	1.268	1.043	0.746	1.398
400	1.013	0.726	1.395	0.939	0.750	1.252	1.047	0.751	1.395
450	1.020	0.733	1.391	0.978	0.790	1.239	1.054	0.757	1.392
500	1.029	0.742	1.387	1.014	0.825	1.229	1.063	0.767	1.387
550	1.040	0.753	1.381	1.046	0.857	1.220	1.075	0.778	1.382
600	1.051	0.764	1.376	1.075	0.886	1.213	1.087	0.790	1.376
650	1.063	0.776	1.370	1.102	0.913	1.207	1.100	0.803	1.370
700	1.075	0.788	1.364	1.126	0.937	1.202	1.113	0.816	1.364
750	1.087	0.800	1.359	1.148	0.959	1.197	1.126	0.829	1.358
800	1.099	0.812	1.354	1.169	0.980	1.193	1.139	0.842	1.353
900	1.121	0.834	1.344	1.204	1.015	1.186	1.163	0.866	1.343
1000	1.142	0.855	1.336	1.234	1.045	1.181	1.185	0.888	1.335
<i>Hydrogen, H_2</i>				<i>Nitrogen, N_2</i>			<i>Oxygen, O_2</i>		
250	14.051	9.927	1.416	1.039	0.742	1.400	0.913	0.653	1.398
300	14.307	10.183	1.405	1.039	0.743	1.400	0.918	0.658	1.395
350	14.427	10.302	1.400	1.041	0.744	1.399	0.928	0.668	1.389
400	14.476	10.352	1.398	1.044	0.747	1.397	0.941	0.681	1.382
450	14.501	10.377	1.398	1.049	0.752	1.395	0.956	0.696	1.373
500	14.513	10.389	1.397	1.056	0.759	1.391	0.972	0.712	1.365
550	14.530	10.405	1.396	1.065	0.768	1.387	0.988	0.728	1.358
600	14.546	10.422	1.396	1.075	0.778	1.382	1.003	0.743	1.350
650	14.571	10.447	1.395	1.086	0.789	1.376	1.017	0.758	1.343
700	14.604	10.480	1.394	1.098	0.801	1.371	1.031	0.771	1.337
750	14.645	10.521	1.392	1.110	0.813	1.365	1.043	0.783	1.332
800	14.695	10.570	1.390	1.121	0.825	1.360	1.054	0.794	1.327
900	14.822	10.698	1.385	1.145	0.849	1.349	1.074	0.814	1.319
1000	14.983	10.859	1.380	1.167	0.870	1.341	1.090	0.830	1.313

Source: Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4th ed. (New York: McGraw-Hill, 1983), p. 783, Table A-4M. Originally published in *Tables of Thermal Properties of Gases*, NBS Circular 564, 1955.

TABLE A-2Ideal-gas specific heats of various common gases (*Concluded*)

(c) As a function of temperature

$$c_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

(T in K, c_p in kJ/kmol · K)

Substance	Formula	a	b	c	d	Temperature range, K	% error	
							Max.	Avg.
Nitrogen	N ₂	28.90	-0.1571×10^{-2}	0.8081×10^{-5}	-2.873×10^{-9}	273–1800	0.59	0.34
Oxygen	O ₂	25.48	1.520×10^{-2}	-0.7155×10^{-5}	1.312×10^{-9}	273–1800	1.19	0.28
Air	—	28.11	0.1967×10^{-2}	0.4802×10^{-5}	-1.966×10^{-9}	273–1800	0.72	0.33
Hydrogen	H ₂	29.11	-0.1916×10^{-2}	0.4003×10^{-5}	-0.8704×10^{-9}	273–1800	1.01	0.26
Carbon monoxide	CO	28.16	0.1675×10^{-2}	0.5372×10^{-5}	-2.222×10^{-9}	273–1800	0.89	0.37
Carbon dioxide	CO ₂	22.26	5.981×10^{-2}	-3.501×10^{-5}	7.469×10^{-9}	273–1800	0.67	0.22
Water vapor	H ₂ O	32.24	0.1923×10^{-2}	1.055×10^{-5}	-3.595×10^{-9}	273–1800	0.53	0.24
Nitric oxide	NO	29.34	-0.09395×10^{-2}	0.9747×10^{-5}	-4.187×10^{-9}	273–1500	0.97	0.36
Nitrous oxide	N ₂ O	24.11	5.8632×10^{-2}	-3.562×10^{-5}	10.58×10^{-9}	273–1500	0.59	0.26
Nitrogen dioxide	NO ₂	22.9	5.715×10^{-2}	-3.52×10^{-5}	7.87×10^{-9}	273–1500	0.46	0.18
Ammonia	NH ₃	27.568	2.5630×10^{-2}	0.99072×10^{-5}	-6.6909×10^{-9}	273–1500	0.91	0.36
Sulfur	S ₂	27.21	2.218×10^{-2}	-1.628×10^{-5}	3.986×10^{-9}	273–1800	0.99	0.38
Sulfur dioxide	SO ₂	25.78	5.795×10^{-2}	-3.812×10^{-5}	8.612×10^{-9}	273–1800	0.45	0.24
Sulfur trioxide	SO ₃	16.40	14.58×10^{-2}	-11.20×10^{-5}	32.42×10^{-9}	273–1300	0.29	0.13
Acetylene	C ₂ H ₂	21.8	9.2143×10^{-2}	-6.527×10^{-5}	18.21×10^{-9}	273–1500	1.46	0.59
Benzene	C ₆ H ₆	-36.22	48.475×10^{-2}	-31.57×10^{-5}	77.62×10^{-9}	273–1500	0.34	0.20
Methanol	CH ₄ O	19.0	9.152×10^{-2}	-1.22×10^{-5}	-8.039×10^{-9}	273–1000	0.18	0.08
Ethanol	C ₂ H ₆ O	19.9	20.96×10^{-2}	-10.38×10^{-5}	20.05×10^{-9}	273–1500	0.40	0.22
Hydrogen chloride	HCl	30.33	-0.7620×10^{-2}	1.327×10^{-5}	-4.338×10^{-9}	273–1500	0.22	0.08
Methane	CH ₄	19.89	5.024×10^{-2}	1.269×10^{-5}	-11.01×10^{-9}	273–1500	1.33	0.57
Ethane	C ₂ H ₆	6.900	17.27×10^{-2}	-6.406×10^{-5}	7.285×10^{-9}	273–1500	0.83	0.28
Propane	C ₃ H ₈	-4.04	30.48×10^{-2}	-15.72×10^{-5}	31.74×10^{-9}	273–1500	0.40	0.12
<i>n</i> -Butane	C ₄ H ₁₀	3.96	37.15×10^{-2}	-18.34×10^{-5}	35.00×10^{-9}	273–1500	0.54	0.24
<i>i</i> -Butane	C ₄ H ₁₀	-7.913	41.60×10^{-2}	-23.01×10^{-5}	49.91×10^{-9}	273–1500	0.25	0.13
<i>n</i> -Pentane	C ₅ H ₁₂	6.774	45.43×10^{-2}	-22.46×10^{-5}	42.29×10^{-9}	273–1500	0.56	0.21
<i>n</i> -Hexane	C ₆ H ₁₄	6.938	55.22×10^{-2}	-28.65×10^{-5}	57.69×10^{-9}	273–1500	0.72	0.20
Ethylene	C ₂ H ₄	3.95	15.64×10^{-2}	-8.344×10^{-5}	17.67×10^{-9}	273–1500	0.54	0.13
Propylene	C ₃ H ₆	3.15	23.83×10^{-2}	-12.18×10^{-5}	24.62×10^{-9}	273–1500	0.73	0.17

Source: B. G. Kyle, *Chemical and Process Thermodynamics* (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1984). Used with permission.

Tabel A-2 menjabarkan nilai Cp dan Cv beberapa zat dengan fungsi suhu.
Untuk beberapa jenis gas khusus, nilai Cp dapat dihitung dengan rumus:

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

TABLE A-4

Saturated water—Temperature table

Temp., T °C	Sat. press., P_{sat} kPa	Specific volume, m^3/kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.9	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

TABLE A-4

Saturated water—Temperature table (Continued)

Temp., T °C	Sat. press., P_{sat} kPa	Specific volume, m^3/kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
205	1724.3	0.001164	0.11508	872.86	1723.5	2596.4	874.87	1920.0	2794.8	2.3776	4.0154	6.3930
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38	1702.9	2598.3	897.61	1899.7	2797.3	2.4245	3.9318	6.3563
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02	1681.9	2599.9	920.50	1878.8	2799.3	2.4712	3.8489	6.3200
220	2319.6	0.001190	0.086094	940.79	1660.5	2601.3	943.55	1857.4	2801.0	2.5176	3.7664	6.2840
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70	1638.6	2602.3	966.76	1835.4	2802.2	2.5639	3.6844	6.2483
230	2797.1	0.001209	0.071505	986.76	1616.1	2602.9	990.14	1812.8	2802.9	2.6100	3.6028	6.2128
235	3062.6	0.001219	0.065300	1010.0	1593.2	2603.2	1013.7	1789.5	2803.2	2.6560	3.5216	6.1775
240	3347.0	0.001229	0.059707	1033.4	1569.8	2603.1	1037.5	1765.5	2803.0	2.7018	3.4405	6.1424
245	3651.2	0.001240	0.054656	1056.9	1545.7	2602.7	1061.5	1740.8	2802.2	2.7476	3.3596	6.1072
250	3976.2	0.001252	0.050085	1080.7	1521.1	2601.8	1085.7	1715.3	2801.0	2.7933	3.2788	6.0721
255	4322.9	0.001263	0.045941	1104.7	1495.8	2600.5	1110.1	1689.0	2799.1	2.8390	3.1979	6.0369
260	4692.3	0.001276	0.042175	1128.8	1469.9	2598.7	1134.8	1661.8	2796.6	2.8847	3.1169	6.0017
265	5085.3	0.001289	0.038748	1153.3	1443.2	2596.5	1159.8	1633.7	2793.5	2.9304	3.0358	5.9662
270	5503.0	0.001303	0.035622	1177.9	1415.7	2593.7	1185.1	1604.6	2789.7	2.9762	2.9542	5.9305
275	5946.4	0.001317	0.032767	1202.9	1387.4	2590.3	1210.7	1574.5	2785.2	3.0221	2.8723	5.8944
280	6416.6	0.001333	0.030153	1228.2	1358.2	2586.4	1236.7	1543.2	2779.9	3.0681	2.7898	5.8579
285	6914.6	0.001349	0.027756	1253.7	1328.1	2581.8	1263.1	1510.7	2773.7	3.1144	2.7066	5.8210
290	7441.8	0.001366	0.025554	1279.7	1296.9	2576.5	1289.8	1476.9	2766.7	3.1608	2.6225	5.7834
295	7999.0	0.001384	0.023528	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2076	2.5374	5.7450
300	8587.9	0.001404	0.021659	1332.7	1230.9	2563.6	1344.8	1404.8	2749.6	3.2548	2.4511	5.7059
305	9209.4	0.001425	0.019932	1360.0	1195.9	2555.8	1373.1	1366.3	2739.4	3.3024	2.3633	5.6657
310	9865.0	0.001447	0.018333	1387.7	1159.3	2547.1	1402.0	1325.9	2727.9	3.3506	2.2737	5.6243
315	10,556	0.001472	0.016849	1416.1	1121.1	2537.2	1431.6	1283.4	2715.0	3.3994	2.1821	5.5816
320	11,284	0.001499	0.015470	1445.1	1080.9	2526.0	1462.0	1238.5	2700.6	3.4491	2.0881	5.5372
325	12,051	0.001528	0.014183	1475.0	1038.5	2513.4	1493.4	1191.0	2684.3	3.4998	1.9911	5.4908
330	12,858	0.001560	0.012979	1505.7	993.5	2499.2	1525.8	1140.3	2666.0	3.5516	1.8906	5.4422
335	13,707	0.001597	0.011848	1537.5	945.5	2483.0	1559.4	1086.0	2645.4	3.6050	1.7857	5.3907
340	14,601	0.001638	0.010783	1570.7	893.8	2464.5	1594.6	1027.4	2622.0	3.6602	1.6756	5.3358
345	15,541	0.001685	0.009772	1605.5	837.7	2443.2	1631.7	963.4	2595.1	3.7179	1.5585	5.2765
350	16,529	0.001741	0.008806	1642.4	775.9	2418.3	1671.2	892.7	2563.9	3.7788	1.4326	5.2114
355	17,570	0.001808	0.007872	1682.2	706.4	2388.6	1714.0	812.9	2526.9	3.8442	1.2942	5.1384
360	18,666	0.001895	0.006950	1726.2	625.7	2351.9	1761.5	720.1	2481.6	3.9165	1.1373	5.0537
365	19,822	0.002015	0.006009	1777.2	526.4	2303.6	1817.2	605.5	2422.7	4.0004	0.9489	4.9493
370	21,044	0.002217	0.004953	1844.5	385.6	2230.1	1891.2	443.1	2334.3	4.1119	0.6890	4.8009
373.95	22,064	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Tabel A-4 menjabarkan nilai volume spesifik, energi dalam, entalpi dan entropi untuk air dalam kondisi cair jenuh (saturated vapor). Tabel A-4 merupakan tabel dengan temperatur sebagai variabel bebasnya dengan kisaran suhu dari 0.01°C hingga 373.95°C.

Notasi f (v_f , u_f , h_f , s_f) merupakan volume jenis, energi dalam, entalpi dan entropi untuk fase cair jenuh sedangkan g (v_g , u_g , h_g , s_g) adalah volume jenis, energi dalam, entalpi dan entropi untuk fase uap jenuh.

TABLE A-5

Saturated water—Pressure table

Press., <i>P</i> kPa	Sat. temp., <i>T</i> _{sat} °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
		Sat. liquid, <i>v</i> _f	Sat. vapor, <i>v</i> _g	Sat. liquid, <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>u</i> _g	Sat. liquid, <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>h</i> _g	Sat. liquid, <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>s</i> _g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

TABLE A-5

Saturated water—Pressure table (Continued)

Press., <i>P</i> kPa	Sat. temp., <i>T</i> _{sat} °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
		Sat. liquid, <i>v</i> _f	Sat. vapor, <i>v</i> _g	Sat. liquid, <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>u</i> _g	Sat. liquid, <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>h</i> _g	Sat. liquid, <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Sat. vapor, <i>s</i> _g
800	170.41	0.001115	0.24035	719.97	1856.1	2576.0	720.87	2047.5	2768.3	2.0457	4.6160	6.6616
850	172.94	0.001118	0.22690	731.00	1846.9	2577.9	731.95	2038.8	2770.8	2.0705	4.5705	6.6409
900	175.35	0.001121	0.21489	741.55	1838.1	2579.6	742.56	2030.5	2773.0	2.0941	4.5273	6.6213
950	177.66	0.001124	0.20411	751.67	1829.6	2581.3	752.74	2022.4	2775.2	2.1166	4.4862	6.6027
1000	179.88	0.001127	0.19436	761.39	1821.4	2582.8	762.51	2014.6	2777.1	2.1381	4.4470	6.5850
1100	184.06	0.001133	0.17745	779.78	1805.7	2585.5	781.03	1999.6	2780.7	2.1785	4.3735	6.5520
1200	187.96	0.001138	0.16326	796.96	1790.9	2587.8	798.33	1985.4	2783.8	2.2159	4.3058	6.5217
1300	191.60	0.001144	0.15119	813.10	1776.8	2589.9	814.59	1971.9	2786.5	2.2508	4.2428	6.4936
1400	195.04	0.001149	0.14078	828.35	1763.4	2591.8	829.96	1958.9	2788.9	2.2835	4.1840	6.4675
1500	198.29	0.001154	0.13171	842.82	1750.6	2593.4	844.55	1946.4	2791.0	2.3143	4.1287	6.4430
1750	205.72	0.001166	0.11344	876.12	1720.6	2596.7	878.16	1917.1	2795.2	2.3844	4.0033	6.3877
2000	212.38	0.001177	0.099587	906.12	1693.0	2599.1	908.47	1889.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3390
2250	218.41	0.001187	0.088717	933.54	1667.3	2600.9	936.21	1864.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2954
2500	223.95	0.001197	0.079952	958.87	1643.2	2602.1	961.87	1840.1	2801.9	2.5542	3.7016	6.2558
3000	233.85	0.001217	0.066667	1004.6	1598.5	2603.2	1008.3	1794.9	2803.2	2.6454	3.5402	6.1856
3500	242.56	0.001235	0.057061	1045.4	1557.6	2603.0	1049.7	1753.0	2802.7	2.7253	3.3991	6.1244
4000	250.35	0.001252	0.049779	1082.4	1519.3	2601.7	1087.4	1713.5	2800.8	2.7966	3.2731	6.0696
5000	263.94	0.001286	0.039448	1148.1	1448.9	2597.0	1154.5	1639.7	2794.2	2.9207	3.0530	5.9737
6000	275.59	0.001319	0.032449	1205.8	1384.1	2589.9	1213.8	1570.9	2784.6	3.0275	2.8627	5.8902
7000	285.83	0.001352	0.027378	1258.0	1323.0	2581.0	1267.5	1505.2	2772.6	3.1220	2.6927	5.8148
8000	295.01	0.001384	0.023525	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2077	2.5373	5.7450
9000	303.35	0.001418	0.020489	1350.9	1207.6	2558.5	1363.7	1379.3	2742.9	3.2866	2.3925	5.6791
10,000	311.00	0.001452	0.018028	1393.3	1151.8	2545.2	1407.8	1317.6	2725.5	3.3603	2.2556	5.6159
11,000	318.08	0.001488	0.015988	1433.9	1096.6	2530.4	1450.2	1256.1	2706.3	3.4299	2.1245	5.5544
12,000	324.68	0.001526	0.014264	1473.0	1041.3	2514.3	1491.3	1194.1	2685.4	3.4964	1.9975	5.4939
13,000	330.85	0.001566	0.012781	1511.0	985.5	2496.6	1531.4	1131.3	2662.7	3.5606	1.8730	5.4336
14,000	336.67	0.001610	0.011487	1548.4	928.7	2477.1	1571.0	1067.0	2637.9	3.6232	1.7497	5.3728
15,000	342.16	0.001657	0.010341	1585.5	870.3	2455.7	1610.3	1000.5	2610.8	3.6848	1.6261	5.3108
16,000	347.36	0.001710	0.009312	1622.6	809.4	2432.0	1649.9	931.1	2581.0	3.7461	1.5005	5.2466
17,000	352.29	0.001770	0.008374	1660.2	745.1	2405.4	1690.3	857.4	2547.7	3.8082	1.3709	5.1791
18,000	356.99	0.001840	0.007504	1699.1	675.9	2375.0	1732.2	777.8	2510.0	3.8720	1.2343	5.1064
19,000	361.47	0.001926	0.006677	1740.3	598.9	2339.2	1776.8	689.2	2466.0	3.9396	1.0860	5.0256
20,000	365.75	0.002038	0.005862	1785.8	509.0	2294.8	1826.6	585.5	2412.1	4.0146	0.9164	4.9310
21,000	369.83	0.002207	0.004994	1841.6	391.9	2233.5	1888.0	450.4	2338.4	4.1071	0.7005	4.8076
22,000	373.71	0.002703	0.003644	1951.7	140.8	2092.4	2011.1	161.5	2172.6	4.2942	0.2496	4.5439
22,064	373.95	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Tabel A-5 menjabarkan nilai volume spesifik, energi dalam, entalpi dan entropi untuk air dalam kondisi cair jenuh (saturated vapor). Tabel A-5 merupakan tabel dengan fungsi tekanan dengan kisaran suhu dari 1kPa hingga 22,064kPa.

TABLE A-6

Superheated water

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$P = 0.01 \text{ MPa (45.81°C)*}$					$P = 0.05 \text{ MPa (81.32°C)}$				$P = 0.10 \text{ MPa (99.61°C)}$			
Sat. ^f	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	3.5655	3132.2	3488.7	8.8362
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201	4.0279	3302.8	3705.6	9.0999
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056	8.9813	3480.6	3929.7	9.6626	4.4900	3480.4	3929.4	9.3424
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312	9.9047	3665.2	4160.4	9.8883	4.9519	3665.0	4160.2	9.5682
900	54.143	3856.9	4398.3	10.8429	10.8280	3856.8	4398.2	10.1000	5.4137	3856.7	4398.0	9.7800
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429	11.7513	4055.2	4642.7	10.3000	5.8755	4055.0	4642.6	9.9800
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326	12.6745	4259.9	4893.7	10.4897	6.3372	4259.8	4893.6	10.1698
1200	67.989	4470.9	5150.8	11.4132	13.5977	4470.8	5150.7	10.6704	6.7988	4470.7	5150.6	10.3504
1300	72.604	4687.4	5413.4	11.5857	14.5209	4687.3	5413.3	10.8429	7.2605	4687.2	5413.3	10.5229
$P = 0.20 \text{ MPa (120.21°C)}$					$P = 0.30 \text{ MPa (133.52°C)}$				$P = 0.40 \text{ MPa (143.61°C)}$			
Sat.	0.88578	2529.1	2706.3	7.1270	0.60582	2543.2	2724.9	6.9917	0.46242	2553.1	2738.1	6.8955
150	0.95986	2577.1	2769.1	7.2810	0.63402	2571.0	2761.2	7.0792	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306
200	1.08049	2654.6	2870.7	7.5081	0.71643	2651.0	2865.9	7.3132	0.53434	2647.2	2860.9	7.1723
250	1.19890	2731.4	2971.2	7.7100	0.79645	2728.9	2967.9	7.5180	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804
300	1.31623	2808.8	3072.1	7.8941	0.87535	2807.0	3069.6	7.7037	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677
400	1.54934	2967.2	3277.0	8.2236	1.03155	2966.0	3275.5	8.0347	0.77265	2964.9	3273.9	7.9003
500	1.78142	3131.4	3487.7	8.5153	1.18672	3130.6	3486.6	8.3271	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933
600	2.01302	3302.2	3704.8	8.7793	1.34139	3301.6	3704.0	8.5915	1.00558	3301.0	3703.3	8.4580
700	2.24434	3479.9	3928.8	9.0221	1.49580	3479.5	3928.2	8.8345	1.12152	3479.0	3927.6	8.7012
800	2.47550	3664.7	4159.8	9.2479	1.65004	3664.3	4159.3	9.0605	1.23730	3663.9	4158.9	8.9274
900	2.70656	3856.3	4397.7	9.4598	1.80417	3856.0	4397.3	9.2725	1.35298	3855.7	4396.9	9.1394
1000	2.93755	4054.8	4642.3	9.6599	1.95824	4054.5	4642.0	9.4726	1.46859	4054.3	4641.7	9.3396
1100	3.16848	4259.6	4893.3	9.8497	2.11226	4259.4	4893.1	9.6624	1.58414	4259.2	4892.9	9.5295
1200	3.39938	4470.5	5150.4	10.0304	2.26624	4470.3	5150.2	9.8431	1.69966	4470.2	5150.0	9.7102
1300	3.63026	4687.1	5413.1	10.2029	2.42019	4686.9	5413.0	10.0157	1.81516	4686.7	5412.8	9.8828
$P = 0.50 \text{ MPa (151.83°C)}$					$P = 0.60 \text{ MPa (158.83°C)}$				$P = 0.80 \text{ MPa (170.41°C)}$			
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1	6.8207	0.31560	2566.8	2756.2	6.7593	0.24035	2576.0	2768.3	6.6616
200	0.42503	2643.3	2855.8	7.0610	0.35212	2639.4	2850.6	6.9683	0.26088	2631.1	2839.8	6.8177
250	0.47443	2723.8	2961.0	7.2725	0.39390	2721.2	2957.6	7.1833	0.29321	2715.9	2950.4	7.0402
300	0.52261	2803.3	3064.6	7.4614	0.43442	2801.4	3062.0	7.3740	0.32416	2797.5	3056.9	7.2345
350	0.57015	2883.0	3168.1	7.6346	0.47428	2881.6	3166.1	7.5481	0.35442	2878.6	3162.2	7.4107
400	0.61731	2963.7	3272.4	7.7956	0.51374	2962.5	3270.8	7.7097	0.38429	2960.2	3267.7	7.5735
500	0.71095	3129.0	3484.5	8.0893	0.59200	3128.2	3483.4	8.0041	0.44332	3126.6	3481.3	7.8692
600	0.80409	3300.4	3702.5	8.3544	0.66976	3299.8	3701.7	8.2695	0.50186	3298.7	3700.1	8.1354
700	0.89696	3478.6	3927.0	8.5978	0.74725	3478.1	3926.4	8.5132	0.56011	3477.2	3925.3	8.3794
800	0.98966	3663.6	4158.4	8.8240	0.82457	3663.2	4157.9	8.7395	0.61820	3662.5	4157.0	8.6061
900	1.08227	3855.4	4396.6	9.0362	0.90179	3855.1	4396.2	8.9518	0.67619	3854.5	4395.5	8.8185
1000	1.17480	4054.0	4641.4	9.2364	0.97893	4053.8	4641.1	9.1521	0.73411	4053.3	4640.5	9.0189
1100	1.26728	4259.0	4892.6	9.4263	1.05603	4258.8	4892.4	9.3420	0.79197	4258.3	4891.9	9.2090
1200	1.35972	4470.0	5149.8	9.6071	1.13309	4469.8	5149.6	9.5229	0.84980	4469.4	5149.3	9.3898
1300	1.45214	4686.6	5412.6	9.7797	1.21012	4686.4	5412.5	9.6955	0.90761	4686.1	5412.2	9.5625

TABLE A-6

Superheated water (Continued)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg · K
<i>P</i> = 1.00 MPa (179.88°C)					<i>P</i> = 1.20 MPa (187.96°C)				<i>P</i> = 1.40 MPa (195.04°C)			
Sat.	0.19437	2582.8	2777.1	6.5850	0.16326	2587.8	2783.8	6.5217	0.14078	2591.8	2788.9	6.4675
200	0.20602	2622.3	2828.3	6.6956	0.16934	2612.9	2816.1	6.5909	0.14303	2602.7	2803.0	6.4975
250	0.23275	2710.4	2943.1	6.9265	0.19241	2704.7	2935.6	6.8313	0.16356	2698.9	2927.9	6.7488
300	0.25799	2793.7	3051.6	7.1246	0.21386	2789.7	3046.3	7.0335	0.18233	2785.7	3040.9	6.9553
350	0.28250	2875.7	3158.2	7.3029	0.23455	2872.7	3154.2	7.2139	0.20029	2869.7	3150.1	7.1379
400	0.30661	2957.9	3264.5	7.4670	0.25482	2955.5	3261.3	7.3793	0.21782	2953.1	3258.1	7.3046
500	0.35411	3125.0	3479.1	7.7642	0.29464	3123.4	3477.0	7.6779	0.25216	3121.8	3474.8	7.6047
600	0.40111	3297.5	3698.6	8.0311	0.33395	3296.3	3697.0	7.9456	0.28597	3295.1	3695.5	7.8730
700	0.44783	3476.3	3924.1	8.2755	0.37297	3475.3	3922.9	8.1904	0.31951	3474.4	3921.7	8.1183
800	0.49438	3661.7	4156.1	8.5024	0.41184	3661.0	4155.2	8.4176	0.35288	3660.3	4154.3	8.3458
900	0.54083	3853.9	4394.8	8.7150	0.45059	3853.3	4394.0	8.6303	0.38614	3852.7	4393.3	8.5587
1000	0.58721	4052.7	4640.0	8.9155	0.48928	4052.2	4639.4	8.8310	0.41933	4051.7	4638.8	8.7595
1100	0.63354	4257.9	4891.4	9.1057	0.52792	4257.5	4891.0	9.0212	0.45247	4257.0	4890.5	8.9497
1200	0.67983	4469.0	5148.9	9.2866	0.56652	4468.7	5148.5	9.2022	0.48558	4468.3	5148.1	9.1308
1300	0.72610	4685.8	5411.9	9.4593	0.60509	4685.5	5411.6	9.3750	0.51866	4685.1	5411.3	9.3036
<i>P</i> = 1.60 MPa (201.37°C)					<i>P</i> = 1.80 MPa (207.11°C)				<i>P</i> = 2.00 MPa (212.38°C)			
Sat.	0.12374	2594.8	2792.8	6.4200	0.11037	2597.3	2795.9	6.3775	0.09959	2599.1	2798.3	6.3390
225	0.13293	2645.1	2857.8	6.5537	0.11678	2637.0	2847.2	6.4825	0.10381	2628.5	2836.1	6.4160
250	0.14190	2692.9	2919.9	6.6753	0.12502	2686.7	2911.7	6.6088	0.11150	2680.3	2903.3	6.5475
300	0.15866	2781.6	3035.4	6.8864	0.14025	2777.4	3029.9	6.8246	0.12551	2773.2	3024.2	6.7684
350	0.17459	2866.6	3146.0	7.0713	0.15460	2863.6	3141.9	7.0120	0.13860	2860.5	3137.7	6.9583
400	0.19007	2950.8	3254.9	7.2394	0.16849	2948.3	3251.6	7.1814	0.15122	2945.9	3248.4	7.1292
500	0.22029	3120.1	3472.6	7.5410	0.19551	3118.5	3470.4	7.4845	0.17568	3116.9	3468.3	7.4337
600	0.24999	3293.9	3693.9	7.8101	0.22200	3292.7	3692.3	7.7543	0.19962	3291.5	3690.7	7.7043
700	0.27941	3473.5	3920.5	8.0558	0.24822	3472.6	3919.4	8.0005	0.22326	3471.7	3918.2	7.9509
800	0.30865	3659.5	4153.4	8.2834	0.27426	3658.8	4152.4	8.2284	0.24674	3658.0	4151.5	8.1791
900	0.33780	3852.1	4392.6	8.4965	0.30020	3851.5	4391.9	8.4417	0.27012	3850.9	4391.1	8.3925
1000	0.36687	4051.2	4638.2	8.6974	0.32606	4050.7	4637.6	8.6427	0.29342	4050.2	4637.1	8.5936
1100	0.39589	4256.6	4890.0	8.8878	0.35188	4256.2	4889.6	8.8331	0.31667	4255.7	4889.1	8.7842
1200	0.42488	4467.9	5147.7	9.0689	0.37766	4467.6	5147.3	9.0143	0.33989	4467.2	5147.0	8.9654
1300	0.45383	4684.8	5410.9	9.2418	0.40341	4684.5	5410.6	9.1872	0.36308	4684.2	5410.3	9.1384
<i>P</i> = 2.50 MPa (223.95°C)					<i>P</i> = 3.00 MPa (233.85°C)				<i>P</i> = 3.50 MPa (242.56°C)			
Sat.	0.07995	2602.1	2801.9	6.2558	0.06667	2603.2	2803.2	6.1856	0.05706	2603.0	2802.7	6.1244
225	0.08026	2604.8	2805.5	6.2629								
250	0.08705	2663.3	2880.9	6.4107	0.07063	2644.7	2856.5	6.2893	0.05876	2624.0	2829.7	6.1764
300	0.09894	2762.2	3009.6	6.6459	0.08118	2750.8	2994.3	6.5412	0.06845	2738.8	2978.4	6.4484
350	0.10979	2852.5	3127.0	6.8424	0.09056	2844.4	3116.1	6.7450	0.07680	2836.0	3104.9	6.6601
400	0.12012	2939.8	3240.1	7.0170	0.09938	2933.6	3231.7	6.9235	0.08456	2927.2	3223.2	6.8428
450	0.13015	3026.2	3351.6	7.1768	0.10789	3021.2	3344.9	7.0856	0.09198	3016.1	3338.1	7.0074
500	0.13999	3112.8	3462.8	7.3254	0.11620	3108.6	3457.2	7.2359	0.09919	3104.5	3451.7	7.1593
600	0.15931	3288.5	3686.8	7.5979	0.13245	3285.5	3682.8	7.5103	0.11325	3282.5	3678.9	7.4357
700	0.17835	3469.3	3915.2	7.8455	0.14841	3467.0	3912.2	7.7590	0.12702	3464.7	3909.3	7.6855
800	0.19722	3656.2	4149.2	8.0744	0.16420	3654.3	4146.9	7.9885	0.14061	3652.5	4144.6	7.9156
900	0.21597	3849.4	4389.3	8.2882	0.17988	3847.9	4387.5	8.2028	0.15410	3846.4	4385.7	8.1304
1000	0.23466	4049.0	4635.6	8.4897	0.19549	4047.7	4634.2	8.4045	0.16751	4046.4	4632.7	8.3324
1100	0.25330	4254.7	4887.9	8.6804	0.21105	4253.6	4886.7	8.5955	0.18087	4252.5	4885.6	8.5236
1200	0.27190	4466.3	5146.0	8.8618	0.22658	4465.3	5145.1	8.7771	0.19420	4464.4	5144.1	8.7053
1300	0.29048	4683.4	5409.5	9.0349	0.24207	4682.6	5408.8	8.9502	0.20750	4681.8	5408.0	8.8786

Tabel A-6 menjabarkan nilai volume spesifik, energi dalam, entalpi dan entropi untuk air dalam kondisi uap panas jenuh (superheated vapor).

Tabel lengkap dari buku Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics dilampirkan pada bagian appendix yang dapat ditemukan pada bagian akhir modul.

C. Latihan Soal

Sebuah panci tertutup bervolume 2m^3 dipanaskan di atas kompor. Mulanya panci tersebut berisi air pada fase cair jenuh dengan tekanan 1 atm. Dengan ditambahkan panas, tekanan panci meningkat jadi 3 atm.

- Berapa temperatur dalam tiap keadaanya?
- Berapa massa uapnya?
- Apa yang terjadi bila pemanasan terus dilanjutkan? Tentukan suhu dan tekanannya dalam setiap keadaanya.

D. Daftar Pustaka

- J.M Smith, Henrick C Van Ness & Michael Abbott. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 6th edition. New York: McGraw-Hill publisher.
- Ahmad Abu Hamid. (2007). Modul Kalor dan Termodinamika. Fakultas Matematika dan IPA. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Hadiyanto. (2014). Dasar Termodinamika. Jurusan Teknik Kimia. Universitas Diponegoro.
- Paul Suparno. (2018). Pendalaman Materi Fisika: Teori Kinetik Gas dan Termodinamika. KemenristekDIKTI.
- I Gusti Agung Putra Adnyana. (2014). Termodinamika. Fakultas Mipa. Universitas Udayana.
- Rizki Pebriani. (2017). Termodinamika. Fakultas Teknik. Politeknik Negeri Sriwijaya

PERTEMUAN 10

TABEL PROPERTI (lanjutan)

A. Capaian Pembelajaran

Menguasai definisi perubahan fase pada zat murni yang berkaitan dengan istilah cair tekan (compressed liquid), cair jenuh (saturation liquid), campuran air-uap, uap jenuh (saturated liquid) dan uap panas lanjut (superheated vapor). Dapat membaca dan menjelaskan tabel properti termodinamika (steam table).

B. Uraian Materi

1. Tabel properti

Properti dari suatu zat biasanya ditampilkan dalam bentuk tabel. Properti termodinamika pada tabel tersebut digunakan dalam perhitungan beberapa masalah termodinamika. Untuk masing-masing zat, properti termodinamika ditampilkan lebih dari satu tabel. Berikut kelanjutan dari tabel properti zat yang umum digunakan dalam perhitungan termodinamika.

Table D.1: Values of Z^0

$P_r =$	0.0100	0.0500	0.1000	0.2000	0.4000	0.6000	0.8000	1.0000
T_r								
0.30	0.0029	0.0145	0.0290	0.0579	0.1158	0.1737	0.2315	0.2892
0.35	0.0026	0.0130	0.0261	0.0522	0.1043	0.1564	0.2084	0.2604
0.40	0.0024	0.0119	0.0239	0.0477	0.0953	0.1429	0.1904	0.2379
0.45	0.0022	0.0110	0.0221	0.0442	0.0882	0.1322	0.1762	0.2200
0.50	0.0021	0.0103	0.0207	0.0413	0.0825	0.1236	0.1647	0.2056
0.55	0.9804	0.0098	0.0195	0.0390	0.0778	0.1166	0.1553	0.1939
0.60	0.9849	0.0093	0.0186	0.0371	0.0741	0.1109	0.1476	0.1842
0.65	0.9881	0.9377	0.0178	0.0356	0.0710	0.1063	0.1415	0.1765
0.70	0.9904	0.9504	0.8958	0.0344	0.0687	0.1027	0.1366	0.1703
0.75	0.9922	0.9598	0.9165	0.0336	0.0670	0.1001	0.1330	0.1656
0.80	0.9935	0.9669	0.9319	0.8539	0.0661	0.0985	0.1307	0.1626
0.85	0.9946	0.9725	0.9436	0.8810	0.0661	0.0983	0.1301	0.1614
0.90	0.9954	0.9768	0.9528	0.9015	0.7800	0.1006	0.1321	0.1630
0.93	0.9959	0.9790	0.9573	0.9115	0.8059	0.6635	0.1359	0.1664
0.95	0.9961	0.9803	0.9600	0.9174	0.8206	0.6967	0.1410	0.1705
0.97	0.9963	0.9815	0.9625	0.9227	0.8338	0.7240	0.5580	0.1779
0.98	0.9965	0.9821	0.9637	0.9253	0.8398	0.7360	0.5887	0.1844
0.99	0.9966	0.9826	0.9648	0.9277	0.8455	0.7471	0.6138	0.1959
1.00	0.9967	0.9832	0.9659	0.9300	0.8509	0.7574	0.6355	0.2901
1.01	0.9968	0.9837	0.9669	0.9322	0.8561	0.7671	0.6542	0.4648
1.02	0.9969	0.9842	0.9679	0.9343	0.8610	0.7761	0.6710	0.5146
1.05	0.9971	0.9855	0.9707	0.9401	0.8743	0.8002	0.7130	0.6026
1.10	0.9975	0.9874	0.9747	0.9485	0.8930	0.8323	0.7649	0.6880
1.15	0.9978	0.9891	0.9780	0.9554	0.9081	0.8576	0.8032	0.7443
1.20	0.9981	0.9904	0.9808	0.9611	0.9205	0.8779	0.8330	0.7858
1.30	0.9985	0.9926	0.9852	0.9702	0.9396	0.9083	0.8764	0.8438
1.40	0.9988	0.9942	0.9884	0.9768	0.9534	0.9298	0.9062	0.8827
1.50	0.9991	0.9954	0.9909	0.9818	0.9636	0.9456	0.9278	0.9103
1.60	0.9993	0.9964	0.9928	0.9856	0.9714	0.9575	0.9439	0.9308
1.70	0.9994	0.9971	0.9943	0.9886	0.9775	0.9667	0.9563	0.9463
1.80	0.9995	0.9977	0.9955	0.9910	0.9823	0.9739	0.9659	0.9583
1.90	0.9996	0.9982	0.9964	0.9929	0.9861	0.9796	0.9735	0.9678
2.00	0.9997	0.9986	0.9972	0.9944	0.9892	0.9842	0.9796	0.9754
2.20	0.9998	0.9992	0.9983	0.9967	0.9937	0.9910	0.9886	0.9865
2.40	0.9999	0.9996	0.9991	0.9983	0.9969	0.9957	0.9948	0.9941
2.60	1.0000	0.9998	0.9997	0.9994	0.9991	0.9990	0.9990	0.9993
2.80	1.0000	1.0000	1.0001	1.0002	1.0007	1.0013	1.0021	1.0031
3.00	1.0000	1.0002	1.0004	1.0008	1.0018	1.0030	1.0043	1.0057
3.50	1.0001	1.0004	1.0008	1.0017	1.0035	1.0055	1.0075	1.0097
4.00	1.0001	1.0005	1.0010	1.0021	1.0043	1.0066	1.0090	1.0115

Table D.2: Values of Z^1

$P_r =$	0.0100	0.0500	0.1000	0.2000	0.4000	0.6000	0.8000	1.0000
T_r								
0.30	-0.0008	-0.0040	-0.0081	-0.0161	-0.0323	-0.0484	-0.0645	-0.0806
0.35	-0.0009	-0.0046	-0.0093	-0.0185	-0.0370	-0.0554	-0.0738	-0.0921
0.40	-0.0010	-0.0048	-0.0095	-0.0190	-0.0380	-0.0570	-0.0758	-0.0946
0.45	-0.0009	-0.0047	-0.0094	-0.0187	-0.0374	-0.0560	-0.0745	-0.0929
0.50	-0.0009	-0.0045	-0.0090	-0.0181	-0.0360	-0.0539	-0.0716	-0.0893
0.55	-0.0314	-0.0043	-0.0086	-0.0172	-0.0343	-0.0513	-0.0682	-0.0849
0.60	-0.0205	-0.0041	-0.0082	-0.0164	-0.0326	-0.0487	-0.0646	-0.0803
0.65	-0.0137	-0.0772	-0.0078	-0.0156	-0.0309	-0.0461	-0.0611	-0.0759
0.70	-0.0093	-0.0507	-0.1161	-0.0148	-0.0294	-0.0438	-0.0579	-0.0718
0.75	-0.0064	-0.0339	-0.0744	-0.0143	-0.0282	-0.0417	-0.0550	-0.0681
0.80	-0.0044	-0.0228	-0.0487	-0.1160	-0.0272	-0.0401	-0.0526	-0.0648
0.85	-0.0029	-0.0152	-0.0319	-0.0715	-0.0268	-0.0391	-0.0509	-0.0622
0.90	-0.0019	-0.0099	-0.0205	-0.0442	-0.1118	-0.0396	-0.0503	-0.0604
0.93	-0.0015	-0.0075	-0.0154	-0.0326	-0.0763	-0.1662	-0.0514	-0.0602
0.95	-0.0012	-0.0062	-0.0126	-0.0262	-0.0589	-0.1110	-0.0540	-0.0607
0.97	-0.0010	-0.0050	-0.0101	-0.0208	-0.0450	-0.0770	-0.1647	-0.0623
0.98	-0.0009	-0.0044	-0.0090	-0.0184	-0.0390	-0.0641	-0.1100	-0.0641
0.99	-0.0008	-0.0039	-0.0079	-0.0161	-0.0335	-0.0531	-0.0796	-0.0680
1.00	-0.0007	-0.0034	-0.0069	-0.0140	-0.0285	-0.0435	-0.0588	-0.0879
1.01	-0.0006	-0.0030	-0.0060	-0.0120	-0.0240	-0.0351	-0.0429	-0.0223
1.02	-0.0005	-0.0026	-0.0051	-0.0102	-0.0198	-0.0277	-0.0303	-0.0062
1.05	-0.0003	-0.0015	-0.0029	-0.0054	-0.0092	-0.0097	-0.0032	0.0220
1.10	0.0000	0.0000	0.0001	0.0007	0.0038	0.0106	0.0236	0.0476
1.15	0.0002	0.0011	0.0023	0.0052	0.0127	0.0237	0.0396	0.0625
1.20	0.0004	0.0019	0.0039	0.0084	0.0190	0.0326	0.0499	0.0719
1.30	0.0006	0.0030	0.0061	0.0125	0.0267	0.0429	0.0612	0.0819
1.40	0.0007	0.0036	0.0072	0.0147	0.0306	0.0477	0.0661	0.0857
1.50	0.0008	0.0039	0.0078	0.0158	0.0323	0.0497	0.0677	0.0864
1.60	0.0008	0.0040	0.0080	0.0162	0.0330	0.0501	0.0677	0.0855
1.70	0.0008	0.0040	0.0081	0.0163	0.0329	0.0497	0.0667	0.0838
1.80	0.0008	0.0040	0.0081	0.0162	0.0325	0.0488	0.0652	0.0814
1.90	0.0008	0.0040	0.0079	0.0159	0.0318	0.0477	0.0635	0.0792
2.00	0.0008	0.0039	0.0078	0.0155	0.0310	0.0464	0.0617	0.0767
2.20	0.0007	0.0037	0.0074	0.0147	0.0293	0.0437	0.0579	0.0719
2.40	0.0007	0.0035	0.0070	0.0139	0.0276	0.0411	0.0544	0.0675
2.60	0.0007	0.0033	0.0066	0.0131	0.0260	0.0387	0.0512	0.0634
2.80	0.0006	0.0031	0.0062	0.0124	0.0245	0.0365	0.0483	0.0598
3.00	0.0006	0.0029	0.0059	0.0117	0.0232	0.0345	0.0456	0.0565
3.50	0.0005	0.0026	0.0052	0.0103	0.0204	0.0303	0.0401	0.0497
4.00	0.0005	0.0023	0.0046	0.0091	0.0182	0.0270	0.0357	0.0443

Table D.3: Values of Z^0

$P_r =$	1.0000	1.2000	1.5000	2.0000	3.0000	5.0000	7.0000	10.000
T_r								
0.30	0.2892	0.3479	0.4335	0.5775	0.8648	1.4366	2.0048	2.8507
0.35	0.2604	0.3123	0.3901	0.5195	0.7775	1.2902	1.7987	2.5539
0.40	0.2379	0.2853	0.3563	0.4744	0.7095	1.1758	1.6373	2.3211
0.45	0.2200	0.2638	0.3294	0.4384	0.6551	1.0841	1.5077	2.1338
0.50	0.2056	0.2465	0.3077	0.4092	0.6110	1.0094	1.4017	1.9801
0.55	0.1939	0.2323	0.2899	0.3853	0.5747	0.9475	1.3137	1.8520
0.60	0.1842	0.2207	0.2753	0.3657	0.5446	0.8959	1.2398	1.7440
0.65	0.1765	0.2113	0.2634	0.3495	0.5197	0.8526	1.1773	1.6519
0.70	0.1703	0.2038	0.2538	0.3364	0.4991	0.8161	1.1341	1.5729
0.75	0.1656	0.1981	0.2464	0.3260	0.4823	0.7854	1.0787	1.5047
0.80	0.1626	0.1942	0.2411	0.3182	0.4690	0.7598	1.0400	1.4456
0.85	0.1614	0.1924	0.2382	0.3132	0.4591	0.7388	1.0071	1.3943
0.90	0.1630	0.1935	0.2383	0.3114	0.4527	0.7220	0.9793	1.3496
0.93	0.1664	0.1963	0.2405	0.3122	0.4507	0.7138	0.9648	1.3257
0.95	0.1705	0.1998	0.2432	0.3138	0.4501	0.7092	0.9561	1.3108
0.97	0.1779	0.2055	0.2474	0.3164	0.4504	0.7052	0.9480	1.2968
0.98	0.1844	0.2097	0.2503	0.3182	0.4508	0.7035	0.9442	1.2901
0.99	0.1959	0.2154	0.2538	0.3204	0.4514	0.7018	0.9406	1.2835
1.00	0.2901	0.2237	0.2583	0.3229	0.4522	0.7004	0.9372	1.2772
1.01	0.4648	0.2370	0.2640	0.3260	0.4533	0.6991	0.9339	1.2710
1.02	0.5146	0.2629	0.2715	0.3297	0.4547	0.6980	0.9307	1.2650
1.05	0.6026	0.4437	0.3131	0.3452	0.4604	0.6956	0.9222	1.2481
1.10	0.6880	0.5984	0.4580	0.3953	0.4770	0.6950	0.9110	1.2232
1.15	0.7443	0.6803	0.5798	0.4760	0.5042	0.6987	0.9033	1.2021
1.20	0.7858	0.7363	0.6605	0.5605	0.5425	0.7069	0.8990	1.1844
1.30	0.8438	0.8111	0.7624	0.6908	0.6344	0.7358	0.8998	1.1580
1.40	0.8827	0.8595	0.8256	0.7753	0.7202	0.7761	0.9112	1.1419
1.50	0.9103	0.8933	0.8689	0.8328	0.7887	0.8200	0.9297	1.1339
1.60	0.9308	0.9180	0.9000	0.8738	0.8410	0.8617	0.9518	1.1320
1.70	0.9463	0.9367	0.9234	0.9043	0.8809	0.8984	0.9745	1.1343
1.80	0.9583	0.9511	0.9413	0.9275	0.9118	0.9297	0.9961	1.1391
1.90	0.9678	0.9624	0.9552	0.9456	0.9359	0.9557	1.0157	1.1452
2.00	0.9754	0.9715	0.9664	0.9599	0.9550	0.9772	1.0328	1.1516
2.20	0.9856	0.9847	0.9826	0.9806	0.9827	1.0094	1.0600	1.1635
2.40	0.9941	0.9936	0.9935	0.9945	1.0011	1.0313	1.0793	1.1728
2.60	0.9993	0.9998	1.0010	1.0040	1.0137	1.0463	1.0926	1.1792
2.80	1.0031	1.0042	1.0063	1.0106	1.0223	1.0565	1.1016	1.1830
3.00	1.0057	1.0074	1.0101	1.0153	1.0284	1.0635	1.1075	1.1848
3.50	1.0097	1.0120	1.0156	1.0221	1.0368	1.0723	1.1138	1.1834
4.00	1.0115	1.0140	1.0179	1.0249	1.0401	1.0747	1.1136	1.1773

Table D.4: Values of Z^1

$P_r =$	1.0000	1.2000	1.5000	2.0000	3.0000	5.0000	7.0000	10.000
T_r								
0.30	-0.0806	-0.0966	-0.1207	-0.1608	-0.2407	-0.3996	-0.5572	-0.7915
0.35	-0.0921	-0.1105	-0.1379	-0.1834	-0.2738	-0.4523	-0.6279	-0.8863
0.40	-0.0946	-0.1134	-0.1414	-0.1879	-0.2799	-0.4603	-0.6365	-0.8936
0.45	-0.0929	-0.1113	-0.1387	-0.1840	-0.2734	-0.4475	-0.6162	-0.8608
0.50	-0.0893	-0.1069	-0.1330	-0.1762	-0.2611	-0.4253	-0.5831	-0.8099
0.55	-0.0849	-0.1015	-0.1263	-0.1669	-0.2465	-0.3991	-0.5446	-0.7521
0.60	-0.0803	-0.0960	-0.1192	-0.1572	-0.2312	-0.3718	-0.5047	-0.6928
0.65	-0.0759	-0.0906	-0.1122	-0.1476	-0.2160	-0.3447	-0.4653	-0.6346
0.70	-0.0718	-0.0855	-0.1057	-0.1385	-0.2013	-0.3184	-0.4270	-0.5785
0.75	-0.0681	-0.0808	-0.0996	-0.1298	-0.1872	-0.2929	-0.3901	-0.5250
0.80	-0.0648	-0.0767	-0.0940	-0.1217	-0.1736	-0.2682	-0.3545	-0.4740
0.85	-0.0622	-0.0731	-0.0888	-0.1138	-0.1602	-0.2439	-0.3201	-0.4254
0.90	-0.0604	-0.0701	-0.0840	-0.1059	-0.1463	-0.2195	-0.2862	-0.3788
0.93	-0.0602	-0.0687	-0.0810	-0.1007	-0.1374	-0.2045	-0.2661	-0.3516
0.95	-0.0607	-0.0678	-0.0788	-0.0967	-0.1310	-0.1943	-0.2526	-0.3339
0.97	-0.0623	-0.0669	-0.0759	-0.0921	-0.1240	-0.1837	-0.2391	-0.3163
0.98	-0.0641	-0.0661	-0.0740	-0.0893	-0.1202	-0.1783	-0.2322	-0.3075
0.99	-0.0680	-0.0646	-0.0715	-0.0861	-0.1162	-0.1728	-0.2254	-0.2989
1.00	-0.0879	-0.0609	-0.0678	-0.0824	-0.1118	-0.1672	-0.2185	-0.2902
1.01	-0.0223	-0.0473	-0.0621	-0.0778	-0.1072	-0.1615	-0.2116	-0.2816
1.02	-0.0062	-0.0227	-0.0524	-0.0722	-0.1021	-0.1556	-0.2047	-0.2731
1.05	0.0220	0.1059	0.0451	-0.0432	-0.0838	-0.1370	-0.1835	-0.2476
1.10	0.0476	0.0897	0.1630	0.0698	-0.0373	-0.1021	-0.1469	-0.2056
1.15	0.0625	0.0943	0.1548	0.1667	0.0332	-0.0611	-0.1084	-0.1642
1.20	0.0719	0.0991	0.1477	0.1990	0.1095	-0.0141	-0.0678	-0.1231
1.30	0.0819	0.1048	0.1420	0.1991	0.2079	0.0875	0.0176	-0.0423
1.40	0.0857	0.1063	0.1383	0.1894	0.2397	0.1737	0.1008	0.0350
1.50	0.0854	0.1055	0.1345	0.1806	0.2433	0.2309	0.1717	0.1058
1.60	0.0855	0.1035	0.1303	0.1729	0.2381	0.2631	0.2255	0.1673
1.70	0.0838	0.1008	0.1259	0.1658	0.2305	0.2788	0.2628	0.2179
1.80	0.0816	0.0978	0.1216	0.1593	0.2224	0.2846	0.2871	0.2576
1.90	0.0792	0.0947	0.1173	0.1532	0.2144	0.2848	0.3017	0.2876
2.00	0.0767	0.0916	0.1133	0.1476	0.2069	0.2819	0.3097	0.3096
2.20	0.0719	0.0857	0.1057	0.1374	0.1932	0.2720	0.3135	0.3355
2.40	0.0675	0.0803	0.0989	0.1285	0.1812	0.2602	0.3089	0.3459
2.60	0.0634	0.0754	0.0929	0.1207	0.1706	0.2484	0.3009	0.3475
2.80	0.0598	0.0711	0.0876	0.1138	0.1613	0.2372	0.2915	0.3443
3.00	0.0535	0.0672	0.0828	0.1076	0.1529	0.2268	0.2817	0.3385
3.50	0.0497	0.0591	0.0728	0.0949	0.1356	0.2042	0.2584	0.3194
4.00	0.0443	0.0527	0.0651	0.0849	0.1219	0.1857	0.2378	0.2994

Table D.5: Values of $(H^R)^0/RT_c$

$P_r =$	0.0100	0.0500	0.1000	0.2000	0.4000	0.6000	0.8000	1.0000
T_r								
0.30	-6.045	-6.043	-6.040	-6.034	-6.022	-6.011	-5.999	-5.987
0.35	-5.906	-5.904	-5.901	-5.895	-5.882	-5.870	-5.858	-5.845
0.40	-5.763	-5.761	-5.757	-5.751	-5.738	-5.726	-5.713	-5.700
0.45	-5.615	-5.612	-5.609	-5.603	-5.590	-5.577	-5.564	-5.551
0.50	-5.465	-5.463	-5.459	-5.453	-5.440	-5.427	-5.414	-5.401
0.55	-0.032	-5.312	-5.309	-5.303	-5.290	-5.278	-5.265	-5.252
0.60	-0.027	-5.162	-5.159	-5.153	-5.141	-5.129	-5.116	-5.104
0.65	-0.023	-0.118	-5.008	-5.002	-4.991	-4.980	-4.968	-4.956
0.70	-0.020	-0.101	-0.213	-4.848	-4.838	-4.828	-4.818	-4.808
0.75	-0.017	-0.088	-0.183	-4.687	-4.679	-4.672	-4.664	-4.655
0.80	-0.015	-0.078	-0.160	-0.345	-4.507	-4.504	-4.499	-4.494
0.85	-0.014	-0.069	-0.141	-0.300	-4.309	-4.313	-4.316	-4.316
0.90	-0.012	-0.062	-0.126	-0.264	-0.596	-4.074	-4.094	-4.108
0.93	-0.011	-0.058	-0.118	-0.246	-0.545	-0.960	-3.920	-3.953
0.95	-0.011	-0.056	-0.113	-0.235	-0.516	-0.885	-3.763	-3.825
0.97	-0.011	-0.054	-0.109	-0.225	-0.490	-0.824	-1.356	-3.658
0.98	-0.010	-0.053	-0.107	-0.221	-0.478	-0.797	-1.273	-3.544
0.99	-0.010	-0.052	-0.105	-0.216	-0.466	-0.773	-1.206	-3.376
1.00	-0.010	-0.051	-0.103	-0.212	-0.455	-0.750	-1.151	-2.584
1.01	-0.010	-0.050	-0.101	-0.208	-0.445	-0.721	-1.102	-1.796
1.02	-0.010	-0.049	-0.099	-0.203	-0.434	-0.708	-1.060	-1.627
1.05	-0.009	-0.046	-0.094	-0.192	-0.407	-0.654	-0.955	-1.359
1.10	-0.008	-0.042	-0.086	-0.175	-0.367	-0.581	-0.827	-1.120
1.15	-0.008	-0.039	-0.079	-0.160	-0.334	-0.523	-0.732	-0.968
1.20	-0.007	-0.036	-0.073	-0.148	-0.305	-0.474	-0.657	-0.857
1.30	-0.006	-0.031	-0.063	-0.127	-0.259	-0.399	-0.545	-0.698
1.40	-0.005	-0.027	-0.055	-0.110	-0.224	-0.341	-0.463	-0.588
1.50	-0.005	-0.024	-0.048	-0.097	-0.196	-0.297	-0.400	-0.505
1.60	-0.004	-0.021	-0.043	-0.086	-0.173	-0.261	-0.350	-0.440
1.70	-0.004	-0.019	-0.038	-0.076	-0.153	-0.231	-0.309	-0.387
1.80	-0.003	-0.017	-0.034	-0.068	-0.137	-0.206	-0.275	-0.344
1.90	-0.003	-0.015	-0.031	-0.062	-0.123	-0.185	-0.246	-0.307
2.00	-0.003	-0.014	-0.028	-0.056	-0.111	-0.167	-0.222	-0.276
2.20	-0.002	-0.012	-0.023	-0.046	-0.092	-0.137	-0.182	-0.226
2.40	-0.002	-0.010	-0.019	-0.038	-0.076	-0.114	-0.150	-0.187
2.60	-0.002	-0.008	-0.016	-0.032	-0.064	-0.095	-0.125	-0.155
2.80	-0.001	-0.007	-0.014	-0.027	-0.054	-0.080	-0.105	-0.130
3.00	-0.001	-0.006	-0.011	-0.023	-0.045	-0.067	-0.088	-0.109
3.50	-0.001	-0.004	-0.007	-0.015	-0.029	-0.043	-0.056	-0.069
4.00	-0.000	-0.002	-0.005	-0.009	-0.017	-0.026	-0.033	-0.041

Table D.6: Values of $(H^R)^1/RT_c$

$P_r =$	0.0100	0.0500	0.1000	0.2000	0.4000	0.6000	0.8000	1.0000
T_r								
0.30	-11.098	-11.096	-11.095	-11.091	-11.083	-11.076	-11.069	-11.062
0.35	-10.656	-10.655	-10.654	-10.653	-10.650	-10.646	-10.643	-10.640
0.40	-10.121	-10.121	-10.121	-10.120	-10.121	-10.121	-10.121	-10.121
0.45	-9.515	-9.515	-9.516	-9.517	-9.519	-9.521	-9.523	-9.525
0.50	-8.868	-8.869	-8.870	-8.872	-8.876	-8.880	-8.884	-8.888
0.55	-0.080	-8.211	-8.212	-8.215	-8.221	-8.226	-8.232	-8.238
0.60	-0.059	-7.568	-7.570	-7.573	-7.579	-7.585	-7.591	-7.596
0.65	-0.045	-0.247	-6.949	-6.952	-6.959	-6.966	-6.973	-6.980
0.70	-0.034	-0.185	-0.415	-6.360	-6.367	-6.373	-6.381	-6.388
0.75	-0.027	-0.142	-0.306	-5.796	-5.802	-5.809	-5.816	-5.824
0.80	-0.021	-0.110	-0.234	-0.542	-5.266	-5.271	-5.278	-5.285
0.85	-0.017	-0.087	-0.182	-0.401	-4.753	-4.754	-4.758	-4.763
0.90	-0.014	-0.070	-0.144	-0.308	-0.751	-4.254	-4.248	-4.249
0.93	-0.012	-0.061	-0.126	-0.265	-0.612	-1.236	-3.942	-3.934
0.95	-0.011	-0.056	-0.115	-0.241	-0.542	-0.994	-3.737	-3.712
0.97	-0.010	-0.052	-0.105	-0.219	-0.483	-0.837	-1.616	-3.470
0.98	-0.010	-0.050	-0.101	-0.209	-0.457	-0.776	-1.324	-3.332
0.99	-0.009	-0.048	-0.097	-0.200	-0.433	-0.722	-1.154	-3.164
1.00	-0.009	-0.046	-0.093	-0.191	-0.410	-0.675	-1.034	-2.471
1.01	-0.009	-0.044	-0.089	-0.183	-0.389	-0.632	-0.940	-1.375
1.02	-0.008	-0.042	-0.085	-0.175	-0.370	-0.594	-0.863	-1.180
1.05	-0.007	-0.037	-0.075	-0.153	-0.318	-0.498	-0.691	-0.877
1.10	-0.006	-0.030	-0.061	-0.123	-0.251	-0.381	-0.507	-0.617
1.15	-0.005	-0.025	-0.050	-0.099	-0.199	-0.296	-0.385	-0.459
1.20	-0.004	-0.020	-0.040	-0.080	-0.158	-0.232	-0.297	-0.349
1.30	-0.003	-0.013	-0.026	-0.052	-0.100	-0.142	-0.177	-0.203
1.40	-0.002	-0.008	-0.016	-0.032	-0.060	-0.083	-0.100	-0.111
1.50	-0.001	-0.005	-0.009	-0.018	-0.032	-0.042	-0.048	-0.049
1.60	-0.000	-0.002	-0.004	-0.007	-0.012	-0.013	-0.011	-0.005
1.70	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	0.003	0.009	0.017	0.027
1.80	0.000	0.001	0.003	0.006	0.015	0.025	0.037	0.051
1.90	0.001	0.003	0.005	0.011	0.023	0.037	0.053	0.070
2.00	0.001	0.003	0.007	0.015	0.030	0.047	0.065	0.085
2.20	0.001	0.005	0.010	0.020	0.040	0.062	0.083	0.106
2.40	0.001	0.006	0.012	0.023	0.047	0.071	0.095	0.120
2.60	0.001	0.006	0.013	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130
2.80	0.001	0.007	0.014	0.028	0.055	0.082	0.110	0.137
3.00	0.001	0.007	0.014	0.029	0.058	0.086	0.114	0.142
3.50	0.002	0.008	0.016	0.031	0.062	0.092	0.122	0.152
4.00	0.002	0.008	0.016	0.032	0.064	0.096	0.127	0.158

Table D.7: Values of $(H^R)^0/RT_c$

$P_r =$	1.0000	1.2000	1.5000	2.0000	3.0000	5.0000	7.0000	10.000
T_r								
0.30	-5.987	-5.975	-5.957	-5.927	-5.868	-5.748	-5.628	-5.446
0.35	-5.845	-5.833	-5.814	-5.783	-5.721	-5.595	-5.469	-5.278
0.40	-5.700	-5.687	-5.668	-5.636	-5.572	-5.442	-5.311	-5.113
0.45	-5.551	-5.538	-5.519	-5.486	-5.421	-5.288	-5.154	-4.950
0.50	-5.401	-5.388	-5.369	-5.336	-5.279	-5.135	-4.999	-4.791
0.55	-5.252	-5.239	-5.220	-5.187	-5.121	-4.986	-4.849	-4.638
0.60	-5.104	-5.091	-5.073	-5.041	-4.976	-4.842	-4.794	-4.492
0.65	-4.956	-4.949	-4.927	-4.896	-4.833	-4.702	-4.565	-4.353
0.70	-4.808	-4.797	-4.781	-4.752	-4.693	-4.566	-4.432	-4.221
0.75	-4.655	-4.646	-4.632	-4.607	-4.554	-4.434	-4.393	-4.095
0.80	-4.494	-4.488	-4.478	-4.459	-4.413	-4.303	-4.178	-3.974
0.85	-4.316	-4.316	-4.312	-4.302	-4.269	-4.173	-4.056	-3.857
0.90	-4.108	-4.118	-4.127	-4.132	-4.119	-4.043	-3.935	-3.744
0.93	-3.953	-3.976	-4.000	-4.020	-4.024	-3.963	-3.863	-3.678
0.95	-3.825	-3.865	-3.904	-3.940	-3.958	-3.910	-3.815	-3.634
0.97	-3.658	-3.732	-3.796	-3.853	-3.890	-3.856	-3.767	-3.591
0.98	-3.544	-3.652	-3.736	-3.806	-3.854	-3.829	-3.743	-3.569
0.99	-3.376	-3.558	-3.670	-3.758	-3.818	-3.801	-3.719	-3.548
1.00	-2.584	-3.441	-3.598	-3.706	-3.782	-3.774	-3.695	-3.526
1.01	-1.796	-3.283	-3.516	-3.652	-3.744	-3.746	-3.671	-3.505
1.02	-1.627	-3.039	-3.422	-3.595	-3.705	-3.718	-3.647	-3.484
1.05	-1.359	-2.034	-3.030	-3.398	-3.583	-3.632	-3.575	-3.420
1.10	-1.120	-1.487	-2.203	-2.965	-3.353	-3.484	-3.453	-3.315
1.15	-0.968	-1.239	-1.719	-2.479	-3.091	-3.329	-3.329	-3.211
1.20	-0.857	-1.076	-1.443	-2.079	-2.801	-3.166	-3.202	-3.107
1.30	-0.698	-0.860	-1.116	-1.560	-2.274	-2.825	-2.942	-2.899
1.40	-0.588	-0.716	-0.915	-1.253	-1.857	-2.486	-2.679	-2.692
1.50	-0.505	-0.611	-0.774	-1.046	-1.549	-2.175	-2.421	-2.486
1.60	-0.440	-0.531	-0.667	-0.894	-1.318	-1.904	-2.177	-2.285
1.70	-0.387	-0.446	-0.583	-0.777	-1.139	-1.672	-1.953	-2.091
1.80	-0.344	-0.413	-0.515	-0.683	-0.996	-1.476	-1.751	-1.908
1.90	-0.307	-0.368	-0.458	-0.606	-0.880	-1.309	-1.571	-1.736
2.00	-0.276	-0.330	-0.411	-0.541	-0.782	-1.167	-1.411	-1.577
2.20	-0.226	-0.269	-0.334	-0.437	-0.629	-0.937	-1.143	-1.295
2.40	-0.187	-0.222	-0.275	-0.359	-0.513	-0.761	-0.929	-1.058
2.60	-0.155	-0.185	-0.228	-0.297	-0.422	-0.621	-0.756	-0.858
2.80	-0.130	-0.154	-0.190	-0.246	-0.348	-0.508	-0.614	-0.689
3.00	-0.109	-0.129	-0.159	-0.205	-0.288	-0.415	-0.495	-0.545
3.50	-0.069	-0.081	-0.099	-0.127	-0.174	-0.239	-0.270	-0.264
4.00	-0.041	-0.048	-0.058	-0.072	-0.095	-0.116	-0.110	-0.061

Table D.8: Values of $(H^R)^1/RT_c$

$P_r =$	1.0000	1.2000	1.5000	2.0000	3.0000	5.0000	7.0000	10.000
T_r								
0.30	-11.062	-11.055	-11.044	-11.027	-10.992	-10.935	-10.872	-10.781
0.35	-10.640	-10.637	-10.632	-10.624	-10.609	-10.581	-10.554	-10.529
0.40	-10.121	-10.121	-10.121	-10.122	-10.123	-10.128	-10.135	-10.150
0.45	-9.525	-9.527	-9.531	-9.537	-9.549	-9.576	-9.611	-9.663
0.50	-8.888	-8.892	-8.899	-8.909	-8.932	-8.978	-9.030	-9.111
0.55	-8.238	-8.243	-8.252	-8.267	-8.298	-8.360	-8.425	-8.531
0.60	-7.596	-7.603	-7.614	-7.632	-7.669	-7.745	-7.824	-7.950
0.65	-6.980	-6.987	-6.997	-7.017	-7.059	-7.147	-7.239	-7.381
0.70	-6.388	-6.395	-6.407	-6.429	-6.475	-6.574	-6.677	-6.837
0.75	-5.824	-5.832	-5.845	-5.868	-5.918	-6.027	-6.142	-6.318
0.80	-5.285	-5.293	-5.306	-5.330	-5.385	-5.506	-5.632	-5.824
0.85	-4.763	-4.771	-4.784	-4.810	-4.872	-5.000	-5.149	-5.358
0.90	-4.249	-4.255	-4.268	-4.298	-4.371	-4.530	-4.688	-4.916
0.93	-3.934	-3.937	-3.951	-3.987	-4.073	-4.251	-4.422	-4.662
0.95	-3.712	-3.713	-3.730	-3.773	-3.873	-4.068	-4.248	-4.497
0.97	-3.470	-3.467	-3.492	-3.551	-3.670	-3.885	-4.077	-4.336
0.98	-3.332	-3.327	-3.363	-3.434	-3.568	-3.795	-3.992	-4.257
0.99	-3.164	-3.164	-3.223	-3.313	-3.464	-3.705	-3.909	-4.178
1.00	-2.471	-2.952	-3.065	-3.186	-3.358	-3.615	-3.825	-4.100
1.01	-1.375	-2.595	-2.880	-3.051	-3.251	-3.525	-3.742	-4.023
1.02	-1.180	-1.723	-2.650	-2.906	-3.142	-3.435	-3.661	-3.947
1.05	-0.877	-0.878	-1.496	-2.381	-2.800	-3.167	-3.418	-3.722
1.10	-0.617	-0.673	-0.617	-1.261	-2.167	-2.720	-3.023	-3.362
1.15	-0.459	-0.503	-0.487	-0.604	-1.497	-2.275	-2.641	-3.019
1.20	-0.349	-0.381	-0.381	-0.361	-0.934	-1.840	-2.273	-2.692
1.30	-0.203	-0.218	-0.218	-0.178	-0.300	-1.066	-1.592	-2.086
1.40	-0.111	-0.115	-0.128	-0.070	-0.044	-0.504	-1.012	-1.547
1.50	-0.049	-0.046	-0.032	0.008	0.078	-0.142	-0.556	-1.080
1.60	-0.005	0.004	0.023	0.065	0.151	0.082	-0.217	-0.689
1.70	0.027	0.040	0.063	0.109	0.202	0.223	0.028	-0.369
1.80	0.051	0.067	0.094	0.143	0.241	0.317	0.203	-0.112
1.90	0.070	0.088	0.117	0.169	0.271	0.381	0.330	0.092
2.00	0.085	0.105	0.136	0.190	0.295	0.428	0.424	0.255
2.20	0.106	0.128	0.163	0.221	0.331	0.493	0.551	0.489
2.40	0.120	0.144	0.181	0.242	0.356	0.535	0.631	0.645
2.60	0.130	0.156	0.194	0.257	0.376	0.567	0.687	0.754
2.80	0.137	0.164	0.204	0.269	0.391	0.591	0.729	0.836
3.00	0.142	0.170	0.211	0.278	0.403	0.611	0.763	0.899
3.50	0.152	0.181	0.224	0.294	0.425	0.650	0.827	1.015
4.00	0.158	0.188	0.233	0.306	0.442	0.680	0.874	1.097

Table D.9: Values of $(S^R)^0/R$

$P_r =$	0.0100	0.0500	0.1000	0.2000	0.4000	0.6000	0.8000	1.0000
T_r								
0.30	-11.614	-10.008	-9.319	-8.635	-7.961	-7.574	-7.304	-7.099
0.35	-11.185	-9.579	-8.890	-8.205	-7.529	-7.140	-6.869	-6.663
0.40	-10.802	-9.196	-8.506	-7.821	-7.144	-6.755	-6.483	-6.275
0.45	-10.453	-8.847	-8.157	-7.472	-6.794	-6.404	-6.132	-5.924
0.50	-10.137	-8.531	-7.841	-7.156	-6.479	-6.089	-5.816	-5.608
0.55	-0.038	-8.245	-7.555	-6.870	-6.193	-5.803	-5.531	-5.324
0.60	-0.029	-7.983	-7.294	-6.610	-5.933	-5.544	-5.273	-5.066
0.65	-0.023	-0.122	-7.052	-6.368	-5.694	-5.306	-5.036	-4.830
0.70	-0.018	-0.096	-0.206	-6.140	-5.467	-5.082	-4.814	-4.610
0.75	-0.015	-0.078	-0.164	-5.917	-5.248	-4.866	-4.600	-4.399
0.80	-0.013	-0.064	-0.134	-0.294	-5.026	-4.694	-4.388	-4.191
0.85	-0.011	-0.054	-0.111	-0.239	-4.785	-4.418	-4.166	-3.976
0.90	-0.009	-0.046	-0.094	-0.199	-0.463	-4.145	-3.912	-3.738
0.93	-0.008	-0.042	-0.085	-0.179	-0.408	-0.750	-3.723	-3.569
0.95	-0.008	-0.039	-0.080	-0.168	-0.377	-0.671	-3.556	-3.433
0.97	-0.007	-0.037	-0.075	-0.157	-0.350	-0.607	-1.056	-3.259
0.98	-0.007	-0.036	-0.073	-0.153	-0.337	-0.580	-0.971	-3.142
0.99	-0.007	-0.035	-0.071	-0.148	-0.326	-0.555	-0.903	-2.972
1.00	-0.007	-0.034	-0.069	-0.144	-0.315	-0.532	-0.847	-2.178
1.01	-0.007	-0.033	-0.067	-0.139	-0.304	-0.510	-0.799	-1.391
1.02	-0.006	-0.032	-0.065	-0.135	-0.294	-0.491	-0.757	-1.225
1.05	-0.006	-0.030	-0.060	-0.124	-0.267	-0.439	-0.656	-0.965
1.10	-0.005	-0.026	-0.053	-0.108	-0.230	-0.371	-0.537	-0.742
1.15	-0.005	-0.023	-0.047	-0.096	-0.201	-0.319	-0.452	-0.607
1.20	-0.004	-0.021	-0.042	-0.085	-0.177	-0.277	-0.389	-0.512
1.30	-0.003	-0.017	-0.033	-0.068	-0.140	-0.217	-0.298	-0.385
1.40	-0.003	-0.014	-0.027	-0.056	-0.114	-0.174	-0.237	-0.303
1.50	-0.002	-0.011	-0.023	-0.046	-0.094	-0.143	-0.194	-0.246
1.60	-0.002	-0.010	-0.019	-0.039	-0.079	-0.120	-0.162	-0.204
1.70	-0.002	-0.008	-0.017	-0.033	-0.067	-0.102	-0.137	-0.172
1.80	-0.001	-0.007	-0.014	-0.029	-0.058	-0.088	-0.117	-0.147
1.90	-0.001	-0.006	-0.013	-0.025	-0.051	-0.076	-0.102	-0.127
2.00	-0.001	-0.006	-0.011	-0.022	-0.044	-0.067	-0.089	-0.111
2.20	-0.001	-0.004	-0.009	-0.018	-0.035	-0.053	-0.070	-0.087
2.40	-0.001	-0.004	-0.007	-0.014	-0.028	-0.042	-0.056	-0.070
2.60	-0.001	-0.003	-0.006	-0.012	-0.023	-0.035	-0.046	-0.058
2.80	-0.000	-0.002	-0.005	-0.010	-0.020	-0.029	-0.039	-0.048
3.00	-0.000	-0.002	-0.004	-0.008	-0.017	-0.025	-0.033	-0.041
3.50	-0.000	-0.001	-0.003	-0.006	-0.012	-0.017	-0.023	-0.029
4.00	-0.000	-0.001	-0.002	-0.004	-0.009	-0.013	-0.017	-0.021

Table D.10: Values of $(S^R)^1/R$

$P_r =$	0.0100	0.0500	0.1000	0.2000	0.4000	0.6000	0.8000	1.0000
T_r								
0.30	-16.782	-16.774	-16.764	-16.744	-16.705	-16.665	-16.626	-16.586
0.35	-15.413	-15.408	-15.401	-15.387	-15.359	-15.333	-15.305	-15.278
0.40	-13.990	-13.986	-13.981	-13.972	-13.953	-13.934	-13.915	-13.896
0.45	-12.564	-12.561	-12.558	-12.551	-12.537	-12.523	-12.509	-12.496
0.50	-11.202	-11.200	-11.197	-11.092	-11.082	-11.172	-11.162	-11.153
0.55	-0.115	-9.948	-9.946	-9.942	-9.935	-9.928	-9.921	-9.914
0.60	-0.078	-8.828	-8.826	-8.823	-8.817	-8.811	-8.806	-8.799
0.65	-0.055	-0.309	-7.832	-7.829	-7.824	-7.819	-7.815	-7.510
0.70	-0.040	-0.216	-0.491	-6.951	-6.945	-6.941	-6.937	-6.933
0.75	-0.029	-0.156	-0.340	-6.173	-6.167	-6.162	-6.158	-6.155
0.80	-0.022	-0.116	-0.246	-0.578	-5.475	-5.468	-5.462	-5.458
0.85	-0.017	-0.088	-0.183	-0.400	-4.853	-4.841	-4.832	-4.826
0.90	-0.013	-0.068	-0.140	-0.301	-0.744	-4.269	-4.249	-4.238
0.93	-0.011	-0.058	-0.120	-0.254	-0.593	-1.219	-3.914	-3.894
0.95	-0.010	-0.053	-0.109	-0.228	-0.517	-0.961	-3.697	-3.658
0.97	-0.010	-0.048	-0.099	-0.206	-0.456	-0.797	-1.570	-3.406
0.98	-0.009	-0.046	-0.094	-0.196	-0.429	-0.734	-1.270	-3.264
0.99	-0.009	-0.044	-0.090	-0.186	-0.405	-0.680	-1.098	-3.093
1.00	-0.008	-0.042	-0.086	-0.177	-0.382	-0.632	-0.977	-2.399
1.01	-0.008	-0.040	-0.082	-0.169	-0.361	-0.590	-0.883	-1.306
1.02	-0.008	-0.039	-0.078	-0.161	-0.342	-0.552	-0.807	-1.113
1.05	-0.007	-0.034	-0.069	-0.140	-0.292	-0.460	-0.642	-0.820
1.10	-0.005	-0.028	-0.055	-0.112	-0.229	-0.350	-0.470	-0.577
1.15	-0.005	-0.023	-0.045	-0.091	-0.183	-0.275	-0.361	-0.437
1.20	-0.004	-0.019	-0.037	-0.075	-0.149	-0.220	-0.286	-0.343
1.30	-0.003	-0.013	-0.026	-0.052	-0.102	-0.148	-0.190	-0.226
1.40	-0.002	-0.010	-0.019	-0.037	-0.072	-0.104	-0.133	-0.158
1.50	-0.001	-0.007	-0.014	-0.027	-0.053	-0.076	-0.097	-0.115
1.60	-0.001	-0.005	-0.011	-0.021	-0.040	-0.057	-0.073	-0.086
1.70	-0.001	-0.004	-0.008	-0.016	-0.031	-0.044	-0.056	-0.067
1.80	-0.001	-0.003	-0.006	-0.013	-0.024	-0.035	-0.044	-0.053
1.90	-0.001	-0.003	-0.005	-0.010	-0.019	-0.028	-0.036	-0.043
2.00	-0.000	-0.002	-0.004	-0.008	-0.016	-0.023	-0.029	-0.035
2.20	-0.000	-0.001	-0.003	-0.006	-0.011	-0.016	-0.021	-0.025
2.40	-0.000	-0.001	-0.002	-0.004	-0.008	-0.012	-0.015	-0.019
2.60	-0.000	-0.001	-0.002	-0.003	-0.006	-0.009	-0.012	-0.015
2.80	-0.000	-0.001	-0.001	-0.003	-0.005	-0.008	-0.010	-0.012
3.00	-0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.004	-0.006	-0.008	-0.010
3.50	-0.000	-0.000	-0.001	-0.001	-0.003	-0.004	-0.006	-0.007
4.00	-0.000	-0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.003	-0.005	-0.006

Table D.11: Values of $(S^R)^0/R$

$P_r =$	1.0000	1.2000	1.5000	2.0000	3.0000	5.0000	7.0000	10.000
T_r								
0.30	-7.099	-6.935	-6.740	-6.497	-6.180	-5.847	-5.683	-5.578
0.35	-6.663	-6.497	-6.299	-6.052	-5.728	-5.376	-5.194	-5.060
0.40	-6.275	-6.109	-5.909	-5.660	-5.330	-4.967	-4.772	-4.619
0.45	-5.924	-5.757	-5.557	-5.306	-4.974	-4.603	-4.401	-4.234
0.50	-5.608	-5.441	-5.240	-4.989	-4.656	-4.282	-4.074	-3.899
0.55	-5.324	-5.157	-4.956	-4.706	-4.373	-3.998	-3.788	-3.607
0.60	-5.066	-4.900	-4.700	-4.451	-4.120	-3.747	-3.537	-3.353
0.65	-4.830	-4.665	-4.467	-4.220	-3.892	-3.523	-3.315	-3.131
0.70	-4.610	-4.446	-4.250	-4.007	-3.684	-3.322	-3.117	-2.935
0.75	-4.399	-4.238	-4.045	-3.807	-3.491	-3.138	-2.939	-2.761
0.80	-4.191	-4.034	-3.846	-3.615	-3.310	-2.970	-2.777	-2.605
0.85	-3.976	-3.825	-3.646	-3.425	-3.135	-2.812	-2.629	-2.463
0.90	-3.738	-3.599	-3.434	-3.231	-2.964	-2.663	-2.491	-2.334
0.93	-3.569	-3.444	-3.295	-3.108	-2.860	-2.577	-2.412	-2.262
0.95	-3.433	-3.326	-3.193	-3.023	-2.790	-2.520	-2.362	-2.215
0.97	-3.259	-3.188	-3.081	-2.932	-2.719	-2.463	-2.312	-2.170
0.98	-3.142	-3.106	-3.019	-2.884	-2.682	-2.436	-2.287	-2.148
0.99	-2.972	-3.010	-2.953	-2.835	-2.646	-2.408	-2.263	-2.126
1.00	-2.178	-2.893	-2.879	-2.784	-2.609	-2.380	-2.239	-2.105
1.01	-1.391	-2.736	-2.798	-2.730	-2.571	-2.352	-2.215	-2.083
1.02	-1.225	-2.495	-2.706	-2.673	-2.533	-2.325	-2.191	-2.062
1.05	-0.965	-1.523	-2.328	-2.483	-2.415	-2.242	-2.121	-2.001
1.10	-0.742	-1.012	-1.557	-2.081	-2.202	-2.104	-2.007	-1.903
1.15	-0.607	-0.790	-1.126	-1.649	-1.968	-1.966	-1.897	-1.810
1.20	-0.512	-0.651	-0.890	-1.308	-1.727	-1.827	-1.789	-1.722
1.30	-0.385	-0.478	-0.628	-0.891	-1.299	-1.554	-1.581	-1.556
1.40	-0.303	-0.375	-0.478	-0.663	-0.990	-1.303	-1.386	-1.402
1.50	-0.246	-0.299	-0.381	-0.520	-0.777	-1.088	-1.208	-1.260
1.60	-0.204	-0.247	-0.312	-0.421	-0.628	-0.913	-1.050	-1.130
1.70	-0.172	-0.208	-0.261	-0.350	-0.519	-0.773	-0.915	-1.013
1.80	-0.147	-0.177	-0.222	-0.296	-0.438	-0.661	-0.799	-0.908
1.90	-0.127	-0.153	-0.191	-0.255	-0.375	-0.570	-0.702	-0.815
2.00	-0.111	-0.134	-0.167	-0.221	-0.325	-0.497	-0.620	-0.733
2.20	-0.087	-0.105	-0.130	-0.172	-0.251	-0.388	-0.492	-0.599
2.40	-0.070	-0.084	-0.104	-0.138	-0.201	-0.311	-0.399	-0.496
2.60	-0.058	-0.069	-0.086	-0.113	-0.164	-0.255	-0.329	-0.416
2.80	-0.048	-0.058	-0.072	-0.094	-0.137	-0.213	-0.277	-0.353
3.00	-0.041	-0.049	-0.061	-0.080	-0.116	-0.181	-0.236	-0.303
3.50	-0.029	-0.034	-0.042	-0.056	-0.081	-0.126	-0.166	-0.216
4.00	-0.021	-0.025	-0.031	-0.041	-0.059	-0.093	-0.123	-0.162

Table D.12: Values of $(S^R)^1/R$

$P_r =$	1.0000	1.2000	1.5000	2.0000	3.0000	5.0000	7.0000	10.000
T_r								
0.30	-16.586	-16.547	-16.488	-16.390	-16.195	-15.837	-15.468	-14.925
0.35	-15.278	-15.251	-15.211	-15.144	-15.011	-14.751	-14.496	-14.153
0.40	-13.896	-13.877	-13.849	-13.803	-13.714	-13.541	-13.376	-13.144
0.45	-12.496	-12.482	-12.462	-12.430	-12.367	-12.248	-12.145	-11.999
0.50	-11.153	-11.143	-11.129	-11.107	-11.063	-10.985	-10.920	-10.836
0.55	-9.914	-9.907	-9.897	-9.882	-9.853	-9.806	-9.769	-9.732
0.60	-8.799	-8.794	-8.787	-8.777	-8.760	-8.736	-8.723	-8.720
0.65	-7.810	-7.807	-7.801	-7.794	-7.784	-7.779	-7.785	-7.811
0.70	-6.933	-6.930	-6.926	-6.922	-6.919	-6.929	-6.952	-7.002
0.75	-6.155	-6.152	-6.149	-6.147	-6.149	-6.174	-6.213	-6.285
0.80	-5.458	-5.455	-5.453	-5.452	-5.461	-5.501	-5.555	-5.648
0.85	-4.826	-4.822	-4.820	-4.822	-4.839	-4.898	-4.969	-5.082
0.90	-4.238	-4.232	-4.230	-4.236	-4.267	-4.351	-4.442	-4.578
0.93	-3.894	-3.885	-3.884	-3.896	-3.941	-4.046	-4.151	-4.300
0.95	-3.658	-3.647	-3.648	-3.669	-3.728	-3.851	-3.966	-4.125
0.97	-3.406	-3.391	-3.401	-3.437	-3.517	-3.661	-3.788	-3.957
0.98	-3.264	-3.247	-3.268	-3.318	-3.412	-3.569	-3.701	-3.875
0.99	-3.093	-3.082	-3.126	-3.195	-3.306	-3.477	-3.616	-3.796
1.00	-2.399	-2.868	-2.967	-3.067	-3.200	-3.387	-3.532	-3.717
1.01	-1.306	-2.513	-2.784	-2.933	-3.094	-3.297	-3.450	-3.640
1.02	-1.113	-1.655	-2.557	-2.790	-2.986	-3.209	-3.369	-3.565
1.05	-0.820	-0.831	-1.443	-2.283	-2.655	-2.949	-3.134	-3.348
1.10	-0.577	-0.640	-0.618	-1.241	-2.067	-2.534	-2.767	-3.013
1.15	-0.437	-0.489	-0.502	-0.654	-1.471	-2.138	-2.428	-2.708
1.20	-0.343	-0.385	-0.412	-0.447	-0.991	-1.767	-2.115	-2.430
1.30	-0.226	-0.254	-0.282	-0.300	-0.481	-1.147	-1.569	-1.944
1.40	-0.158	-0.178	-0.200	-0.220	-0.290	-0.730	-1.138	-1.544
1.50	-0.115	-0.130	-0.147	-0.166	-0.206	-0.479	-0.823	-1.222
1.60	-0.086	-0.098	-0.112	-0.129	-0.159	-0.334	-0.604	-0.969
1.70	-0.067	-0.076	-0.087	-0.102	-0.127	-0.248	-0.456	-0.775
1.80	-0.053	-0.060	-0.070	-0.083	-0.105	-0.195	-0.355	-0.628
1.90	-0.043	-0.049	-0.057	-0.069	-0.089	-0.160	-0.286	-0.518
2.00	-0.035	-0.040	-0.048	-0.058	-0.077	-0.136	-0.238	-0.434
2.20	-0.025	-0.029	-0.035	-0.043	-0.060	-0.105	-0.178	-0.322
2.40	-0.019	-0.022	-0.027	-0.034	-0.048	-0.086	-0.143	-0.254
2.60	-0.015	-0.018	-0.021	-0.028	-0.041	-0.074	-0.120	-0.210
2.80	-0.012	-0.014	-0.018	-0.023	-0.025	-0.065	-0.104	-0.180
3.00	-0.010	-0.012	-0.015	-0.020	-0.031	-0.058	-0.093	-0.158
3.50	-0.007	-0.009	-0.011	-0.015	-0.024	-0.046	-0.073	-0.122
4.00	-0.006	-0.007	-0.009	-0.012	-0.020	-0.038	-0.060	-0.100

Table D.13: Values of ϕ^0

$P_r =$	0.0100	0.0500	0.1000	0.2000	0.4000	0.6000	0.8000	1.0000
T_r								
0.30	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.35	0.0034	0.0007	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000
0.40	0.0272	0.0055	0.0028	0.0014	0.0007	0.0005	0.0004	0.0003
0.45	0.1321	0.0266	0.0135	0.0069	0.0036	0.0025	0.0020	0.0016
0.50	0.4529	0.0912	0.0461	0.0235	0.0122	0.0085	0.0067	0.0055
0.55	0.9817	0.2432	0.1227	0.0625	0.0325	0.0225	0.0176	0.0146
0.60	0.9840	0.5383	0.2716	0.1384	0.0718	0.0497	0.0386	0.0321
0.65	0.9886	0.9419	0.5212	0.2655	0.1374	0.0948	0.0738	0.0611
0.70	0.9908	0.9528	0.9057	0.4560	0.2360	0.1626	0.1262	0.1045
0.75	0.9931	0.9616	0.9226	0.7178	0.3715	0.2559	0.1982	0.1641
0.80	0.9931	0.9683	0.9354	0.8730	0.5445	0.3750	0.2904	0.2404
0.85	0.9954	0.9727	0.9462	0.8933	0.7534	0.5188	0.4018	0.3319
0.90	0.9954	0.9772	0.9550	0.9099	0.8204	0.6823	0.5297	0.4375
0.93	0.9954	0.9795	0.9594	0.9183	0.8375	0.7551	0.6109	0.5058
0.95	0.9954	0.9817	0.9616	0.9226	0.8472	0.7709	0.6668	0.5521
0.97	0.9954	0.9817	0.9638	0.9268	0.8570	0.7852	0.7112	0.5984
0.98	0.9954	0.9817	0.9638	0.9290	0.8610	0.7925	0.7211	0.6223
0.99	0.9977	0.9840	0.9661	0.9311	0.8650	0.7980	0.7295	0.6442
1.00	0.9977	0.9840	0.9661	0.9333	0.8690	0.8035	0.7379	0.6668
1.01	0.9977	0.9840	0.9683	0.9354	0.8730	0.8110	0.7464	0.6792
1.02	0.9977	0.9840	0.9683	0.9376	0.8770	0.8166	0.7551	0.6902
1.05	0.9977	0.9863	0.9705	0.9441	0.8872	0.8318	0.7762	0.7194
1.10	0.9977	0.9886	0.9750	0.9506	0.9016	0.8531	0.8072	0.7586
1.15	0.9977	0.9886	0.9795	0.9572	0.9141	0.8730	0.8318	0.7907
1.20	0.9977	0.9908	0.9817	0.9616	0.9247	0.8892	0.8531	0.8166
1.30	0.9977	0.9931	0.9863	0.9705	0.9419	0.9141	0.8872	0.8590
1.40	0.9977	0.9931	0.9886	0.9772	0.9550	0.9333	0.9120	0.8892
1.50	1.0000	0.9954	0.9908	0.9817	0.9638	0.9462	0.9290	0.9141
1.60	1.0000	0.9954	0.9931	0.9863	0.9727	0.9572	0.9441	0.9311
1.70	1.0000	0.9977	0.9954	0.9886	0.9772	0.9661	0.9550	0.9462
1.80	1.0000	0.9977	0.9954	0.9908	0.9817	0.9727	0.9661	0.9572
1.90	1.0000	0.9977	0.9954	0.9931	0.9863	0.9795	0.9727	0.9661
2.00	1.0000	0.9977	0.9977	0.9954	0.9886	0.9840	0.9795	0.9727
2.20	1.0000	1.0000	0.9977	0.9977	0.9931	0.9908	0.9886	0.9840
2.40	1.0000	1.0000	1.0000	0.9977	0.9977	0.9954	0.9931	0.9931
2.60	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9977	0.9977	0.9977
2.80	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0023	1.0023
3.00	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0023	1.0023	1.0046	1.0046
3.50	1.0000	1.0000	1.0000	1.0023	1.0023	1.0046	1.0069	1.0093
4.00	1.0000	1.0000	1.0000	1.0023	1.0046	1.0069	1.0093	1.0116

Table D.14: Values of ϕ^1

$P_r =$	0.0100	0.0500	0.1000	0.2000	0.4000	0.6000	0.8000	1.0000
T_r								
0.30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.35	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.40	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.45	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
0.50	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0013	0.0013
0.55	0.9705	0.0069	0.0068	0.0068	0.0066	0.0065	0.0064	0.0063
0.60	0.9795	0.0227	0.0226	0.0223	0.0220	0.0216	0.0213	0.0210
0.65	0.9863	0.9311	0.0572	0.0568	0.0559	0.0551	0.0543	0.0535
0.70	0.9908	0.9528	0.9036	0.1182	0.1163	0.1147	0.1131	0.1116
0.75	0.9931	0.9683	0.9332	0.2112	0.2078	0.2050	0.2022	0.1994
0.80	0.9954	0.9772	0.9550	0.9057	0.3302	0.3257	0.3212	0.3168
0.85	0.9977	0.9863	0.9705	0.9375	0.4774	0.4708	0.4654	0.4590
0.90	0.9977	0.9908	0.9795	0.9594	0.9141	0.6323	0.6250	0.6165
0.93	0.9977	0.9931	0.9840	0.9705	0.9354	0.8953	0.7227	0.7144
0.95	0.9977	0.9931	0.9885	0.9750	0.9484	0.9183	0.7888	0.7797
0.97	1.0000	0.9954	0.9908	0.9795	0.9594	0.9354	0.9078	0.8413
0.98	1.0000	0.9954	0.9908	0.9817	0.9638	0.9440	0.9225	0.8729
0.99	1.0000	0.9954	0.9931	0.9840	0.9683	0.9528	0.9332	0.9036
1.00	1.0000	0.9977	0.9931	0.9863	0.9727	0.9594	0.9440	0.9311
1.01	1.0000	0.9977	0.9931	0.9885	0.9772	0.9638	0.9528	0.9462
1.02	1.0000	0.9977	0.9954	0.9908	0.9795	0.9705	0.9616	0.9572
1.05	1.0000	0.9977	0.9977	0.9954	0.9885	0.9863	0.9840	0.9840
1.10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0023	1.0046	1.0093	1.0163
1.15	1.0000	1.0000	1.0023	1.0046	1.0116	1.0186	1.0257	1.0375
1.20	1.0000	1.0023	1.0046	1.0069	1.0163	1.0280	1.0399	1.0544
1.30	1.0000	1.0023	1.0069	1.0116	1.0257	1.0399	1.0544	1.0716
1.40	1.0000	1.0046	1.0069	1.0139	1.0304	1.0471	1.0642	1.0815
1.50	1.0000	1.0046	1.0069	1.0163	1.0328	1.0496	1.0666	1.0865
1.60	1.0000	1.0046	1.0069	1.0163	1.0328	1.0496	1.0691	1.0865
1.70	1.0000	1.0046	1.0093	1.0163	1.0328	1.0496	1.0691	1.0865
1.80	1.0000	1.0046	1.0069	1.0163	1.0328	1.0496	1.0666	1.0840
1.90	1.0000	1.0046	1.0069	1.0163	1.0328	1.0496	1.0666	1.0815
2.00	1.0000	1.0046	1.0069	1.0163	1.0304	1.0471	1.0642	1.0815
2.20	1.0000	1.0046	1.0069	1.0139	1.0304	1.0447	1.0593	1.0765
2.40	1.0000	1.0046	1.0069	1.0139	1.0280	1.0423	1.0568	1.0716
2.60	1.0000	1.0023	1.0069	1.0139	1.0257	1.0399	1.0544	1.0666
2.80	1.0000	1.0023	1.0069	1.0116	1.0257	1.0375	1.0496	1.0642
3.00	1.0000	1.0023	1.0069	1.0116	1.0233	1.0352	1.0471	1.0593
3.50	1.0000	1.0023	1.0046	1.0023	1.0209	1.0304	1.0423	1.0520
4.00	1.0000	1.0023	1.0046	1.0093	1.0186	1.0280	1.0375	1.0471

Table D.15: Values of ϕ^0

$P_r =$	1.0000	1.2000	1.5000	2.0000	3.0000	5.0000	7.0000	10.000
T_r								
0.30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.35	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.40	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003
0.45	0.0016	0.0014	0.0012	0.0010	0.0008	0.0008	0.0009	0.0012
0.50	0.0055	0.0048	0.0041	0.0034	0.0028	0.0025	0.0027	0.0034
0.55	0.0146	0.0127	0.0107	0.0089	0.0072	0.0063	0.0066	0.0080
0.60	0.0321	0.0277	0.0234	0.0193	0.0154	0.0132	0.0135	0.0160
0.65	0.0611	0.0527	0.0445	0.0364	0.0289	0.0244	0.0245	0.0282
0.70	0.1045	0.0902	0.0759	0.0619	0.0488	0.0406	0.0402	0.0453
0.75	0.1641	0.1413	0.1188	0.0966	0.0757	0.0625	0.0610	0.0673
0.80	0.2404	0.2065	0.1738	0.1409	0.1102	0.0899	0.0867	0.0942
0.85	0.3319	0.2858	0.2399	0.1945	0.1517	0.1227	0.1175	0.1256
0.90	0.4375	0.3767	0.3162	0.2564	0.1995	0.1607	0.1524	0.1611
0.93	0.5058	0.4355	0.3656	0.2972	0.2307	0.1854	0.1754	0.1841
0.95	0.5521	0.4764	0.3999	0.3251	0.2523	0.2028	0.1910	0.2000
0.97	0.5984	0.5164	0.4345	0.3532	0.2748	0.2203	0.2075	0.2163
0.98	0.6223	0.5370	0.4529	0.3681	0.2864	0.2296	0.2158	0.2244
0.99	0.6442	0.5572	0.4699	0.3828	0.2978	0.2388	0.2244	0.2328
1.00	0.6668	0.5781	0.4875	0.3972	0.3097	0.2483	0.2328	0.2415
1.01	0.6792	0.5970	0.5047	0.4121	0.3214	0.2576	0.2415	0.2500
1.02	0.6902	0.6166	0.5224	0.4266	0.3334	0.2673	0.2506	0.2582
1.05	0.7194	0.6607	0.5728	0.4710	0.3690	0.2958	0.2773	0.2844
1.10	0.7586	0.7112	0.6412	0.5408	0.4285	0.3451	0.3228	0.3296
1.15	0.7907	0.7499	0.6918	0.6026	0.4875	0.3954	0.3690	0.3750
1.20	0.8166	0.7834	0.7328	0.6546	0.5420	0.4446	0.4150	0.4198
1.30	0.8590	0.8318	0.7943	0.7345	0.6383	0.5383	0.5058	0.5093
1.40	0.8892	0.8690	0.8395	0.7925	0.7145	0.6237	0.5902	0.5943
1.50	0.9141	0.8974	0.8730	0.8375	0.7745	0.6966	0.6668	0.6714
1.60	0.9311	0.9183	0.8995	0.8710	0.8222	0.7586	0.7328	0.7430
1.70	0.9462	0.9354	0.9204	0.8995	0.8610	0.8091	0.7907	0.8054
1.80	0.9572	0.9484	0.9376	0.9204	0.8913	0.8531	0.8414	0.8590
1.90	0.9661	0.9594	0.9506	0.9376	0.9162	0.8872	0.8831	0.9057
2.00	0.9727	0.9683	0.9616	0.9528	0.9354	0.9183	0.9183	0.9462
2.20	0.9840	0.9817	0.9795	0.9727	0.9661	0.9616	0.9727	1.0093
2.40	0.9931	0.9908	0.9908	0.9886	0.9863	0.9931	1.0116	1.0568
2.60	0.9977	0.9977	0.9977	0.9977	1.0023	1.0162	1.0399	1.0889
2.80	1.0023	1.0023	1.0046	1.0069	1.0116	1.0328	1.0593	1.1117
3.00	1.0046	1.0069	1.0069	1.0116	1.0209	1.0423	1.0740	1.1298
3.50	1.0093	1.0116	1.0139	1.0186	1.0304	1.0593	1.0914	1.1508
4.00	1.0116	1.0139	1.0162	1.0233	1.0375	1.0666	1.0990	1.1588

Table D.16: Values of ϕ^1

$P_r =$	1.0000	1.2000	1.5000	2.0000	3.0000	5.0000	7.0000	10.000
T_r								
0.30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.35	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.40	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.45	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
0.50	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0011	0.0009	0.0008	0.0006
0.55	0.0063	0.0062	0.0061	0.0058	0.0053	0.0045	0.0039	0.0031
0.60	0.0210	0.0207	0.0202	0.0194	0.0179	0.0154	0.0133	0.0108
0.65	0.0536	0.0527	0.0516	0.0497	0.0461	0.0401	0.0350	0.0289
0.70	0.1117	0.1102	0.1079	0.1040	0.0970	0.0851	0.0752	0.0629
0.75	0.1995	0.1972	0.1932	0.1871	0.1754	0.1552	0.1387	0.1178
0.80	0.3170	0.3133	0.3076	0.2978	0.2812	0.2512	0.2265	0.1954
0.85	0.4592	0.4539	0.4457	0.4325	0.4093	0.3698	0.3365	0.2951
0.90	0.6166	0.6095	0.5998	0.5834	0.5546	0.5058	0.4645	0.4130
0.93	0.7145	0.7063	0.6950	0.6761	0.6457	0.5916	0.5470	0.4898
0.95	0.7798	0.7691	0.7568	0.7379	0.7063	0.6501	0.6026	0.5432
0.97	0.8414	0.8318	0.8185	0.7998	0.7656	0.7096	0.6607	0.5984
0.98	0.8730	0.8630	0.8492	0.8298	0.7962	0.7379	0.6887	0.6266
0.99	0.9036	0.8913	0.8790	0.8590	0.8241	0.7674	0.7178	0.6546
1.00	0.9311	0.9204	0.9078	0.8872	0.8531	0.7962	0.7464	0.6823
1.01	0.9462	0.9462	0.9333	0.9162	0.8831	0.8241	0.7745	0.7096
1.02	0.9572	0.9661	0.9594	0.9419	0.9099	0.8531	0.8035	0.7379
1.05	0.9840	0.9954	1.0186	1.0162	0.9886	0.9354	0.8872	0.8222
1.10	1.0162	1.0280	1.0593	1.0990	1.1015	1.0617	1.0186	0.9572
1.15	1.0375	1.0520	1.0814	1.1376	1.1858	1.1722	1.1403	1.0864
1.20	1.0544	1.0691	1.0990	1.1588	1.2388	1.2647	1.2474	1.2050
1.30	1.0715	1.0914	1.1194	1.1776	1.2853	1.3868	1.4125	1.4061
1.40	1.0814	1.0990	1.1298	1.1858	1.2942	1.4488	1.5171	1.5524
1.50	1.0864	1.1041	1.1350	1.1858	1.2942	1.4689	1.5740	1.6520
1.60	1.0864	1.1041	1.1350	1.1858	1.2883	1.4689	1.5996	1.7140
1.70	1.0864	1.1041	1.1324	1.1803	1.2794	1.4622	1.6033	1.7458
1.80	1.0839	1.1015	1.1298	1.1749	1.2706	1.4488	1.5959	1.7620
1.90	1.0814	1.0990	1.1272	1.1695	1.2618	1.4355	1.5849	1.7620
2.00	1.0814	1.0965	1.1220	1.1641	1.2503	1.4191	1.5704	1.7539
2.20	1.0765	1.0914	1.1143	1.1535	1.2331	1.3900	1.5346	1.7219
2.40	1.0715	1.0864	1.1066	1.1429	1.2190	1.3614	1.4997	1.6866
2.60	1.0666	1.0814	1.1015	1.1350	1.2023	1.3397	1.4689	1.6482
2.80	1.0641	1.0765	1.0940	1.1272	1.1912	1.3183	1.4388	1.6144
3.00	1.0593	1.0715	1.0889	1.1194	1.1803	1.3002	1.4158	1.5813
3.50	1.0520	1.0617	1.0789	1.1041	1.1561	1.2618	1.3614	1.5101
4.00	1.0471	1.0544	1.0691	1.0914	1.1403	1.2303	1.3213	1.4555

C. Latihan Soal/ Tugas

1. Pada tabel A2 tentukan nilai C_p dalam Kj/kmol.K untuk senyawa:
 - a. Sulfur dioksida
 - b. Benzena
 - c. Ethanol
 - d. Karbon monoksida
2. Tentukan nilai energy dalam, entalpi dan entropi dalam kondisi saturated liquid pada suhu sebagai berikut
 - a. 162 C
 - b. 200 C
 - c. 278 C
 - d. 330 C
3. Pada tekanan 1.60 Mpa dengna suhu saturated 300C, berapakah nilai energy dalam, entalpi dan entropi dari superheated water tersebut

D. Daftar Pustaka

- J.M Smith, Henrick C Van Ness & Michael Abbott. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 6th edition. New York: McGraw-Hill publisher.
- Ahmad Abu Hamid. (2007). Modul Kalor dan Termodinamika. Fakultas Matematika dan IPA. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Hadiyanto. (2014). Dasar Termodinamika. Jurusan Teknik Kimia. Universitas Diponegoro.
- Paul Suparno. (2018). Pendalaman Materi Fisika: Teori Kinetik Gas dan Termodinamika. KemenristekDIKTI.
- I Gusti Agung Putra Adnyana. (2014). Termodinamika. Fakultas Mipa. Universitas Udayana.

PERTEMUAN 11

GRAFIK PROPERTI THERMODINAMIKA

A. Capaian Pembelajaran

Menguasai definisi perubahan fase pada zat murni yang berkaitan dengan istilah cair tekan (compressed liquid), cair jenuh (saturation liquid), campuran air-uap, uap jenuh (saturated liquid) dan uap panas lanjut (superheated vapor). Dapat membaca dan menjelaskan grafik properti termodinamika.

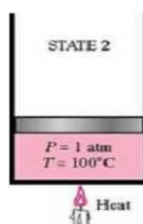
B. Uraian Materi

Zat murni adalah zat dengan komponen yang stabil dan tidak berubah-ubah. Contoh zat murni dalam aplikasinya pada kehidupan sehari-hari adalah air, nitrogen, helium dan CO₂. Terdapat tiga jenis zat murni jika dikategorikan berdasarkan struktur molekulnya yaitu zat murni dalam bentuk solid, liquid dan gas. Dalam analisa termodinamika, air (H₂O) digunakan sebagai dasar perhitungan zat murni karena diasumsikan semua zat murni memiliki kelakuan yang mirip satu dengan yang lainnya.

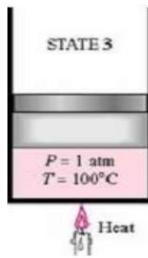
Mengulang sedikit dari pertemuan sebelumnya tentang perubahan fase pada zat murni:



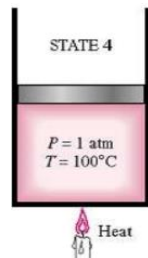
Fase awal ini disebut fase Cair tekan (Compressed liquid). Pada fase ini bila panas ditambahkan ke sistem akan berpengaruh pada kenaikan suhu namun proses penguapan belum terjadi.



Pada fase ini fluida tepat akan berubah fasenya. Terjadi sedikit proses penguapan dengan penambahan panas walaupun.



Fase ketiga ini disebut campuran Air-Uap (Liquid – Vapor Mixture). Pada keadaan ini terjadi kesetimbangan antara uap dan cairan jenuh. Temperatur akan tetap konstan dengan penambahan panas namun jumlah uap akan bertambah.

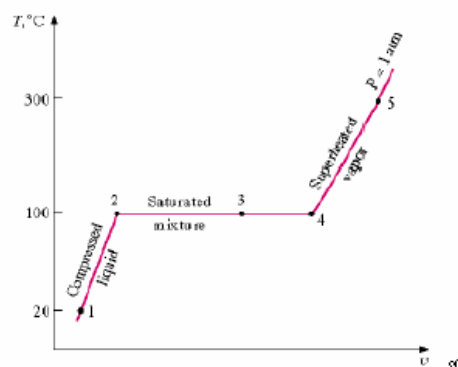


Pada fase keempat campuran tepat berubah jadi uap seluruhnya disebut dengan uap jenuh (Saturated Vapor). Pada keadaan ini, berkurangnya panas dari system menyebabkan terjadi proses pengembunan.



Fase kelima disebut dengan fase uap panas jenuh (Superheated vapor). Penambahan panas akan menyebabkan kenaikan suhu dan volume.

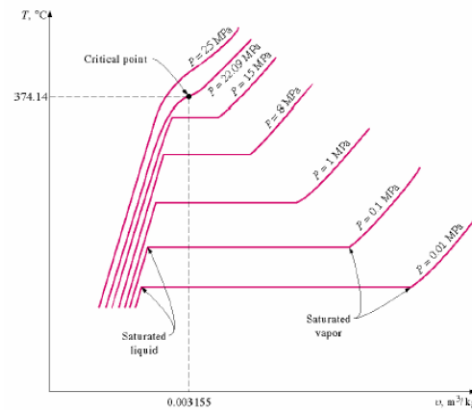
Proses-proses perubahan fase diatas dapat digambarkan dalam diagram suhu dan tekanan atau dikenal dengan istilah diagram T-v. Diagram ini menggambarkan secara detail perubahan yang terjadi setiap proses dengan variabel temperatur dan volume jenis.



Gambar 27. Diagram T-v

1. Diagram properti

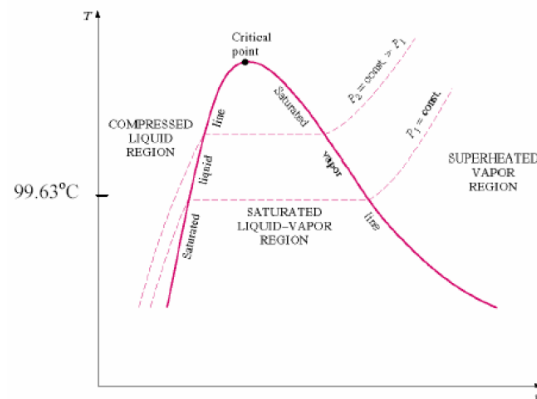
Dalam termodinamika, properti dari zat murni (dalam hal ini properti dari H₂O) digambarkan dalam beberapa bentuk diagram. Temperatur dan volume jenisnya diplot dalam diagram T-v sedangkan tekanan dan volume jenisnya diplot pada diagram P-v seperti yang dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 28. Diagram T-v perubahan fase zat murni

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa semakin tinggi tekanan air maka semakin tinggi pula titik didihnya. Temperatur saturasi atau dilambangkan dengan T_{sat} adalah fungsi dari tekanan saturasi (P_{sat}) yang berarti zat murni dapat berubah fase pada temperature dan tekanan tertentu. Dalam menggambar grafik termodinamika, jika titik-titik pada keadaan cair jenuh dihubungkan maka akan diperoleh garis cair jenuh. Sedangkan garis uap jenuh dapat digambarkan dengan memplot titik-titik pada keadaan uap jenuh.

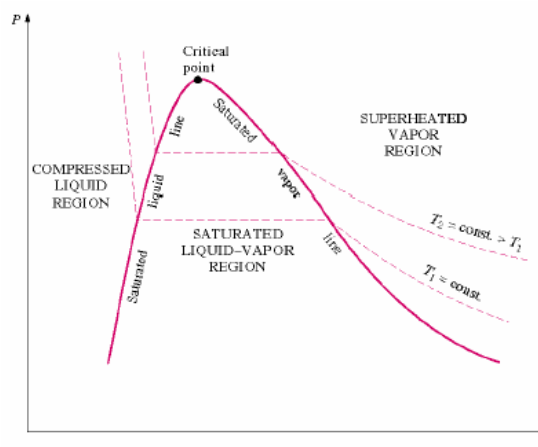
Ukuran dari garis penghubung antara keadaan cair jenuh dan uap dijenuh dipengaruhi oleh besarnya tekanan yang diberikan pada system. Pada titik 22.09 Mpa, garis uap jenuh dan cair jenuh bertemu pada satu titik yang disebut dengan titik kritis (critical point). Untuk komponen air, titik kritis berada pada suhu (T_c) 374.14 °C, dengan volume (v_c) 0.003155 m³/kg pada tekanan (P_c) 22.09 Mpa.



Gambar 29. Diagram T-v zat murni

Jika dilihat pada grafik di atas, proses perubahan dari air menjadi uap yang berada di atas titik kritis (critical point) tidak terlihat jelas. Hal tersebut dikarenakan pada kondisi di atas titik kritis fase uap terjadi karena perubahan spontan dari fase cair.

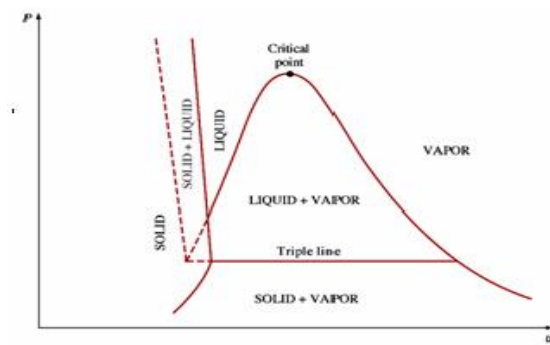
Diagram berikut menggambarkan hubungan antara tekanan dan volume (P-v). Diagram tersebut sekilas mirip dengan diagram T-v namun dapat dilihat pada grafik ini, garis temperatur konstan mempunyai trend menurun sedangkan pada diagram T-v garis tekanan konstan mempunyai trend naik.



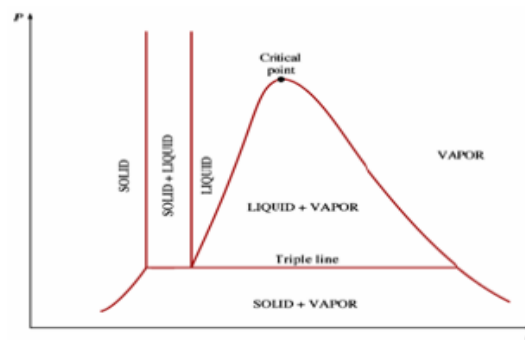
Gambar 30. Diagram P-v zat murni

2. Diagram P-V dan P-T fase padat, cair dan gas

Pada saat membeku, beberapa jenis zat murni akan mengalami proses penyusutan. Namun kasus khusus untuk zat murni seperti air akan mengembang saat membeku yang digambarkan dalam grafik berikut.

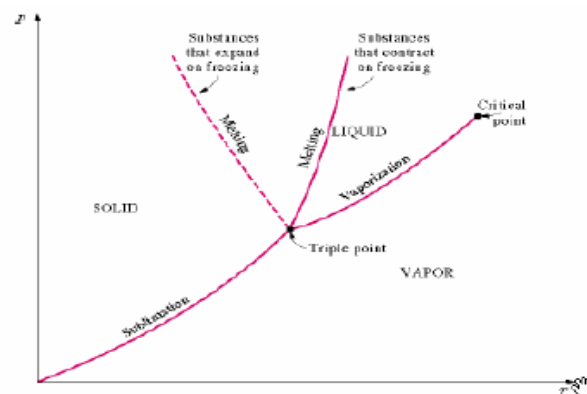


Gambar 31. Diagram P-v zat murni yang menyusut saat membeku



Gambar 32. Diagram P-v zat murni yang mengembang saat membeku

Pada kondisi tertentu fase padat, cair dan gas berada dalam suatu kesetimbangan. Jika diplotkan dalam diagram P-v dan T-v, kondisi tersebut akan membentuk suatu garis yang disebut triple line. Jika dikombinasikan di dalam diagram tekanan vs temperature (P-T) keadaan ini nampak sebagai satu titik yang disebut triple point.



Gambar 33. Diagram P-T zat murni (diagram fase)

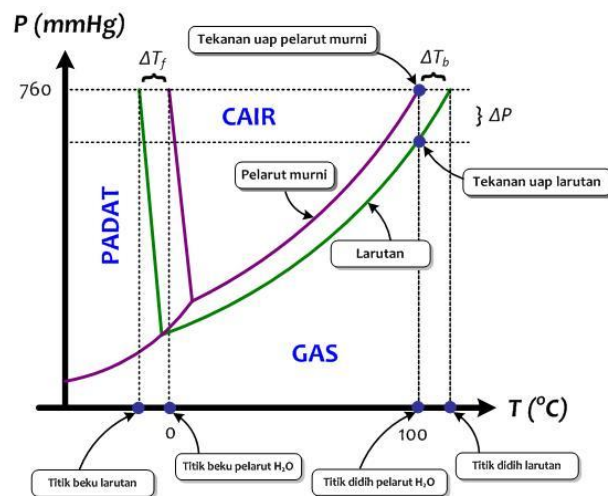
Diagram P-T dikenal dengan istilah diagram fase. Pada diagram fase terdapat garis batas yang jelas untuk memisahkan fase solid, vapor dan liquid. Ketiga garis bertemu di triple point. Triple point untuk air ada pada temperatur 0.01°C dan 4.58mmHg.

Daerah cair dan daerah uap dipisahkan oleh garis vaporisation (penguapan). Garis tersebut berakhir di titik kritis karena tidak ada batas yang jelas antara fase cair dan fase uap.

Pemisah antara daerah uap (vapor) dan daerah beku (solid) adalah garis sublimation. Garis ini merupakan transisi fase pada gas dimana zat padat dan uapnya dapat menyublim.

Garis melting line (garis leleh) adalah garis yang memisahkan daerah beku dan daerah cair.

Dari grafik tersebut terlihat bahwa kondisi liquid (cair) hanya dapat terjadi pada tekanan dibawah tekanan triple point.



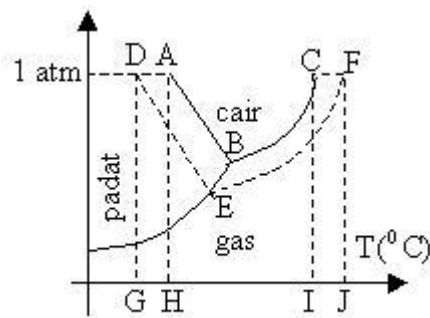
Gambar 34. Diagram P-T NaCl dan H₂O (diagram fase)

Diagram P-T merupakan acuan dalam menentukan tekanan uap pelarut murni dan tekanan uap larutan. Dari diagram diatas dapat tertera data diagram P-T air dan diagram P-T NaCl.

Diagram tersebut juga memplot suhu saat zat murni mulai membeku (titik beku larutan) dan suhu saat zat murni mulai mendidih (titik didih).

Contoh soal

Pada diagram berikut, daerah perubahan titik didih terjadi pada garis adalah



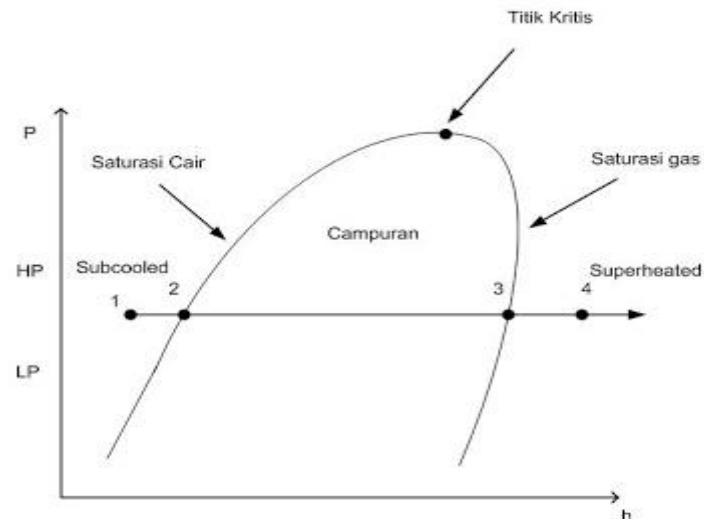
- | | |
|--------|--------|
| a. A-B | b. I-J |
| c. B-C | d. D-E |

3. Diagram Pressure-Enthalpy (P-H)

Diagram P-h merupakan diagram dengan sumbu x menunjukkan enthalpy (h) dan sumbu y menunjukkan Tekanan (P).

Biasanya diagram P-h digunakan untuk sistem termodinamika seperti siklus rankine dan perhitungan sistem refrigerasi. Diagram P-h dilengkapi dengan garis-garis besaran lain, seperti garis suhu, entropi, dan volume jenis. Selain garis-garis besaran tersebut diatas, terdapat pula kubah saturasi (ditunjukkan dengan garis merah) yang menunjukkan perbedaan fasa zat.

Didalam kubah merupakan daerah dimana fasa dari zat berupa campuran gas dan cair. Di bagian kanan terdapat garis saturasi gas (gas jenuh). Di garis ini zat dalam keadaan tepat jenuh gas. Jika sedikit saja ke kiri maka sudah ada bagian yang mencair dan jika sedikit saja ke kanan maka sudah terjadi superheated. Superheated adalah keadaan dimana pada saat suatu zat yang sudah dalam keadaan gas jenuh, kemudian mengalami kenaikan suhu.



Gambar 35. Diagram P-H

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat garis lurus dengan arah ke kanan. Garis tersebut dimulai dari sebelah kiri kubah atau dengan kata lain awalnya zat dalam keadaan subcooled.

Proses 1 ke 2, zat dalam keadaan subcooled tersebut menerima kalor sehingga terjadi kenaikan suhu sampai zat menjadi saturasi cair. Enthalpy pada zat tersebut naik. Pada titik 2 zat dalam keadaan saturasi cair.

Proses 2 ke 3, Zat tersebut menerima kalor akibatnya enthalpy naik. Dalam tahap ini kalor yang diterima tidak mengubah suhu zat, melainkan merubah fasa menjadi gas. Zat yang tadinya berupa saturasi cair mulai berubah menjadi gas (menguap). Antara titik 2 dan titik 3 berfasa campuran. Semakin dekat dengan titik 3 semakin banyak zat yang berfasa gas. Sebaliknya semakin dekat dengan titik 2, semakin banyak zat yang berfasa cair. Di titik 3 keadaan zat menjadi saturasi gas (gas jenuh) di mana semua zat berfasa gas.

Proses 3 ke 4, Setelah berfasa saturasi gas, zat tersebut menerima kalor akibatnya enthalpy terus naik. Pada proses ini terjadi kenaikan suhu sehingga zat menjadisuperheated.

Proses 1-->2-->3-->4 terjadi pada tekanan (P) yang sama. Dalam diagram P-h ini juga dapat menggambarkan proses-proses lain sehingga diketahui besaran-besaran yang ada pada proses tersebut.

C. Soal Latihan/ Tugas

1. Jelaskan yang Anda ketahui tentang perubahan fase zat murni
2. Gambarkan diagram properti zat murni yang Anda ketahui (T-v diagram, P-v diagram) dan jelaskan
3. Gambarkan diagram P-v zat murni dalam kondisi menyusut saat membeku
4. Jelaskan yang dimaksud dengan triple line

D. Daftar Pustaka

- J.M Smith, Henrick C Van Ness & Michael Abbott. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 6th edition. New York: McGraw-Hill publisher.
- Ahmad Abu Hamid. (2007). Modul Kalor dan Termodinamika. Fakultas Matematika dan IPA. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Ruangguru. Prinsip dan hukum termodinamika (diakses tanggal 5 Maret 2020) Tersedia pada <https://blog.ruangguru.com/hukum-dan-prinsip-termodinamika>
- Academia. Tabel Termodinamika (diakses tanggal 5 Maret 2020) Tersedia pada https://www.academia.edu/38665807/TABEL_TERMODINAMIKA
- Wordpress. Tabel dan grafik termodinamika. (diakses tanggal 5 Maret 2020) Tersedia pada <https://nurulimantmunib.wordpress.com/tag/termodinamika/>
- Seamolec. Termodinamika. (diakses tanggal 7 Maret 2020). Tersedia pada <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://sumbelbelajar.seamolec.org/Media/Dokumen/5a583883865eacc372523abb/c0e181161c6210969033149ffce55788.pdf&ved=2ahUKEwiLmvqFy4voAhVJWX0KHWZECBM4ChAWMAJ6BAgCEAE&usg=AOvVaw0aHjEeXmTN8Yop-cf8B1GA>

PERTEMUAN 12

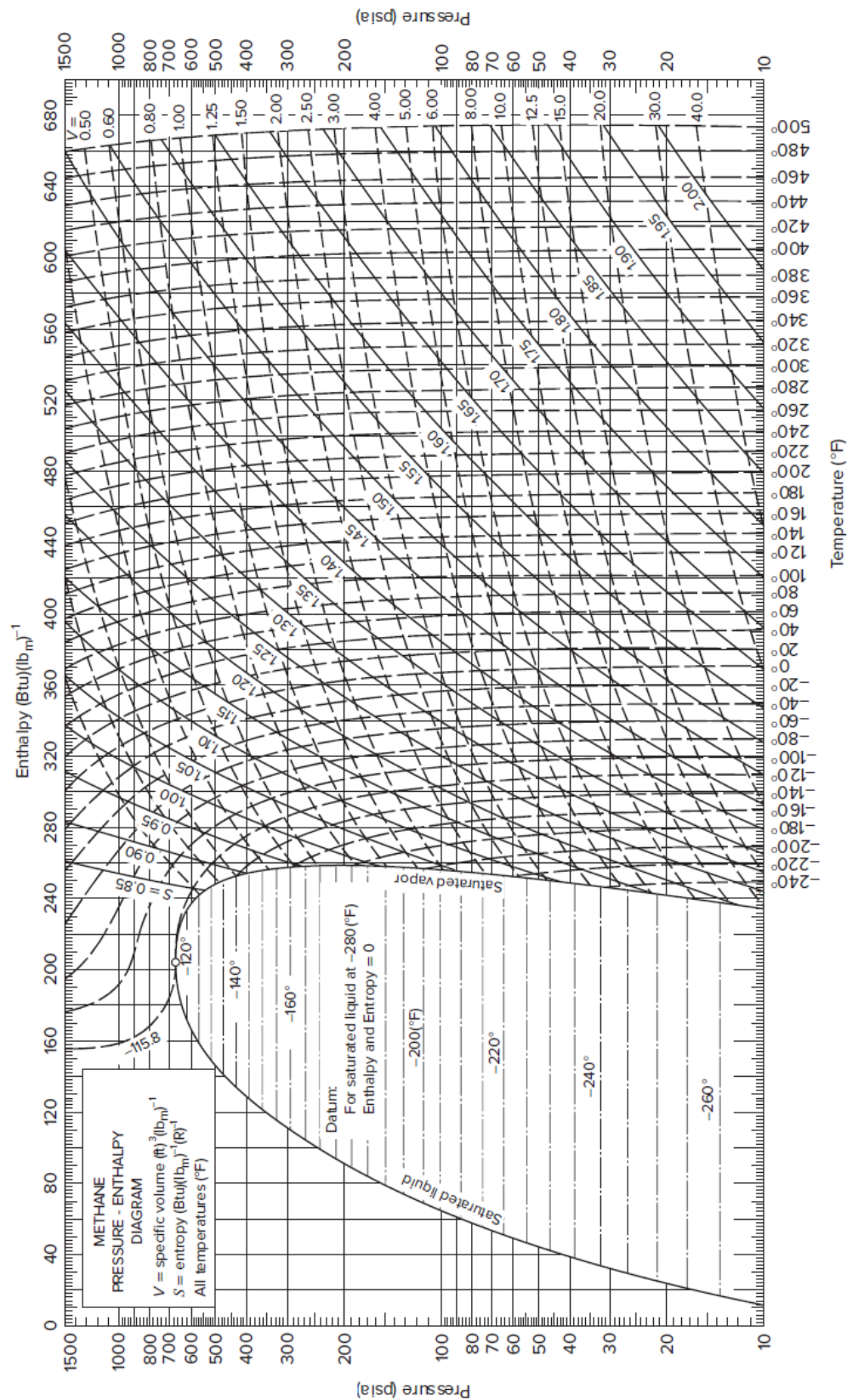
GRAFIK PROPERTI (lanjutan)

A. Capaian Pembelajaran

Menguasai definisi perubahan fase pada zat murni yang berkaitan dengan istilah cair tekan (compressed liquid), cair jenuh (saturation liquid), campuran air-uap, uap jenuh (saturated liquid) dan uap panas lanjut (superheated vapor). Dapat membaca dan menjelaskan grafik properti termodinamika.

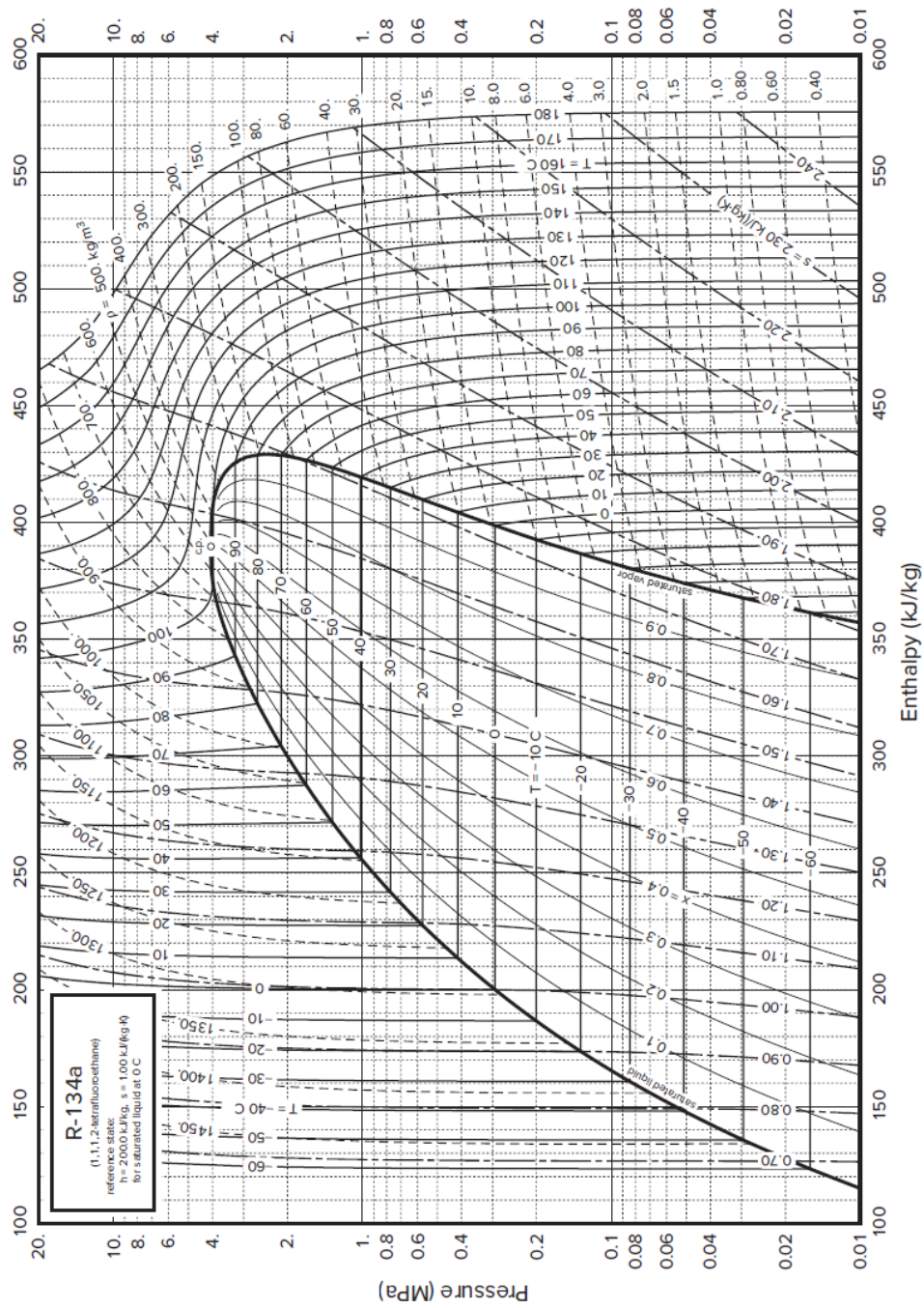
Pada pertemuan ini akan dibahas lebih lanjut tentang beberapa grafik properti termodinamika yang umum digunakan dalam perhitungan.

B. Uraian Materi



Source: C. S. Matthews and C. O. Hurd, Trans. AIChE, vol. 42, 1946, pp. 55–78.

Figure F.1 PH diagram for methane.



Retrieved from: Green, Don W., and Perry, Robert H. Perry's Chemical Engineers' Handbook (8th Edition). Blacklick, OH, USA: McGraw-Hill Professional Publishing, 2007. Copyright © 2007. McGraw-Hill Professional Publishing. All rights reserved.

Figure F.2 PH diagram for tetrafluoroethane (HFC-134a).

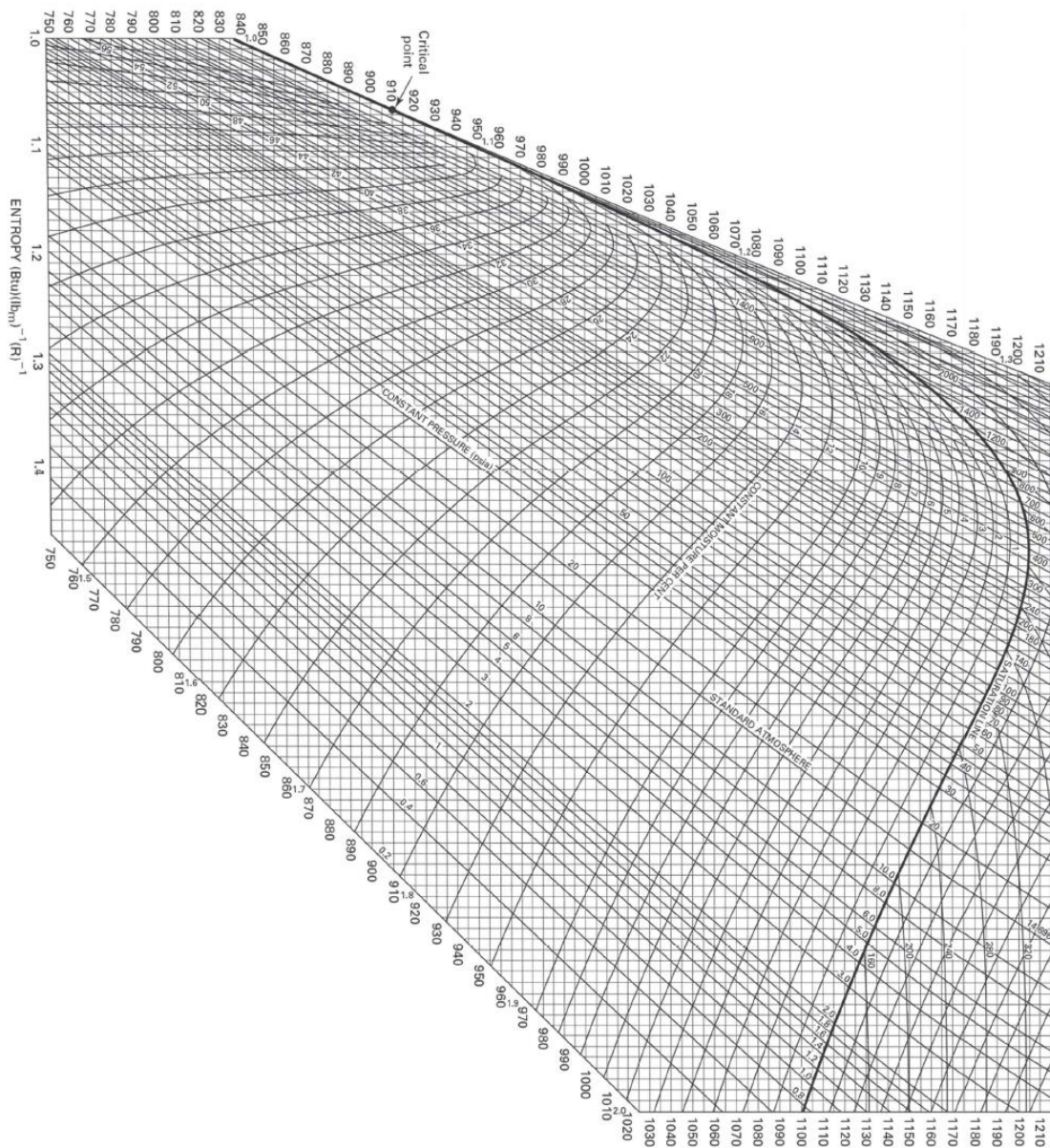
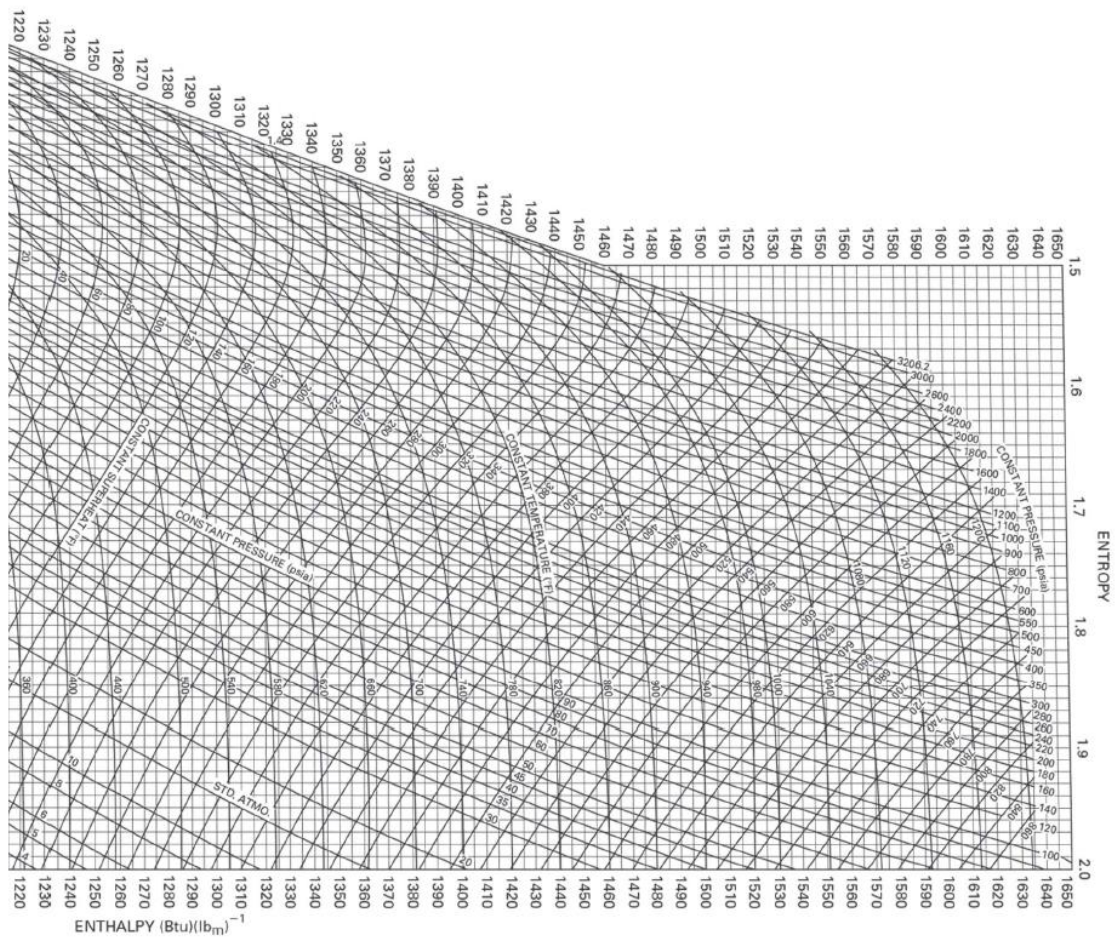
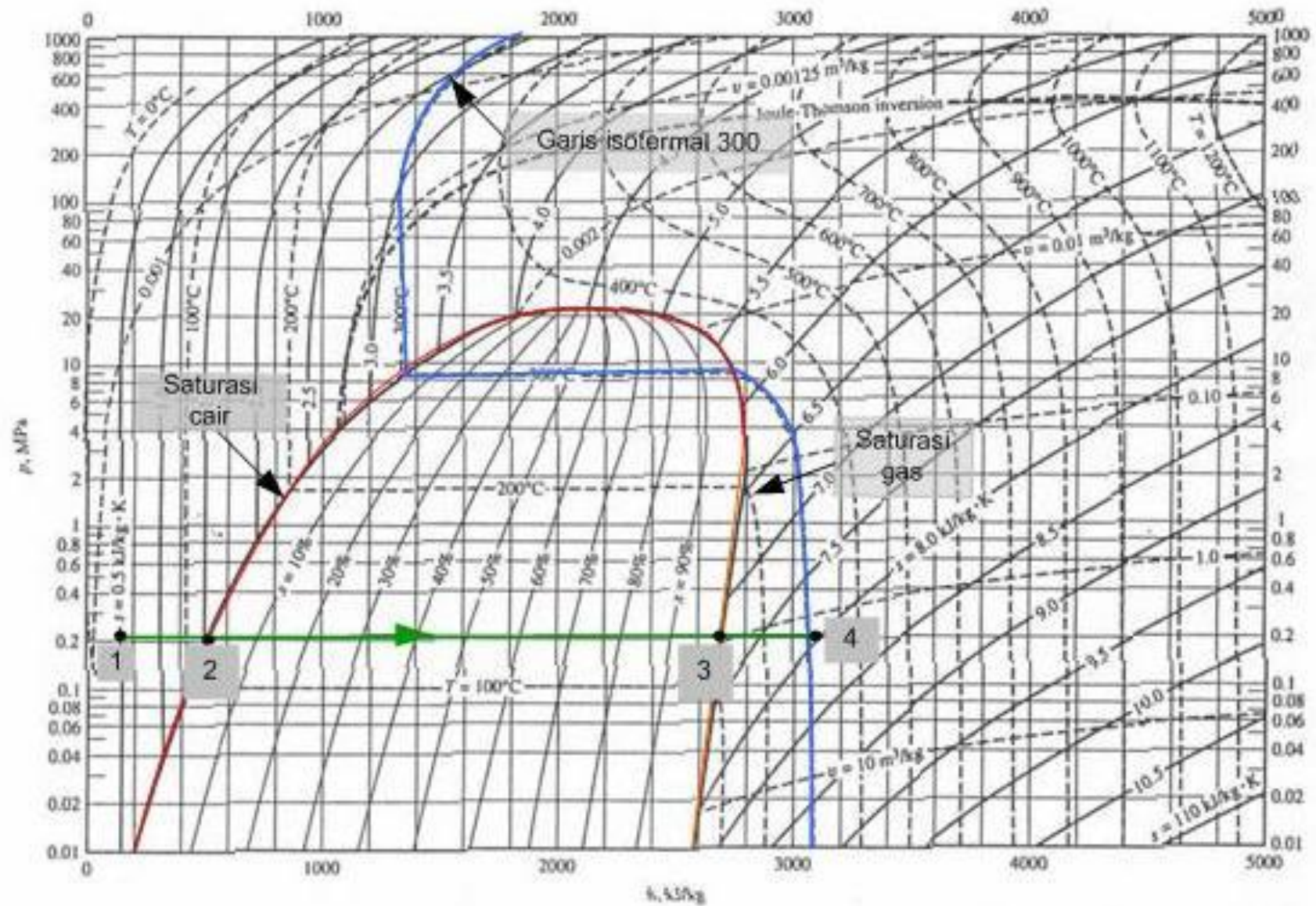


Figure F.3 Mollier (HS) diagram for steam.

Mollier diagram for steam.

(Reproduced by permission from "Steam Tables: Properties of Saturated and Superheated Steam," copyright 1940, Combustion Engineering, Inc.





Then

Diagram P-H Untuk Refrigeran R-22

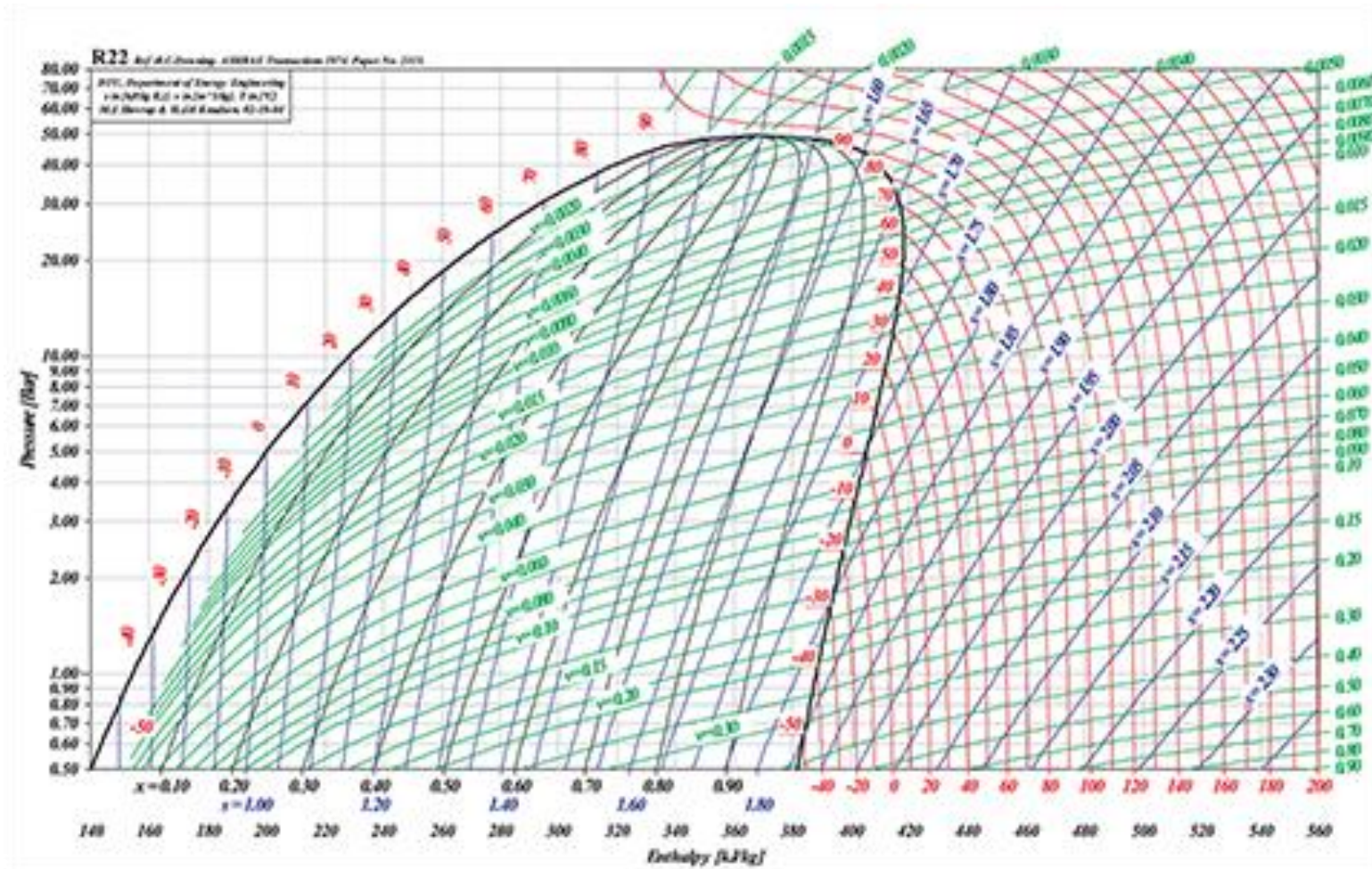
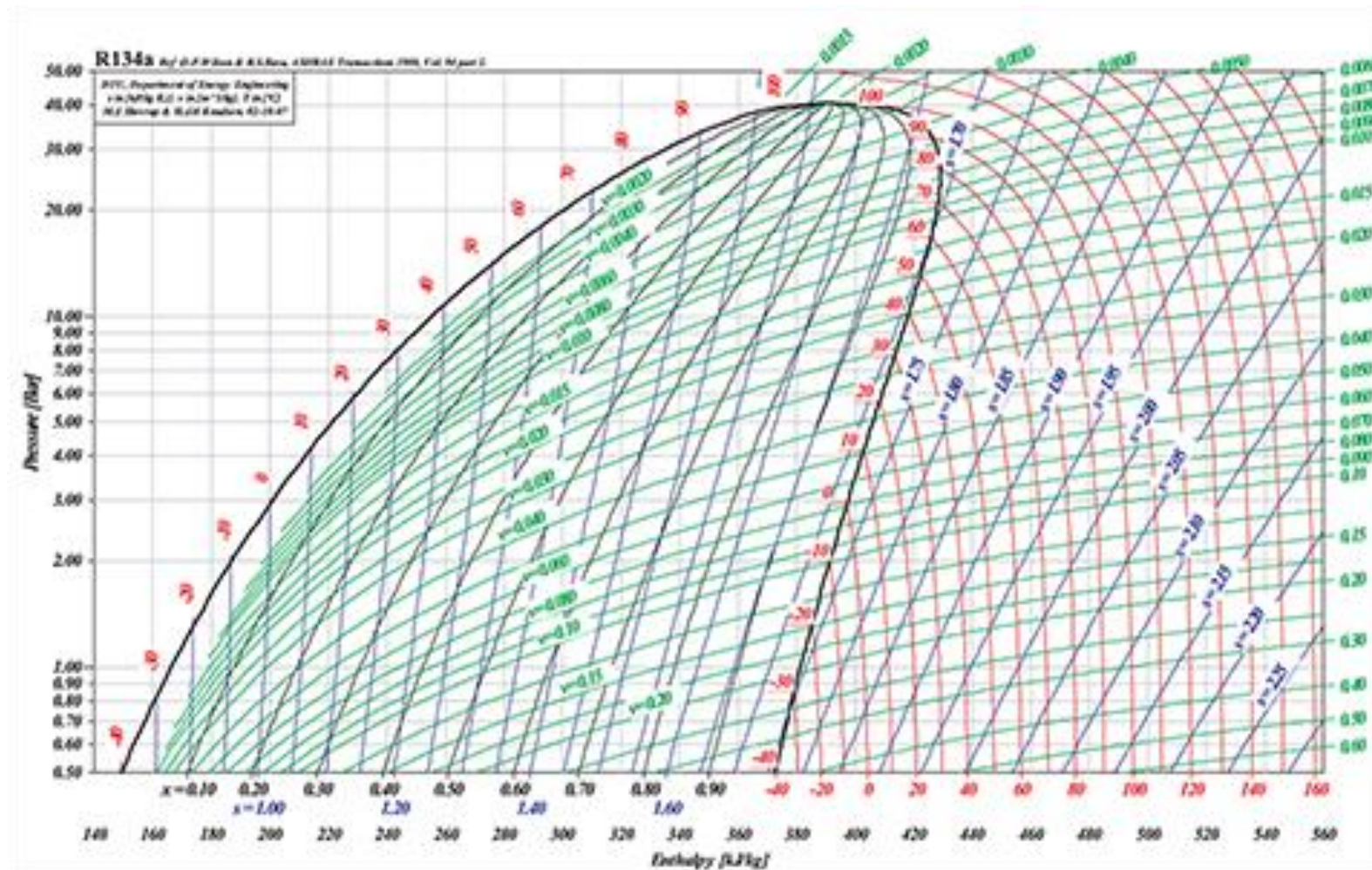


Diagram P-H Untuk Refrigeran R-134a



C. Soal Latihan/ Tugas

1. Pada grafik P-H diagram dengan refrigeran HFC-134A, carilah:
 - a. Bagian 2 fase
 - b. Titik kritis (critical point)
 - c. Gambarkan garis isothermal pada suhu 300C
 - d. Tentukan nilai entalpi jika diketahui campuran berada konstan pada 50% kualitas steam
2. Pada grafik P-H R 404a, temukan:
 - a. Titik kritis
 - b. Pada tekanan 20kpa, tentukan nilai entropinya

D. Daftar Pustaka

- J.M Smith, Henrick C Van Ness & Michael Abbott. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 6th edition. New York: McGraw-Hill publisher.
- Ahmad Abu Hamid. (2007). Modul Kalor dan Termodinamika. Fakultas Matematika dan IPA. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Ruangguru. Prinsip dan hukum termodinamika (diakses tanggal 5 Maret 2020)
Tersedia pada <https://blog.ruangguru.com/hukum-dan-prinsip-termodinamika>
- Academia. Tabel Termodinamika (diakses tanggal 5 Maret 2020) Tersedia pada https://www.academia.edu/38665807/TABEL_TERMODINAMIKA
- Wordpress. Tabel dan grafik termodinamika. (diakses tanggal 5 Maret 2020)
Tersedia pada <https://nurulimantmunib.wordpress.com/tag/termodinamika/>
- Seamolec. Termodinamika. (diakses tanggal 7 Maret 2020). Tersedia pada <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://sumb%20erbelajar.seamolec.org/Media/Dokumen/5a583883865eacc372523abb%20c0e181161c6210969033149ffce55788.pdf&ved=2ahUKEwiLmvqFy4voAhVJWX0KHWZECBM4ChAWMAJ6BAgCEAE&usg=AOvVaw0aHjEeXmTN8Yop-cf8B1GA>

PERTEMUAN 13

HUKUM II TERMODINAMIKA

A. Capaian Pembelajaran

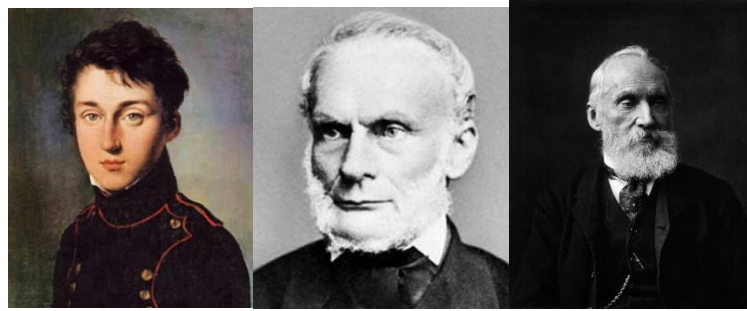
Menguasai teori aplikasi materi secara mendalam tentang definisi dan aplikasi hukum II termodinamika. Mampu mengidentifikasi aplikasi termodinamika dalam kehidupan sehari-hari maupun dalam dunia industri. Mampu memahami perbedaan proses irreversibel dan reversibel. Mampu melakukan perhitungan efisiensi dari mesin pendingin dan mesin kalor. Mampu memahami konsep siklus carnot dan penerapannya.

B. Uraian Materi

1. Definisi dan aplikasi Hukum II Termodinamika

Menurut pemahaman Anda, mengapa es mencair pada temperature ruangan? Mengapa besi berkarat saat terpapar oksigen? Mengapa beberapa hal terjadi secara spontan dan dapat kembali ke bentuk mulanya, tetapi ada juga yang tidak? Jawabannya adalah karena adanya perubahan entropi, atau dikenal dengan ΔS . Entropi adalah ukuran ketidakteraturan suatu sistem yang sangat mempengaruhi jalannya suatu proses.

Seperti yang dinyatakan oleh Nicolas Leonard Sadi Carnot bahwa total entropi dari sebuah sistem terisolasi tidak akan berkurang seiring dengan waktu. Teori entropi tersebut yang menjadi dasar Hukum II Termodinamika. Teori tersebut ditambahkan oleh Rudolf Clausius yang menyatakan bahwa kalor mengalir secara alami dari benda dengan suhu tinggi ke benda dengan suhu yang rendah. Kalor tidak akan mengalir spontan dari benda dingin ke benda panas tanpa adanya usaha.



Gambar 36. Foto Sadi Carnot, Rudolf Clausius dan William Thompson

Belajar dari beberapa teori tersebut, dapat dianalisa bahwa:

- Entropi konstan ($S_2 = S_1$) dicapai pada proses yang berlangsung reversible. Namun entropi akan bertambah ($S_2 > S_1$) jika proses berlangsung irreversible.
- Suatu mesin tidak dapat bekerja menerima kalor dari satu reservoir dan mengubah kalor seluruhnya menjadi usaha.
- Dalam suatu siklus, usaha dari luar diperlukan reservoir untuk mengalirkan kalor dari suhu rendah ke reservoir dengan suhu tinggi.

Mari kita lihat dan cari contoh penerapan hukum tersebut secara real dalam kehidupan sehari-hari. Contoh sederhananya dapat kita lihat pada gelas yang diisi air es. Ketika gelas tersebut diisi es, temperatur system turun dan suhu gelas menjadi dingin. Udara di lingkungan gelas tersebut akan turun juga suhunya. Uap airnya pun ikut mendingin dan kemudian terjadi proses pengembunan membentuk tetesan air di luar gelas.

Konsep pengembunan ini yang mendasari kerja system refrigerasi rumah tangga seperti AC, lemari es, dan heater.

2. Proses reversible, irreversible dan spontanitas reaksi

Suatu proses dikatakan irreversible jika proses dapat berlangsung spontan tanpa intervensi dari luar. Contohnya air terjun yang mengalir dari tempat tinggi ke tempat yang lebih rendah. Sedangkan proses reversibel dicirikan oleh fungsi keadaan sistem seperti tekanan, temperatur yang tidak berbeda dengan keadaan lingkungannya.

Nilai entropi dan entalpi suatu sistem sangat berpengaruh terhadap spontanitas reaksi tersebut. Proses spontan sering ditemui pada reaksi yang memiliki nilai entalpi positif ($\Delta H > 0$) walau tidak selalu demikian.

Contoh pada proses membeku dan mencairnya air (H_2O) dalam tekanan normal. Kedua proses berlangsung spontan walaupun proses mencairnya air merupakan proses eksotermik (ΔH^-) sedangkan proses membekunya air termasuk endotermik (ΔH^+).

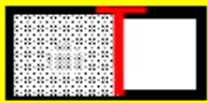
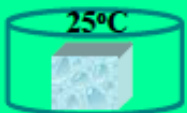
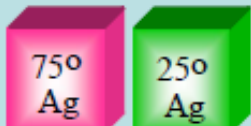
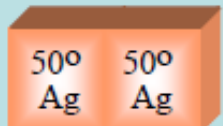


(eksotermik; spontan pada $T < 0^\circ\text{C}$)



(endotermik; spontan pada $T > 0^\circ\text{C}$)

Lalu bagaimana cara mengetahui suatu reaksi spontan atau tidak? Proses reversible atau irreversible? Jawabannya dapat dilihat dari nilai entropinya. Proses reversible ditandai dengan nilai entropi yang konstan atau tidak adanya perubahan entropi ($\Delta S=0$). Sedangkan untuk proses irreversible, perubahan entropi bernilai positif ($\Delta S > 0$).

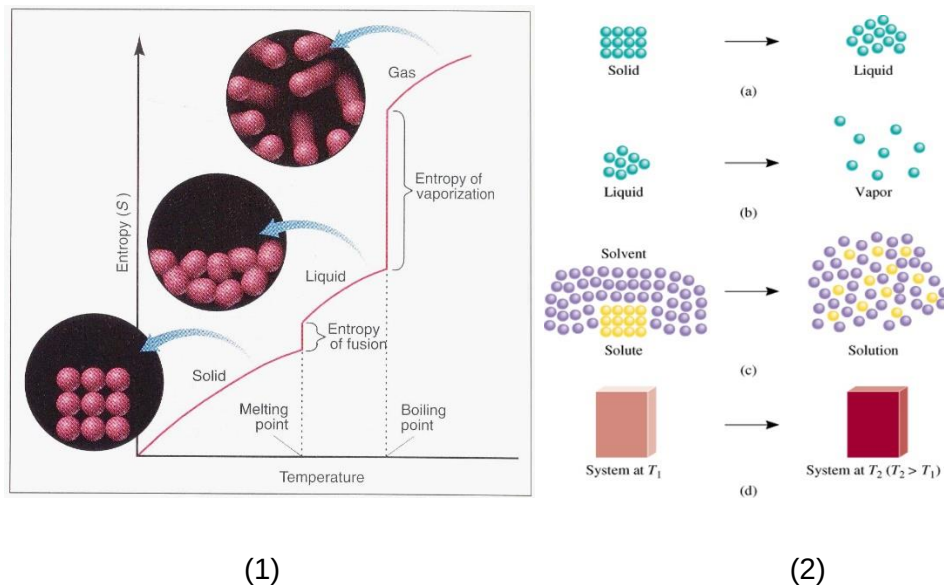
Keadaan awal	Proses	Keadaan akhir
	Parfum menyebar →	
	Es meleleh →	
	Penguapan air →	
	Kalor →	

Gambar. Contoh proses spontan

3. Entropi dan prinsip penambahan entropi

Ukuran ketidakteraturan suatu sistem dikenal dengan istilah entropi. Dalam sistem tertutup, semakin tinggi entropi berarti semakin tidak teratur sistem tersebut. Peningkatan temperatur juga menghasilkan tingkat energi atom dalam

molekul jadi bertambah. Molekul-molekul yang bebas tersebut akan berotasi dan bervibrasi ikatannya berakibat pada meningkatnya nilai entropi.



Gambar 37. (1). Entropi vs suhu (2). Proses yang menghasilkan kenaikan entropi ($\Delta S > 0$)

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa semakin tinggi suhu, semakin acak partikel dalam sistem dan berakibat nilai entropi yang semakin tinggi.

Faktor lain yang mempengaruhi nilai entropi adalah perbedaan fase dari sistem. Sistem dalam fase gas mempunyai nilai entropi tertinggi jika dibandingkan sistem dalam fase solid dan cair. Hal tersebut dikarenakan partikel dapat lebih bebas bergerak jika berada dalam fase gas, yang menimbulkan ketidakteraturan sistem sehingga nilai entropi fase gas pun menjadi lebih tinggi jika dibandingkan fase yang lain.

$$S_{\text{padat}} < S_{\text{cair}} << S_{\text{gas}}$$

Bagaimana hubungan entropi dengan proses reversibel–irreversible dan hukum II termodinamika?

Pada proses isothermal reversible ($\Delta S=0$) dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\Delta S = \Delta S_{\text{sistem}} + \Delta S_{\text{lingkungan}} = 0$$

Sedangkan jika prosesnya irreversible, perubahan entropinya adalah sebagai berikut

$$\Delta S = \Delta S_{\text{sistem}} > 0$$

Jika kedua rumus tersebut dikombinasikan, maka didapat hukum II termodinamika

$$\Delta S = \Delta S_{\text{sistem}} + \Delta S_{\text{lingkungan}} \geq 0$$

Dimana jika pada perhitungan dihasilkan $\Delta S = 0$ maka reaksi tersebut adalah reversibel. Namun kondisi sebaliknya proses irreversible terjadi jika diperoleh nilai $\Delta S > 0$. Dalam kehidupan sehari-hari, sulit untuk menemukan proses yang terjadi secara reversibel karena sebagian besar proses termodinamika yang terjadi adalah proses irreversible.

Contoh soal.

3 gram es 0°C ditempatkan dalam 5 gram air dengan suhu 10°C . Jika diketahui $C_{\text{air}} = 1 \text{ kal/g}^\circ\text{C}$ dan kalor lebur es adalah 80 kal/g . Tentukan apakah proses tersebut berlangsung secara spontan atau tidak?

$$\begin{aligned} Q & \text{ dilepaskan pada pendinginan air} = \\ & 4 \text{ g} \times 1 \text{ kal/g}^\circ\text{C} \times 10^\circ\text{C} = 40 \text{ kal} \\ \text{Jumlah es yang melebur dengan } 40 \text{ kal} & = \\ & 40 \text{ kal} \times 1 \text{ g} / 80 \text{ kal} = 0,5 \text{ g} \\ \Delta S_{\text{es}} & = 0,5 \times 80 / 273 = 0,1465 \text{ kal/K} \\ \Delta S_{\text{air}} & = \int C \, dT/T = -C \ln 283/273 = -0,1439 \text{ kal/K} \\ \Delta S_{\text{total}} & = \Delta S_{\text{es}} + \Delta S_{\text{air}} = 0,0026 \text{ kal/K} = 0,0109 \text{ J/K} \\ \Delta S_{\text{total}} & > 0 \text{ proses peleburan es spontan} \end{aligned}$$

Latihan

Tentukan manakah komponen yang memiliki entropi yang lebih tinggi

1 mol $\text{SO}_2(\text{g})$ atau 1 mol $\text{SO}_3(\text{g})$

1 mol $\text{CO}_2(\text{s})$ atau 1 mol $\text{CO}_2(\text{g})$

1 mol $\text{KBr}(\text{s})$ atau 1 mol $\text{KBr}(\text{aq})$

Tabel Entropi standar untuk beberapa jenis senyawa pada 25°C

Substance	S° (J/K.mol)	Substance	S° (J/K.mol)
C (diamond)	2.37	HBr (g)	198.59
C (graphite)	5.69	HCl (g)	186.80
CaO (s)	39.75	HF (g)	193.67
CaCO ₃ (s)	92.9	HI (g)	206.33
C ₂ H ₂ (g)	200.82	H ₂ O (l)	69.91
C ₂ H ₄ (g)	219.4	H ₂ O (g)	188.72
C ₂ H ₆ (g)	229.5	NaCl (s)	72.12
CH ₃ OH (l)	127	O ₂ (g)	205.03
CH ₃ OH (g)	238	SO ₂ (g)	248.12
CO (g)	197.91	SO ₃ (g)	256.72

4. Menghitung perubahan entropi dalam proses reversibel

a. Proses adiabatik

Pada proses adiabatik $d'Q = 0$ dan proses adiabatik reversibel $d'Q_r = 0$ maka dapat dirumuskan pada setiap proses adiabatik reversibel $dS = 0 \rightarrow$ entropi S konstan

b. Proses isothermal

Pada proses isothermal reversibel, suhu dijaga konstan sehingga menghasilkan perubahan entropi yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{d'Q_r}{T} = \frac{1}{T} \int_1^2 d'Q_r = \frac{Q_r}{T}$$

Pada proses isothermal reversible, arus panas masuk ke dalam sistem per satuan massa atau per mol sehingga perubahan entropi jenisnya menjadi

$$s_2 - s_1 = \frac{1}{T}$$

Pada beberapa proses, terjadi perubahan suhu yang mengikuti arus panas ketika masuk ke dalam sistem. Hal tersebut berakibat pada perhitungan perubahan entropi menjadi

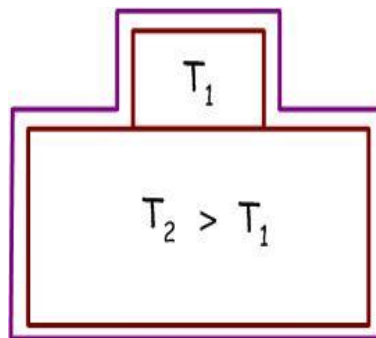
$$(s_2 - s_1)_v = \int_{T_1}^{T_2} c_v \frac{dT}{T}$$

Nilai C_v dan C_p dari system sebagai fungsi suhu harus diketahui untuk mengaplikasikan rumus tersebut. Jika diasumsikan nilai C_v dan C_p adalah konstan maka dapat dirumuskan sebagai berikut

$$(s_2 - s_1)_v = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} \quad \text{DAN} \quad (s_2 - s_1)_p = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$$

5. Menghitung perubahan entropi dalam proses irreversibel

Seperti yang diketahui dari penjelasan diatas, bahwa nilai entropi (S) merupakan variable dari suatu keadaan yang ditentukan pada kondisi awal proses dan akhir proses. Sehingga untuk perhitungan proses irreversible, dapat mengacu pada rumus proses reversibel dengan syarat keadaan awal (S_0) dan akhir (S_1) adalah sama.



Dapat dilihat dari bagan di samping bahwa T_1 berubah menjadi T_2 , meski proses ireversibel, asalkan keadaan awal = keadaan akhir, dapat digunakan rumus proses reversible.

$T_2 > T_1$ menandakan arus panas masuk ke dalam benda dan jika dihitung $\ln T_2/T_1$ nilainya (+) sehingga mengakibatkan entropi benda naik.

Jika proses pada tekanan tetap dan C_p juga tetap dapat dirumuskan sebagai

$$(s_2 - s_1)_P = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Jika suhu reservoir tetap T_2 , karena itu perubahan entropinya = perubahan entropi pada proses isothermal reversibel →

$$\Delta S_{\text{res}} = \int_1^2 \frac{d'Q}{T} = \frac{1}{T} C_p \int_{T_1}^{T_2} dT = C_p \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Karena arus panas keluar dari reservoir, sesuai perjanjian tanda, harus diberi tanda (-), jadi

$$\Delta S_{\text{res}} = -C_p \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Karena $T_2 > T_1$, maka $(T_2 - T_1)/T_2 \rightarrow (+)$, ruas kanan menjadi (-), perubahan entropi total

$$\Delta S = \Delta S_{\text{benda}} + \Delta S_{\text{res}} = C_p \left(\ln \frac{T_2}{T_1} - \frac{T_2 - T_1}{T_2} \right)$$

Sesuai hukum kedua termodinamika, pada proses ireversibel, entropi total (entropi dunia) selalu bertambah. Untuk membuktikannya dibuat grafik $\ln T_2/T_1$ dan $(T_2 - T_1)/T_2$ sebagai fungsi T_2/T_1 seperti pada gambar berikut.

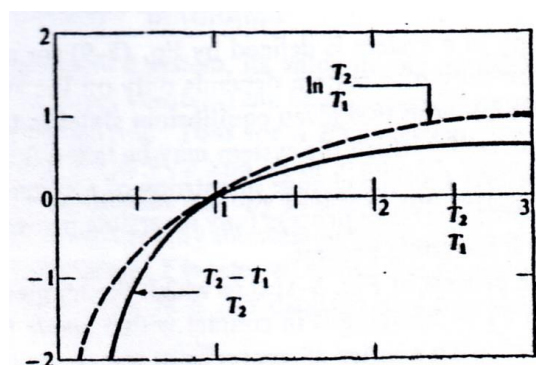


Fig. 5-5 A graph of $\ln (T_2/T_1)$ and $(T_2 - T_1)/T_2$ as a function of T_2/T_1 .

Gambar 38. Grafik $\ln T_2/T_1$

Penjelasan grafik:

Suatu benda bersuhu T_1 masuk ke suatu sistem pada T_2 (dengan asumsi benda tersebut bersuhu lebih tinggi dari sistem). Hal tersebut mengakibatkan arus panas dapat mengalir dari benda ke reservoir.

Perubahan entropi benda $\rightarrow$ negatif

Perubahan entropi reservoir $\rightarrow$ positif

Perubahan entropi dunia $\rightarrow$ positif (selalu jika proses ireversibel)

Pada titik $T_2/T_1 = 1 \rightarrow T_2 = T_1$,

Dapat dilihat di sisi kanannya $\rightarrow T_2 > T_1$

Sedangkan di sisi kirinya tertera $\rightarrow T_2 < T_1$, sehingga selisih kedua grafik tsb (+).
Kecuali pada daerah $T_2 = T_1$ nilainya = 0

Jika $T_2 = T_1 \rightarrow$ prosesnya reversibel

Jadi utk proses ireversibel $\rightarrow \Delta S$ selalu positif

6. Energi Gibbs

Proses spontan didasarkan atas 2 faktor yaitu:

- Nilai entalpi (H) yang menurun
- ΔS yang meningkat

Kedua faktor tersebut jika dikombinasikan dapat dihitung dengan rumusan yang disebut Energi Gibbs (G).

Rumus energi Gibbs adalah

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

Keterangan:

ΔG : perubahan energi bebas (energi Gibbs)

ΔH : perubahan entalpi

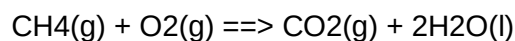
T : temperatur

ΔS : perubahan entropi

$\Delta G < 0$ maka ΔS meningkat, terjadi proses spontan

$\Delta G = 0$ maka terjadi proses setimbang

Contoh soal



Jika diketahui harga perubahan entropinya adalah $-242,2 \text{ J/K mol}$ dan perubahan entalpinya $-890,4 \text{ kJ/mol}$, hitunglah harga perubahan energi bebas gibbs standar pada suhu 25 degC ?

Pembahasan :

Langkah pertama yang akan kita lakukan adalah mengubah satuan perubahan entropi dari J ke kJ.

$$1 \text{ kJ} = 1000 \text{ j}$$

$$\Delta S^\circ = -242,2 \text{ J/K mol} = -242,2/1000 \text{ kJ/ K mol} = -0,2422 \text{ kJ/mol K}$$

Kemudian suhu juga harus kita ubah menjadi satuan Kelvin.

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

Perubahan energi bebas Gibbs standar :

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$$

$$= -890,4 \text{ kJ/mol} - 298 \text{ K} \times -0,2422 \text{ kJ/mol K}$$

$$= (-890,4 + 72,1756) \text{ kJ/mol}$$

$$= -818,2244 \text{ kJ/mol}$$

$\Delta G < 0$ maka ΔS meningkat, terjadi proses spontan

7. Hubungan antara besaran termodinamik dan suhu dalam kespontanan

Dapat dilihat dari tabel berikut bahwa suhu sangat berpengaruh terhadap nilai ΔS , ΔH dan ΔG . Pada kasus dimana ΔS dan ΔH bernilai positif menghasilkan reaksi yang konstan pada suhu tinggi. Sedangkan apabila ΔS dan ΔH keduanya bernilai negatif akan menghasilkan reaksi yang spontan pada suhu rendah.

Tabel 8. Hubungan ΔS , ΔH dan suhu dalam kespontanan reaksi

No	ΔH	ΔS	ΔG	Hasil	Contoh
1	-	+	-	Spontan semua T	$2\text{H}_2\text{O}_{(g)} \rightarrow 2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)}$
2	-	-	-	Spontan $T \downarrow$ $\neq$ spontan $T \uparrow$	$\text{H}_2\text{O}_{(c)} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}_{(p)}$
3	+	+	+	$\neq$ Spontan $T \downarrow$ Spontan $T \uparrow$	$2\text{NH}_{3(g)} \rightarrow \text{N}_{2(g)} + 3\text{H}_{2(g)}$
4	+	-	+	$\neq$ Spontan semua T	$3\text{O}_{2(g)} \rightarrow 2\text{O}_{3(g)}$

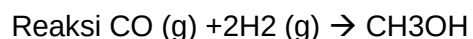
8. Perubahan Energi Bebas Gibbs standar

Perubahan energi bebas gibbs untuk setiap reaksi dapat dihitung dari ΔG_f° pereaksi dan ΔG_f° hasil reaksi. Perubahan energi bebas pembentukan standar untuk setiap zat diukur pada tekanan 1 atm dan suhu 298K.

$$\Delta G = \sum \Delta G_f^\circ (\text{produk}) - \sum \Delta G_f^\circ (\text{pereaksi})$$

Contoh soal.

Hitung ΔG_f° untuk reaksi antar CO dan H₂ yang menghasilkan CH₃OH (metanol).
Diketahui $\Delta G_f^\circ \text{ CO} = -137.3 \text{ kJ/mol}$, $\Delta G_f^\circ \text{ H}_2 = 0$, $\Delta G_f^\circ \text{ CH}_3\text{OH} = -166.8 \text{ kJ/mol}$



$$\Delta G_f^\circ = -166.8 - (-137.3 + 2 \times 0) = -29.5 \text{ kJ}$$

$$T \cdot \Delta S_f^\circ = 298 (\sum S_f^\circ \text{ produk} - \sum S_f^\circ \text{ reaksi})$$

$$= 298 (2 \times 0.1923) - (0.1915 + 3(0.1306))$$

$$= -59.2 \text{ kJ}$$

Jadi ΔG $= \Delta H - T \cdot \Delta S$

$$= -92.22 - (-59.2) = -33 \text{ kJ}$$

Appendix B

Standard Thermodynamic Values for Selected Substances at 298 K

(NOTE: See the rear endpaper for a list of other important data tables.)

Substance or ion	ΔH_f° (kJ/mol)	ΔG_f° (kJ/mol)	S° (J/mol · K)	Substance or ion	ΔH_f° (kJ/mol)	ΔG_f° (kJ/mol)	S° (J/mol · K)
$e^-(g)$	0	0	20.87	$Ca^{2+}(aq)$	-542.96	-553.04	-55.2
Aluminum				$CaF_2(s)$	-1215	-1162	68.87
$Al(s)$	0	0	28.3	$CaCl_2(s)$	-795.0	-750.2	114
$Al^{3+}(aq)$	-524.7	-481.2	-313	$CaCO_3(s)$	-1206.9	-1128.8	92.9
$AlCl_3(s)$	-704.2	-628.9	110.7	$CaO(s)$	-635.1	-603.5	38.2
$Al_2O_3(s)$	-1676	-1582	50.94	$Ca(OH)_2(s)$	-986.09	-898.56	83.39
Barium				$Ca_3(PO_4)_2(s)$	-4138	-3899	263
$Ba(s)$	0	0	62.5	$CaSO_4(s)$	-1432.7	-1320.3	107
$Ba(g)$	175.6	144.8	170.28	Carbon			
$Ba^{2+}(g)$	1649.9	—	—	C(graphite)	0	0	5.686
$Ba^{2+}(aq)$	-538.36	-560.7	13	C(diamond)	1.896	2.866	2.439
$BaCl_2(s)$	-806.06	-810.9	126	$C(g)$	715.0	669.6	158.0
$BaCO_3(s)$	-1219	-1139	112	$CO(g)$	-110.5	-137.2	197.5
$BaO(s)$	-548.1	-520.4	72.07	$CO_2(g)$	-393.5	-394.4	213.7
$BaSO_4(s)$	-1465	-1353	132	$CO_2(aq)$	-412.9	-386.2	121
Boron				$CO_3^{2-}(aq)$	-676.26	-528.10	-53.1
B(β -rhombohedral)	0	0	5.87	$HCO_3^-(aq)$	-691.11	587.06	95.0
$BF_3(g)$	-1137.0	-1120.3	254.0	$H_2CO_3(aq)$	-698.7	-623.42	191
$BCl_3(g)$	-403.8	-388.7	290.0	$CH_4(g)$	-74.87	-50.81	186.1
$B_2H_6(g)$	35	86.6	232.0	$C_2H_2(g)$	227	209	200.85
$B_2O_3(s)$	-1272	-1193	53.8	$C_2H_4(g)$	52.47	68.36	219.22
$H_3BO_3(s)$	-1094.3	-969.01	88.83	$C_2H_6(g)$	-84.667	-32.89	229.5
Bromine				$C_3H_8(g)$	-105	-24.5	269.9
$Br_2(l)$	0	0	152.23	$C_4H_{10}(g)$	-126	-16.7	310
$Br_2(g)$	30.91	3.13	245.38	$C_6H_6(l)$	49.0	124.5	172.8
$Br(g)$	111.9	82.40	174.90	$CH_3OH(g)$	-201.2	-161.9	238
$Br^-(g)$	-218.9	—	—	$CH_3OH(l)$	-238.6	-166.2	127
$Br^-(aq)$	-120.9	-102.82	80.71	$HCHO(g)$	-116	-110	219
$HBr(g)$	-36	-53.5	198.59	$HCOO^-(aq)$	-410	-335	91.6
Cadmium				$HCOOH(l)$	-409	-346	129.0
$Cd(s)$	0	0	51.5	$HCOOH(aq)$	-410	-356	164
$Cd(g)$	112.8	78.20	167.64	$C_2H_5OH(l)$	-277.63	-174.8	161
$Cd^{2+}(aq)$	-72.38	-77.74	-61.1	$C_3H_5OH(g)$	-235.1	-168.6	282.6
$CdS(s)$	-144	-141	71	$CH_3CHO(g)$	-166	-133.7	266
Calcium				$CH_3COOH(l)$	-487.0	-392	160
$Ca(s)$	0	0	41.6	$C_6H_{12}O_6(s)$	-1274.5	-910.56	212.1
$Ca(g)$	192.6	158.9	154.78	$CN^-(aq)$	151	166	118
$Ca^{2+}(g)$	1934.1	—	—	$HCN(g)$	135	125	201.7
				$HCN(l)$	105	121	112.8

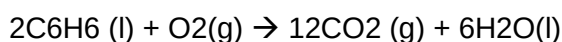
C. Latihan Soal

1. Pada suatu system memiliki nilai $\Delta S = + 200,4 \text{ J/mol K}$ dan $\Delta H = + 258 \text{ kJ/mol}$. Hitung suhu dimana reaksi tersebut berjalan spontan.
2. Jika diketahui dari data berikut nilai untuk penguraian batu kapur menjadi kapur tohor. Berapa energi bebas standar ΔG , ΔH dan ΔS untuk proses penguraian tersebut.



Zat	$\Delta H_f^\circ / (\text{kJ/mol})$	$S^\circ / (\text{J/Kmol})$
$\text{CaCO}_3 (\text{g})$	-1207	93
$\text{CaO} (\text{s})$	-635	40
$\text{CO}_2 (\text{g})$	-393,5	214

3. Hitunglah nilai perubahan entropi (ΔS) untuk reaksi
 $4\text{CO}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 8\text{CO}_2(\text{g})$ pada 25C
4. Dalam suhu 298K terjadi proses pembentukan amonia dengan reaksi sebagai berikut $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$
 Proses tersebut memiliki nilai perubahan entropi sebesar -197 J/Kmol . Hitunglah ΔS_{univ} dan tentukanlah apakah reaksi tersebut berjalan spontan atau tidak? (jika $\Delta H_{\text{NH}_3} = -46.3 \text{ kJ/mol}$)
5. Apakah perubahan entropinya positif atau negatif untuk:
 - a. Pembekuan etanol
 - b. Penguapan bromin
 - c. Pelarutan urea dalam air
 - d. Penguraian H_2O
6. Hitung nilai perubahan energi bebas standar pada reaksi berikut jika reaksi berlangsung pada suhu ruangan. Apakah reaksi tersebut berjalan secara spontan?



7. Hitung energi bebas pembentukan amoniak dimana diketahui ΔH_{NH_3} adalah -46.11 dengan $\Delta S_{NH_3} = 0.1923 \text{ kJ/mol}$, $\Delta S_{N_2} = 0.1915 \text{ kJ/mol}$, $\Delta S_{H_2} = 0.1306 \text{ kJ/mol}$

D. Daftar Pustaka

- J.M Smith, Henrick C Van Ness & Michael Abbott. Introduction To Chemical Engineering Thermodynamics. 6th Edition. New York: Mcgraw-Hill Publisher.
- Paul Suparno. (2018). Pendalaman Materi Fisika: Teori Kinetik Gas Dan Termodinamika. Kemenristekdikti.
- I Gusti Agung Putra Adnyana. (2014). Termodinamika. Fakultas Mipa. Universitas Udayana.
- Rizki Pebriani. (2017). Termodinamika. Fakultas Teknik. Politeknik Negeri Sriwijaya
- Suprpto Brotosiswojo. (2007). Pengantar Fisika Statistik. Universitas Terbuka.
- Paulus Cahyono Tjiang. (2006) Efisiensi Siklus Carnot Untuk Persamaan Gas. LPPM.Universitas Katolik Parahyangan.
- Academia. Tabel Termodinamika (Diakses Tanggal 5 Maret 2020) Tersedia Pada https://www.academia.edu/38665807/TABEL_TERMODINAMIKA
- Wordpress. Tabel Dan Grafik Termodinamika. (Diakses Tanggal 5 Maret 2020. Tersedia Pada <https://nurulimantmunib.wordpress.com/tag/thermodinamika/>
- Seamolec. Termodinamika. (Diakses Tanggal 7 Maret 2020). Tersedia Pada <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://sumb.erbelaajar.seamolec.org/Media/Dokumen/5a583883865eacc372523abb/c0e181161c6210969033149ffce55788.pdf&ved=2ahUKEwiLmvgFy4voAhVJWX0KHWZECBM4ChAWMAJ6BAgCEAE&usq=AOvVaw0aHjEeXmTN8Yop-cf8B1GA>

PERTEMUAN 14

SISTEM REFRIGERASI

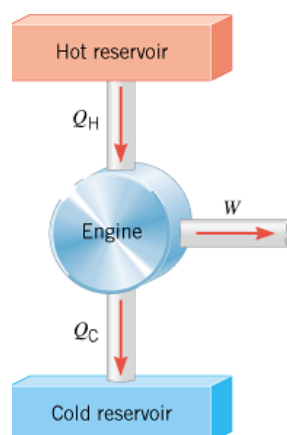
A. Capaian Pembelajaran

Menguasai teori aplikasi materi secara mendalam tentang definisi dan aplikasi hukum II termodinamika. Mampu mengidentifikasi aplikasi termodinamika dalam kehidupan sehari-hari maupun dalam dunia industri. Mampu memahami perbedaan proses irreversibel dan reversibel. Mampu melakukan perhitungan efisiensi dari mesin pendingin dan mesin kalor. Mampu memahami konsep siklus carnot dan penerapannya.

B. Uraian Materi

Sebuah alat yang melakukan usaha dengan mengkonversi kalor yang diperolehnya disebut dengan mesin kalor. Terdapat 3 ciri dari mesin kalor:

1. Kalor dari sebuah reservoir panas diinput ke dalam mesin pada temperatur yang sangat tinggi
2. Sebagian dari kalor input digunakan untuk melakukan kerja oleh mesin
3. Sisa dari kalor tersebut dilanjutkan ke reservoir dingin pada temperatur yang lebih rendah



Gambar 39. Skema mesin kalor

Dapat dilihat dari gambar bahwa Q_H (kalor input) digunakan sistem untuk melakukan kerja (W) dan sisa kalor tersebut (Q_C) dilanjutkan ke reservori dingin untuk

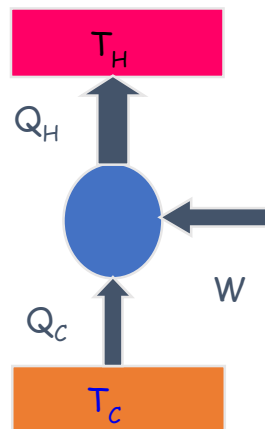
diproses kembali. Jika diasumsikan bahwa tidak terdapat kehilangan energi dalam mesin, maka dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$W = Q_H - Q_C$$

$$e = \frac{W}{Q_H} \quad e = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}$$

1. Mesin Pendingin

Mesin pendingin beroperasi kebalikan dari mesin kalor. Mesin pendingin memiliki proses kerja yang sama dengan mesin kalor namun beroperasi secara terbalik. Mesin pendingin mengambil kalor dari reservoir dingin dengan suhu yang rendah dan membuang kalor ke daerah yang lebih panas.



Gambar 40. Skema mesin pendingin

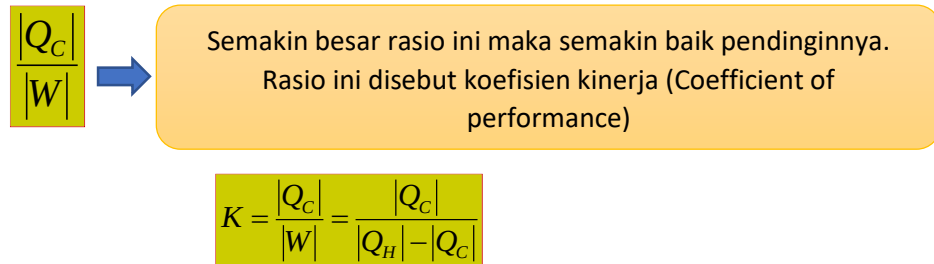
Dapat dilihat dari gambar diatas bahwa sebagian dari kalor input Q_C diubah menjadi kerja W dan sisanya Q_H dibuang ke reservoir panas. Sehingga diperoleh rumus

$$Q_H + Q_C - W = 0$$

$$-Q_H = Q_C - W \quad |Q_H| = Q_C + |W|$$

$$|Q_H| > Q_C$$

Yang diinginkan dari sebuah siklus pendingin adalah sistem yang bisa mengkonversi banyak kalor Q_c dengan menggunakan sedikit kerja W .



Keterangan:

K = Koefisien daya guna

Q_c = kalor yang diserap pada suhu reservoir rendah (J)

Q_h = kalor yang diberikan pada suhu reservoir tinggi (J)

W = usaha yang diperlukan (J)

T_1 = suhu reservoir tinggi

T_2 = suhu reservoir rendah

Contoh soal:

Air cooler dalam ruangan memiliki daya 300 watt. Pada suhu dalam ruangan -4°C dan suhu luar 23°C Hitung panas yang diserap mesin tersebut selama 15 menit

Diketahui:

$$P = 300 \text{ watt}$$

$$T_1 = 23^\circ\text{C} = 296 \text{ K}$$

$$T_2 = -4^\circ\text{C} = 280 \text{ K}$$

Ditanya:

Berapakah nilai Q_2 ?

Jawab:

$$K_p = \frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

$$Q_2 = \frac{W \cdot T_2}{T_1 - T_2}$$

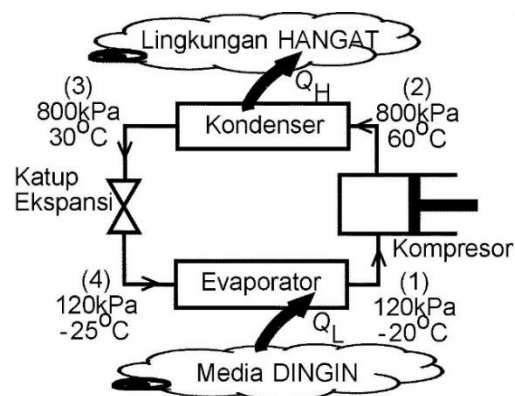
$$Q_2 = (300 \times 280) / (300 - 280) = 4400 \text{ J/detik}$$

Dalam waktu 15 menit = 800 detik maka

$$Q_2 = 4400 \times 800 = 4.5 \times 10^8 \text{ Joule}$$

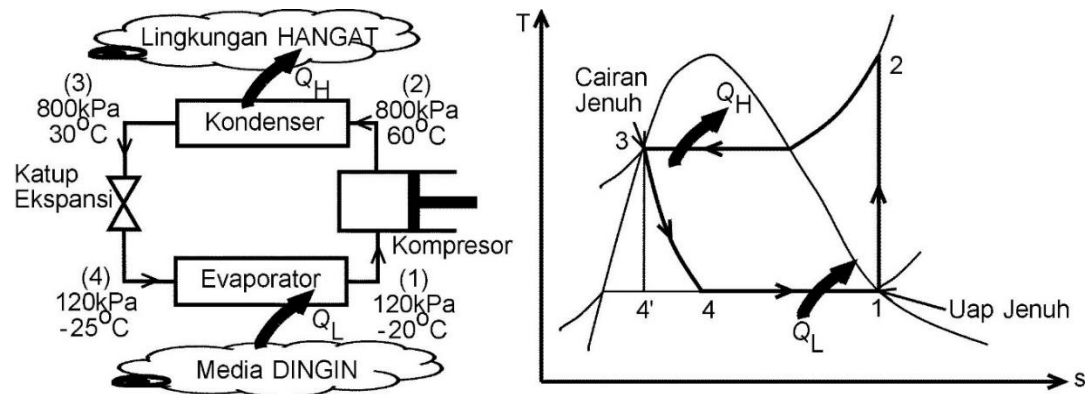
2. Siklus Refrigerasi Kompresi Uap Ideal

Gambar di bagian kiri adalah ilustrasi dari siklus refrigerasi kompresi uap ideal. Pada siklus tersebut, refrigeran yang berada dalam fase saturated dimasukan ke dalam kompresor untuk menghasilkan superheated vapor. Refrigeran tersebut kemudian menuju ke kondensor dimana akan terjadi proses kondensasi dengan membuang kalor ke lingkungan. Proses tersebut bertujuan untuk mengubah fase superheated vapor menjadi saturated liquid. Setelah dari kondensor, refrigeran masuk ke dalam katup ekspansi dimana akan dilakukan proses throttling untuk menurunkan tekanan liquid sehingga berubah menjadi campuran jenuh. Pada proses terakhir, refrigeran masuk ke dalam evaporator untuk proses evaporasi dengan menyerap kalor dari lingkungan bersiap untuk melakukan proses kompresi berikutnya.



Siklus refrigerasi kompresi uap ideal dapat digambarkan dalam diagram T - s seperti gambar di atas-kanan. Proses-proses yang terjadi adalah,

- 1-2 : Kompresi isentropis dalam kompresor
- 2-3 : Pembuangan kalor secara isobaris dalam kondenser
- 3-4 : *Throttling* dalam katup ekspansi atau tabung kapiler
- 4-1 : Penyerapan kalor secara isobaris dalam evaporator



Persamaan energi untuk komponen-komponen refrigerator bisa dituliskan sebagai berikut:

$$q - w = h_e - h_i$$

dimana diasumsikan perubahan energi kinetik dan potensial bisa diabaikan.

Dari notasi-notasi pada gambar di atas maka COPs dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\text{COP}_R = \frac{q_L}{w_{\text{net,in}}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

$$\text{COP}_{HP} = \frac{q_H}{w_{\text{net,in}}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

$$\text{di mana } h_1 = h_g @ p_1 \text{ dan } h_3 = h_f @ p_3$$

Contoh Soal

Dalam sebuah refrigerator aktual, R-12 masuk ke kompresor sebagai uap panas lanjut pada 0,14MPa, 20°C, laju massa 0,05kg/s, dan keluar pada 0,8MPa, 50°C. Refrigeran didinginkan dalam kondenser sampai 26°C, 0,72MPa dan di-throttling sampai 0,15MPa. Dengan mengabaikan rugi kalor dan rugi tekanan dalam pipa-pipa sambungan tentukan

- laju kalor dari media yang didinginkan dan kerja kompresor,
- efisiensi adiabatik kompresor,
- COP

Jawab

Dari Tabel refrigeran

a. Kondisi 1 (uap panas lanjut) :

$$\left. \begin{array}{l} p_1 = 0,14 \text{ MPa} \\ T_1 = -20^\circ\text{C} \end{array} \right\} \rightarrow h_1 = 179,01 \text{ kJ/kg}$$

b. Kondisi 2 (uap panas lanjut)

$$\left. \begin{array}{l} p_2 = 0,8 \text{ MPa} \\ T_2 = 50^\circ\text{C} \end{array} \right\} \rightarrow h_2 = 213,45 \text{ kJ/kg}$$

c. Kondisi 3 (cairan terkompresi)

$$\left. \begin{array}{l} p_3 = 0,72 \text{ MPa} \\ T_3 = 26^\circ\text{C} \end{array} \right\} \rightarrow h_3 = h_f @ 26^\circ\text{C} = 60,68 \text{ kJ/kg}$$

d. Kondisi 4 (campuran jenuh)

$$h_4 = h_3 = 60,58 \text{ kJ/kg}$$

e. Laju kalor yang diserap dari media yang didinginkan:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_L &= \dot{m}(h_1 - h_4) \\ &= 0,05 \times (179,01 - 60,68) = 5,92 \text{ kW} \end{aligned}$$

Kerja kompresor

$$\begin{aligned} \dot{W}_{in} &= \dot{m}(h_2 - h_1) \\ &= 0,05 \times (213,45 - 179,01) = 1,72 \text{ kW} \end{aligned}$$

f. Efisiensi adiabatik

$$\eta_C = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

dimana

$$\left. \begin{array}{l} p_{2s} = 0,8 \text{ MPa} \\ s_{2s} = s_1 = 0,7147 \text{ kJ/(kg.K)} \end{array} \right\} \rightarrow h_{2s} = 210,08 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_C = \frac{210,08 - 179,01}{213,45 - 179,01} = 90,2\%$$

g. Coefficient of Performance

$$\text{COP}_R = \frac{q_L}{w_{\text{net,in}}} = \frac{5,82}{1,72} = 3,44$$

Tabel 9. Properti refrigerant 134a

TABLE A-11

Saturated refrigerant-134a—Temperature table

Temp., T °C	Sat. press., P_{sat} kPa	Specific volume, m^3/kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
-40	51.25	0.0007054	0.36081	-0.036	207.40	207.37	0.000	225.86	225.86	0.00000	0.96866	0.96866
-38	56.86	0.0007083	0.32732	2.475	206.04	208.51	2.515	224.61	227.12	0.01072	0.95511	0.96584
-36	62.95	0.0007112	0.29751	4.992	204.67	209.66	5.037	223.35	228.39	0.02138	0.94176	0.96315
-34	69.56	0.0007142	0.27090	7.517	203.29	210.81	7.566	222.09	229.65	0.03199	0.92859	0.96058
-32	76.71	0.0007172	0.24711	10.05	201.91	211.96	10.10	220.81	230.91	0.04253	0.91560	0.95813
-30	84.43	0.0007203	0.22580	12.59	200.52	213.11	12.65	219.52	232.17	0.05301	0.90278	0.95579
-28	92.76	0.0007234	0.20666	15.13	199.12	214.25	15.20	218.22	233.43	0.06344	0.89012	0.95356
-26	101.73	0.0007265	0.18946	17.69	197.72	215.40	17.76	216.92	234.68	0.07382	0.87762	0.95144
-24	111.37	0.0007297	0.17395	20.25	196.30	216.55	20.33	215.59	235.92	0.08414	0.86527	0.94941
-22	121.72	0.0007329	0.15995	22.82	194.88	217.70	22.91	214.26	237.17	0.09441	0.85307	0.94748
-20	132.82	0.0007362	0.14729	25.39	193.45	218.84	25.49	212.91	238.41	0.10463	0.84101	0.94564
-18	144.69	0.0007396	0.13583	27.98	192.01	219.98	28.09	211.55	239.64	0.11481	0.82908	0.94389
-16	157.38	0.0007430	0.12542	30.57	190.56	221.13	30.69	210.18	240.87	0.12493	0.81729	0.94222
-14	170.93	0.0007464	0.11597	33.17	189.09	222.27	33.30	208.79	242.09	0.13501	0.80561	0.94063
-12	185.37	0.0007499	0.10736	35.78	187.62	223.40	35.92	207.38	243.30	0.14504	0.79406	0.93911
-10	200.74	0.0007535	0.099516	38.40	186.14	224.54	38.55	205.96	244.51	0.15504	0.78263	0.93766
-8	217.08	0.0007571	0.092352	41.03	184.64	225.67	41.19	204.52	245.72	0.16498	0.77130	0.93629
-6	234.44	0.0007608	0.085802	43.66	183.13	226.80	43.84	203.07	246.91	0.17489	0.76008	0.93497
-4	252.85	0.0007646	0.079804	46.31	181.61	227.92	46.50	201.60	248.10	0.18476	0.74896	0.93372
-2	272.36	0.0007684	0.074304	48.96	180.08	229.04	49.17	200.11	249.28	0.19459	0.73794	0.93253
0	293.01	0.0007723	0.069255	51.63	178.53	230.16	51.86	198.60	250.45	0.20439	0.72701	0.93139
2	314.84	0.0007763	0.064612	54.30	176.97	231.27	54.55	197.07	251.61	0.21415	0.71616	0.93031
4	337.90	0.0007804	0.060338	56.99	175.39	232.38	57.25	195.51	252.77	0.22387	0.70540	0.92927
6	362.23	0.0007845	0.056398	59.68	173.80	233.48	59.97	193.94	253.91	0.23356	0.69471	0.92828
8	387.88	0.0007887	0.052762	62.39	172.19	234.58	62.69	192.35	255.04	0.24323	0.68410	0.92733
10	414.89	0.0007930	0.049403	65.10	170.56	235.67	65.43	190.73	256.16	0.25286	0.67356	0.92641
12	443.31	0.0007975	0.046295	67.83	168.92	236.75	68.18	189.09	257.27	0.26246	0.66308	0.92554
14	473.19	0.0008020	0.043417	70.57	167.26	237.83	70.95	187.42	258.37	0.27204	0.65266	0.92470
16	504.58	0.0008066	0.040748	73.32	165.58	238.90	73.73	185.73	259.46	0.28159	0.64230	0.92389
18	537.52	0.0008113	0.038271	76.08	163.88	239.96	76.52	184.01	260.53	0.29112	0.63198	0.92310

Tabel 10. Properti refrigerant R22

Temp. °C	Pressure kPa	spec. Density kg/m ³		spec. Volume m ³ /kg		spec. Enthalpy kJ/kg			spec. Entropy kJ/kg K	
		liquid	gas	liquid	gas	liquid	latent	gas	liquid	gas
-150	0,0019338	1701,8	0,0001633	0,0005876	6123,7	37,558	298,342	335,9	0,14276	2,5653
-149	0,0023683	1699,2	0,0001983	0,0005885	5040,7	38,628	297,702	336,33	0,15141	2,5493
-148	0,0028899	1696,6	0,0002401	0,00058941	4164,1	39,696	297,074	336,77	0,15998	2,5337
-147	0,0035138	1694,0	0,0002896	0,00059031	3452,1	40,764	296,436	337,2	0,16848	2,5184
-146	0,0042576	1691,4	0,0003482	0,00059122	2871,6	41,831	295,809	337,64	0,17691	2,5034
-145	0,0051413	1688,8	0,0004172	0,00059213	2396,8	42,898	295,182	338,08	0,18526	2,4887
-144	0,0061879	1686,2	0,0004982	0,00059305	2006,9	43,964	294,556	338,52	0,19355	2,4743
-143	0,0074233	1683,6	0,0005931	0,00059396	1685,8	45,029	293,931	338,96	0,20177	2,4602
-142	0,0088776	1681,0	0,0007039	0,00059488	1420,5	46,095	293,305	339,4	0,20992	2,4463
-141	0,010584	1678,4	0,0008329	0,00059581	1200,6	47,159	292,681	339,84	0,21801	2,4328
-140	0,012581	1675,8	0,0009826	0,00059673	1017,7	48,223	292,067	340,29	0,22603	2,4195
-139	0,01491	1673,2	0,0011559	0,00059766	865,13	49,287	291,443	340,73	0,23399	2,4065
-138	0,01762	1670,6	0,0013559	0,00059859	737,52	50,351	290,829	341,18	0,24189	2,3938
-137	0,020764	1668,0	0,0015861	0,00059952	630,46	51,414	290,216	341,63	0,24973	2,3813
-136	0,024403	1665,4	0,0018505	0,00060046	540,39	52,477	289,603	342,08	0,25751	2,3691
-135	0,028603	1662,8	0,0021533	0,0006014	464,4	53,54	288,99	342,53	0,26523	2,3571
-134	0,033438	1660,2	0,0024992	0,00060234	400,12	54,603	288,377	342,98	0,2729	2,3453
-133	0,038991	1657,6	0,0028935	0,00060328	345,6	55,666	287,764	343,43	0,28051	2,3338
-132	0,045352	1655,0	0,0033418	0,00060423	299,24	56,728	287,162	343,89	0,28806	2,3225
-131	0,052623	1652,4	0,0038503	0,00060519	259,72	57,79	286,55	344,34	0,29556	2,3114
-130	0,060914	1649,8	0,0044259	0,00060614	225,94	58,853	285,947	344,8	0,30301	2,3005
-129	0,070347	1647,2	0,0050759	0,0006071	197,01	59,915	285,345	345,26	0,3104	2,2899
-128	0,081056	1644,6	0,0058084	0,00060806	172,17	60,977	284,733	345,71	0,31774	2,2794
-127	0,093187	1642,0	0,0066321	0,00060902	150,78	62,039	284,131	346,17	0,32503	2,2692
-126	0,1069	1639,4	0,0075564	0,00060999	132,34	63,101	283,529	346,63	0,33228	2,2591
-125	0,12237	1636,8	0,0085917	0,00061096	116,39	64,163	282,937	347,1	0,33947	2,2492
-124	0,13978	1634,2	0,0097488	0,00061194	102,58	65,225	282,335	347,56	0,34661	2,2396
-123	0,15935	1631,5	0,01104	0,00061292	90,583	66,287	281,733	348,02	0,35371	2,2301
-122	0,18129	1628,9	0,012477	0,0006139	80,148	67,349	281,141	348,49	0,36076	2,2208
-121	0,20585	1626,3	0,014074	0,00061488	71,051	68,411	280,539	348,95	0,36776	2,2116
-120	0,23328	1623,7	0,015847	0,00061587	63,104	69,473	279,947	349,42	0,37472	2,2027
-119	0,26388	1621,1	0,01781	0,00061686	56,15	70,535	279,355	349,89	0,38163	2,1939
-118	0,29794	1618,5	0,01998	0,00061786	50,051	71,597	278,763	350,36	0,38849	2,1852
-117	0,33579	1615,9	0,022375	0,00061886	44,694	72,658	278,172	350,83	0,39532	2,1767
-116	0,37778	1613,3	0,025014	0,00061986	39,978	73,72	277,58	351,3	0,40209	2,1684
-115	0,42428	1610,7	0,027917	0,00062086	35,821	74,782	276,988	351,77	0,40883	2,1603
-114	0,47571	1608,0	0,031105	0,00062187	32,149	75,844	276,406	352,25	0,41552	2,1523
-113	0,53248	1605,4	0,034602	0,00062289	28,9	76,906	275,814	352,72	0,42217	2,1444
-112	0,59505	1602,8	0,038431	0,0006239	26,021	77,967	275,233	353,2	0,42878	2,1367
-111	0,66392	1600,2	0,042617	0,00062492	23,465	79,029	274,641	353,67	0,43535	2,1291
-110	0,7396	1597,6	0,047188	0,00062595	21,192	80,091	274,059	354,15	0,44188	2,1217
-109	0,82265	1595,0	0,052171	0,00062698	19,168	81,152	273,478	354,63	0,44836	2,1144
-108	0,91364	1592,3	0,057595	0,00062801	17,362	82,214	272,896	355,11	0,45481	2,1072
-107	1,0132	1589,7	0,063493	0,00062905	15,75	83,276	272,314	355,59	0,46122	2,1002
-106	1,122	1587,1	0,069897	0,00063008	14,307	84,337	271,733	356,07	0,46759	2,0933
-105	1,2407	1584,5	0,076841	0,00063113	13,014	85,398	271,152	356,55	0,47392	2,0865
-104	1,3701	1581,8	0,084361	0,00063218	11,854	86,46	270,57	357,03	0,48021	2,0798
-103	1,5109	1579,2	0,092495	0,00063323	10,811	87,521	269,989	357,51	0,48647	2,0733

3. Siklus Carnot

Siklus Carnot adalah proses termodinamik yang dialami oleh zat pada mesin Carnot. Dalam siklus Carnot, untuk menghitung usaha total yang dilakukan oleh sistem untuk satu siklus sama dengan luas area di dalam siklus pada diagram P-V. Menurut hukum termodinamika usaha pada siklus carnot dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Q = \Delta U + W$$

$$Q_1 - Q_2 = 0 + W$$

$$W = Q_1 - Q_2$$

Dalam menilai kinerja suatu mesin, efisiensi merupakan suatu faktor yang penting. Untuk mesin kalor, efisiensi mesin (η) ditentukan dari perbandingan usaha yang dilakukan terhadap kalor masukan yang diberikan. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\% = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\% = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \times 100\%$$

Untuk siklus Carnot berlaku hubungan ,

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

sehingga efisiensi mesin Carnot dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \times 100\%$$

Keterangan:

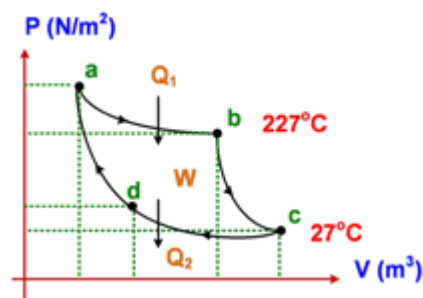
η : efisiensi mesin Carnot

T_1 : suhu reservoir bersuhu tinggi (K)

T_2 : suhu reservoir bersuhu rendah (K)

4. Perhitungan Mesin Carnot

Sebuah mesin Carnot beroperasi seperti yang tertera pada gambar berikut



Jika kalor yang diserap reservoir suhu tinggi adalah 1800 joule, tentukan:

- Efisiensi mesin Carnot
- Usaha mesin Carnot
- Jenis proses ab, bc, cd dan da

Jawab:

- Efisiensi mesin Carnot

$$\eta = W/Q_h$$

$$= 1 - Q_c/Q_h$$

$$\text{karena } Q_c/Q_h = T_c/T_h$$

$$\text{maka } \eta = 1 - T_c/T_h$$

$$\eta = 1 - 300 / 500$$

$$= 0,4$$

$$= 0,4 / 100$$

$$= 40\%$$

- Usaha mesin Carnot

$$W = \eta \times Q_h$$

$$= 0,4 \times 1800$$

$$= 720 \text{ Joule}$$

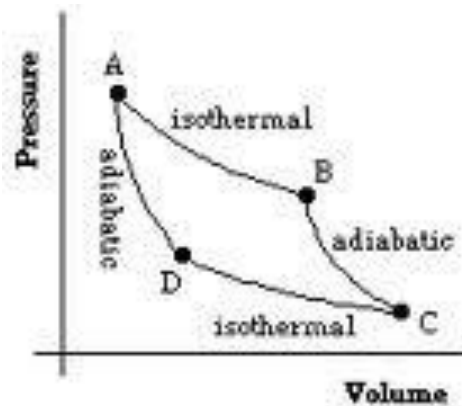
- Jenis proses:

Ab-dc isothermal; bc-da adiabatik

Latihan soal siklus Carnot:

Sebuah mesin Carnot menyerap kalor sebesar 500 kJ. Mesin ini bekerja pada reservoir bersuhu 600 K dan 400 K. Berapa kalor yang terbuang oleh mesin?

5. Penjelasan proses pada siklus Carnot



Gambar 41. Siklus Carnot

Pada gambar dapat terlihat bahwa siklus Carnot melibatkan dua proses isothermal dan dua proses adiabatik.

a. Proses A – B

Gas mula – mula berada pada keadaan (P_1, V_1, T_1) ditempatkan pada reservoir bersuhu T_1 . Gas di ekspansikan secara isotermis sehingga mencapai keadaan (P_2, V_2, T_1). Pada proses ini, gas menyerap kalor Q_1 .

b. Proses B – C

Gas mengembang secara adiabatik sampai pada keadaan (P_2, V_2, T_2). Pada proses ini, gas melakukan usaha hingga suhunya turun menjadi T_2 .

c. Proses C – D

Gas berada pada reservoir yang lebih dingin T_2 , kemudian ditekan hingga berada pada keadaan (P_3, V_3, T_2) secara isotermis. Selama proses ini, gas melepaskan kalor (Q_2)

d. Proses D – A

Gas dikembalikan pada keadaan semula (P_1, V_1, T_1) melalui proses adiabatik. Selama proses ini, gas dikenai usaha.

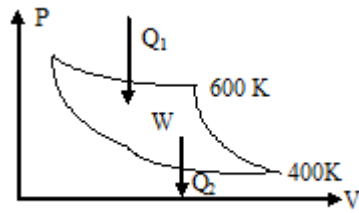
Hubungan antara volume, suhu, usaha dan kalor dalam siklus carnot dirumuskan pada tabel berikut:

V	T	W	ΔU	Q
$V_1 \rightarrow V_2$ Ekspansi	T_A	$-nRT_A \ln V_2/V_1$	0	$q_{in} = -w$ $= nRT_A \ln V_2/V_1$
$V_2 \rightarrow V_3$ Ekspansi	$T_A \rightarrow T_B$	$nC_V(T_B - T_A)$	w	0
$V_3 \rightarrow V_4$ Kompresi	T_B	$-nRT_B \ln V_3/V_4$	0	$q_{out} = -w$ $= nRT_B \ln V_3/V_4$
$V_4 \rightarrow V_1$ kompresi	$T_B \rightarrow T_A$	$nC_V(T_A - T_B)$	w	0

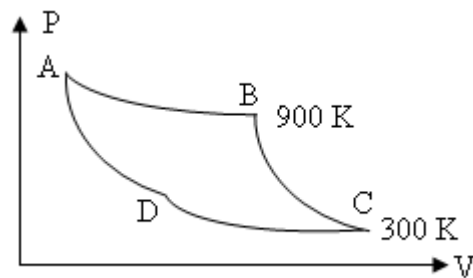
C. Latihan Soal

1. Pilihlah yang memiliki entropi lebih tinggi dalam masing-masing soal di bawah ini, dan jelaskan.
 - a. 1 mol $\text{NaCl}_{(s)}$ atau 1 mol $\text{NaCl}_{(aq)}$
 - b. 1 mol O_2 dan 2 mol H_2 atau 1 mol H_2O
 - c. 1 mol $\text{H}_2\text{O}_{(s)}$ atau 1 mol $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$
 - d. semangkuk sup pada 24°C atau pada 95°C
2. Apakah perubahan entropinya positif atau negatif untuk:
 - a. pembekuan etanol
 - b. penguapan bromin
 - c. pelarutan urea di dalam air
 - d. pendinginan gas N_2
3. Perhatikan reaksi pembakaran metana berikut ini :
$$\text{CH}_4(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \Rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$$

Jika diketahui harga perubahan entropinya adalah $-242,2 \text{ J/K mol}$ dan perubahan entalpinya $-890,4 \text{ kJ/mol}$, hitunglah harga perubahan energi bebas gibbs standar pada suhu 300 Kelvin?
4. Perhatikanlah reaksi berikut ini:
Jika diketahui harga $\Delta S = +160,4 \text{ J/mol K}$ dan $\Delta H = +178 \text{ kJ/mol}$. Pada suhu berapakah reaksi diatas dapat berlangsung spontan?
5. Refrigerator menggunakan refrigeran R-12 dan beroperasi dengan siklus kompresi uap ideal antara 0,14 dan 0,8MPa. Apabila laju massa refrigeran 0,05kg/s, tentukan
 - a. laju kalor dari ruangan yang didinginkan dan kerja kompresor
 - b. laju kalor yang dibuang ke lingkungan, (c) COP
6. Pada grafik PV mesin Carnot berikut diketahui reservoir suhu tinggi 600 dan suhu rendah 400. Jika usaha yang dilakukan mesin W, maka kalor yang dikeluarkan pada suhu rendah adalah....



7. Pada grafik berikut diketahui usaha yang dilakukan 7300 J. Berapa kalor yang dilepas sistem?



8. Sebuah mesin Carnot bekerja dalam suatu siklus antara 727°C dan 127°C . Mesin tersebut menyerap kalor 6000 Joule pada reservoir suhu tinggi. Efisiensi mesin dan usaha yang dilakukan oleh mesin dalam satu siklus adalah...
9. Sebuah lemari es memiliki koefisien performansi 6. Jika suhu ruang di luar lemari es adalah 28°C , berapakah suhu paling rendah di dalam lemari es yang dapat diperoleh?
10. Sebuah mesin pendingin memiliki reservoir suhu rendah sebesar -15°C . Jika selisih suhu antara reservoir suhu tinggi dan suhu rendahnya sebesar 40°C , tentukan koefisien performansi mesin tersebut!

D. Daftar Pustaka

- J.M Smith, Henrick C Van Ness & Michael Abbott. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 6th edition. New York: McGraw-Hill publisher.
- Paul Suparno. (2018). Pendalaman Materi Fisika: Teori Kinetik Gas dan Termodinamika. KemenristekDIKTI.
- I Gusti Agung Putra Adnyana. (2014). Termodinamika. Fakultas Mipa. Universitas Udayana.
- Rizki Pebriani. (2017). Termodinamika. Fakultas Teknik. Politeknik Negeri Sriwijaya

Suprpto Brotohiswojo. (2007). Pengantar Fisika Statistik. Universitas Terbuka.

Paulus Cahyono Tjiang. (2006) Efisiensi Siklus Carnot untuk Persamaan Gas. LPPM.Universitas Katolik Parahyangan.

Academia. Tabel Termodinamika (diakses tanggal 5 Maret 2020) Tersedia pada https://www.academia.edu/38665807/TABEL_TERMODINAMIKA

Wordpress. Tabel dan grafik termodinamika. (diakses tanggal 5 Maret 2020. Tersedia pada <https://nurulimantmunib.wordpress.com/tag/thermodinamika/>

Seamolec. Termodinamika. (diakses tanggal 7 Maret 2020). Tersedia pada <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://sumbelbelajar.seamolec.org/Media/Dokumen/5a583883865eacc372523abb/c0e181161c6210969033149ffce55788.pdf&ved=2ahUKEwiLmvqFy4voAhVJWX0KHWZECBM4ChAWMAJ6BAgCEAE&usg=AOvVaw0aHjEeXmTN8Yop-cf8B1GA>

RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER (RPS)

Program Studi : Teknik Kimia

Mata Kuliah/Kode : Termodinamika 1/ TKM232

Prasyarat : -

SKS : 2 Sks

Deskripsi Mata Kuliah : Mata kuliah Termodinamika 1 merupakan mata kuliah wajib program studi S1 Teknik Kimia yang membahas tentang dasar termodinamika Teknik kimia. Materi yang dibahas mencakup persamaan gas ideal, hukum pertama termodinamika, energi bebas dan sifat fluida nyata.

Capaian Pembelajaran : Setelah menyelesaikan mata kuliah ini, Mahasiswa mampu menganalisis masalah terkait teknik kimia dengan memanfaatkan sifat termodinamika

Penyusun Mayang Gitta Pawitra, S.T., M.Sc. (Ketua)
Rifkah Akmalina, ST.,MT (Anggota 1)

PERTEMUAN KE-	KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN	BAHAN KAJIAN (MATERI AJAR)	METODE PEMBELAJARAN	PENGALAMAN BELAJAR MAHASISWA	KRITERIA PENILAIAN	BOBOT NILAI
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	Mampu menjelaskan konsep dasar termodinamika	a. Sistem dan lingkungan b. Sifat ekstensif dan intensif c. Satuan SI dan british dan cara pembacaan steam table	Tatap muka dan diskusi	Diskusi 1	Kelengkapan jawaban dan partisipasi	7%

		d. Penggunaan rumus interpolasi pada table e. Hubungan kerja, Gaya, Energi kinetik dan Energi potensial				
2	Mampu mengetahui konsep dan penerapan energi, transfer energi dan perhitungan energi	a. Hukum pertama Termodinamika b. Efisiensi konversi energi c. Energi dan lingkungan d. Bentuk-bentuk energi e. Transfer energi oleh kalor f. Transfer energi oleh usaha. g. Bentuk-bentuk mekanika usaha	Tatap muka dan diskusi	Tugas 1	Kelengkapan jawaban latihan dan tugas	7%
3	Mampu menjelaskan konsep sifat-sifat zat murni	a. Zat Murni b. Fase-fase Zat Murni c. Proses Perubahan Fase dari Zat Murni d. Diagram P-v-T untuk Fase Perubahan Proses	Tatap muka dan diskusi	Tugas 2	Ketepatan jawaban	7%
4	Mampu menjelaskan konsep sifat-sifat zat murni (lanjutan)	a. Persamaan Keadaan Gas Ideal b. Faktor Kompresibel c. Persamaan Keadaan lainnya	Tatap muka dan diskusi	Latihan 1	Kelengkapan jawaban latihan dan tugas	7%
5	Mampu menjelaskan konsep analisis energi pada sistem tertutup	a. Batas bergerak: Tinjauan pada Usaha b. Keseimbangan Energi untuk Sistem Tertutup c. Kalor Jenis C_v dan C_p d. Perhitungan	Tatap muka dan diskusi	Diskusi	Kelengkapan jawaban dan partisipasi	7%

6	Mampu menjelaskan konsep analisis energi pada sistem tertutup (lanjutan)	a. Energi Dalam, Entalpi. Dan Kalor Jenis Gas Ideal b. Energi Dalam, Entalpi, dan Kalor Jenis dari Zat Padat dan Zat Cair	Tatap muka dan diskusi	Latihan 3	Kelengkapan jawaban latihan	7%
7	Mampu menjelaskan konsep analisis energi pada sistem terbuka	a. Energi Dalam, Entalpi. Dan Kalor Jenis Gas Ideal b. Energi Dalam, Entalpi, dan Kalor Jenis dari Zat Padat dan Zat Cair	Tatap muka dan diskusi	Tugas 3	Ketepatan Jawaban	8%
UTS						
8	Mahasiswa mampu menjelaskan konsep analisis massa dan energi dari volume kontrol	a. Konservasi Massa b. Usaha dari Aliran dan Energi dari fluida mengalir	Tatap muka dan diskusi	Tugas 4	Kelengkapan jawaban latihan dan tugas	7%
9	Mahasiswa mampu menjelaskan konsep analisis massa dan energi dari volume kontrol (lanjutan)	a. Analisis Energi dari Sistem aliran stabil b. Beberapa aplikasi dari sistem aliran stabil c. Analisis Energi dari Proses Aliran yang tidak stabil	Tatap muka dan diskusi	Tugas 5	Kelengkapan jawaban latihan dan tugas	7%
10	Mampu menjelaskan konsep dan penerapan Hukum Kedua Termodinamika	a. Pendahuluan Hukum Kedua, b. Reservoir Energi Termal c. Mesin Kalor d. Mesin Pendingin dan Pompa Kalor	Tatap muka dan diskusi	Tugas 6	Kelengkapan jawaban latihan dan tugas	7%

		e. Mesin Gerak Perpetual f. Proses Reversibel dan Irreversibel				
11	Mampu menjelaskan konsep dan penerapan Hukum Kedua Termodinamika (lanjutan)	a. Siklus Carnot b. Prinsip Carnot c. Skala Temperatur Termodinamika d. Mesin Kalor Carnot e. Mesin Pendingin dan Pompa Kalor Carnot	Tatap muka dan diskusi	Diksusi	Kelengkapan jawaban dan partisipasi	7%
12	Mampu menjelaskan konsep dan penerapan entropi	a. Pendahuluan Entropi b. Kenaikan dari Prinsip Entropi c. Perubahan Entropi dari Zat Murni d. Proses Isentropi e. Diagram-diagram sifat yang menjelaskan Entropi	Tatap muka dan diskusi	Tugas 7	Kelengkapan jawaban latihan dan tugas	8%
13	Mampu menjelaskan konsep dan penerapan entropi (lanjutan)	a. Hubungan Tds b. Perubahan Entropi dari Zat cair dan Zat Padat c. Perubahan Entropi dari Gas Ideal d. Usaha Aliran Tetap yang Reversibel e. Keseimbangan Entropi	Tatap muka dan diskusi	Tugas 8	Kelengkapan jawaban latihan dan tugas	7%
14	Mampu menganalisa konsep sistem refrigerasi	Sistem Refrigerasi	Tatap muka dan diskusi	Latihan 8	Kelengkapan jawaban latihan dan tugas	7%

UAS

Referensi/Sumber :

1. Cengel, Yunus. (2006). *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer Second Edition*. Hill Primis: McGraw .
2. Moran & moran
3. Smith,J.M., H.C. van Ness and M.C. Abbott, *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamic*, Edisi ke-7, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1996. (Pustaka utama)
4. Daubert, T.E., *Chemical Engineering Thermodynamics*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1985.
5. Sandler,S.I., 1989, *Chemical and Engineering Thermodynamics*, Edisi ke-2, John Wiley & Sons,New York.

Tangerang Selatan, Januari 2018

Ketua Program Studi Teknik Kimia**Ir. Wiwik Indrawati, M.Pd****NIDN. 0429036203****Ketua Tim Teaching****Mata Kuliah Termodinamika 1****Mayang Gitta Pawitra, ST., M.Sc****NIDN. 0416069002**

