

# Handboek voor Thermische en Fluïdumwetenschappen

## Theorie, Analyse en Toepassingen

December 18, 2025

## Contents

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Formularium</b>   | <b>5</b>  |
| <b>I Stromingen</b>  | <b>8</b>  |
| <b>1 Eigenschappen van Fluïda</b>                                | <b>9</b>  |
| 1.1 Definitie van een Fluïdum . . . . .                          | 9         |
| 1.2 Dichtheid . . . . .  | 9         |
| 1.3 Viscositeit . . . . .  | 9         |
| <b>2 Fluïdumstatica (Hydrostatica)</b>                           | <b>10</b> |
| 2.1 Drukverdeling in een Fluïdum in Rust . . . . .               | 10        |
| 2.1.1 Het Infinitesimale Controle Volume . . . . .               | 10        |
| 2.1.2 Identificatie van Krachten . . . . .                       | 11        |
| 2.1.3 Krachtenevenwicht . . . . .                                | 12        |
| 2.1.4 Integratie . . . . .                                       | 12        |
| 2.2 Krachten op Onderdompelde Oppervlakken . . . . .             | 14        |
| 2.2.1 Rechthoekig Oppervlak - Basisprobleem . . . . .            | 14        |
| 2.2.2 Schuin Rechthoekig Oppervlak onder Hoek $\theta$ . . . . . | 14        |
| 2.2.3 Algemene Formules . . . . .                                | 15        |
| 2.2.4 De Methode van het Drukprisma . . . . .                    | 15        |
| 2.3 Krachten op Gekromde Oppervlakken . . . . .                  | 16        |
| 2.3.1 Horizontale Component ( $F_H$ ) . . . . .                  | 16        |
| 2.3.2 Verticale Component ( $F_V$ ) . . . . .                    | 16        |
| 2.3.3 Resultante . . . . .                                       | 16        |
| 2.4 Archimedes' kracht en Drijfvermogen . . . . .                | 16        |
| <b>3 Kinematica van Stromingen</b>                               | <b>18</b> |
| 3.1 Euleriaanse Beschrijving . . . . .                           | 18        |
| 3.2 Materiële Afgeleide . . . . .                                | 18        |
| 3.3 Reynolds Transport Stelling (RTT) . . . . .                  | 19        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4 Fluïdumdynamica: De Bewegingsvergelijkingen</b>                     | <b>19</b> |
| 4.1 Behoudswetten en Control Volume Analyse . . . . .                    | 19        |
| 4.1.1 Continuïteitsvergelijking (Massabehoud) . . . . .                  | 19        |
| 4.1.2 Impulsbehoud (Momentumvergelijking) . . . . .                      | 20        |
| 4.2 Afleiding van de Wet van Bernoulli . . . . .                         | 20        |
| 4.2.1 Afleiding via Euler Vergelijking . . . . .                         | 20        |
| 4.2.2 Projectie op een Stroomlijn . . . . .                              | 21        |
| 4.2.3 Beperkingen van Bernoulli . . . . .                                | 22        |
| 4.2.4 Interpretatie van de Termen . . . . .                              | 22        |
| 4.3 De Algemene Energievergelijking . . . . .                            | 23        |
| 4.3.1 Correctiefactoren voor Profielen . . . . .                         | 23        |
| <b>5 Controlevolume Analyse</b>  | <b>24</b> |
| 5.1 Controle volume Analyse Stappenplan . . . . .                        | 24        |
| 5.2 Interne Stromingen . . . . .   | 24        |
| 5.2.1 Newton's Tweede Wet voor een Fluïdumdeeltje . . . . .              | 25        |
| 5.2.2 Krachtenbalans . . . . .   | 25        |
| 5.2.3 De Navier-Stokes Vergelijking . . . . .                            | 25        |
| 5.3 Oplossing: Stroming tussen Parallelle Platen (Poiseuille) . . . . .  | 26        |
| 5.4 Wet van Poiseuille voor Cilindrische Buis . . . . .                  | 28        |
| <b>6 Interne en Externe Stroming</b>                                     | <b>29</b> |
| 6.1 Interne Stroming: Laminair vs. Turbulent . . . . .                   | 29        |
| 6.1.1 Reynolds Getal . . . . .   | 29        |
| 6.1.2 Overgang Laminair-Turbulent . . . . .                              | 29        |
| 6.1.3 Reynolds Decompositie . . . . .                                    | 31        |
| 6.1.4 Wrijvingsfactor en Drukval . . . . .                               | 31        |
| 6.1.5 Major en Minor Losses . . . . .                                    | 32        |
| 6.1.6 Leidingsystemen: Serie en Parallel . . . . .                       | 35        |
| 6.1.7 Iteratieve Oplossingsmethoden (Type 2 Problemen) . . . . .         | 35        |
| 6.2 Externe Stroming: Weerstand en Lift . . . . .                        | 35        |
| 6.2.1 Drukgradienten . . . . .   | 36        |
| 6.2.2 Weerstand (Drag) . . . . .   | 36        |
| 6.2.3 Lift . . . . .   | 37        |
| 6.3 Extra oefeningen: Interne en Externe Stroming . . . . .              | 38        |
| 6.3.1 Oefening 1: Drukverlies in een Leidingsysteem . . . . .            | 38        |
| 6.3.2 Oefening 2: Luchtweerstand op een Auto . . . . .                   | 39        |
| 6.3.3 Oefening 3: Liftkracht op een Vleugel . . . . .                    | 40        |
| 6.3.4 Oefening 4: Reynoldsgetal en Stromingsregime . . . . .             | 40        |
| 6.3.5 Oefening 5: Drukverlies in een Buis (Laminaire Stroming) . . . . . | 41        |
| 6.3.6 Oefening 6: Weerstand op een Bol (Sphere) . . . . .                | 41        |
| 6.3.7 Oefening 7: Weerstand en Vermogen voor een Auto in Wind . . . . .  | 42        |
| <b>II Warmte</b>   | <b>43</b> |
| <b>7 Thermodynamica</b>  | <b>44</b> |
| 7.1 Systemen en Controle Volumes . . . . .                               | 44        |
| 7.2 Eigenschappen van een Systeem . . . . .                              | 45        |
| 7.3 Processen en Cycli . . . . .   | 45        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>8 De Eerste Hoofdwet van de Thermodynamica: Energiebehoud</b>                              | <b>45</b>  |
| 8.1 Vormen van Energie . . . . .  | 46         |
| 8.2 Energie-overdracht: Warmte en Arbeid . . . . .  | 46         |
| 8.3 Arbeid bij Grensverplaatsing (Moving Boundary Work) . . . . .                             | 47         |
| 8.4 De Eerste Hoofdwet voor Open Systemen (Controlevolumes) . . . . .                         | 48         |
| 8.4.1 Specifieke Componenten: Smoring en Mengkamers . . . . .                                 | 49         |
| <b>9 Eigenschappen van Zuivere Stoffen</b>  | <b>50</b>  |
| 9.1 Fasen en Faseverandering . . . . .  | 50         |
| 9.2 Het Staatspostulaat en Onafhankelijkheid . . . . .  | 50         |
| 9.3 Eigenschapsdiagrammen en Tabellen . . . . .   | 50         |
| 9.4 De Ideale Gaswet . . . . .  | 52         |
| <b>10 De Tweede Hoofdwet en Entropie</b>  | <b>52</b>  |
| 10.1 Entropie . . . . .   | 52         |
| 10.2 Entropiebalans en Efficiëntie . . . . .  | 54         |
| 10.2.1 Entropiebalans voor Open Systemen . . . . .  | 54         |
| 10.2.2 Isentropische Efficiënties . . . . .   | 55         |
| <b>11 Thermodynamische Cycli</b>  | <b>55</b>  |
| 11.1 De Carnot Cyclus . . . . .   | 57         |
| 11.2 COP, Coefficients Of Performance . . . . .   | 58         |
| 11.3 Otto en Diesel Cycli . . . . .   | 59         |
| 11.4 Rankine Cyclus . . . . .   | 62         |
| 11.5 Dampcompressie Koelcyclus . . . . .  | 64         |
| 11.6 Omkeerbare versus Onomkeerbare Cycli . . . . .   | 67         |
| <b>12 Warmteoverdracht Mechanismen</b>  | <b>73</b>  |
| 12.1 Conductie . . . . .  | 73         |
| 12.2 Convectie . . . . .  | 74         |
| 12.3 Straling . . . . .   | 75         |
| 12.4 Combinatie van Convectie, Conductie en Straling . . . . .                                | 76         |
| <b>III Oefeningen Warmte en Stromingen</b>  | <b>81</b>  |
| <b>13 Oefeningen</b>  | <b>82</b>  |
| 13.1 Oefenzitting 1&2: Hydrostatica . . . . .   | 82         |
| 13.2 Oefenzitting 3: Stromingsleer&Bernoulli en energievergelijking . . . . .                 | 89         |
| 13.3 Oefenzitting 4: Tabellen en eenheden . . . . .   | 93         |
| 13.4 Oefenzitting 5: Gesloten systemen . . . . .  | 93         |
| 13.5 Oefenzitting 6: Open systemen . . . . .  | 96         |
| 13.6 Oefenzitting 7: Eerste hoofdwet cycli . . . . .  | 98         |
| 13.7 Oefenzitting 7: Cycli en Tweede Hoofdwet . . . . .                                       | 100        |
| 13.8 Oefenzitting 8 : Entropie en tweede hoofdwet . . . . .                                   | 104        |
| 13.9 Oefenzitting 9: Otto-cycli en verbrandingsmotoren . . . . .                              | 106        |
| 13.10 Oefenzitting 11: Navier-Stokes, Moody diagram, stromingsweerstand . . . . .             | 111        |
| 13.11 Oefenzitting 12: Turbulentie, leidingen, uitwendige stroming, drag&lift force . . . . . | 112        |
| <b>14 Bijlagen</b>  | <b>116</b> |

## Formularium

# I. Eigenschappen van zuivere stoffen/Properties of pure substances

## 1 Algemeen/General

- $H \stackrel{\text{def}}{=} U + PV, \quad h = u + Pv$
- $c_V \stackrel{\text{def}}{=} \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_V, \quad c_P \stackrel{\text{def}}{=} \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P, \quad k \stackrel{\text{def}}{=} \frac{c_P}{c_V}$

## 2 Vaste stoffen en onsamendrukbare vloeistoffen/Solids and incompressible liquids

- $v = \text{constant}$
- $c_P = c_V = c$
- $\Delta u = c\Delta T$
- $\Delta h = c\Delta T + v\Delta P$
- $\Delta s = s_2 - s_1 = c \ln \frac{T_2}{T_1}$

## 3 Samengedrukte vloeistof/Compressed liquid

- $v = v_f(T), \quad u = u_f(T), \quad s = s_f(T), \quad h = h_f(T)$

## 4 Verzadigde vloeistof-damp mengsels/ Saturated liquid-vapor mixtures

- $x \stackrel{\text{def}}{=} \frac{m_g}{m_f+m_g}$
- $v = x v_g + (1-x)v_f = v_f + x(v_g - v_f) = v_f + x v_{fg}$   
(idem voor  $u, h$  en  $s$ /same for  $u, h$  and  $s$ )
- Verzadigde vloeistof/Saturated liquid:  $x = 0$ ,  
Verzadigde damp/Saturated vapor:  $x = 1$

Kernformules en een symbolenoverzicht per deel. Nieuwe symbolen noteer je met `\symS` (stromingen) of `\symW` (warmte), zodat ze automatisch in de tabellen hieronder terechtkomen (na hercompileren).

## Deel 1: Stromingen

### Belangrijke Formules

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Dichtheid</b>                     | : $\rho = \frac{m}{V}$  |
| <b>Schuifspanning (Newtoniaans)</b>  | : $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$  |
| <b>Kinematische viscositeit</b>      | : $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  |
| <b>Hydrostatische druk</b>           | : $p = p_0 + \rho gh$   |
| <b>Continuïteit (massadebiet)</b>    | : $\dot{m} = \rho AV$   |
| <b>Continuïteit (incompressibel)</b> | : $A_1 V_1 = A_2 V_2$   |
| <b>Continuïteit (differentieel)</b>  | : $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$                              |
| <b>Bernoulli (zonder verliezen)</b>  | : $\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{const.}$   |
| <b>Bernoulli (met verliezen)</b>     | : $\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L$ |
| <b>Darcy–Weisbach</b>                | : $h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$  |
| <b>Kleine verliezen</b>              | : $h_m = K \frac{V^2}{2g}$  |
| <b>Reynoldsgetal</b>                 | : $Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{VD}{\nu}$  |

$h_L$  — totaal energieverlies (head loss)

m

$h_f$  — wrijvingskopverlies

m

$f$  — wrijvingsfactor (Darcy)

-

$K$  — verliescoëfficiënt

-

$\varepsilon$  — absolute wandruwheid

m

## Grootheden en symbolen

| Symbool       | Betekenis                               | Eenheid           |
|---------------|---|-------------------|
| $h_L$         | totaal energieverlies (head loss)       | m                 |
| $h_f$         | wrijvingskopverlies                     | m                 |
| $f$           | wrijvingsfactor (Darcy)                 | -                 |
| $K$           | verliescoëfficiënt                      | -                 |
| $\varepsilon$ | absolute wandruwheid                    | m                 |
| $\rho$        | dichtheid                               | kg/m <sup>3</sup> |
| $m$           | massa                                   | kg                |
| $\tau$        | schuifspanning                          | Pa                |
| $\mu$         | dynamische viscositeit                  | Pas               |
| $\nu$         | kinematische viscositeit                | m <sup>2</sup> /s |
| $A$           | oppervlakte                             | m <sup>2</sup>    |
| $V$           | snelheid                                | m/s               |
| $d$           | laagdikte                               | m                 |
| $F$           | kracht                                  | N                 |
| $p$           | druk                                    | Pa                |
| $g$           | zwaartekrachtsversnelling               | m/s <sup>2</sup>  |
| $\vec{v}$     | snelheidsvector                         | m/s               |
| $\vec{a}$     | versnellingsvector                      | m/s <sup>2</sup>  |
| $Re$          | Reynoldsgetal                           | -                 |
| $D$           | karakteristieke lengte (bijv. diameter) | m                 |

## Deel 2: Warmte

### Belangrijke Formules

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| Eerste hoofdwet (gesloten)      | : $\Delta U = Q - W$   |
| Eerste hoofdwet (stationair CV) | : $\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m} \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{out} - \sum \dot{m} \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{in}$ |
| Enthalpie                       | : $h = u + pv$   |
| Ideaal gas                      | : $pv = RT$  |
| Clausius-ongelijkheid           | : $\Delta S \geq \int \frac{\delta Q}{T}$  |
| Entropiebalans (stationair CV)  | : $\dot{S}_{gen} = \sum \dot{m} s_{out} - \sum \dot{m} s_{in} - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k}$  |
| Fourier (1D)                    | : $\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx}$  |
| Convectie (Newton)              | : $\dot{Q} = hA(T_s - T_\infty)$   |
| Straling (Stefan–Boltzmann)     | : $\dot{Q} = \varepsilon\sigma A (T_s^4 - T_\infty^4)$   |
| Warmtewisselaar (LMTD)          | : $\dot{Q} = UA \Delta T_{lm}$   |

$k$  — thermische geleidbaarheid

W/(m K)

|  |             |
|--|-------------|
| $U$ — globale warmteoverdrachtscoëfficiënt | $W/(m^2 K)$ |
|--|-------------|

|                              |   |
|------------------------------|---|
| $\varepsilon$ — emissiviteit | - |
|------------------------------|---|

|                                       |               |
|---------------------------------------|---------------|
| $\sigma$ — Stefan–Boltzmann constante | $W/(m^2 K^4)$ |
|---------------------------------------|---------------|

| Symbool       | Betekenis                              | Eenheid       |
|---------------|--|---------------|
| $k$           | thermische geleidbaarheid              | $W/(m K)$     |
| $U$           | globale warmteoverdrachtscoëfficiënt   | $W/(m^2 K)$   |
| $\varepsilon$ | emissiviteit                           | -             |
| $\sigma$      | Stefan–Boltzmann constante             | $W/(m^2 K^4)$ |
| $Q$           | warmteoverdracht (gesloten systeem)    | J             |
| $W$           | arbeid (gesloten systeem)              | J             |
| $\dot{m}$     | massadebiet                            | kg/s          |
| $h$           | specifieke enthalpie                   | kJ/kg         |
| $R$           | specifieke gasconstante                | J/(kg K)      |
| $v$           | specifiek volume                       | $m^3/kg$      |
| $c_v$         | soortelijke warmte bij constant volume | kJ/(kg K)     |
| $c_p$         | soortelijke warmte bij constant druk   | kJ/(kg K)     |
| $s$           | specifieke entropie                    | kJ/(kg K)     |

# Part I

## Stromingen

# 1 Eigenschappen van Fluïda

## 1.1 Definitie van een Fluïdum

Een **fluïdum** is een stof die niet in staat is blijvende weerstand te bieden tegen afschuiving. Waar een vaste stof zijn vorm behoudt onder schuifspanning, zal een fluïdum continu blijven vervormen zolang de schuifkracht wordt aangehouden. Fluïda omvatten zowel vloeistoffen als gassen.

## 1.2 Dichtheid

De dichtheid  $\rho$  van een fluïdum wordt gedefinieerd als de massa per volume-eenheid:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$$

$\rho$  — dichtheid

$\text{kg}/\text{m}^3$

$m$  — massa

kg

## 1.3 Viscositeit

Viscositeit is een maat voor de interne wrijving van een fluïdum. Voor een Newtoniaans fluïdum geldt een lineair verband tussen de schuifspanning  $\tau$  en de snelheidsgradiënt:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

$\tau$  — schuifspanning

Pa

$\mu$  — dynamische viscositeit

Pa s

waarbij:

- $\tau$  de schuifspanning is [Pa]
- $\mu$  de dynamische viscositeit [Pa·s]
- $\frac{\partial u}{\partial y}$  de snelheidsgradiënt loodrecht op de stroomrichting

De kinematische viscositeit wordt gedefinieerd als:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

$\nu$  — kinematische viscositeit

$\text{m}^2/\text{s}$

Voor vloeistoffen neemt de viscositeit af met toenemende temperatuur, terwijl voor gassen de viscositeit toeneemt met temperatuur.

### Voorbeeld: Schuifspanning in een olielaag

**Gegeven:** Een vlakke plaat met oppervlakte  $A = 0.5 \text{ m}^2$  wordt met een snelheid van  $V = 2 \text{ m/s}$  over een vlakke ondergrond getrokken. Tussen de plaat en de ondergrond bevindt zich een olielaagje met dikte  $d = 1 \text{ mm}$  en dynamische viscositeit  $\mu = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ .

|                   |              |
|-------------------|--------------|
| $A$ — oppervlakte | $\text{m}^2$ |
|-------------------|--------------|

|                |              |
|----------------|--------------|
| $V$ — snelheid | $\text{m/s}$ |
|----------------|--------------|

|                 |            |
|-----------------|------------|
| $d$ — laagdikte | $\text{m}$ |
|-----------------|------------|

**Gevraagd:** Bereken de benodigde kracht  $F$  om de plaat te bewegen.

|              |            |
|--------------|------------|
| $F$ — kracht | $\text{N}$ |
|--------------|------------|

**Oplossing:** De snelheidsgradiënt is lineair (Couette stroming):

$$\frac{du}{dy} \approx \frac{V}{d} = \frac{2 \text{ m/s}}{0.001 \text{ m}} = 2000 \text{ s}^{-1}$$

De schuifspanning is:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = 0.1 \cdot 2000 = 200 \text{ Pa}$$

De benodigde kracht is:

$$F = \tau \cdot A = 200 \text{ N/m}^2 \cdot 0.5 \text{ m}^2 = 100 \text{ N}$$

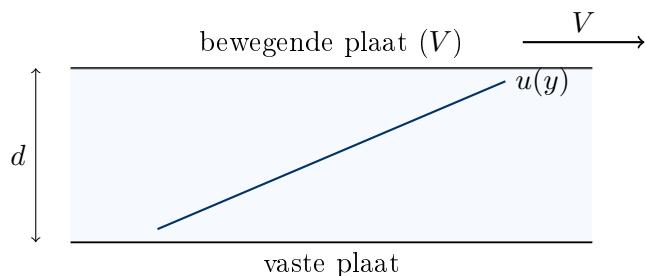


Figure 1.1: Couette-stroming: lineair snelheidsprofiel tussen een vaste en een bewegende plaat.

## 2 Fluïdumstatica (Hydrostatica)

Fluïdumstatica behandelt vloeistoffen die in rust zijn. In deze toestand zijn er geen relatieve bewegingen tussen vloeistoflagen, dus er zijn geen schuifspanningen. Alleen normaalkrachten (druk) spelen een rol.

### 2.1 Drukverdeling in een Fluïdum in Rust

#### 2.1.1 Het Infinitesimale Controle Volume

We beginnen met het beschouwen van een infinitesimaal klein controle volume in een fluïdum dat in rust is. Dit is een kubisch volume met afmetingen:

- Lengte in x-richting:  $dx$
- Lengte in y-richting:  $dy$

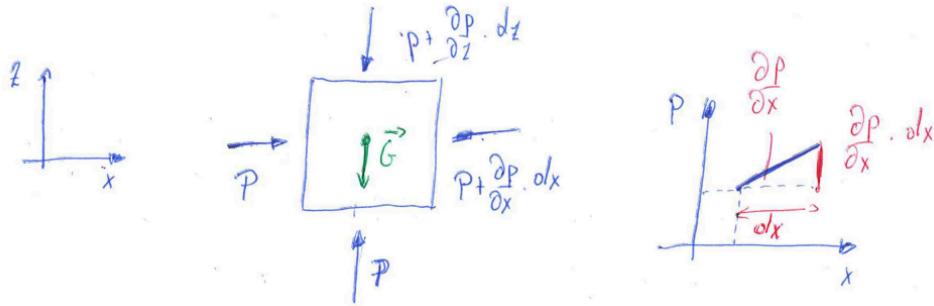


Figure 2.1: Infinitesimaal controle volume in een fluïdum in rust met de werkende krachten.

- Lengte in z-richting:  $dz$

Het volume van dit element is dus:

$$dV = dx \cdot dy \cdot dz$$

**Belangrijke aannname:** Het fluïdum is in rust, wat betekent dat er geen weerstand tegen schuifspanningen optreedt in het fluïdum. De enige krachten die werken zijn drukkrachten (loodrecht op oppervlakken) en zwaartekrachten.

### 2.1.2 Identificatie van Krachten

Op dit controle volume werken verschillende krachten:

#### 1. Drukkrachten op elk oppervlak:

- Linkervlak (in x-richting):

- Oppervlakte:  $A_x = dy \cdot dz$
- Druk:  $p$
- Kracht richting positieve x:  $F_{x,links} = p \cdot dy \cdot dz$

- Rechtervlak (in x-richting):

- Oppervlakte:  $A_x = dy \cdot dz$
- Druk:  $p + \frac{\partial p}{\partial x} dx$  (druk verandert over afstand  $dx$ )
- Kracht richting negatieve x:  $F_{x,rechts} = - \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \cdot dy \cdot dz$

$p$  — druk

Pa

- 2. Zwaartekracht: De massa van het element is:

$$dm = \rho \cdot dV = \rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

De zwaartekracht werkt in de negatieve z-richting:

$$G = dm \cdot g = \rho \cdot g \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

$g$  — zwaartekrachtsversnelling

m/s<sup>2</sup>

### 2.1.3 Krachtenevenwicht

**Krachtenevenwicht in x-richting:** Voor een fluïdum in rust moet de som van alle krachten in x-richting nul zijn ( $\sum F_x = 0$ ):

$$p \cdot dy \cdot dz - \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \cdot dy \cdot dz = 0$$

Uitwerken:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz = 0 \implies \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

**Conclusie:** De druk verandert niet in de horizontale x-richting in een fluïdum in rust.

**Krachtenevenwicht in y-richting:** Volledig analoog aan de x-richting ( $\sum F_y = 0$ ):

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

**Conclusie:** De druk verandert niet in de horizontale y-richting in een fluïdum in rust.

**Krachtenevenwicht in z-richting (verticaal):** In de verticale richting hebben we zowel drukkrachten als zwaartekracht.

- **Ondervlak (beneden):** Kracht omhoog  $F_{z,onder} = p \cdot dx \cdot dy$
- **Bovenvlak (boven):** Kracht omlaag  $F_{z,boven} = -\left(p + \frac{\partial p}{\partial z} dz\right) \cdot dx \cdot dy$
- **Zwaartekracht:** Omlaag  $G = -\rho g \cdot dx \cdot dy \cdot dz$

Krachtenevenwicht ( $\sum F_z = 0$ ):

$$p \cdot dx \cdot dy - \left( p + \frac{\partial p}{\partial z} dz \right) \cdot dx \cdot dy - \rho g \cdot dx \cdot dy \cdot dz = 0$$

Uitwerken en delen door  $dx \cdot dy \cdot dz$ :

$$-\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g = 0 \implies \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

**Cruciale conclusie:** De druk neemt af in de positieve z-richting (omhoog). Dit betekent dat de druk toeneemt met de diepte!

### 2.1.4 Integratie

**Integratie voor Vloeistoffen ( $\rho = \text{constant}$ ):**

$$\int_{z_1}^{z_2} dp = \int_{z_1}^{z_2} (-\rho g) dz \implies p_2 - p_1 = -\rho g(z_2 - z_1)$$

Als we definiëren dat  $h = z_1 - z_2$  (de diepte onder punt 1):

$$p_2 = p_1 + \rho gh$$

Dit is de fundamentele hydrostatische vergelijking. Voor water ( $\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$ ) is  $\Delta p \approx 9810 \text{ Pa/m} \approx 0.1 \text{ bar/m}$ .

**Integratie voor Gassen ( $\rho = \rho(z)$ ):** Voor gassen volgt de dichtheid de ideale gaswet  $\rho = \frac{p}{RT}$ . Substitueren in  $\frac{dp}{dz} = -\rho g$ :

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{p \cdot g}{RT} \implies \frac{dp}{p} = -\frac{g}{RT} dz$$

Voor een isotherme atmosfeer ( $T = \text{constant}$ ), integreren van  $z_1$  tot  $z_2$ :

$$p_2 = p_1 \exp\left(-\frac{g(z_2 - z_1)}{RT}\right)$$

Dit verklaart waarom de luchtdruk exponentieel afneemt met de hoogte.

**Voorbeeld: Druk op diepte**

**Gegeven:** Een duiker bevindt zich op 20 m diepte in zee water ( $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ ). De atmosferische druk aan het oppervlak is  $P_{atm} = 101.3 \text{ kPa}$ . **Gevraagd:** De absolute druk op de duiker.

**Oplossing:**

$$P = P_{atm} + \rho gh$$

$$P = 101300 + 1025 \cdot 9.81 \cdot 20$$

$$P = 101300 + 201105 = 302405 \text{ Pa} \approx 3.02 \text{ bar}$$

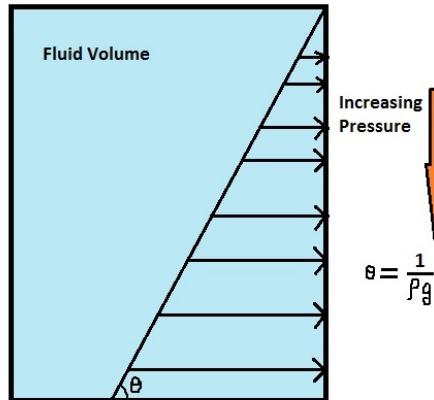


Figure 2.2: Lineaire toename van hydrostatische druk met de diepte.

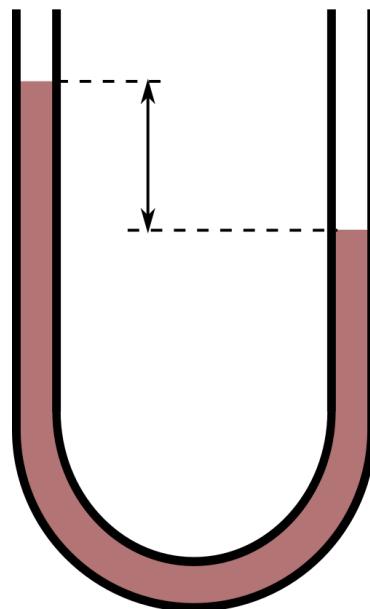


Figure 2.3: U-buis manometer (schematisch).

**Voorbeeldoefening: manometer (drukverschil)**

**Gegeven:** Een U-buis manometer met kwik ( $\rho_{Hg} = 13\,600 \text{ kg/m}^3$ ) toont een niveauverschil  $h = 12 \text{ cm}$ .

**Gevraagd:** Bepaal  $\Delta p = p_{tank} - p_{atm}$ .

**Oplossing:**

$$\Delta p = \rho gh = 13\,600 \cdot 9.81 \cdot 0.12 \approx 1.60 \times 10^4 \text{ Pa} = 16.0 \text{ kPa}$$

## 2.2 Krachten op Onderdompelde Oppervlakken

### 2.2.1 Rechthoekig Oppervlak - Basisprobleem

Beschouw een rechthoekig oppervlak volledig ondergedompeld in water:

- Breedte:  $b$
- Hoogte:  $a$
- Georiënteerd verticaal ( $\theta = 90^\circ$ )
- Bovenkant op diepte 0, onderkant op diepte  $a$

**Drukverdeling en Totale Kracht:** Op diepte  $y$  is de druk  $p(y) = \rho gy$  (waarbij  $p_0$  verwaarloosbaar is). De kracht op een infinitesimale strip met hoogte  $dy$  is  $dF = p(y) \cdot b \cdot dy = \rho gy \cdot b \cdot dy$ . Integreren over de hoogte:

$$F = \int_0^a \rho gy \cdot b \, dy = \rho gb \left[ \frac{y^2}{2} \right]_0^a = \frac{1}{2} \rho gba^2$$

Alternatief:  $F = p_{\text{gem}} \cdot A = (\rho g \frac{a}{2}) \cdot (ab) = \frac{1}{2} \rho g a^2 b$ .

**Aangrijppingspunt (Center of Pressure):** Het moment van de drukkracht om de bovenkant moet gelijk zijn aan het moment van de resulterende kracht ( $F \cdot y_p = \int y \cdot dF$ ):

$$F \cdot y_p = \int_0^a y \cdot (\rho gy \cdot b) \, dy = \rho gb \int_0^a y^2 \, dy = \rho gb \left[ \frac{y^3}{3} \right]_0^a = \frac{1}{3} \rho gba^3$$

Invullen van  $F$ :

$$\left( \frac{1}{2} \rho gba^2 \right) \cdot y_p = \frac{1}{3} \rho gba^3 \implies y_p = \frac{2}{3}a$$

**Conclusie:** Het aangrijppingspunt ligt op twee derde van de hoogte vanaf de bovenkant.

### 2.2.2 Schuin Rechthoekig Oppervlak onder Hoek $\theta$

**Coördinatensysteem:** Voor een oppervlak onder hoek  $\theta$  met de horizontaal definiëren we  $y'$  als de afstand langs het schuine oppervlak vanaf de bovenkant. De verticale diepte is  $h = y' \sin \theta$ .

**Totale Kracht:** De druk op positie  $y'$  is  $p(y') = \rho gy' \sin \theta$ . De kracht op een strip is  $dF = \rho gy' \sin \theta \cdot b \cdot dy'$ .

$$F = \int_0^a \rho g \sin \theta \cdot b \cdot y' \, dy' = \frac{1}{2} \rho g \sin \theta \cdot b \cdot a^2$$

De kracht kan ontbonden worden in een horizontale component  $F_x = F \sin \theta$  en een verticale component  $F_y = F \cos \theta$ .

**Aangrijppingspunt:**

$$F \cdot y_p = \int_0^a y' \cdot dF = \int_0^a y' \cdot (\rho g \sin \theta \cdot b \cdot y') \, dy' = \frac{1}{3} \rho g \sin \theta \cdot b \cdot a^3$$

Dit leidt opnieuw tot:

$$y_p = \frac{2a}{3}$$

### 2.2.3 Algemene Formules

**Totale Kracht:** Voor een algemeen ondergedompeld oppervlak:

$$F = p_{gem} \cdot A = (\rho g h_c) \cdot A$$

waarbij  $h_c$  de verticale diepte van het zwaartepunt is.

**Aangrijppingspunt (Center of Pressure):** Het aangrijppingspunt wordt bepaald door het traagheidsmoment:

$$y_p = y_c + \frac{I_{xx,c}}{y_c \cdot A}$$

waarbij  $y_p$  en  $y_c$  posities langs het oppervlak zijn, en  $I_{xx,c}$  het traagheidsmoment rond de horizontale as door het zwaartepunt is.

### 2.2.4 De Methode van het Drukprisma

Naast de formule  $F = p_c A$ , is de methode van het **drukprisma** vaak intuïtiever. De totale hydrostatische kracht op een vlak oppervlak is gelijk aan het volume van het drukprisma dat op dat oppervlak rust.

- Voor een rechthoekige wand is dit prisma driehoekig (of trapeziumvormig bij overdruk).
- De totale kracht  $F$  is het volume van dit prisma.
- Het aangrijppingspunt  $y_p$  is het geometrische zwaartepunt van dit prisma.

Bij een externe overdruk  $P_0$  (zoals in een drukvat) kan men werken met een equivalente vloeistofhoogte  $h_{eq} = P_0 / (\rho g)$ . Het drukprofiel start dan niet bij 0 maar bij  $P_0$ , wat het rekenwerk vereenvoudigt tot een trapeziumvolume.

#### Voorbeeld: Kracht op een sluisdeur

**Gegeven:** Een rechthoekige sluisdeur is  $4\text{ m}$  breed en het water staat  $3\text{ m}$  hoog tegen de deur.

**Gevraagd:** De totale hydrostatische kracht op de deur. **Oplossing:** Het zwaartepunt van het natte oppervlak ligt op halve hoogte:  $h_c = 1.5\text{ m}$ . De oppervlakte is  $A = 4 \cdot 3 = 12\text{ m}^2$ .

$$F = \rho g h_c A = 1000 \cdot 9.81 \cdot 1.5 \cdot 12$$

$$F = 176580\text{ N} \approx 176.6\text{ kN}$$

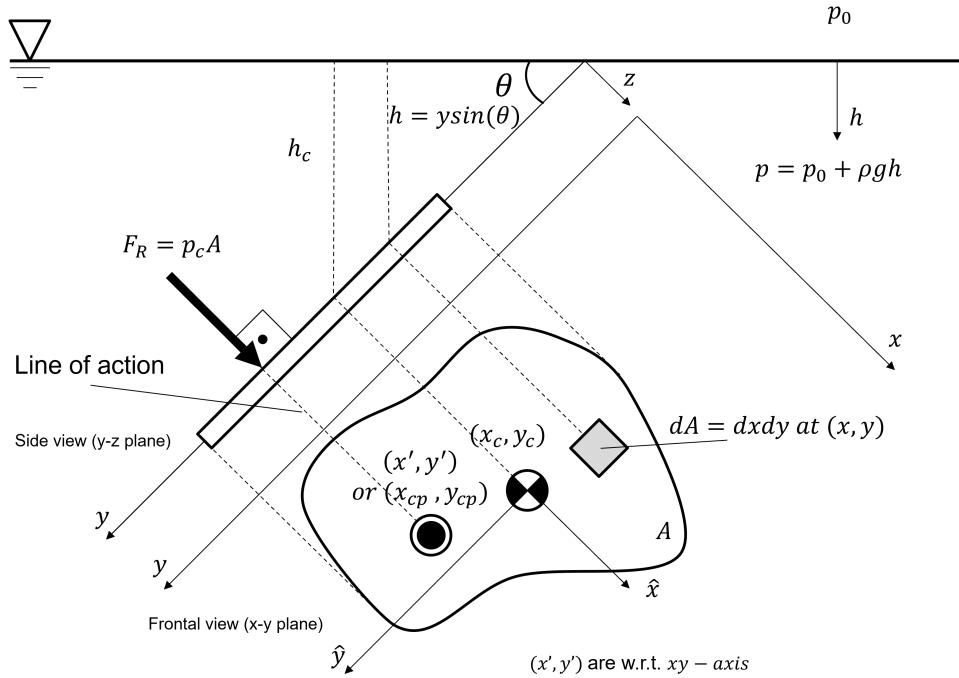


Figure 2.4: Hydrostatische krachten op een ondergedompeld vlak oppervlak.

## 2.3 Krachten op Gekromde Oppervlakken

Voor gekromde oppervlakken (zoals een dam of buis) is directe integratie complex. We gebruiken de componentenmethode:

### 2.3.1 Horizontale Component ( $F_H$ )

De horizontale kracht is gelijk aan de kracht op de **verticale projectie** van het gekromde oppervlak.

$$F_H = \rho g h_{c,proj} A_{proj}$$

Het aangrijppingspunt ligt op het drukpunt van deze projectie.

### 2.3.2 Verticale Component ( $F_V$ )

De verticale kracht is gelijk aan het **gewicht van de vloeistofkolom** (reëel of imaginair) boven het gekromde oppervlak.

$$F_V = \rho g V_{kolom}$$

De werklijn gaat door het zwaartepunt van dit volume.

### 2.3.3 Resultante

De totale kracht is de vectoriële som:

$$F_R = \sqrt{F_H^2 + F_V^2}, \quad \theta = \arctan\left(\frac{F_V}{F_H}\right)$$

**Belangrijk:** Voor een cirkelvormig oppervlak (zoals een cilinder of bol) staat de resultante drukkracht altijd loodrecht op het oppervlak en gaat dus door het krommingsmiddelpunt. Dit maakt momentenberekeningen rond dat punt zeer eenvoudig (arm = 0).

## 2.4 Archimedes' kracht en Drijfvermogen

Het principe van Archimedes stelt dat een ondergedompeld lichaam een opwaartse kracht ondervindt die gelijk is aan het gewicht van de verplaatste vloeistof:

$$F_B = \rho_{vloeistof} g V_{ondergedompeld}$$

## Afleiding voor een rechthoekig blok

Beschouw een rechthoekig blok dat volledig is ondergedompeld in een vloeistof met dichtheid  $\rho$ . Het blok heeft een boven- en ondervlak met oppervlakte  $A$ , en hoogte  $h$ . De druk in een vloeistof neemt toe met de diepte volgens de hydrostatische wet  $p = p_{atm} + \rho g z$ .

- De druk op het bovenvlak (op diepte  $h_1$ ) is  $p_1 = p_{atm} + \rho g h_1$ .
- De druk op het ondervlak (op diepte  $h_2 = h_1 + h$ ) is  $p_2 = p_{atm} + \rho g h_2$ .

De krachten op de verticale zijwanden heffen elkaar op vanwege symmetrie. De netto verticale kracht wordt bepaald door het drukverschil tussen onder- en bovenkant (waarbij de kracht op de onderkant omhoog werkt en op de bovenkant omlaag):

$$\begin{aligned} F_B &= F_{onder} - F_{boven} \\ &= p_2 A - p_1 A \\ &= (p_{atm} + \rho g h_2) A - (p_{atm} + \rho g h_1) A \\ &= \rho g (h_2 - h_1) A \\ &= \rho g h A \end{aligned}$$

Omdat  $V = h \cdot A$  het volume van het blok is, volgt hieruit:

$$F_B = \rho g V$$

Dit bevestigt dat de opwaartse kracht gelijk is aan het gewicht van de verplaatste vloeistof. Deze kracht grijpt aan in het drukkpunt van de verplaatste vloeistof. Voor de stabiliteit van drijvende lichamen is de positie van het metacentrum ten opzichte van het zwaartepunt cruciaal. Als het metacentrum boven het zwaartepunt ligt, ontstaat bij een kleine kanteling een herstellend moment en is het lichaam stabiel.

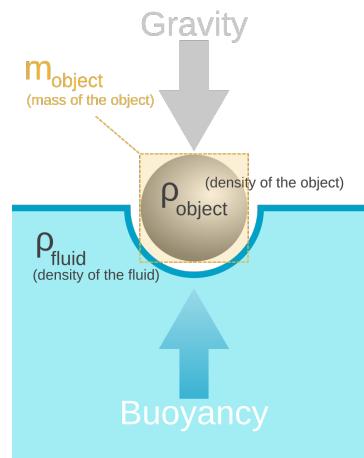


Figure 2.5: Drijfvermogen: opwaartse kracht werkt in het drukkpunt (centrum van opwaartse kracht).

### Voorbeeldoefening: drijfhoogte bepalen

**Gegeven:** Een houten blok met dichtheid  $\rho_{blok} = 650 \text{ kg/m}^3$  drijft in water ( $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ).

**Gevraagd:** Welk deel van het volume is ondergedompeld?

**Oplossing:** In evenwicht:  $\rho_w g V_{onder} = \rho_{blok} g V_{totaal}$ . Dus:

$$\frac{V_{onder}}{V_{totaal}} = \frac{\rho_{blok}}{\rho_w} = \frac{650}{1000} = 0.65$$

Dus het blok is voor  $\boxed{65\%}$  ondergedompeld.

## 3 Kinematica van Stromingen

### 3.1 Euleriaanse Beschrijving

Er bestaan twee fundamentele benaderingen voor het beschrijven van stromingen:

- **Euleriaanse beschrijving:** We beschrijven het snelheidsveld op vaste punten in de ruimte:  $\vec{V}(\vec{x}, t)$ .

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| $\vec{v}$ — snelheidsvector | m/s |
|-----------------------------|-----|

|                                |                  |
|--------------------------------|------------------|
| $\vec{a}$ — versnellingsvector | m/s <sup>2</sup> |
|--------------------------------|------------------|

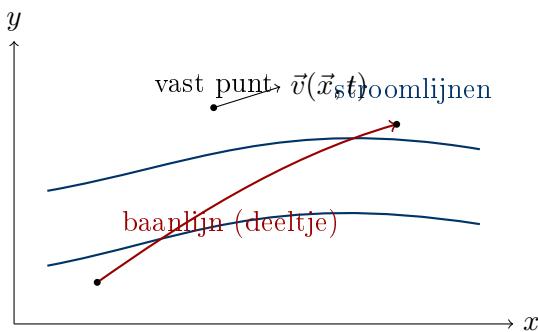


Figure 3.1: Intuïtie: Euleriaans (veld op vaste punten) vs. Lagrangiaans (volg een deeltje).

### 3.2 Materiële Afgeleide

De materiële afgeleide (ook wel substantiële of convectieve afgeleide genoemd) beschrijft de verandering van een grootheid terwijl we met een vloeistofdeeltje meebewegen:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla$$

Hierbij is  $\nabla$  (uitgesproken als 'nabla') de gradiëntoperator. In Cartesische coördinaten is deze vectoroperator gedefinieerd als:

$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix}$$

De term  $\vec{v} \cdot \nabla$  is het inproduct van de snelheidsvector  $\vec{v} = (u, v, w)$  met de gradiënt, wat de convectieve verandering weergeeft.

Uitgeschreven in Cartesische coördinaten wordt de materiële afgeleide:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

De versnelling van een vloeistofdeeltje is dus:

$$\vec{a} = \frac{D\vec{v}}{Dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}$$

waarbij  $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$  de lokale versnelling is en  $(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}$  de convectieve versnelling.

### 3.3 Reynolds Transport Stelling (RTT)

De Reynolds Transport Stelling is de wiskundige brug tussen de systeembenedering (vaste massa) en de controlevolume-benedering (vast gebied). Het stelt ons in staat om behoudswetten voor een systeem om te zetten naar een integraalvorm voor een controlevolume.

$$\frac{dB_{sys}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho b \, dV + \int_{CS} \rho b (\vec{v} \cdot \hat{n}) \, dA$$

Hierbij is  $B$  een extensieve eigenschap (zoals massa  $m$ , impuls  $m\vec{v}$ , of energie  $E$ ) en  $b$  de intensieve eigenschap per massa-eenheid ( $1$ ,  $\vec{v}$ , of  $e$ ).

- De eerste term rechts is de verandering *binnen* het controlevolume (onstationair effect).
- De tweede term is de netto flux *door* het controleoppervlak.

Voor massabehoud ( $B = m, b = 1$ ) leidt dit direct tot de continuïteitsvergelijking.

## 4 Fluïdumdynamica: De Bewegingsvergelijkingen

Wanneer fluïda bewegen, wordt de analyse complexer door de effecten van traagheid, viscositeit en turbulentie.

### 4.1 Behoudswetten en Control Volume Analyse

#### 4.1.1 Continuïteitsvergelijking (Massabehoud)

De wet van behoud van massa stelt dat massa noch gecreëerd noch vernietigd kan worden. Voor een controle volume geldt:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho \, dV + \int_{CS} \rho \vec{v} \cdot \hat{n} \, dA = 0$$

Voor stationaire stroming ( $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ ):

$$\int_{CS} \rho \vec{v} \cdot \hat{n} \, dA = 0 \implies \dot{m}_{in} = \dot{m}_{uit}$$

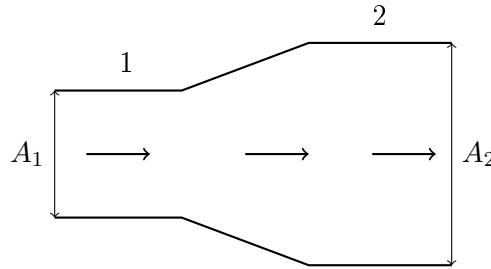
Voor onsamendrukbare stroming ( $\rho = \text{constant}$ ):

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \implies A_1 V_1 = A_2 V_2$$

#### Gravity not included:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 && \text{Continuity} \\ \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial x} \\ \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial y} && \text{Momentum} \\ \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned}$$

Figure 4.1: Illustratie van de continuïteitsvergelijking:  $A_1 V_1 = A_2 V_2$ .



$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \text{ (onsamendrukbaar)}$$

Figure 4.2: Zelfde idee als Fig. 4.1: een vernauwing geeft hogere snelheid bij kleinere doorsnede.

#### 4.1.2 Impulsbehoud (Momentumvergelijking)

Voor een controle volume geldt de impulsvergelijking:

$$\sum \vec{F}_{ext} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho \vec{v} dV + \int_{CS} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \hat{n}) dA$$

Voor stationaire stroming:

$$\sum \vec{F}_{ext} = \int_{CS} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \hat{n}) dA = \dot{m}_{uit} \vec{v}_{uit} - \dot{m}_{in} \vec{v}_{in}$$

De externe krachten omvatten druk-, zwaarte- en wrijvingskrachten.

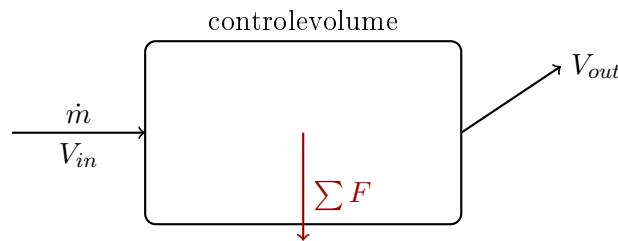


Figure 4.3: Impulsbehoud: krachteresultante hangt samen met de verandering van impulsstroom door het controlevolume.

#### Voorbeeldoefening: straal op een plaat (orde van grootte)

**Gegeven:** Waterstraal met massadebit  $\dot{m} = 4,0 \text{ kg/s}$  wordt idealiter omgebogen van  $V_{in} = 12 \text{ m/s}$  naar stilstand in de  $x$ -richting (dus  $V_{out,x} \approx 0$ ).

**Gevraagd:** Benader de kracht in  $x$ -richting op de plaat.

**Oplossing:** Voor stationair:  $\sum F_x \approx \dot{m}(V_{out,x} - V_{in,x}) \approx 4.0(0 - 12) = -48 \text{ N}$ .

Dus de plaat ondervindt een kracht van 48 N in de stromingsrichting (tegengesteld aan de snelheidsverandering).

## 4.2 Afleiding van de Wet van Bernoulli

#### 4.2.1 Afleiding via Euler Vergelijking

De Euler vergelijking beschrijft de beweging van een ideaal (wrijvingsloos) fluïdum. Voor een stationaire stroming ( $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = 0$ ) luidt deze:

$$\rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \rho \vec{g}$$

Hierin is de term  $(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}$  de convectieve versnelling.

### 4.2.2 Projectie op een Stroomlijn

We vermenigvuldigen elke term van de Euler vergelijking scalair met een infinitesimale verplaatsing  $d\vec{s}$  langs een stroomlijn. Omdat de snelheid  $\vec{v}$  raakt aan de stroomlijn, is  $d\vec{s}$  evenwijdig aan  $\vec{v}$ .

$$\underbrace{\rho[(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v}] \cdot d\vec{s}}_{\text{Traagheidsterm}} = \underbrace{-\nabla p \cdot d\vec{s}}_{\text{Drukterm}} + \underbrace{\rho\vec{g} \cdot d\vec{s}}_{\text{Zwaartekrachterm}}$$

We werken elke term afzonderlijk uit:

- **Drukterm:** De gradiënt  $\nabla p$  is een vector die de richting van de grootste drukverandering aangeeft. Het inproduct met de verplaatsing  $d\vec{s}$  geeft de totale verandering van de druk  $dp$  over die afstand (totale differentiaal):

$$-\nabla p \cdot d\vec{s} = -\left(\frac{\partial p}{\partial x}dx + \frac{\partial p}{\partial y}dy + \frac{\partial p}{\partial z}dz\right) = -dp$$

- **Zwaartekrachterm:** De zwaartekracht werkt verticaal omlaag:  $\vec{g} = -g\hat{k} = (0, 0, -g)$ . De verplaatsing is  $d\vec{s} = (dx, dy, dz)$ . Het inproduct wordt:

$$\rho\vec{g} \cdot d\vec{s} = \rho(0 \cdot dx + 0 \cdot dy - g \cdot dz) = -\rho gdz$$

Dit komt overeen met de verandering in potentiële energie.

- **Traagheidsterm (Convectieve versnelling):** We gebruiken de vectoridentiteit  $(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = \frac{1}{2}\nabla v^2 - \vec{v} \times (\nabla \times \vec{v})$ . Het inproduct met  $d\vec{s}$  wordt:

$$\rho\left(\frac{1}{2}\nabla v^2 - \vec{v} \times (\nabla \times \vec{v})\right) \cdot d\vec{s}$$

Omdat we integreren *langs een stroomlijn*, is  $d\vec{s}$  evenwijdig aan  $\vec{v}$ . Het vectorproduct  $\vec{v} \times (\dots)$  staat loodrecht op  $\vec{v}$  en dus ook loodrecht op  $d\vec{s}$ . Het inproduct van loodrechte vectoren is nul, dus de rotatieterm valt weg.

$$\rho\frac{1}{2}\nabla v^2 \cdot d\vec{s} = \rho d\left(\frac{1}{2}v^2\right) = \rho v dv$$

Invullen van deze termen in de oorspronkelijke vergelijking geeft:

$$\rho v dv = -dp - \rho gdz$$

Herschikken levert de differentiaalvergelijking van Bernoulli:

$$dp + \rho v dv + \rho gdz = 0$$

Voor een onsamendrukbare vloeistof ( $\rho$  is constant) kunnen we integreren tussen twee punten op de stroomlijn:

$$\int dp + \int \rho v dv + \int \rho gdz = \text{constant}$$

Dit levert de wet van Bernoulli:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gz = \text{constant}$$

### 4.2.3 Beperkingen van Bernoulli

De wet van Bernoulli is krachtig maar heeft strikte geldigheidsvoorwaarden. Hij mag enkel gebruikt worden als aan **alle** volgende voorwaarden is voldaan:

1. **Stationaire stroming:** Geen tijdsafhankelijkheid.
2. **Onviskeus:** Geen wrijving (dus niet dicht bij wanden of in lange leidingen).
3. **Onsamendrukbaar:** Dichtheid  $\rho$  is constant.
4. **Langs een stroomlijn:** De constante geldt in principe enkel op één stroomlijn (tenzij de stroming rotatievrij is).

Bij plotse expansies of in lange leidingen is de aannname "onviskeus" fout en moet de algemene energievergelijking met verliestermen gebruikt worden.

### 4.2.4 Interpretatie van de Termen

De wet van Bernoulli drukt behoud van mechanische energie uit per volume-eenheid:

- $p$ : Statische druk (drukenergie per volume)
- $\frac{1}{2}\rho v^2$ : Dynamische druk (kinetische energie per volume)
- $\rho gz$ : Hydrostatische druk (potentiële energie per volume)

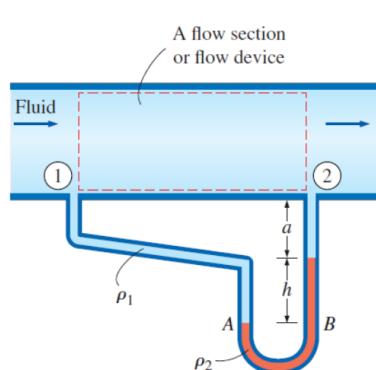
#### Voorbeeld: Wet van Torricelli

**Gegeven:** Een groot open reservoir gevuld met water heeft een klein gaatje op 5 m onder het wateroppervlak. **Gevraagd:** De uitstroomsnelheid  $V_2$ . **Oplossing:** Pas Bernoulli toe tussen het oppervlak (1) en het gaatje (2).  $P_1 = P_2 = P_{atm}$  (beide open aan atmosfeer).  $V_1 \approx 0$  (reservoir is groot).  $z_1 = 5 \text{ m}$ ,  $z_2 = 0 \text{ m}$ .

$$P_{atm} + 0 + \rho g(5) = P_{atm} + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + 0$$

$$\rho g(5) = \frac{1}{2}\rho V_2^2 \implies V_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot 5}$$

$$V_2 = \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 5} = \sqrt{98.1} \approx 9.9 \text{ m/s}$$



**FIGURE 1-58**  
 $= P_1$  Measuring the pressure drop across  
 a flow section or a flow device by a  
 differential manometer.

$$P_1 + \rho_1 g(a + h) - \rho_2 gh - \rho_1 ga = P_2$$

$$P_1 - P_2 = (\rho_2 - \rho_1)gh$$

Figure 4.4: Diagram van de Wet van Bernoulli.

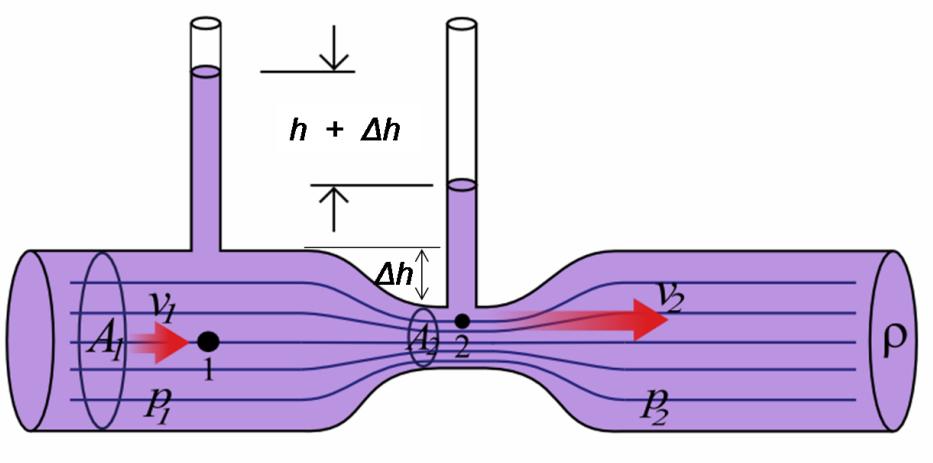


Figure 4.5: Venturi-effect: hogere snelheid in de keel gaat (bij gelijke hoogte) samen met lagere statische druk.

### Voorbeeldoefening: drukdaling in een venturi (Bernoulli + continuïteit)

**Gegeven:** Water stroomt horizontaal door een venturi. Doorsneden:  $A_2 = 0,50A_1$ . Gemeten inlaat-snelheid  $V_1 = 2,0 \text{ m/s}$ .

**Gevraagd:** Benader  $p_1 - p_2$  (verliesloos).

**Oplossing:** Continuïteit:  $A_1V_1 = A_2V_2 \Rightarrow V_2 = \frac{A_1}{A_2}V_1 = 2V_1 = 4,0 \text{ m/s}$ .

Bernoulli (zelfde  $z$ ):  $p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2$ .

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2}\rho (V_2^2 - V_1^2) = \frac{1}{2} \cdot 1000 (16 - 4) = 6000 \text{ Pa}$$

Dus  $p_1 - p_2 \approx 6,0 \text{ kPa}$ .

## 4.3 De Algemene Energievergelijking

In de praktijk is er altijd wrijving en worden pompen of turbines gebruikt. We gebruiken dan de uitgebreide energievergelijking, vaak uitgedrukt in termen van "hoogte" (head, in meters vloeistofkolom):

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2g} + z_1 + h_{pomp} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2g} + z_2 + h_{turbine} + h_L$$

Hierbij vertegenwoordigt  $h_L$  het totaal aan energieverliezen (head loss) door wrijving in leidingen en componenten.

### 4.3.1 Correctiefactoren voor Profielen

In de integrale analyses gebruiken we vaak de gemiddelde snelheid  $\bar{V}$ . Omdat het snelheidsprofiel niet vlak is (bijv. parabolisch bij laminair), moeten we correctiefactoren invoeren:

**Kinetische Energie Correctiefactor ( $\alpha$ ):** De factor  $\alpha$  in de energievergelijking corrigeert voor de niet-uniforme verdeling van kinetische energie.

- Laminair:  $\alpha = 2,0$  (grote correctie!)
- Turbulent:  $\alpha \approx 1,05$  (vaak verwaarloosd als 1)

**Impulsflux Correctiefactor ( $\beta$ ):** Voor de impulsvergelijking geldt analoog:

$$\sum \vec{F} = \sum \beta \dot{m} \vec{V}_{uit} - \sum \beta \dot{m} \vec{V}_{in}$$

- Laminair:  $\beta = 4/3 \approx 1,33$
- Turbulent:  $\beta \approx 1,02$

## 5 Controlevolume Analyse

### 5.1 Controle volume Analyse Stappenplan

#### Behoud van massa

massa in = massa uit

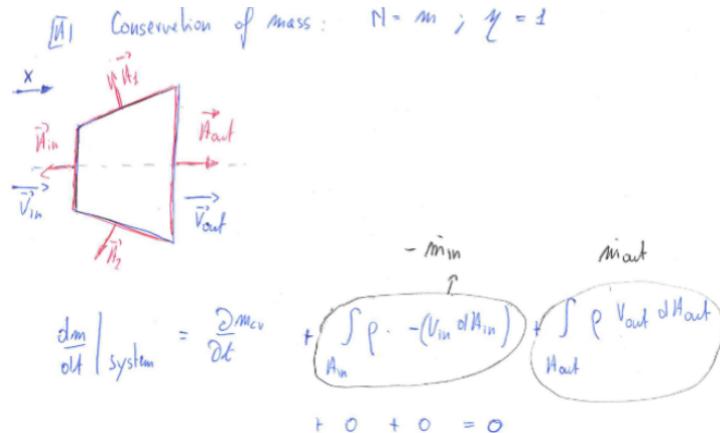


Figure 5.1: Controlevolume voor massabehoud.

#### Behoud van momentum

#### Reynold transport theorema

### 5.2 Interne Stromingen

de invloed van viscositeit op de euler en bernoulli vergelijkingen

$$\begin{aligned} \text{Ideal fluid: } \tau_{yz} &= \tau_{yx} = 0 \quad ; \quad \tau_{yy} = -p \\ \text{Real fluid: } \tau_{yx} &= \mu \left[ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right] \\ \tau_{yz} &= \mu \left[ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right] \\ \tau_{yy} &= -p + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \end{aligned}$$

Equations of motion: Newtonian fluid and incompressible flow

$$(x) \underbrace{p \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right]}_{\text{Euler equations}} = p f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \underbrace{\mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right]}_{\text{viscous forces.}}$$

Figure 5.2: Vergelijkingen voor viskeuze vloeistoffen.

De Navier-Stokes vergelijkingen zijn de fundamentele bewegingsvergelijkingen voor viskeuze vloeistoffen. Ze zijn een uitbreiding van de Euler vergelijking (die wrijving verwaarloost) door toevoeging van viskeuze krachten.

### 5.2.1 Newton's Tweede Wet voor een Fluïdumdeeltje

We vertrekken opnieuw van de tweede wet van Newton ( $\vec{F} = m\vec{a}$ ) toegepast op een infinitesimaal fluïdumdeeltje met volume  $dV$  en massa  $dm = \rho dV$ .

$$\rho dV \frac{D\vec{v}}{Dt} = \sum \vec{F}_{ext}$$

Hierin is  $\frac{D\vec{v}}{Dt}$  de materiële afgeleide (totale versnelling), die bestaat uit de lokale versnelling en de convectieve versnelling:

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = \underbrace{\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}}_{\text{lokaal}} + \underbrace{(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}}_{\text{convectief}}$$

### 5.2.2 Krachtenbalans

De krachten die op het deeltje werken kunnen worden onderverdeeld in lichaamskrachten en oppervlaktekrachten:

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{F}_{zwaartekracht} + \vec{F}_{druk} + \vec{F}_{viskeus}$$

- **Zwaartekracht:** Werkt op de massa van het deeltje.

$$\vec{F}_{zwaartekracht} = \rho \vec{g} dV$$

- **Drukkrachten:** Netto kracht door drukverschillen op de oppervlakken (normaalspanningen). Zoals eerder afgeleid bij Euler:

$$\vec{F}_{druk} = -\nabla p dV$$

- **Viskeuze krachten (Stroperigheid):** In een reëel fluïdum ontstaan er schuifspanningen door snelheidsgradiënten. Voor een *Newtoniaans fluïdum* is de schuifspanning evenredig met de vervormingssnelheid. De evenredigheidsconstante is de dynamische viscositeit  $\mu$ .

De netto viskeuze kracht per volume-eenheid is de divergentie van de viskeuze spanningstensor. Voor een onsamendrukbaar stroming ( $\nabla \cdot \vec{v} = 0$ ) vereenvoudigt dit tot:

$$\vec{F}_{viskeus} = \mu \nabla^2 \vec{v} dV$$

Hierin is  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  de Laplace-operator. Deze term represeneert de diffusie van impuls door wrijving.

### 5.2.3 De Navier-Stokes Vergelijking

Door alle termen in te vullen en te delen door het volume  $dV$ , verkrijgen we de Navier-Stokes vergelijking voor een onsamendrukbaar, Newtoniaans fluïdum:

$$\underbrace{\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right)}_{\text{Traagheidskrachten}} = \underbrace{-\nabla p}_{\text{Drukkrachten}} + \underbrace{\mu \nabla^2 \vec{v}}_{\text{Viskeuze krachten}} + \underbrace{\rho \vec{g}}_{\text{Zwaartekracht}}$$

Dit is een vectorvergelijking. In componentvorm (bijvoorbeeld de x-richting) ziet dit er als volgt uit:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x$$

Vergelijkbare vergelijkingen gelden voor de y- en z-richtingen. Samen met de continuïteitsvergelijking ( $\nabla \cdot \vec{v} = 0$ ) vormen deze een gesloten stelsel om het stromingsveld te beschrijven.

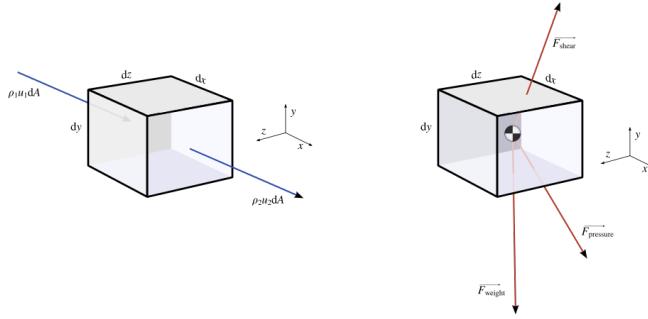


Figure 5.3: Controlevolume voor de afleiding van behoudswetten.

### 5.3 Oplossing: Stroming tussen Parallelle Platen (Poiseuille)

**Probleemstelling:** Stationaire, volledig ontwikkelde stroming tussen twee parallelle platen op afstand  $a$  van elkaar met een van de platen die beweegt.

Figure 5.4: Snelheidsprofiel voor laminaire stroming tussen parallelle platen.

**Aannames:**

- Stationair:  $\frac{\partial}{\partial t} = 0$
- 2D stroming:  $w = 0$
- Geen verandering in x-richting:  $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$
- Snelheid alleen in x-richting:  $v = 0$

**Continuïteitsvergelijking:**

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \Rightarrow u = u(y)$$

**Navier-Stokes in x-richting:**

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

**Navier-Stokes in y-richting:**

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial y} \Rightarrow p = p(x)$$

Omdat  $\frac{\partial p}{\partial x}$  niet afhangt van  $y$ , en  $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$  niet afhangt van  $x$ , moet:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \text{constant}$$

**Integratie:**

$$\frac{d^2 u}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}$$

Eerste integratie:

$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} y + C_1$$

Tweede integratie:

$$u(y) = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} y^2 + C_1 y + C_2$$

### Randvoorwaarden:

- Bij  $y = 0$ :  $u(0) = 0$  (no-slip conditie)
- Bij  $y = a$ :  $u(a) = U_p$  (snelheid van bovenste plaat)

### Toepassing van randvoorwaarden:

$$C_2 = 0$$

$$C_1 = \frac{U_p}{a} - \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} a$$

### Oplossing:

$$u(y) = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} y^2 + \left( \frac{U_p}{a} - \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} a \right) y$$

### Visuele weergave van het snelheidsprofiel:

Voor vaste platen ( $U_p = 0$ ) wordt dit:

$$u(y) = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (y^2 - ay)$$

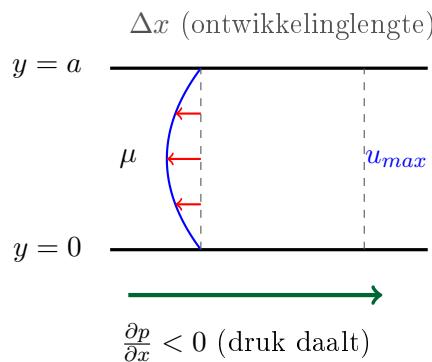


Figure 5.5: Snelheidsprofiel voor Couette-Poiseuille stroming tussen vaste platen. De parabolische curve toont hoe de snelheid van nul aan de wand tot het maximum in het midden stijgt.

### Karakteristieken van het profiel:

- **No-slip voorwaarde:** Snelheid is nul aan beide wanden ( $u(0) = u(a) = 0$ )
- **Maximale snelheid:** Optreedt in het midden:  $u_{max} = -\frac{1}{8\mu} \frac{\partial p}{\partial x} a^2$
- **Parabolische vorm:** Rechtstreeks gevolg van lineaire visceuze spanningen
- **Volumedebiet:**  $Q = -\frac{a^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x}$  (geïntegreerd over diepte)

## 5.4 Wet van Poiseuille voor Cilindrische Buis

Voor stroming in een cilinder met straal  $R$  geldt in cilindercoördinaten:

$$u(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (R^2 - r^2)$$

**Visuele weergave van het axiaal snelheidsprofiel:**

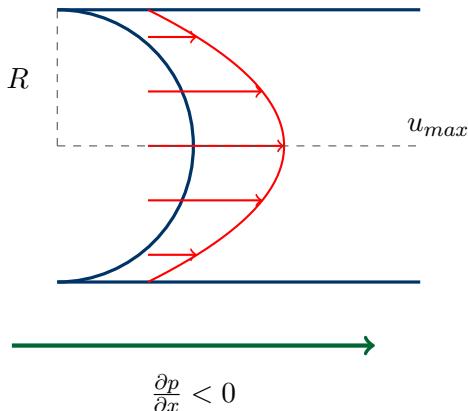


Figure 5.6: Parabolisch snelheidsprofiel in een cilindrische buis. Dwarsdoorsnede toont de karakteristieke paraboloïde vorm met maximale snelheid in het centrum.

Het volumedebiet is:

$$Q = \int_0^R u(r) 2\pi r dr = -\frac{\pi}{8\mu} \frac{\partial p}{\partial x} R^4$$

Met  $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_2 - p_1}{L} = -\frac{\Delta p}{L}$ :

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\mu L}$$

Dit is de **wet van Hagen-Poiseuille**.

**Belangrijke observaties:**

- Het debiet is proportioneel aan  $R^4$  (zeer gevoelig voor diameter!)
- Het debiet is omgekeerd evenredig met viscositeit  $\mu$  en buislengte  $L$
- Een kleine vernauwing reduceert het debiet drastisch (praktisch belangrijk voor medische toepassingen)

**Voorbeeld: Drukval in een leiding**

**Gegeven:** Olie ( $\mu = 0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ) stroomt door een horizontale buis met diameter  $D = 2 \text{ cm}$  en lengte  $L = 10 \text{ m}$ . Het debiet is  $Q = 0.5 \text{ liter/s} = 0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$ . **Gevraagd:** Het drukverschil  $\Delta p$ .

**Oplossing:** Straal  $R = 0.01 \text{ m}$ .

$$\Delta p = \frac{8\mu L Q}{\pi R^4}$$

$$\Delta p = \frac{8 \cdot 0.2 \cdot 10 \cdot 0.0005}{\pi \cdot (0.01)^4}$$

$$\Delta p = \frac{0.008}{\pi \cdot 10^{-8}} \approx 254648 \text{ Pa} \approx 2.55 \text{ bar}$$

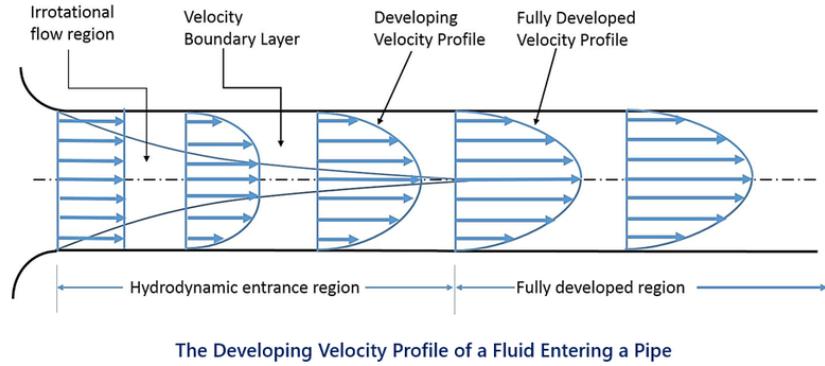


Figure 5.7: Parabolisch snelheidsprofiel bij Hagen-Poiseuille stroming in een buis.

## 6 Interne en Externe Stroming

### 6.1 Interne Stroming: Laminair vs. Turbulent

#### 6.1.1 Reynolds Getal

Het Reynolds getal is een dimensieloze parameter die de verhouding tussen traagheids of inertiekrachten en viskeuze krachten aangeeft (intertiekraft/viscositeitskrachten):

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

waarbij:

- $V$ : karakteristieke snelheid [m/s]
- $D$ : karakteristieke lengte (bijv. diameter) [m]
- $\rho$ : dichtheid [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $\mu$ : dynamische viscositeit [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]
- $\nu$ : kinematische viscositeit [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$Re$  — Reynoldsgetal

$D$  — karakteristieke lengte (bijv. diameter)

m

#### 6.1.2 Overgang Laminair-Turbulent

Voor stroming in een cilinderbuiss:

- **Laminair ( $Re < 2000$ ):** De vloeistof stroomt in ordelijke, parallelle lagen. Viscositeit domineert en verstoringen worden uitgedempt. Het snelheidsprofiel is parabolisch ( $V_{max} = 2V_{gem}$ ).
- **Transitiegebied ( $2000 < Re < 3000$ ):** De stroming wisselt tussen laminair en turbulent.
- **Turbulent ( $Re > 3000$ ):** De stroming is chaotisch met wervelingen en sterke menging. Traagheidskrachten domineren. Het snelheidsprofiel is veel vlakker ("plug flow").

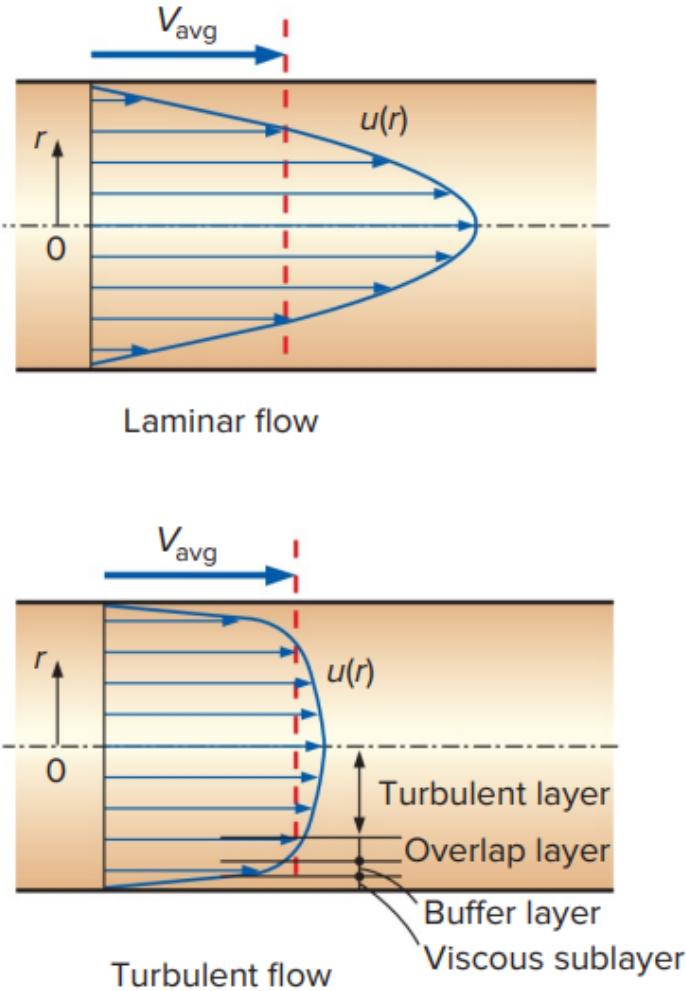


Figure 6.1: Visuele weergave van laminaire (boven) en turbulente (onder) stroming, zoals zichtbaar gemaakt met kleurstofinjectie (Osborne Reynolds experiment).

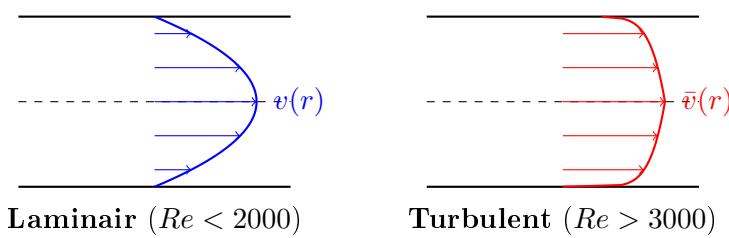


Figure 6.2: Vergelijking van snelheidsprofielen: Laminair (parabolisch) vs. Turbulent (vlakker profiel).

### Voorbeeld: Reynoldsgetal bepalen

**Gegeven:** Water ( $20^\circ C$ ,  $\nu = 10^{-6} m^2/s$ ) stroomt door een buis met diameter  $50 mm$  met een gemiddelde snelheid van  $0.1 m/s$ . **Gevraagd:** Is de stroming laminair of turbulent? **Oplossing:**

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{0.1 \cdot 0.05}{10^{-6}} = \frac{0.005}{10^{-6}} = 5000$$

Omdat  $Re = 5000 > 3000$ , is de stroming **turbulent**.

### 6.1.3 Reynolds Decompositie

In turbulente stroming wordt de momentane snelheid ontbonden in een tijdsgemiddelde en een fluctuerende component:

$$u(t, y) = \bar{u}(y) + u'(t, y)$$

waarbij  $\bar{u}(y)$  de tijdsgemiddelde snelheid is en  $u'(t, y)$  de turbulente fluctuatie (met  $\bar{u}' = 0$ ). De turbulente fluctuaties veroorzaken een extra schijnbare schuifspanning, de Reynoldsspanning:  $\tau_{Reynolds} = -\rho \bar{u}' v'$ . Deze verhoogt de effectieve wrijving in turbulente stroming aanzienlijk.

Dit verklaart ook de bollere vorm van de snelheidsprofielen in turbulente stroming, omdat de Reynoldsspanningen de snelheid dichter bij de wanden verhogen.

### 6.1.4 Wrijvingsfactor en Drukval

Het energieverlies door wrijving in een rechte leiding resulteert in een drukval  $\Delta p$ . Deze wordt berekend met de **Darcy-Weisbach vergelijking**:

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2$$

Of uitgedrukt als wrijvingshoopte (head loss):

$$h_f = \frac{\Delta p}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Hierin is:

- $f$ : de Darcy-wrijvingsfactor (dimensieloos)
- $L$ : lengte van de leiding [m]
- $D$ : diameter van de leiding [m]
- $V$ : gemiddelde stroomsnelheid [m/s]

#### Bepaling van de Wrijvingsfactor $f$

De waarde van  $f$  hangt af van het stromingsregime (Reynoldsgetal) en de wandruwheid.

**1. Laminaire stroming ( $Re < 2000$ ):** Bij laminaire stroming wordt de wrijving puur bepaald door viskeuze krachten en is de wandruwheid verwaarloosbaar. De factor  $f$  volgt uit een exacte analytische oplossing (Hagen-Poiseuille):

$$f = \frac{64}{Re}$$

**2. Turbulente stroming ( $Re > 3000$ ):** Bij turbulente stroming spelen zowel de viskeuze sublaag als de wandruwheid een rol. De wrijvingsfactor hangt af van:

- Het Reynoldsgetal  $Re$
- De relatieve wandruwheid  $\varepsilon/D$  (waarbij  $\varepsilon$  de gemiddelde ruwheidshoogte is)

De waarde van  $f$  kan worden afgelezen uit het **Moody-diagram** (Figuur 6.3) of berekend met de impliciete **Colebrook-vergelijking**:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Voor handberekeningen is de **Haaland-benadering** (expliciet) vaak nauwkeurig genoeg:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \approx -1.8 \log_{10} \left( \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right)$$

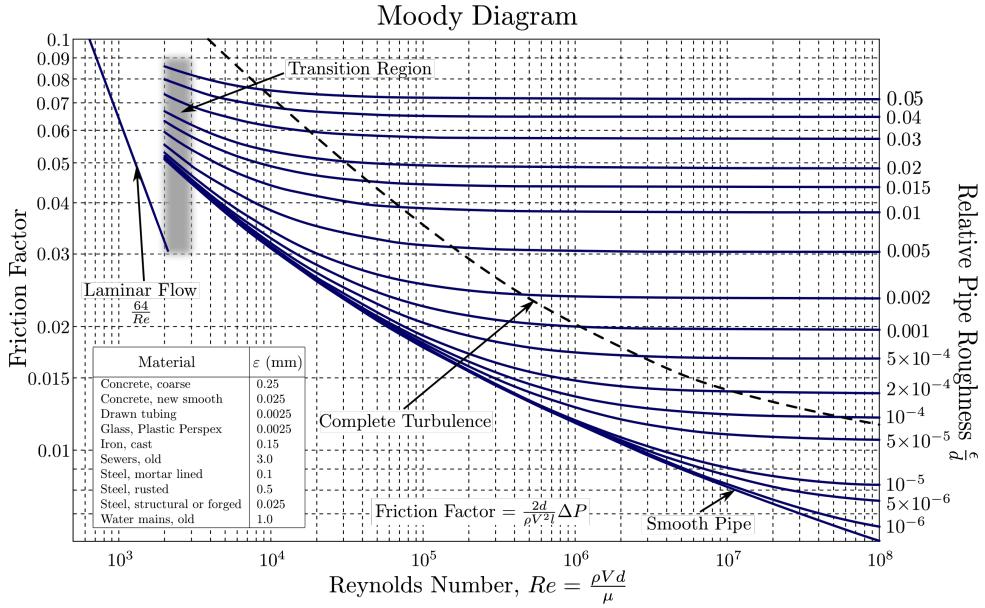


Figure 6.3: Moody-diagram:  $f$  als functie van  $Re$  en relatieve ruwheid  $\varepsilon/D$ .

### Voorbeeldoefening: Drukverlies in een waterleiding

**Gegeven:** Water ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) stroomt door een horizontale stalen buis ( $\varepsilon = 0.045 \text{ mm}$ ) met een diameter  $D = 50 \text{ mm}$  en lengte  $L = 20 \text{ m}$ . De snelheid is  $V = 4.0 \text{ m/s}$ .

**Gevraagd:** Bereken de drukval  $\Delta p$  over de leiding.

**Oplossing:**

#### 1. Bereken Reynoldsgetal:

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{4.0 \cdot 0.050}{10^{-6}} = 200\,000$$

Dit is  $> 3000$ , dus de stroming is **turbulent**.

#### 2. Bepaal relatieve ruwheid:

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.045 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} = 0.0009$$

#### 3. Bepaal wrijvingsfactor $f$ :

Via Moody-diagram bij  $Re = 2 \cdot 10^5$  en  $\varepsilon/D = 0.0009$  vinden we  $f \approx 0.021$ . (Of via Haaland formule:  $f \approx 0.0208$ ).

#### 4. Bereken drukval:

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2 = 0.021 \cdot \frac{20}{0.050} \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot (4.0)^2$$

$$\Delta p = 0.021 \cdot 400 \cdot 8000 = 67\,200 \text{ Pa}$$

De drukval is dus **67.2 kPa**.

### 6.1.5 Major en Minor Losses

In leidingsystemen wordt het totale energieverlies (head loss,  $h_L$ ) onderverdeeld in twee categorieën:

### Major Losses (Wrijvingsverliezen)

Dit zijn de verliezen door viskeuze wrijving in de rechte stukken leiding. Zoals eerder besproken worden deze berekend met Darcy-Weisbach:

$$h_{major} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Hoewel ze "major" heten, zijn ze niet altijd de grootste verliezen; de naam verwijst naar het feit dat ze over de hele lengte optreden.

### Minor Losses (Lokale Verliezen)

Dit zijn verliezen die optreden bij componenten zoals bochten, afsluiters, vernauwingen, verwijdingen en in- of uitlaten. Deze verliezen worden veroorzaakt door stroomloslating en wervelingen die energie dissiperen.

$$h_{minor} = K_L \frac{V^2}{2g}$$

Hierin is  $K_L$  de verliescoëfficiënt (loss coefficient), die afhangt van de geometrie van de component. Enkele typische waarden voor  $K_L$ :

- Scherpe inlaat:  $K_L \approx 0.5$
- Afgeronde inlaat:  $K_L \approx 0.04$
- Uitlaat (in reservoir):  $K_L = 1.0$  (alle kinetische energie gaat verloren)
- $90^\circ$  bocht (standaard):  $K_L \approx 0.3 - 0.9$
- Volledig open bokkraan:  $K_L \approx 10$

Soms wordt ook de equivalente lengte  $L_{eq}$  gebruikt:  $h_{minor} = f \frac{L_{eq}}{D} \frac{V^2}{2g}$ .

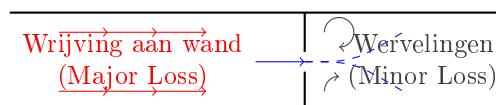


Figure 6.4: Illustratie van Major Losses (wandwrijving) en Minor Losses (wervelingen door obstructies).

### Total Head Loss

Het totale verlies is de som van alle major en minor losses in het systeem:

$$h_{L,totaal} = \sum h_{major} + \sum h_{minor} = \sum f_i \frac{L_i}{D_i} \frac{V_i^2}{2g} + \sum K_{L,j} \frac{V_j^2}{2g}$$

Als de diameter (en dus snelheid  $V$ ) constant is over het hele systeem, kan dit vereenvoudigd worden tot:

$$h_{L,totaal} = \left( f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V^2}{2g}$$

### Voorbeeldoefening: Leidingsysteem met verliezen

**Gegeven:** Water stroomt uit een groot reservoir door een horizontale pijp ( $D = 10 \text{ cm}$ ,  $L = 50 \text{ m}$ ,  $f = 0.02$ ) naar de atmosfeer. Het systeem bevat:

- Een scherpe inlaat ( $K_L = 0.5$ )
- Twee  $90^\circ$  bochten ( $K_L = 0.3$  elk)
- Een volledig open afsluiter ( $K_L = 0.2$ )

Het water niveau in het reservoir staat  $H = 10 \text{ m}$  boven de uitlaat.

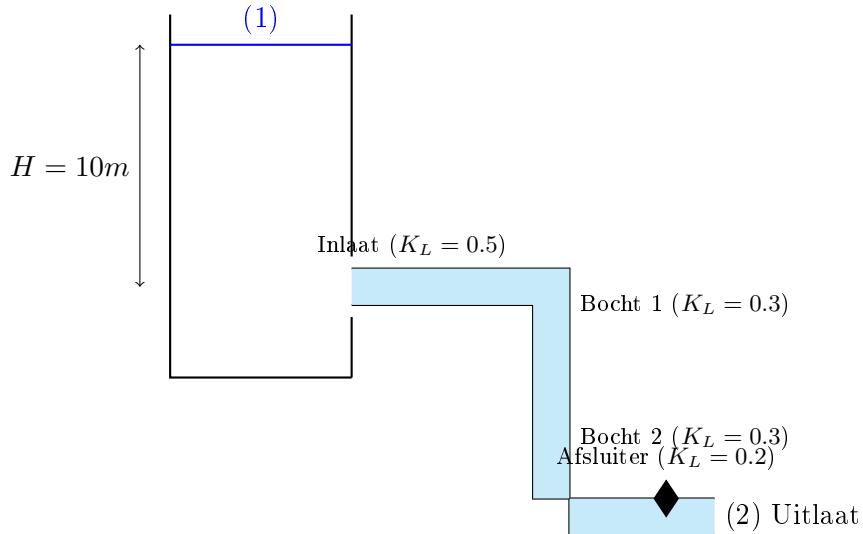


Figure 6.5: Schematische voorstelling van het leidingsysteem uit de oefening.

**Gevraagd:** Het debiet  $Q$ .

**Oplossing:** We passen de uitgebreide Bernoulli-vergelijking toe tussen het oppervlak van het reservoir (1) en de uitlaat (2):

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L$$

- $p_1 = p_2 = p_{atm}$  (beide open aan atmosfeer)  $\rightarrow$  vallen weg.
- $V_1 \approx 0$  (groot reservoir).
- $z_1 - z_2 = H = 10 \text{ m}$ .

De vergelijking wordt:

$$H = \frac{V_2^2}{2g} + h_L$$

Het totale verlies is:

$$h_L = \left( f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V_2^2}{2g}$$

Waarbij  $\sum K_L = K_{inlaat} + 2 \cdot K_{bocht} + K_{afsluiter} = 0.5 + 2(0.3) + 0.2 = 1.3$ . Invullen:

$$10 = \frac{V_2^2}{2g} + \left( 0.02 \frac{50}{0.10} + 1.3 \right) \frac{V_2^2}{2g}$$

$$10 = \frac{V_2^2}{2g} (1 + 0.02 \cdot 500 + 1.3) = \frac{V_2^2}{2g} (1 + 10 + 1.3) = \frac{V_2^2}{2g} (12.3)$$

$$V_2^2 = \frac{10 \cdot 2 \cdot 9.81}{12.3} = \frac{196.2}{12.3} \approx 15.95$$

$$V_2 = \sqrt{15.95} \approx 3.99 \text{ m/s}$$

Het debiet is  $Q = V_2 \cdot A = 3.99 \cdot \frac{\pi}{4}(0.10)^2 = 3.99 \cdot 0.007854 \approx 0.0313 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dus  $Q \approx 31.3 \text{ L/s}$ .

### 6.1.6 Leidingsystemen: Serie en Parallel

Net als in elektrische circuits gelden er regels voor complexe leidingsystemen:

#### Serieschakeling:

- Het debiet is overal gelijk:  $Q_1 = Q_2 = Q_{totaal}$ .
- De verliezen tellen op:  $h_{L,totaal} = h_{L,1} + h_{L,2} + \dots$

#### Parallelschakeling:

- Het drukverschil (en dus head loss) over elke tak is gelijk:  $h_{L,1} = h_{L,2} = \Delta p / \rho g$ .
- De debieten tellen op:  $Q_{totaal} = Q_1 + Q_2 + \dots$

Dit betekent dat voor twee parallelle leidingen geldt:

$$\left( f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \right)_1 = \left( f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \right)_2$$

Dit stelt ons in staat de verhouding van snelheden (en debieten) te bepalen.

### 6.1.7 Iteratieve Oplossingsmethoden (Type 2 Problemen)

Bij veel ontwerpproblemen is de diameter en het drukverschil gegeven, maar is het debiet  $Q$  (en dus snelheid  $V$ ) onbekend. Omdat de wrijvingsfactor  $f$  afhangt van het Reynoldsgetal ( $Re = VD/\nu$ ), en  $Re$  afhangt van  $V$ , is dit een impliciet probleem.

#### Stappenplan:

1. **Schat een waarde voor  $f$ :** Een goede startwaarde is de volledig turbulente waarde (rechts in Moody-diagram), die enkel afhangt van  $\epsilon/D$ .
2. **Bereken  $V$ :** Gebruik de energievergelijking met de geschatte  $f$  om  $V$  te vinden.
3. **Bereken  $Re$ :**  $Re = VD/\nu$ .
4. **Update  $f$ :** Gebruik het nieuwe Reynoldsgetal en het Moody-diagram (of Colebrook/Haaland) om een betere waarde voor  $f$  te vinden.
5. **Herhaal:** Ga terug naar stap 2 met de nieuwe  $f$  tot de waarde niet meer verandert (convergentie).

## 6.2 Externe Stroming: Weerstand en Lift

Bij externe stroming beweegt een fluïdum rondom een object (of beweegt een object door een stilstaand fluïdum). De krachten die het fluïdum op het object uitoefent, worden ontbonden in twee componenten:

- **Weerstand (Drag,  $F_D$ ):** De krachtcomponent evenwijdig aan de stromingsrichting (remmend).
- **Lift ( $F_L$ ):** De krachtcomponent loodrecht op de stromingsrichting.

### 6.2.1 Drukgradienten

Drukgradienten ontstaan door veranderingen in de stromingssnelheid rond een object, volgens Bernoulli's principe. Hogere snelheden leiden tot lagere drukken en vice versa. Dit resulteert in krachten op het object. Deze drukverschillen zijn de oorzaak van zowel lift als weerstand.

Hieronder zijn voorbeelden van drukvelden rond een object weergegeven:

*[Figuur: Drukvelden rond een object in stroming. Blauwe gebieden geven lage druk aan (hoge snelheid), rode gebieden hoge druk (lage snelheid).]*

Figure 6.6: Voorbeeld van drukvelden rond een object in stroming.

*[Figuur: Stroomlijnen rond een bol in stroming. Let op de versnelde stroming aan de zijkanten en de vertraagde stroming aan de voorkant en achterkant.]*

Figure 6.7: Stroomlijnen rond een bol in stroming.

Hoe abrupter de stroming verandert (bijv. bij stompe voorwerpen), hoe groter de drukverschillen en dus de krachten.

### 6.2.2 Weerstand (Drag)

De totale weerstands kracht wordt gegeven door:

$$F_D = C_D A \frac{1}{2} \rho V^2$$

Hierin is:

- $C_D$ : de weerstandscoëfficiënt (dimensieloos, experimenteel bepaald).
- $A$ : het frontaal oppervlak (geprojecteerd oppervlak loodrecht op de stroming).
- $\rho$ : de dichtheid van het fluïdum.
- $V$ : de relatieve snelheid.

De weerstand bestaat uit twee bijdragen:

1. **Wrijvingsweerstand:** Veroorzaakt door schuifspanningen aan het oppervlak (viscositeit). Dominant bij slanke, gestroomlijnde lichamen (zoals een vliegtuigvleugel).
2. **Drukweerstand (Vormweerstand):** Veroorzaakt door drukverschillen. Aan de voorkant is de druk hoog (stuw punt), aan de achterkant laag, vooral als de stroming loslaat (*flow separation*) en een turbulent zog vormt. Dominant bij stompe voorwerpen (zoals een bal of vrachtwagen).

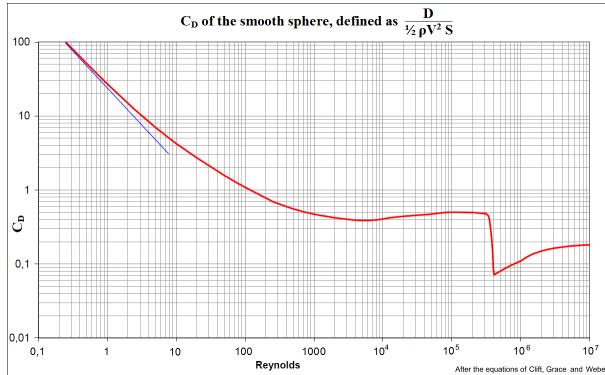


Figure 6.8: Weerstandscoëfficiënt van een bol als functie van het Reynoldsgetal. Merk de plotse daling op bij  $Re \approx 3 \cdot 10^5$  (overgang naar turbulente grenslaag, waardoor loslating wordt uitgesteld).

Als je vliegtuigen bouwt wil je dat  $C_L$  zo groot mogelijk is en dat  $C_D$  zo klein mogelijk is.

### Voorbeeldoefening: Weerstand op een auto

**Gegeven:** Een auto met frontaal oppervlak  $A = 2.4 m^2$  en  $C_D = 0.30$  rijdt met  $108 km/u$  door lucht ( $\rho = 1.2 kg/m^3$ ).

**Gevraagd:** Het vermogen nodig om de luchtweerstand te overwinnen.

**Oplossing:**

1. Zet snelheid om naar m/s:  $V = 108/3.6 = 30 m/s$ .

2. Bereken de weerstandskracht:

$$F_D = C_D A \frac{1}{2} \rho V^2 = 0.30 \cdot 2.4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.2 \cdot (30)^2 = 0.30 \cdot 2.4 \cdot 0.6 \cdot 900 = 388.8 N$$

3. Bereken het vermogen ( $P = F \cdot V$ ):

$$P = F_D \cdot V = 388.8 N \cdot 30 m/s = 11664 W \approx 11.7 kW$$

Het benodigde vermogen is  $11.7 kW$ .

### 6.2.3 Lift

Lift wordt gegenereerd door een asymmetrische stroming rond een lichaam, waardoor de druk aan de ene kant lager is dan aan de andere kant (Bernoulli: hogere snelheid = lagere druk).

$$F_L = C_L A \frac{1}{2} \rho V^2$$

Hier is  $A$  meestal het *planform area* (bovenaanzicht oppervlak) bij vleugels, niet het frontaal oppervlak.

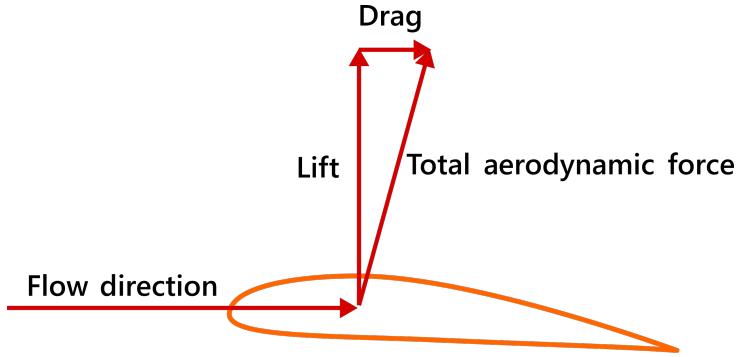


Figure 6.9: Lift- en weerstandskrachten op een vleugelprofiel.

### Voorbeeldoefening: Opstijgend vliegtuig

**Gegeven:** Een vliegtuigje (massa  $1500 \text{ kg}$ ) moet opstijgen. Vleugeloppervlak  $A = 20 \text{ m}^2$ . Maximale liftcoëfficiënt  $C_{L,max} = 1.5$ . Luchtdichtheid  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ .

**Gevraagd:** De minimale opstijgsnelheid (stall speed).

**Opplossing:** Om op te stijgen moet de liftkracht gelijk zijn aan het gewicht ( $F_L = m \cdot g$ ).

$$mg = C_{L,max} A \frac{1}{2} \rho V_{min}^2$$

Herschrijven voor  $V_{min}$ :

$$V_{min} = \sqrt{\frac{2mg}{C_{L,max}\rho A}}$$

Invullen:

$$V_{min} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1500 \cdot 9.81}{1.5 \cdot 1.2 \cdot 20}} = \sqrt{\frac{29430}{36}} = \sqrt{817.5} \approx 28.6 \text{ m/s}$$

De minimale snelheid is  $28.6 \text{ m/s}$  (ongeveer  $103 \text{ km/u}$ ).

## 6.3 Extra oefeningen: Interne en Externe Stroming

In deze oefenzitting behandelen we vraagstukken over drukverliezen in leidingsystemen (interne stroming) en krachten op objecten in een stroming (externe stroming).

### 6.3.1 Oefening 1: Drukverlies in een Leidingsysteem

**Probleemstelling:** Water stroomt door een horizontale stalen leiding met een diameter  $D = 0.1 \text{ m}$  en een lengte  $L = 50 \text{ m}$ . De stroomsnelheid is  $v = 2 \text{ m/s}$ . Het leidingsysteem bevat de volgende componenten:

- Twee  $90^\circ$  bochten ( $K_{bocht} = 0.3$  elk).
- Een volledig open schuifafsluiter ( $K_{afsluiter} = 0.2$ ).

De Darcy-wrijvingsfactor is gegeven als  $f = 0.02$ . Bereken het totale energieverlies (head loss,  $h_L$ ) in meters vloeistofkolom.

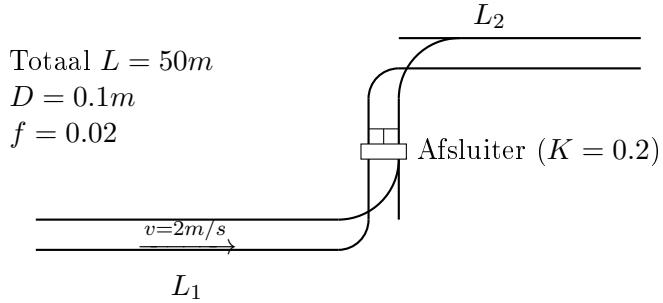


Figure 6.10: Schematische weergave van het leidingsysteem.

**Oplossing:**

1. Bereken de snelheidshoogte (Velocity Head):

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{2^2}{2 \cdot 9.81} = \frac{4}{19.62} \approx 0.204 \text{ m}$$

2. Bereken Major Losses (Wrijving):

$$h_{major} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = 0.02 \cdot \frac{50}{0.1} \cdot 0.204$$

$$h_{major} = 0.02 \cdot 500 \cdot 0.204 = 10 \cdot 0.204 = 2.04 \text{ m}$$

3. Bereken Minor Losses (Componenten): De som van de verliescoëfficiënten is:

$$\sum K = 2 \cdot K_{bocht} + K_{afsluiter} = 2(0.3) + 0.2 = 0.8$$

Het verlies is:

$$h_{minor} = \sum K \frac{v^2}{2g} = 0.8 \cdot 0.204 \approx 0.163 \text{ m}$$

4. Totale Head Loss:

$$h_L = h_{major} + h_{minor} = 2.04 + 0.163 = 2.203 \text{ m}$$

Het totale energieverlies is 2.20 m.

### 6.3.2 Oefening 2: Luchtweerstand op een Auto

**Probleemstelling:** Een auto rijdt met een snelheid van  $108 \text{ km/u}$ . De auto heeft een frontaal oppervlak  $A = 2.5 \text{ m}^2$  en een weerstandscoëfficiënt  $C_D = 0.3$ . De luchtdichtheid is  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ . Bereken de luchtweerstandskracht die op de auto werkt.

**Oplossing:**

1. Converteer snelheid naar m/s:

$$v = \frac{108}{3.6} = 30 \text{ m/s}$$

2. Bereken de weerstandskracht:

$$F_D = C_D A \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$F_D = 0.3 \cdot 2.5 \cdot 0.5 \cdot 1.2 \cdot (30)^2$$

$$F_D = 0.75 \cdot 0.6 \cdot 900 = 0.45 \cdot 900 = 405 \text{ N}$$

De weerstandskracht is 405 N.

### 6.3.3 Oefening 3: Liftkracht op een Vleugel

**Probleemstelling:** Een klein vliegtuig vliegt op zeeniveau ( $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ) met een snelheid van  $60 \text{ m/s}$ . De vleugel heeft een oppervlak van  $15 \text{ m}^2$  en de liftcoëfficiënt bij deze invalshoek is  $C_L = 0.5$ . Bereken de gegenereerde liftkracht.

**Oplossing:**

1. Pas de liftformule toe:

$$F_L = C_L A \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$F_L = 0.5 \cdot 15 \cdot 0.5 \cdot 1.225 \cdot (60)^2$$

$$F_L = 7.5 \cdot 0.6125 \cdot 3600$$

$$F_L = 4.59375 \cdot 3600 \approx 16537.5 \text{ N}$$

De liftkracht is  $16.5 \text{ kN}$ .

### 6.3.4 Oefening 4: Reynoldsgetal en Stromingsregime

**Probleemstelling:** Olie met kinematische viscositeit  $\nu = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  en dichtheid  $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$  stroomt door een buis met diameter  $D = 25 \text{ mm}$ . Bereken het Reynoldsgetal voor volumedebieten van  $5$ ,  $20$  en  $100 \text{ L/min}$  en bepaal voor elk geval of de stroming laminair, transitie of turbulent is.

**Oplossing:** Eerst berekenen we de stroomsnelheden voor elk debiet. Het volumedebiet  $Q$  is gerelateerd aan de snelheid via  $Q = V \cdot A = V \cdot \frac{\pi D^2}{4}$ .

Voor  $Q = 5 \text{ L/min} = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ :

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 5 \times 10^{-5}}{\pi(0.025)^2} = \frac{2 \times 10^{-4}}{0.001963} \approx 0.102 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{0.102 \cdot 0.025}{5 \times 10^{-5}} = \frac{0.00255}{5 \times 10^{-5}} = 51$$

Dit is \*\*laminair\*\* ( $Re < 2000$ ).

Voor  $Q = 20 \text{ L/min} = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ :

$$V = \frac{4 \cdot 2 \times 10^{-4}}{\pi(0.025)^2} \approx 0.408 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{0.408 \cdot 0.025}{5 \times 10^{-5}} \approx 204$$

Dit is \*\*laminair\*\* ( $Re < 2000$ ).

Voor  $Q = 100 \text{ L/min} = 1.667 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ :

$$V = \frac{4 \cdot 1.667 \times 10^{-3}}{\pi(0.025)^2} \approx 3.40 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{3.40 \cdot 0.025}{5 \times 10^{-5}} \approx 1700$$

Dit is nog \*\*laminair\*\*, maar dicht bij de transitie.

**Samenvatting:** Alle drie debieten resulteren in laminaire stroming.

### 6.3.5 Oefening 5: Drukverlies in een Buis (Laminaire Stroming)

**Probleemstelling:** Water bij  $20^\circ C$  ( $\nu = 10^{-6} m^2/s$ ) stroomt door een 50 m lange koperen buis met diameter  $D = 20 mm$  en relatieve ruwheid  $\varepsilon/D = 0.0002$ . De gemiddelde stroomsnelheid is  $1.5 m/s$ . Bereken: (a) Het Reynoldsgetal; (b) De wrijvingsfactor; (c) De drukval over de leiding.

**Oplossing:**

1. **Reynoldsgetal:**

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{1.5 \cdot 0.02}{10^{-6}} = 30\,000$$

Dit is \*\*turbulent\*\* ( $Re > 3000$ ).

2. **Wrijvingsfactor (via Haaland formule):**

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \approx -1.8 \log_{10} \left( \left( \frac{0.0002}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{30\,000} \right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \approx -1.8 \log_{10}(5.4 \times 10^{-6} + 2.3 \times 10^{-4}) \approx -1.8 \log_{10}(2.38 \times 10^{-4})$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \approx -1.8 \times (-3.62) \approx 6.52$$

$$f \approx 0.0235$$

3. **Drukval (Darcy-Weisbach):**

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2 = 0.0235 \cdot \frac{50}{0.02} \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot (1.5)^2$$

$$\Delta p = 0.0235 \cdot 2500 \cdot 1125 = 66\,187.5 Pa \approx 66.2 kPa$$

De drukval is ongeveer 66.2 kPa.

### 6.3.6 Oefening 6: Weerstand op een Bol (Sphere)

**Probleemstelling:** Een tennisbal (diameter  $D = 6.5 cm$ ) wordt afgesloten zonder spin met een snelheid van  $30 m/s$  door lucht ( $\rho = 1.2 kg/m^3$ ,  $\nu = 1.5 \times 10^{-5} m^2/s$ ). Bereken: (a) Het Reynoldsgetal; (b) De weerstandskracht (voor een glad oppervlak,  $C_D \approx 0.46$ ).

**Oplossing:**

1. **Reynoldsgetal:**

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{30 \cdot 0.065}{1.5 \times 10^{-5}} = \frac{1.95}{1.5 \times 10^{-5}} = 130\,000$$

Dit valt in het bereik waar  $C_D = 0.46$  geldig is.

2. **Weerstandskracht:** Het frontaal oppervlak van een bol:  $A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.065)^2}{4} \approx 0.00332 m^2$

$$F_D = C_D A \frac{1}{2} \rho V^2 = 0.46 \cdot 0.00332 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.2 \cdot (30)^2$$

$$F_D = 0.46 \cdot 0.00332 \cdot 0.6 \cdot 900 = 0.46 \cdot 1.789 \approx 0.82 N$$

$F_D \approx 0.82 N$

### 6.3.7 Oefening 7: Weerstand en Vermogen voor een Auto in Wind

**Probleemstelling:** Een auto ondergaat een zijwind van  $20 \text{ m/s}$  (windvlagen). De auto heeft een frontaal oppervlak van  $2.4 \text{ m}^2$  en een zijoppervlak van ongeveer  $3.0 \text{ m}^2$ . Voor zijwind, neem  $C_D = 0.8$  (stomper dan voorwind). Bereken: (a) De zijweerstandskracht; (b) Het benodigde vermogen om tegen deze wind in te rijden met  $15 \text{ m/s}$  snelheid (relatieve snelheid =  $\sqrt{15^2 + 20^2} \approx 25 \text{ m/s}$ ).

**Oplossing:**

1. **Zijweerstandskracht (gebruikmakend van zijoppervlak):**

$$F_D = C_D A \frac{1}{2} \rho V_{wind}^2 = 0.8 \cdot 3.0 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.2 \cdot (20)^2$$

$$F_D = 0.8 \cdot 3.0 \cdot 0.6 \cdot 400 = 0.8 \cdot 720 = 576 \text{ N}$$

2. **Vermogen (gebruik makend van relatieve windsnelheid):**

$$P = F_D \cdot V_{rel} = 576 \cdot 25 = 14\,400 \text{ W} = 14.4 \text{ kW}$$

Zijweerstand: 576 N; Vermogen: 14.4 kW

# Part II

## Warmte

# 7 Thermodynamica

## 7.1 Systemen en Controle Volumes

Er zijn twee soorten systemen die we eerst bestuderen:

**Gesloten Systeem (Controlemassa):** Bij een gesloten systeem is de hoeveelheid massa vast.

Er kan geen massa de grens van het systeem passeren. Energie, in de vorm van warmte of arbeid, kan de grens echter wel passeren. Een klassiek voorbeeld is een gas opgesloten in een zuiger-cilinder apparaat. Als het gas wordt verwarmd, zet het uit en beweegt de zuiger. De grens van het systeem beweegt dus en het volume verandert, maar de massa binnenvinden blijft constant. Als er ook geen energie de grens passeert, spreken we van een geïsoleerd systeem.

**Open Systeem (Controlevolume):** In veel technische toepassingen, zoals bij compressoren, turbines, en straalmotoren, is er sprake van een continue stroom van massa. In deze gevallen is het handiger om een specifiek volume in de ruimte te bestuderen, het zogenaamde controlevolume. De grenzen van dit volume worden het controleoppervlak genoemd. Zowel massa als energie kunnen deze grenzen passeren. Een boiler is bijvoorbeeld een open systeem: koud water stroomt erin, warmte wordt toegevoegd, en warm water stroomt eruit.

$Q$  — warmteoverdracht (gesloten systeem)

J

$W$  — arbeid (gesloten systeem)

J

$\dot{m}$  — massadebit

kg/s

$h$  — specifieke enthalpie

kJ/kg

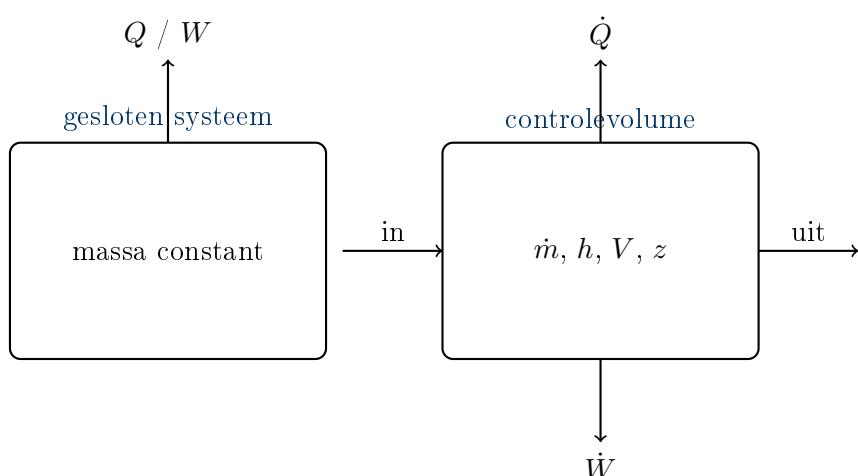


Figure 7.1: Thermodynamische modellering: gesloten systeem (controlemassa) vs. open systeem (controlevolume).

## 7.2 Eigenschappen van een Systeem

Elk systeem wordt gekarakteriseerd door zijn eigenschappen. Dit zijn macroscopische kenmerken zoals druk ( $P$ ), temperatuur ( $T$ ), volume ( $V$ ) en massa ( $m$ ).

Belangrijke concepten zijn ook de specifieke eigenschappen, die de eigenschap per eenheid massa weergeven.

- Specifiek volume ( $v$ ):  $v = V/m$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )
- Specifieke interne energie ( $u$ ):  $u = U/m$  ( $\text{kJ/kg}$ )
- Specifieke enthalpie ( $h$ ):  $h = H/m$  ( $\text{kJ/kg}$ )

## 7.3 Processen en Cyclus

Wanneer een systeem verandert van de ene evenwichtstoestand naar de andere, ondergaat het een proces. De reeks toestanden die het systeem doorloopt, vormt het pad van het proces. Om een proces volledig te beschrijven, moeten we de begintoestand, de eindtoestand, het pad en de interacties met de omgeving (warmte en arbeid) kennen.

Vaak wordt in analyses aangenomen dat een proces een quasi-evenwichtsproces (of quasi-statisch proces) is. Dit houdt in dat het proces zo langzaam verloopt dat het systeem op elk moment infinitesimaal dicht bij een evenwichtstoestand is. Hoewel dit een idealisatie is, benadert het veel werkelijke processen goed en maakt het berekeningen eenvoudiger omdat de eigenschappen uniform gedefinieerd blijven.

Speciale processen worden aangeduid met het voorvoegsel iso-:

- **Isotherm:** Temperatuur blijft constant ( $T = C$ ).
- **Isobaar:** Druk blijft constant ( $P = C$ ).
- **Isochoor:** Volume blijft constant ( $V = C$ ).
- **Adiabatisch:** Er is geen warmte-uitwisseling met de omgeving ( $Q = 0$ ). Let op: adiabatisch betekent niet noodzakelijk dat de temperatuur constant is; expansie zonder warmtetoevoer leidt bijvoorbeeld tot afkoeling.

Een cyclus is een proces (of reeks processen) waarbij de eindtoestand identiek is aan de begintoestand. De netto verandering van eigenschappen over een cyclus is nul ( $\Delta E_{cyclus} = 0$ ), wat impliceert dat de netto energieoverdracht via warmte gelijk moet zijn aan de netto energieoverdracht via arbeid.

# 8 De Eerste Hoofdwet van de Thermodynamica: Energiebehoud

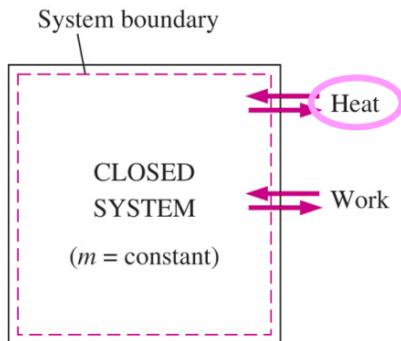


Figure 8.1: Eerste Hoofdwet voor gesloten systemen:  $Q - W = \Delta U$ .

De Eerste Hoofdwet van de thermodynamica is een uitdrukking van het principe van behoud van energie: energie kan niet worden gecreëerd of vernietigd, alleen van vorm veranderen. Voor elk thermodynamisch systeem geldt:

$$E_{in} - E_{uit} = \Delta E_{systeem}$$

De netto verandering in de totale energie van het systeem is gelijk aan het verschil tussen de energie die binnenkomt en de energie die weggaat.

## 8.1 Vormen van Energie

De totale energie  $E$  van een systeem bestaat uit macroscopische en microscopische vormen:

- **Macroscopische energie:** Gerelateerd aan de beweging en invloed van externe effecten op het systeem als geheel.
  - Kinetische energie ( $KE$ ): Energie door de beweging van het systeem ( $KE = \frac{1}{2}mv^2$ ).
  - Potentiële energie ( $PE$ ): Energie door de positie in een zwaartekrachtveld ( $PE = mgz$ ).
- **Microscopische energie (Interne energie,  $U$ ):** Gerelateerd aan de moleculaire structuur en activiteit. Dit omvat translationele, rotationele en vibrationele energie van moleculen, evenals de chemische energie in atoombindingen en de kernenergie in atoomkernen. In de thermodynamica verwijst de term "thermische energie" vaak naar de voelbare (kinetische) en latente (faseverandering) delen van de interne energie.

Voor stationaire systemen (die niet bewegen als geheel) zijn  $\Delta KE$  en  $\Delta PE$  nul, en geldt  $\Delta E = \Delta U$ .

## 8.2 Energie-overdracht: Warmte en Arbeid

Energie kan de grens van een gesloten systeem slechts op twee manieren passeren: als warmte of als arbeid.

- **Warmte ( $Q$ ):** Warmte is de vorm van energie-overdracht die wordt aangedreven door een temperatuurverschil. Energie stroomt spontaan van een medium met hoge temperatuur naar een medium met lage temperatuur. Een proces zonder warmteoverdracht noemen we adiabatisch. De hoeveelheid warmteoverdracht per tijdseenheid noemen we het warmtestroomdebiet  $\dot{Q}$  (in Watt of J/s).
- **Arbeid ( $W$ ):** Arbeid is de energie-overdracht geassocieerd met een kracht die over een afstand werkt ( $W = F \cdot s$ ). Als de energie-overdracht geen warmte is, dan moet het arbeid zijn. Voorbeelden zijn een draaiende as (as-arbeid), een stijgende zuiger (grensverplaatsingsarbeid) of elektrische stroom die een grens passeert (elektrische arbeid). Arbeid per tijdseenheid is vermogen  $\dot{W}$  (in Watt).

De energiebalans voor een gesloten systeem wordt traditioneel geschreven als:

$$Q_{net,in} - W_{net,uit} = \Delta E_{systeem}$$

Of in differentiële vorm:  $\delta Q - \delta W = dE$ . Hierbij is de conventie dat warmte toegevoerd aan het systeem positief is, en arbeid verricht door het systeem positief is.

### 8.3 Arbeid bij Grensverplaatsing (Moving Boundary Work)

Een van de belangrijkste vormen van arbeid in motoren en compressoren is de arbeid die verricht wordt door een gas dat uitzet of samengedrukt wordt in een zuiger-cilinder apparaat. Omdat  $F = P \cdot A$  en  $ds = dV/A$ , kunnen we schrijven  $\delta W_b = Fds = PdV$ . De totale arbeid tijdens een proces van toestand 1 naar 2 is:

$$W_b = \int_1^2 P dV$$

Dit betekent dat de arbeid gelijk is aan de oppervlakte onder de procescurve in een  $P - V$  diagram. De waarde van de integraal hangt af van de relatie tussen  $P$  en  $V$  tijdens het proces:

- Isobaar proces ( $P = C$ ):  $W_b = P(V_2 - V_1)$ .
- Isotherm proces (ideaal gas,  $PV = mRT = C$ ):  $W_b = mRT \ln(V_2/V_1)$ .
- Polytroop proces ( $PV^n = C$ ):  $W_b = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-n}$  (voor  $n \neq 1$ ).

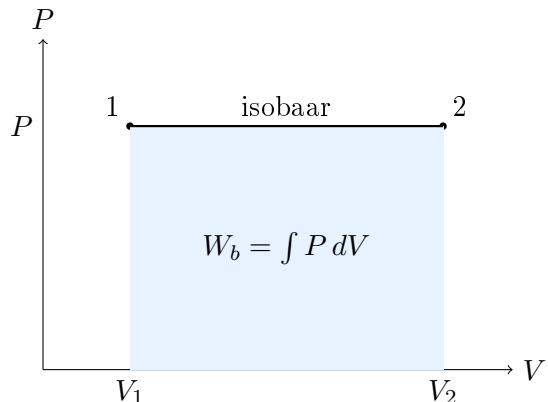


Figure 8.2: Interpretatie van grensverplaatsingsarbeid als oppervlakte onder de  $P$ - $V$  curve.

#### Voorbeeldoefening: isobare expansie in zuiger-cilinder

**Gegeven:** Een gas in een zuiger-cilinder ondergaat een isobare expansie bij  $P = 200 \text{ kPa}$ . Het volume verandert van  $V_1 = 0,10 \text{ m}^3$  naar  $V_2 = 0,25 \text{ m}^3$ .

**Gevraagd:** Bepaal de grensverplaatsingsarbeid  $W_b$  (arbeid door het systeem).

**Oplossing:** Bij isobaar proces geldt:

$$W_b = P(V_2 - V_1) = 200 \times 10^3 (0,25 - 0,10) = 200 \times 10^3 \cdot 0,15 = 3,0 \times 10^4 \text{ J}$$

Dus  $W_b = 30 \text{ kJ}$  (positief: arbeid geleverd door het gas).

## 8.4 De Eerste Hoofdwet voor Open Systemen (Controlevolumes)

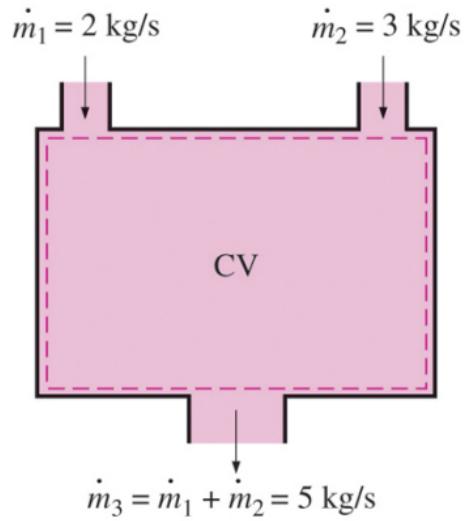


Figure 8.3: Eerste Hoofdwet voor open systemen (controlevolume).

Bij open systemen stroomt massa de grenzen over. Massa draagt energie met zich mee (interne energie  $u$ , kinetische energie  $V^2/2$  en potentiële energie  $gz$ ). (Zie bernoulli) Daarnaast is er energie nodig om de massa in of uit het systeem te duwen tegen de heersende druk in. Deze mechanische energie noemen we stromingsarbeid of flow work ( $W_{flow} = Pv$ ).

Om de thermodynamische analyse van open systemen te vereenvoudigen, combineren we de interne energie  $u$  en de stromingsarbeid  $Pv$  in een nieuwe eigenschap: enthalpie ( $h$ ).

$$h = u + Pv$$

Enthalpie is de interne energie van een fluïdum plus de energie die nodig is om het fluïdum te laten stromen.

De energiebalans voor een algemeen stromingsproces is:

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum \dot{m}_{in} \theta_{in} = \dot{Q}_{uit} + \dot{W}_{uit} + \sum \dot{m}_{uit} \theta_{uit} + \frac{dE_{sys}}{dt}$$

Waarbij  $\theta$  de totale energie per eenheid massa van de stromende vloeistof is:  $\theta = h + \frac{V^2}{2} + gz$ .

Voor een stationair stromingsproces (steady-flow), waarbij de eigenschappen in het controlevolume niet veranderen met de tijd ( $dE_{sys}/dt = 0$ ) en de in- en uitgaande massastromen gelijk zijn ( $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{uit} = \dot{m}$ ), vereenvoudigt dit tot:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[ (h_2 - h_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

Hierbij staat punt 1 voor de inlaat en punt 2 voor de uitlaat. In veel apparaten, zoals nozzles en diffusers, zijn warmte en arbeid verwaarloosbaar, en balanceert de verandering in enthalpie direct de verandering in kinetische energie.

Dit loopt samen met bernoulli waarbij  $A_1*V_1^2 = A_2*V_2^2$

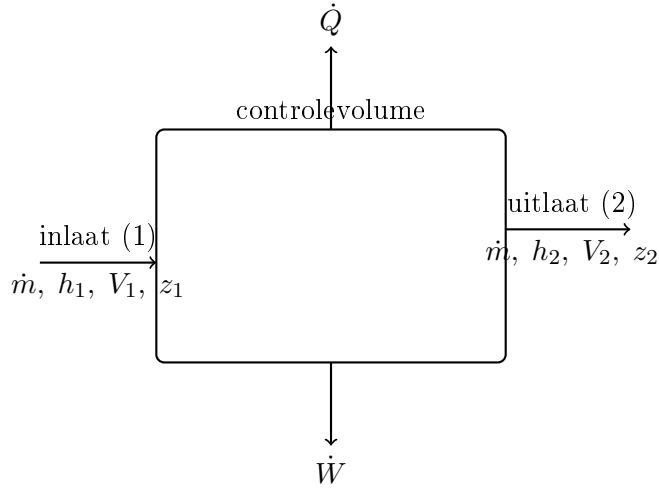


Figure 8.4: Schema van een controlevolume met energiestromen via warmte, arbeid en massastromen.

### Voorbeeldoefening: nozzle (enthalpie naar snelheid)

**Gegeven:** Een nozzle werkt stationair, adiabatisch ( $\dot{Q} \approx 0$ ) en zonder as-arbeid ( $\dot{W} \approx 0$ ). De snelheidsverandering is dominant, hoogteverschil verwaarloosbaar. Het massadebiet is  $\dot{m} = 0,50 \text{ kg/s}$ . Inlaat:  $V_1 \approx 20 \text{ m/s}$ . Uitlaat:  $V_2 \approx 220 \text{ m/s}$ .

**Gevraagd:** Bepaal de vereiste enthalpiedaling  $\Delta h = h_2 - h_1$ .

**Oplossing:** Met  $\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[ (h_2 - h_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right]$  en  $\dot{Q} \approx \dot{W} \approx 0$ :

$$h_2 - h_1 \approx -\frac{V_2^2 - V_1^2}{2}$$

$$V_2^2 - V_1^2 = 220^2 - 20^2 = 48400 - 400 = 48000 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$\Delta h \approx -\frac{48000}{2} = -24000 \text{ J/kg} = -24 \text{ kJ/kg}$$

Dus de nozzle “zet” ongeveer  $24 \text{ kJ/kg}$  enthalpie om in kinetische energie.

#### 8.4.1 Specifieke Componenten: Smoring en Mengkamers

**1. Smoring (Throttling):** Bij een expansieeventiel of capillair buisje (in koelkasten) daalt de druk aanzienlijk zonder dat er arbeid wordt verricht of warmte wordt uitgewisseld (adiabatisch).

$$\dot{Q} \approx 0, \quad \dot{W} = 0, \quad \Delta KE \approx 0, \quad \Delta PE \approx 0$$

De energiebalans reduceert tot:

$$h_1 = h_2$$

Dit is een **isenthalpisch** proces. Hoewel de enthalpie constant blijft, daalt de temperatuur meestal (Joule-Thomson effect).

**2. Mengkamers (Mixing Chambers):** Wanneer twee stromen mengen (bijv. in een douche of industriële menger), geldt behoud van massa en energie. Vaak is de kamer adiabatisch.

$$\sum \dot{m}_{in} h_{in} = \sum \dot{m}_{uit} h_{uit}$$

Voor twee inlaatstromen (1, 2) en één uitlaatstroem (3):

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 \quad (\text{met } \dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2)$$

# 9 Eigenschappen van Zuivere Stoffen

Om de energiebalansen op te lossen, moeten we de waarden van  $u$ ,  $h$  en  $v$  kunnen bepalen. Stoffen zoals water of koelmiddel (R-134a) gedragen zich complexer dan ideale gassen vanwege faseovergangen. Een zuivere stof heeft een uniforme chemische samenstelling.

## 9.1 Fasen en Faseverandering

We kennen drie hoofdfasen: vaste stof, vloeistof en gas. De thermodynamica van faseverandering is rijk aan terminologie:

- **Gecomprimeerde vloeistof (subcooled liquid):** Vloeistof die niet op het punt staat te verdampen (bijv. water bij 20°C en 1 atm).
- **Verzadigde vloeistof (saturated liquid):** Vloeistof die op het punt staat te koken. Elke toevoeging van warmte zorgt voor dampvorming.
- **Verzadigde damp (saturated vapor):** Damp die op het punt staat te condenseren. Elke onttrekking van warmte zorgt voor druppelvorming.
- **Oververhitte damp (superheated vapor):** Damp die niet op het punt staat te condenseren (bijv. stoom bij 300°C en 1 atm).

**Verzadigingstemperatuur ( $T_{sat}$ ) en -druk ( $P_{sat}$ ):** Bij een gegeven druk is er een specifieke temperatuur waarbij een zuivere stof kookt. Water kookt bijvoorbeeld bij 100°C bij 1 atm, maar bij een lagere temperatuur op grote hoogte waar de druk lager is.

## 9.2 Het Staatspostulaat en Onafhankelijkheid

Het staatspostulaat stelt dat de toestand van een eenvoudig samendrukbaar systeem volledig bepaald is door twee onafhankelijke, intensieve eigenschappen.

- **Buiten de koepel (Enkelfasig):**  $P$  en  $T$  zijn onafhankelijk. Als je  $P$  en  $T$  kent, ligt de toestand vast (bijv. oververhitte damp).
- **Binnen de koepel (Tweefasig):**  $P$  en  $T$  zijn afhankelijk ( $P = P_{sat}(T)$ ). Je hebt een andere eigenschap nodig, zoals de kwaliteit  $x$ , om de toestand te bepalen.

De kwaliteit  $x$  is de massafractie damp in het mengsel:

$$x = \frac{m_{damp}}{m_{totaal}}$$

Eigenschappen in het menggebied worden berekend als gewogen gemiddelde:

$$v = v_f + x(v_g - v_f)$$

## 9.3 Eigenschapsdiagrammen en Tabellen

De relaties tussen eigenschappen worden gevisualiseerd in  $T - v$ ,  $P - v$  en  $P - T$  diagrammen. Op een  $T - v$  diagram zien we een karakteristieke "koepel" (de verzadigingskoepel):

- De linkerzijde van de koepel is de verzadigde vloeistoflijn.
- De rechterzijde is de verzadigde damplijn.
- Het punt waar de lijnen samenkommen is het kritieke punt. Boven de kritieke temperatuur en druk is er geen duidelijk onderscheid meer tussen vloeistof en damp.

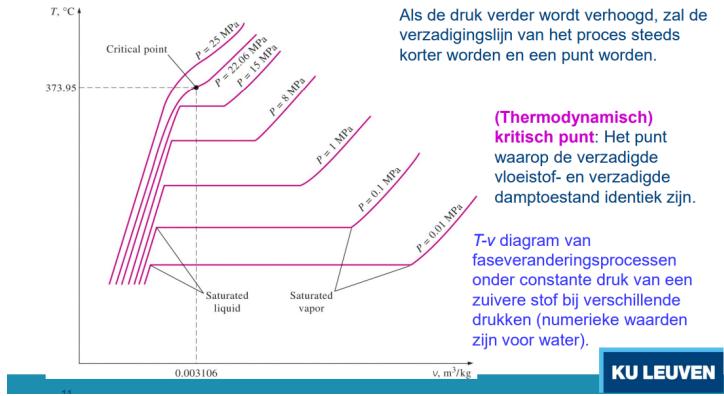


Figure 9.1: P-v-T oppervlak en projecties (fasediagrammen).

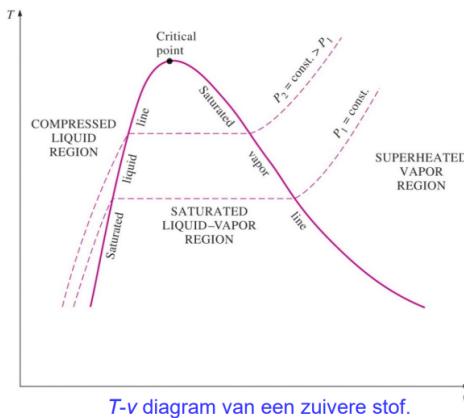


Figure 9.2: P-T fasediagram

Onder de koepel bevindt zich het menggebied, waar vloeistof en damp in evenwicht samen bestaan. In dit gebied zijn druk en temperatuur afhankelijk van elkaar. Om de toestand vast te leggen, gebruiken we de kwaliteit of dampfractie  $x$ , gedefinieerd als de verhouding van de massa damp tot de totale massa van het mengsel:

$$x = \frac{m_{damp}}{m_{totaal}}$$

De waarde van  $x$  loopt van 0 (verzadigde vloeistof) tot 1 (verzadigde damp). De eigenschappen van het mengsel worden berekend als een gewogen gemiddelde:

$$y_{gem} = y_f + x \cdot y_{fg}$$

Waarbij  $y$  staat voor een specifieke eigenschap ( $v$ ,  $u$ , of  $h$ ).  $y_f$  is de waarde voor verzadigde vloeistof en  $y_{fg}$  is het verschil tussen verzadigde damp en vloeistof ( $y_g - y_f$ ). Deze waarden vinden we in thermodynamische tabellen.

### Voorbeeldoefening: kwaliteit en mengseleigenschap

**Gegeven:** In een verzadigd mengsel geldt bij een bepaalde druk:  $h_f = 500 \text{ kJ/kg}$  en  $h_g = 2700 \text{ kJ/kg}$ . De gemeten enthalpie van het mengsel is  $h = 1600 \text{ kJ/kg}$ .

**Gevraagd:** Bepaal de kwaliteit  $x$ .

**Oplossing:** We gebruiken  $h = h_f + x(h_g - h_f)$ :

$$x = \frac{h - h_f}{h_g - h_f} = \frac{1600 - 500}{2700 - 500} = \frac{1100}{2200} = 0,50$$

Dus  $x = 0,50$ : de massa bestaat voor 50% uit damp.

## 9.4 De Ideale Gaswet

Voor gassen bij hoge temperatuur en lage druk (ten opzichte van hun kritieke waarden) zijn de intermoleculaire krachten verwaarloosbaar klein. Onder deze omstandigheden kunnen we de Ideale Gaswet gebruiken:

$$Pv = RT$$

$R$  — specifieke gasconstante

J/(kg K)

$v$  — specifiek volume

m<sup>3</sup>/kg

Hierin is  $R$  de specifieke gasconstante, die verschilt per gas ( $R = R_u/M$ , met  $R_u = 8.314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$  de universele gasconstante en  $M$  de molaire massa).

Een belangrijke eigenschap van ideale gassen is dat de interne energie en enthalpie enkel afhangen van de temperatuur ( $u = u(T)$  en  $h = h(T)$ ). Dit leidt tot de definities van de soortelijke warmten:

- $c_v = (\frac{\partial u}{\partial T})_v = \frac{du}{dT} \rightarrow \Delta u = c_v \Delta T$  (voor constante  $c_v$ )
- $c_p = (\frac{\partial h}{\partial T})_p = \frac{dh}{dT} \rightarrow \Delta h = c_p \Delta T$  (voor constante  $c_p$ )

$c_v$  — soortelijke warmte bij constant volume

kJ/(kg K)

$c_p$  — soortelijke warmte bij constant druk

kJ/(kg K)

De verhouding  $k = c_p/c_v$  is de specifieke warmteverhouding, die een rol speelt bij adiabatische processen van ideale gassen ( $Pv^k = C$ ).

Indien een gas te sterk afwijkt van ideaal gedrag (bijvoorbeeld bij hoge druk), gebruiken we de compressibiliteitsfactor  $Z$  ( $Pv = ZRT$ ) of complexere toestandsvergelijkingen zoals van der Waals of Beattie-Bridgeman.

## 10 De Tweede Hoofdwet en Entropie

De Eerste Wet stelt dat energie behouden blijft, maar zegt niets over de richting van een proces. Een kop koffie koelt af in een kamer, maar wordt nooit spontaan warmer door energie uit de kamerlucht te onttrekken, hoewel dit de eerste wet niet zou schenden. Dit inzicht leidt tot de Tweede Hoofdwet van de Thermodynamica.

### 10.1 Entropie

Om de Tweede Wet kwantitatief te maken, introduceerde Clausius het concept entropie ( $S$ ). Entropie kan worden gezien als een maat voor moleculaire wanorde of de "kwaliteit" van energie. Hoe hoger de entropie, hoe minder bruikbaar de energie is voor arbeid. De verandering in entropie  $dS$  wordt gedefinieerd als  $dQ/T$  voor een intern reversibel proces. Voor elk proces geldt het principe van toename van entropie:

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}$$

Voor een geïsoleerd systeem betekent dit dat de entropie altijd toeneemt (bij irreversibele, echte processen) of gelijk blijft (bij reversibele, ideale processen), maar nooit afneemt ( $\Delta S_{gen} \geq 0$ ). Irreversibiliteiten zoals wrijving, menging en warmteoverdracht over een eindig temperatuurverschil genereren entropie.

## Belangrijke Formules

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| Clausius-ongelijkheid          | : $\Delta S \geq \int \frac{\delta Q}{T}$   |
| Intern reversibel              | : $ds = \frac{\delta q_{rev}}{T}$   |
| Entropiebalans (gesloten)      | : $\Delta S = \int \frac{\delta Q}{T_{grens}} + S_{gen}$                                    |
| Entropiebalans (stationair CV) | : $\dot{S}_{gen} = \sum \dot{m} s_{out} - \sum \dot{m} s_{in} - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k}$ |
| Ideaal gas                     | : $\Delta s = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$      |
| Incompressibel (c const.)      | : $\Delta s = c \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$  |

$s$  — specifieke entropie

kJ/(kg K)

## Omkeerbaar vs. onomkeerbaar (intuïtie)

Een proces is **omkeerbaar** als het (idealiter) zonder netto sporen in systeem én omgeving terug te draaien is. In de praktijk is dit een limietgeval.

Typische bronnen van **onomkeerbaarheid**:

- wrijving (mechanisch of intern in het fluïdum)
- mengen van stoffen/temperaturen
- warmteoverdracht bij eindig  $\Delta T$
- smoren (throttling) door kleppen/ver nauwingen

Onomkeerbaar  $\Rightarrow S_{gen} > 0$ .

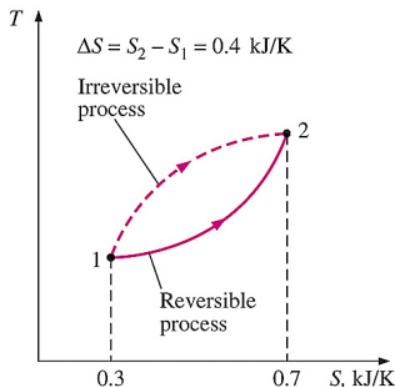


Figure 10.1: T-s diagram: vergelijking tussen een reversibel (ideaal) en irreversibel (echt) proces. Het irreversibele proces eindigt op een hogere entropie ( $\Delta S > \int \delta Q/T$ ).

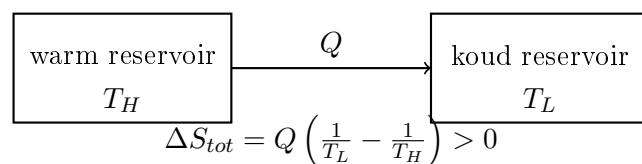


Figure 10.2: Warmteoverdracht bij eindig  $\Delta T$  is onomkeerbaar en genereert entropie.

### Voorbeeldoefening: entropieverandering bij opwarming (incompressibel)

**Gegeven:**  $m = 2,0 \text{ kg}$  water wordt opgewarmd van  $T_1 = 20^\circ\text{C}$  naar  $T_2 = 80^\circ\text{C}$ . Neem  $c \approx 4,18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .

**Gevraagd:** Bepaal  $\Delta S$  van het water.

**Oplossing:** Zet om naar Kelvin:  $T_1 = 293 \text{ K}$  en  $T_2 = 353 \text{ K}$ .

$$\Delta S = mc \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) = 2,0 \cdot 4,18 \ln \left( \frac{353}{293} \right) \approx 1,55 \text{ kJ/K}$$

Dus  $\boxed{\Delta S \approx 1,55 \text{ kJ/K}}$ .

### Voorbeeldoefening: entropieproductie bij warmteoverdracht tussen reservoirs

**Gegeven:**  $Q = 500 \text{ kJ}$  stroomt van  $T_H = 600 \text{ K}$  naar  $T_L = 300 \text{ K}$ .

**Gevraagd:** Bepaal  $\Delta S_{tot}$  en  $S_{gen}$ .

**Oplossing:**

$$\Delta S_{warm} = -\frac{Q}{T_H} = -\frac{500}{600} = -0,833 \text{ kJ/K}, \quad \Delta S_{koud} = +\frac{Q}{T_L} = +\frac{500}{300} = 1,667 \text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_{tot} = \Delta S_{warm} + \Delta S_{koud} = 0,834 \text{ kJ/K}$$

Omdat dit proces onomkeerbaar is, geldt  $S_{gen} = \Delta S_{tot} > 0$ .

## 10.2 Entropiebalans en Efficiëntie

### 10.2.1 Entropiebalans voor Open Systemen

Net als massa en energie, kan entropie een controle volume binnengaan of verlaten via massastromen en warmteoverdracht. Echter, in tegenstelling tot energie, blijft entropie *niet* behouden: het wordt gegenereerd door onomkeerbaarheden. De algemene entropiebalans voor een open systeem is:

$$\underbrace{\frac{dS_{CV}}{dt}}_{\text{Verandering in CV}} = \underbrace{\sum \dot{m}_{in} s_{in} - \sum \dot{m}_{uit} s_{uit}}_{\text{Netto entropiestroom via massa}} + \underbrace{\sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k}}_{\text{Entropiestroom via warmte}} + \underbrace{\dot{S}_{gen}}_{\text{Entropiegeneratie}}$$

Voor een **stationair proces** (steady-state,  $dS_{CV}/dt = 0$ ) wordt dit:

$$\dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_{uit} s_{uit} - \sum \dot{m}_{in} s_{in} - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \geq 0$$

Hierbij is:

- $\dot{S}_{gen}$ : De snelheid van entropiegeneratie (altijd  $\geq 0$ ).
- $\dot{Q}_k/T_k$ : De entropieoverdracht door warmteoverdracht bij temperatuur  $T_k$  (op de grens).
- $s$ : De specifieke entropie van de in- en uitgaande massastromen.

Voor een **adiabatisch** systeem ( $\dot{Q} = 0$ ) met één inlaat en één uitlaat (bijv. een ideale turbine of pomp) geldt:

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}(s_{uit} - s_{in}) \geq 0 \Rightarrow s_{uit} \geq s_{in}$$

In het ideale geval (reversibel) is  $s_{uit} = s_{in}$  (isentroop).

### 10.2.2 Isentropische Efficiënties

Omdat echte machines (turbines, compressoren, pompen, nozzles) onomkeerbaar zijn, genereren ze entropie ( $s_{uit} > s_{in}$  voor adiabatische processen). De isentropische efficiëntie vergelijkt de werkelijke prestatie met de ideale (isentrope) prestatie.

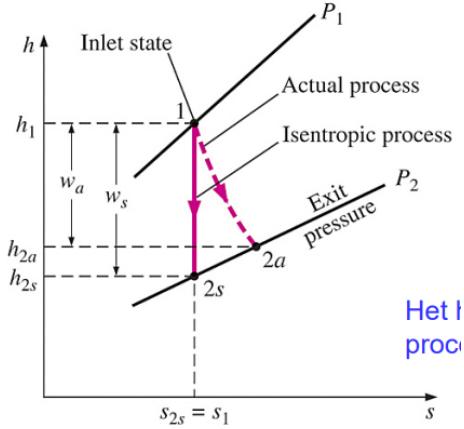


Figure 10.3: h-s diagram voor een turbine. Het werkelijke proces (stippellijn) wijkt af van het isentrope proces (verticale lijn) richting hogere entropie.

### Turbine

Turbines leveren arbeid; de werkelijke arbeid is *lager* dan de ideale isentrope arbeid. Rendement (inline om witruimte te beperken):  $\eta_T = \frac{\text{Werkelijke Arbeid}}{\text{Isentropische Arbeid}} \approx \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}}$ , waarbij  $h_{2a}$  de werkelijke uitgangsenthalpie is en  $h_{2s}$  de enthalpie bij isentrope expansie ( $s_{2s} = s_1$ ).

### Compressor en Pomp

Een compressor vereist arbeid; de werkelijke arbeid is *hoger* dan de ideale isentrope arbeid. Rendement:  $\eta_C = \frac{\text{Isentropische Arbeid}}{\text{Werkelijke Arbeid}} \approx \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$ .

### Nozzle (Straalbuis)

Een nozzle zet druk om in kinetische energie. Rendement:  $\eta_N = \frac{\text{Werkelijke Kinetische Energie}}{\text{Isentropische Kinetische Energie}} = \frac{V_{2a}^2}{V_{2s}^2} \approx \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}}$ .

## 11 Thermodynamische Cycli

### Inleiding: Cycli?

Een thermodynamische cyclus is een reeks processen waarbij een systeem terugkeert naar zijn oorspronkelijke toestand. Cycli worden in alle moderne machines (motoren, compressoren, warmtepompen, turbines) gebruikt. Het grote voordeel is dat na één volledige cyclus alle toestateigenschappen teruggekeerd zijn naar hun oorspronkelijke waarden, dus  $\Delta E_{cyclus} = 0$ . Dit houdt in dat de netto energie die als warmte wordt toegevoerd gelijk moet zijn aan de netto arbeid die geproduceerd wordt:

$$Q_{netto,in} = W_{netto,uit}$$

Dit is waarom cycli zo interessant zijn voor praktische toepassingen: je kunt continu arbeid of koeling uit eenzelfde hoeveelheid werkvloeistof halen door deze steeds opnieuw door dezelfde cyclus te voeren.

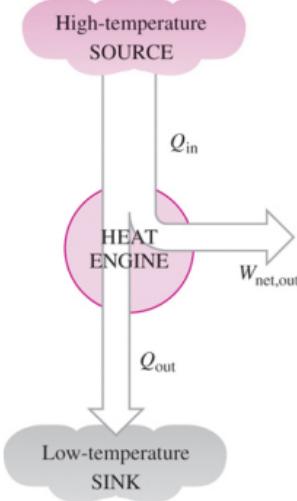


Figure 11.1: Schematische weergave van een warmtemotor.

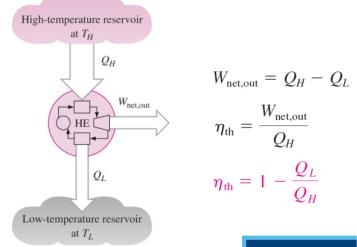


Figure 11.2: Definitie van thermisch rendement.

Op een  $P$ - $V$  diagram is de oppervlakte omsloten door de cycluscurve gelijk aan de netto arbeid per kilogram (of per mol) werkvloeistof. Op een  $T$ - $s$  diagram is dit eveneens waar voor de warmte. Een grotere oppervlakte = beter rendement.

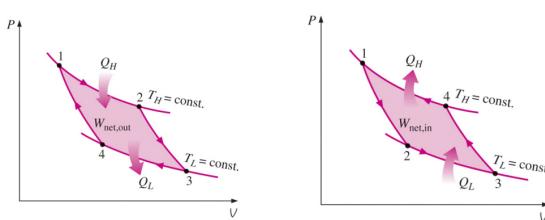


Figure 11.3: P-V diagrammen van een thermodynamische cyclus.

## 11.1 De Carnot Cyclus

Dit is de meest efficiënte theoretische cyclus die mogelijk is tussen twee temperatuurlimieten. Hij werd bedacht door Sadi Carnot (1824) en dient als referentiepunt: geen enkel apparaat kan beter presteren dan de Carnot-cyclus tussen dezelfde twee temperatuurlimieten.

### Vier Processen van de Carnot-cyclus (expansie)

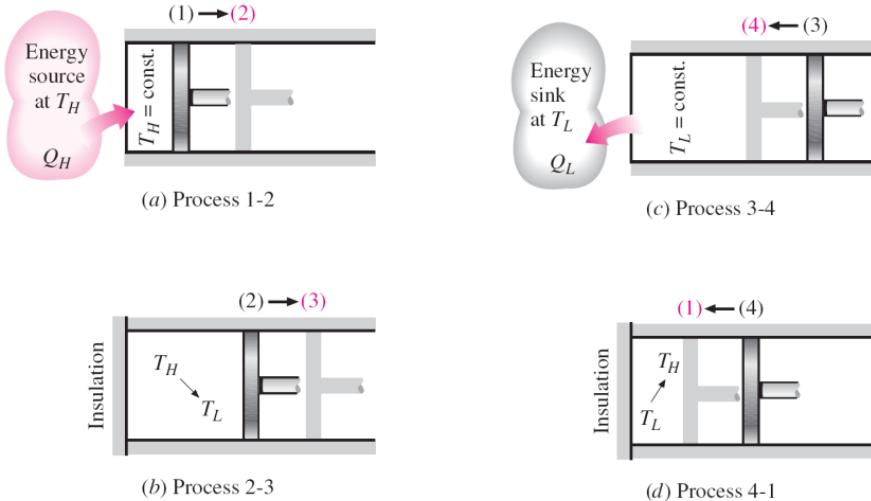


Figure 11.4: De vier stappen van de Carnot-cyclus in een zuiger-cilinder systeem: (a) Isotherme expansie, (b) Adiabatische expansie, (c) Isotherme compressie, (d) Adiabatische compressie.

#### 1. Proces 1→2: Isotherme expansie bij $T_H$

Het gas expandeert terwijl het constant in contact staat met een heet reservoir. De expansie verricht arbeid op de omgeving ( $W_{1\rightarrow 2} > 0$ ), dus moet warmte worden toegevoerd om de temperatuur constant te houden ( $Q_{1\rightarrow 2} > 0$ ). Dit is het proces waar de motor "voeding" krijgt.

#### 2. Proces 2→3: Adiabatische expansie (isentroop)

Het gas expandeert verder, maar nu zonder warmte-uitwisseling ( $Q_{2\rightarrow 3} = 0$ ). De expansiearbeit wordt geleverd uit de interne energie van het gas, dus de temperatuur daalt van  $T_H$  naar  $T_L$ . Dit proces is reversibel, dus isentroop ( $s = \text{const}$ ).

#### 3. Proces 3→4: Isotherme compressie bij $T_L$

Het gas wordt nu gecomprimeerd terwijl het in contact staat met een koud reservoir. Compressie vereist arbeid ( $W_{3\rightarrow 4} < 0$ , negatief omdat arbeid wordt op het systeem verricht). Deze arbeid wordt niet als warmte opgeslagen (want  $T$  is constant), dus moet warmte naar buiten worden afgevoerd ( $Q_{3\rightarrow 4} < 0$ ). Dit is het "afvalproces" waar ongewenste warmte wordt verwijderd.

#### 4. Proces 4→1: Adiabatische compressie (isentroop)

Verdere compressie zonder warmte-uitwisseling verhoogt de temperatuur van  $T_L$  terug naar  $T_H$ , completerend de cyclus. Dit sluit de lus.

### Rendement van de Carnot-cyclus

Het thermisch rendement van een Carnot-motor is:

$$\eta_{th,Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Dit is het **theoretische maximum**. Enkele belangrijke waarnemingen:

- Het rendement hangt *enkel* af van de absolute temperaturen, niet van het materiaal of de detaillen van het proces.
- Een rendement van 100% is alleen mogelijk als  $T_L = 0\text{K}$  (absoluut nul), wat fysisch onmogelijk is.
- Om het rendement te verhogen, moet je  $T_H$  *verhogen* of  $T_L$  *verlagen*. Dit is waarom stoomturbines zoveel hete stoom gebruiken.
- Geen enkel werkelijk apparaat kan dit rendement bereiken; alle werkelijke motoren zijn minder efficiënt vanwege onomkeerbaarheden (wrijving, warmteoverdracht bij eindig  $\Delta T$ , etc.).

**Voorbeeld:** Een warmtemotor tussen  $T_H = 600\text{K}$  en  $T_L = 300\text{K}$  kan maximaal bereiken:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{300}{600} = 0,50 = 50\%$$

Elke echte motor zal slechter presteren.

## 11.2 COP, Coefficients Of Performance

COP toont hoe effectief een koel- of verwarmingssysteem is. Het is de verhouding van nuttige warmteoverdracht tot de benodigde arbeid.

De COP voor een warmtepomp (verwarming) is:

$$\text{COP}_{\text{warmtepomp}} = \frac{Q_H}{W_{in}} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

De COP voor een koelkast (koeling) is:

$$\text{COP}_{\text{koelkast}} = \frac{Q_L}{W_{in}} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

### Omgekeerde Carnot: Koelkast en Warmtepomp

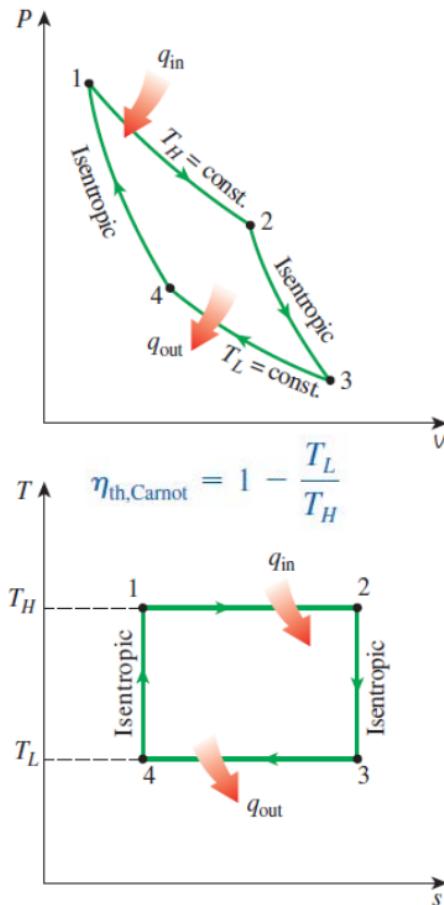
Als je de cyclus in omgekeerde richting laat lopen (volgens pijlen in omgekeerde volgorde) krijg je een koelmachine. In plaats van warmte om te zetten in arbeid, gebruik je arbeid om warmte van koud naar warm over te brengen. De Coefficient of Performance is:

$$\text{COP}_{\text{koelkast}} = \frac{Q_L}{W_{in}} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

Dit is veel groter dan 1! Een ideale koelkast tussen 270 K en 300 K heeft  $\text{COP} = 270/(300 - 270) = 9$ . Dit betekent dat voor elke joule elektrische arbeid, 9 joule warmte uit de koude ruimte wordt onttrokken  $Q_L$  (en 10 joule naar buiten wordt afgevoerd  $Q_H$ ).

### T-s diagram van de Carnot-cyclus (schematisch)

Voor een intern reversibele cyclus geldt  $\delta q_{rev} = T ds$ . Daardoor geeft de oppervlakte in het *T-s* diagram een directe interpretatie van warmte en (via de energiebalans over een cyclus) netto arbeid. Let op: In een *T-s* diagram vormen de twee isotherme processen horizontale lijnen (constant  $T$ ), en de twee isentropische processen zijn verticaal (constant  $s$ ). Dit geeft een rechthoek!



**FIGURE 9-5**  
P-v and T-s diagrams of a Carnot cycle.

Figure 11.5: P-v en T-s diagrammen van de Carnot-cyclus.

### Voorbeeldoefening: COP van een Carnot-koelkast

**Gegeven:** Een koelkast werkt ideaal (Carnot) tussen  $T_L = 270\text{ K}$  (binnentemperatuur) en  $T_H = 300\text{ K}$  (omgevingstemperatuur).

**Gevraagd:** Bepaal COP<sub>koelkast</sub>.

**Oplossing:**

Voor een Carnot-koelkast geldt:

$$\text{COP}_{\text{koelkast}} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{270}{300 - 270} = \frac{270}{30} = 9$$

Dus  $\boxed{\text{COP} = 9}$  (theoretisch maximum).

Dit betekent dat elke joule compressorarbeid 9 joule koeling oplevert. Dit is het ideale geval; echte koelkasten hebben COP tussen 2 en 4 vanwege onomkeerbaarheden.

## 11.3 Otto en Diesel Cycli

Dit zijn de geïdealiseerde modellen voor interne verbrandingsmotoren. In tegenstelling tot externe motoren (zoals stoomturbines die constant dezelfde werkvloeistof recirculeren) gebeurt de energietoevoeging in benzine- en dieselmotoren door in-situ verbranding van brandstof.

## Otto-cyclus (Benzine)

De Otto-cyclus bestaat uit vier slagen:

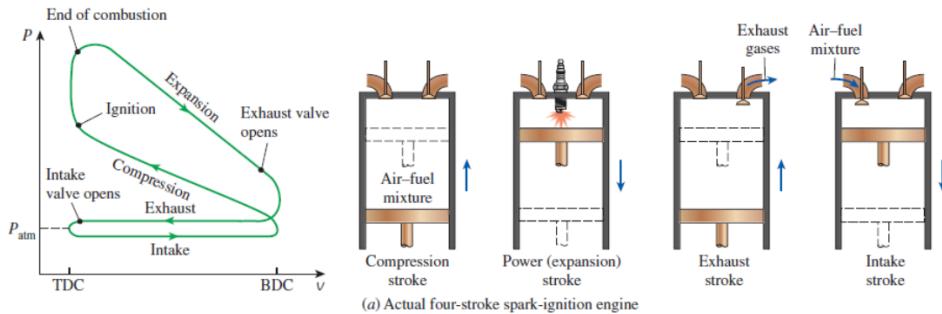


Figure 11.6: De vier slagen van een viertakt benzinemotor: inlaat, compressie, arbeid (expansie), uitlaat.

1. **Inlaatslag (0→1):** Zuiger beweegt naar beneden, klep opent, lucht-brandstofmengsel stroomt in.
2. **Compressieslag (1→2):** Beide kleppen dicht, zuiger beweegt omhoog. Het mengsel wordt isentroop gecomprimeerd tot hogedruk en -temperatuur. Dit stelt formeel een isentroop proces voor:  $PV^k = \text{const}$ .
3. **Ontsteking en Expansieslag (2→3→4):** De brandstof ontsnapt (vonk). Aan dit moment nemen we aan dat warmte ogenblikkelijk wordt toegevoerd terwijl het volume nog constant is (isochor). Dit verhoogt druk en temperatuur (2→3). Daarna expandeert het gas isentroop en levert arbeid (3→4). Dit is de "power stroke".
4. **Uitlaatslag (4→1):** Uitlaatklep opent, verbrandingsgassen stromen uit bij vrijwel constant volume (isochore warmteafvoer: 4→1). De druk daalt tot atmosferisch.

**Idealisering in de thermodynamica:** We combineren inlaat en uitlaat in één isochor warmteafvoer. De cyclus wordt dus:

- 1→2: Isentrope compressie
- 2→3: Isochore warmtetoevoeringswarmtetoevoering (ontsteking)
- 3→4: Isentrope expansie (arbeid)
- 4→1: Isochore warmteafvoer (uitlaat)

### Rendement van de Otto-cyclus:

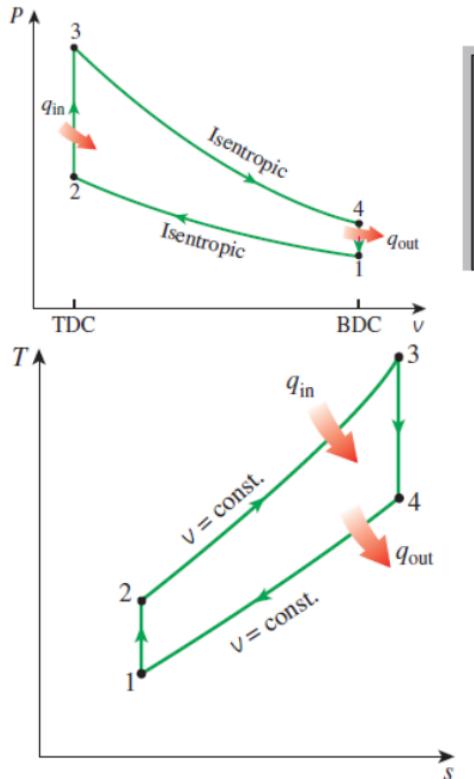
Het rendement hangt af van de **compressieratio**  $r = V_1/V_2$  en de soortelijke warmteverhouding  $k = c_p/c_v$ :

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

**Voorbeeld:** Voor  $r = 8$  en  $k = 1,4$  (lucht):

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{8^{0.4}} \approx 1 - 0,452 \approx 0,565 = 56,5\%$$

Dit is het theoretische rendement; echte Otto-motoren halen ongeveer 25–30% door vele onomkeerbaarheden.



**FIGURE 9–15**  
T-s diagram of the ideal Otto cycle.

Figure 11.7: T-s diagram van de ideale Otto-cyclus. Proces 1-2 en 3-4 zijn isentroop (adiabatisch reversibel), 2-3 en 4-1 zijn isochoor (constant volume).

### Diesel-cyclus

De Diesel-cyclus verschilt van Otto vooral in hoe de verbranding plaatsvindt. In plaats van ogenblikkelijke ontsteking bij constant volume, laat de diesel-motor de brandstof langzaam inspuiten gedurende een deel van de expansieslag. Dit wordt gemodelleerd als isobare (constant druk) warmtetoeveringswarmtetoevering.

1. 1→2: Isentrope compressie (dezelfde als Otto)
2. 2→3: Isobare warmtetoeveringswarmtetoevering (brandstoftoevoeringsfase)
3. 3→4: Isentrope expansie (arbeid)
4. 4→1: Isochore warmteafvoer

**Voordeel van Diesel:** De isobare warmtetoeveringsfase gebeurt bij gelijkmatigere drukken, wat efficiënter kan zijn. Diesels bereiken ook hogere compressieratio's (15–22) omdat ze geen vonkontsteking nodig hebben, wat het rendement verbetert. In de praktijk bereiken diesels rendement van 40–50%.

**Nadeel:** De hogere drukken vereisen sterker materiaal (duurder) en meer motorlawaai.

Figure 11.8: P-v en T-s diagrammen van de Diesel-cyclus.

Figure 11.9: Vergelijking van Otto en Diesel cycli.

## 11.4 Rankine Cyclus

Dit is de basiscyclus voor stoomkrachtcentrales en gebruikt in bijna alle grote warmte-elektrische centrales ter wereld. In tegenstelling tot Otto/Diesel gebruikt Rankine externe verbranding (coal, gas, nucleair) om water in stoom om te zetten. Een voordeel is dat je grote volumes kunt verwerken en hoge temperaturen kunt bereiken. Een nadeel is dat het proces ingewikkelder is omdat water faseveranderingen ondergaat.

### De vier componenten van een Rankine-cyclus

1. **Pomp (1→2):** Vloeibaar water onder lage druk wordt pompgecomprimeerd tot hoge druk (isentrope proces). De pomparbeid is klein omdat water incompressibel is. Een echte pomp levert niet-ideale compressie, dus praktische efficiënties liggen rond 75–85%.
2. **Ketel/Boiler (2→3):** Water wordt isobaar (constant druk) verwarmd. Dit is het meest complexe deel: eerst verhoogt zich de temperatuur van vloeibaar water tot het kookpunt (gecomprimeerde vloeistof), daarna verdampft het geleidelijk aan (menggebied met kwaliteit  $x$  tussen 0 en 1), en tenslotte kan het verder opgewarmd worden tot oververhitte stoom. Alle warmte wordt toegevoerd:  $Q_{in} = h_3 - h_2$ .
3. **Turbine (3→4s):** Hete stoom expandeert isentroop door de turbine en levert arbeid. De uitlaat bevindt zich in het menggebied (natte stoom). Dit is waar de mechanische arbeid wordt gegenereerd. De turbine-efficiëntie (ongeveer 85–90%) is lager dan de ideale isentrope arbeid vanwege wrijving en stromingsverlies.
4. **Condensor (4→1):** De natte stoom wordt isobaar gecondenseerd in een groot warmtewisselaar (meestal koelwater van een rivier/zee). Dit verwijdert veel warmte:  $Q_{uit} = h_4 - h_1$ .

### Thermisch rendement:

$$\eta_{Rankine} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{uit}}{Q_{in}}$$

Voor praktische centrales:  $\eta_{Rankine} \approx 35,40\%$ . De reden dat dit lager is dan Carnot: veel van de warmtetoeveringswarmtetoeveringsfase gebeurt bij veel lagere temperatuur dan de hogedrukdampf temperatuur.

### Manieren om rendement te verbeteren:

- Hogere stoomtemperatuur (in de ketel): verhoogt  $T_{gem}$  van warmtetoeveringsfase.
- Hogere keteldruk: idem.
- Lagere condensortemperatuur: lastig (vereist koud koelwater).
- **Superheat:** Stoom verder opwarmen na damp-fase (dit gebeurt in moderne centrales).
- **Regeneratie:** Tappunten uit de turbine gebruiken om voedingswater voor te verwarmen (wordt in real centrales gedaan).

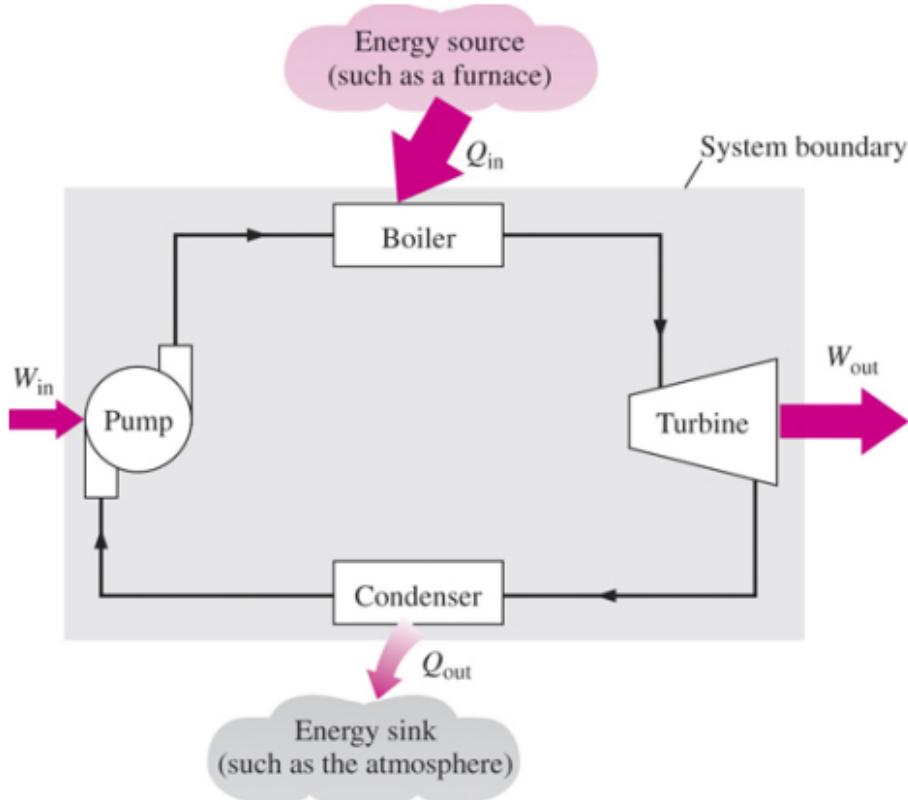


Figure 11.10: Praktisch stoomkrachtcentrale schema Rankine cyclus: pomp verdicht water, ketel verdampft in stoom, turbine expandeert voor arbeid, condensor liquefieert terug naar water.

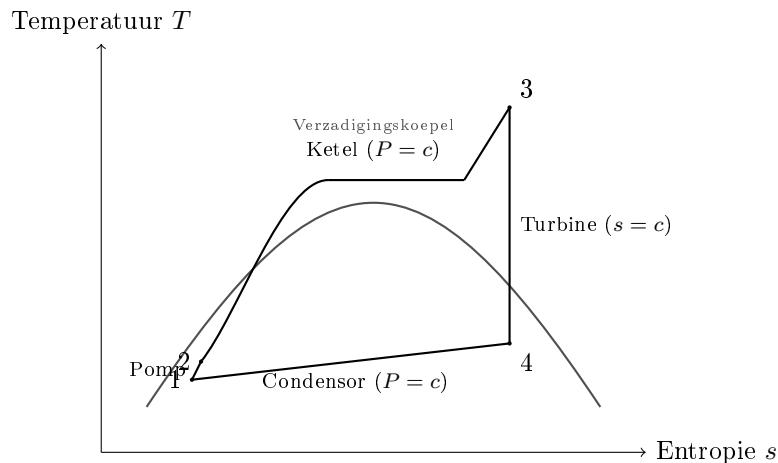


Figure 11.11: T-s diagram Rankine-cyclus met oververhitting. Proces 1-2: pomp, 2-3: ketel (opwarmen, verdampen, oververhitte), 3-4: turbine (expansie), 4-1: condensor.

### Voorbeeldoefening: Rankine rendement

**Gegeven:** Een ideale Rankine-cyclus werkt tussen stoomketel (druk  $P = 5 \text{ MPa}$ , oververhitte stoom  $T = 400^\circ\text{C}$ ) en condensor ( $P = 10 \text{ kPa}$ ). Water uit de pomp is gezuiverd vloeistof.

**Gevraagd:** Bepaal het theoretische rendement (isentrope turbine aangenomen).

**Oplossing:**

Dit is een tabelleeroefening. Uit stoomtabellen:

- **Toestand 3** (inlaat turbine, oververhitte stoom 5 MPa, 400°C):  $h_3 \approx 3231 \text{ kJ/kg}$ ,  $s_3 \approx 6,55 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$
- **Toestand 1** (uitlaat condensor, verzadigde vloeistof 10 kPa):  $h_1 \approx 191 \text{ kJ/kg}$ ,  $s_1 \approx 0,649 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$
- **Toestand 4s** (isentrope expansie  $s_4 = s_3$ , dus  $s_{4s} = 6,55 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$  in het menggebied bij 10 kPa): Dit ligt in het menggebied. We zoeken de kwaliteit:  $s_{4s} = s_f + x(s_g - s_f)$ . Met  $s_f = 0,649$ ,  $s_g = 8,150$ :

$$6,55 = 0,649 + x(8,150 - 0,649) \implies x \approx 0,773$$

$$\text{Dan: } h_{4s} = h_f + x(h_g - h_f) = 191 + 0,773 \times (2584 - 191) \approx 1839 \text{ kJ/kg}$$

Arbeid en warmte:

$$W_{turbine} = h_3 - h_{4s} = 3231 - 1839 = 1392 \text{ kJ/kg} \quad (11.1)$$

$$W_{pomp} \approx v(P_3 - P_1) \approx 0,001(5000 - 10) \approx 4,99 \text{ kJ/kg} \quad (11.2)$$

$$W_{net} = 1392 - 5 = 1387 \text{ kJ/kg} \quad (11.3)$$

$$Q_{in} = h_3 - h_2 \approx h_3 - h_1 - W_{pomp} = 3231 - 191 - 5 = 3035 \text{ kJ/kg} \quad (11.4)$$

Rendement:

$$\eta = \frac{1387}{3035} \approx 0,457 = 45,7\%$$

Dit is theoretisch maximum. Praktische centrales bereiken ongeveer 35–40% vanwege turbine-inefficiëntie en warmteverliezen.

## 11.5 Dampcompressie Koelcyclus

Dit is de meest gebruikte cyclus in koelkasten, airconditioners en warmtepompen. In tegenstelling tot Rankine (die gas/stoom gebruikt) werkt dit met synthetische koelmiddelen (vraker R-134a, tegenwoordig meer vriendelijke stoffen als R-32, R-290). Het voordeel is dat deze stoffen ontworpen zijn voor gunstige thermodynamische eigenschappen bij praktische drukken.

## De vier componenten

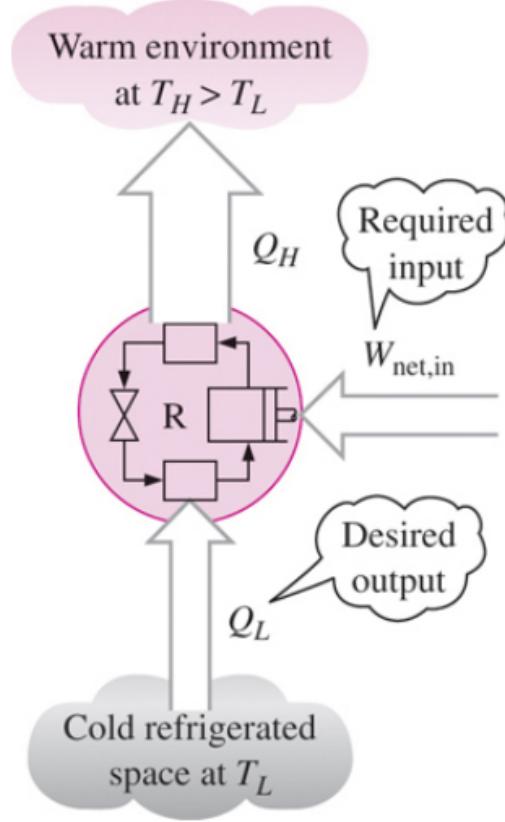


Figure 11.12: Schematische weergave van een dampcompressie koelcyclus met de vier hoofdcomponenten: compressor, condensor, expansieventiel en verdamper.

1. **Compressor (1→2):** Het koelmiddel in gaserige vorm wordt isentroop gecomprimeerd naar hoge druk en temperatuur. Dit vereist elektrische arbeid ( $W_{in}$ ). Een echte compressor bereikt 70–85% isentrope efficiëntie.
2. **Condensor (2→3):** Het hete, hoogdrukgas wordt isobaar gecondenseerd door het naar buiten te blazen (lucht of water). Dit verwijdert warmte:  $Q_{uit} = h_2 - h_3$ .
3. **Expansieventiel (3→4):** Dit is het sleutelproces! De vloeistof wordt door een vernauwing geperst (zoals een capillairtubus of elektronisch ventiel). Dit is een irreversibel "smoring"-proces (isenthalpisch:  $h_3 = h_4$ ). De druk daalt sterk, en omdat de enthalpie hetzelfde blijft, verdampert een deel van de vloeistof. Dit veroorzaakt een grote temperatuurdaling.
4. **Verdamper (4→1):** Het natte koelmiddel (mengsel van vloeistof en gas) verdampert isobaar in contact met de koude ruimte (of wat je wilt koelen). Dit onttrekt warmte:  $Q_{in} = h_1 - h_4$ .

### COP (Coefficient of Performance)

De efficiëntie van een koelcyclus wordt niet uitgedrukt als rendement (want het is geen motor), maar als COP:

$$\text{COP}_{refrig} = \frac{Q_L}{W_{in}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

Voor een warmtepomp (die warmte aan een warm reservoir afgeeft):

$$\text{COP}_{heat\ pump} = \frac{Q_H}{W_{in}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = 1 + \text{COP}_{refrig}$$

**Typische waarden:** Echte koelkasten bereiken COP = 2–4. Dit betekent dat voor elke joule elektrische arbeid, 2–4 joule warmte uit de koude ruimte wordt onttrokken.

**Onomkeerbaarheid:** Het expansieventiel (3→4) is zeer onomkeerbaar en genereert veel entropie. Dit is de grootste energieverdrijver in echte cycli. Ideale cycli gebruiken een expansieturbine in plaats van een ventiel, maar dit is praktisch moeilijk realiserbaar.

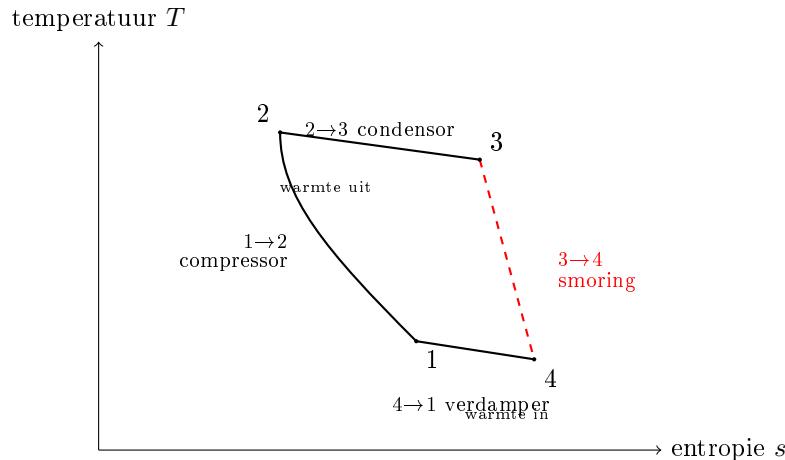
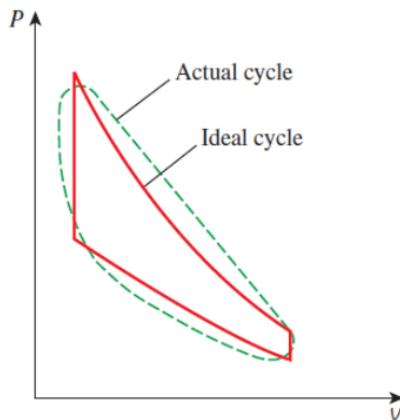


Figure 11.13: T-s diagram dampcompressie koelcyclus: let op dashed lijn (3→4) voor onomkeerbare smoring. Compressor gebruikt arbeid, condensor stoot warmte af, verdamper haalt warmte op uit koude ruimte.



**FIGURE 9-2**

The analysis of many complex processes can be reduced to a manageable level by utilizing some idealizations.

Figure 11.14: P-h diagram van de dampcompressie koelcyclus.

### Praktische Opmerkingen

- **Subcooling en Superheat:** Moderne airconditioners voegen extra componenten toe: de vloeistof wordt onderkoeld voordat het het expansieventiel bereikt (betere COP), en de zuiggas kan licht oververhit zijn om vloeistripping in de compressor te voorkomen.
- **Twee-traps systemen:** Voor zeer lage temperaturen (diepvries) worden twee cycli in serie

gebruikt, elk met zijn eigen compressor.

- **Milieu:** Oudere koelmiddelen (CFC's, HCFC's) beschadigen de ozonlaag. Moderne keuze: HFC-vrij (HFO's) of natuurlijke stoffen (propaan R-290, isobutaan R-600a).

## 11.6 Omkeerbare versus Onomkeerbare Cyclus

### Definitie en Thermodynamisch Perspectief

Alle praktische cyclussen zijn **onomkeerbaar** (irreversibel) vanwege:

1. **Wrijving en Stroming:** Turbulentie, viskeuze verliezen in buizen en in machines
2. **Warmteoverdracht bij eindig  $\Delta T$ :** Warmte stroomt nooit spontaan van koud naar warm zonder arbeid
3. **Smoring (Throttling):** Expansieeventiel, afsluiting van gassen
4. **Menging:** Twee stoffen of temperaturen die mengen

Deze onomkeerbaren genereren **entropie**. Uit de Tweede Wet van Thermodynamica:

$$\Delta S_{gen} = S_{uit} - S_{in} - \int \frac{\delta Q}{T_{bound}} \geq 0$$

waarbij  $S_{gen}$  de *entropie-generatie* is. Voor reversibele processen:  $S_{gen} = 0$ . Voor onomkeerbare processen:  $S_{gen} > 0$ .

### Visualisatie in het T-s diagram

In een *T-s* diagram geldt dat de oppervlakte onder de cyclus direct gerelateerd is aan de netto arbeid:

$$W_{netto} = \oint T ds \quad (\text{oppervlak van cyclus})$$

Wanneer onomkeerbaren optreden, stijgt de entropie van het systeem. Dit veroorzaakt dat de *eindtoestand* van een proces hoger ligt in *s* dan ideaal. Als gevolg:

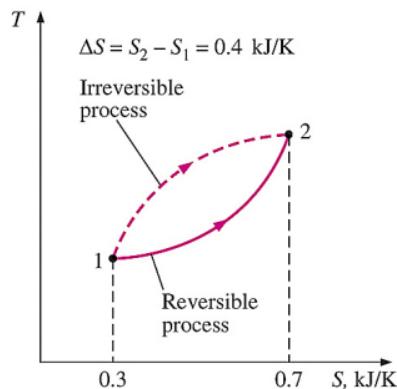


Figure 11.15: T-s diagram: omkeerbare cyclus versus onomkeerbare cyclus. Onomkeerbaren verplaatsen het eindpunt naar hoger entropie, wat leidt tot een kleiner ingesloten oppervlak en minder netto arbeid.

## Waarom Onomkeerbaarheid Lagere Prestatie Geeft

Voor een turbine (expansie):

- **Ideaal (isentroop):** Gas expandeert reversibel van  $(P_1, s_1)$  tot  $(P_2, s_2 = s_1)$  (verticale lijn in  $T-s$ ). Dit levert maximale arbeid:  $W_s = h_1 - h_{2s}$ .
- **Echt (onomkeerbaar):** Wrijving en interne ongelijkheden genereren entropie. Het gas eindigt bij  $(P_2, s_2 > s_1)$ , dus op een hogere enthalpie  $h_2 > h_{2s}$ . Arbeid:  $W_{real} = h_1 - h_2 < W_s$ .
- **Efficiëntie:**  $\eta_{turbine} = \frac{W_{real}}{W_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$  (typisch 85–90%).

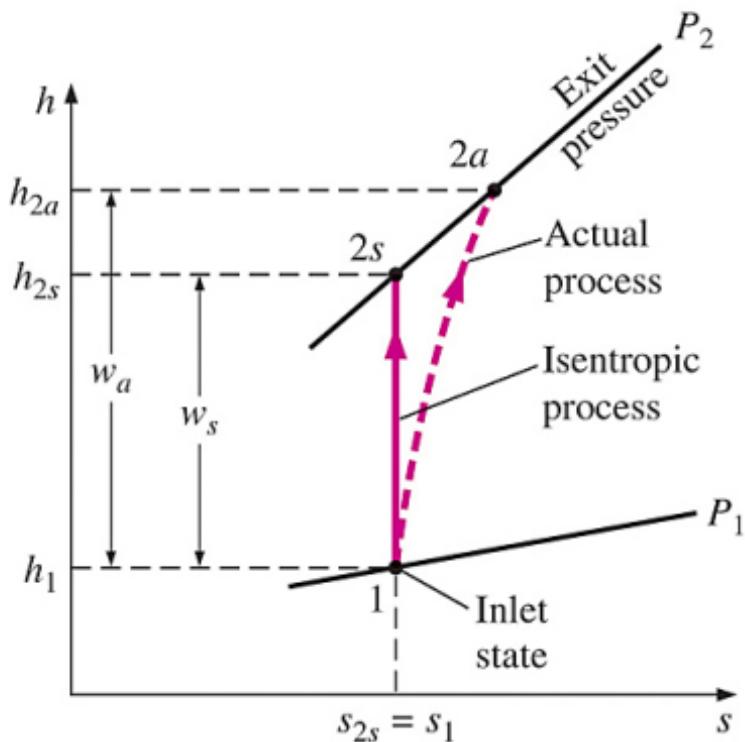


Figure 11.16: Isentropische efficiënties van turbine, compressor, pomp en straalbuis.

Voor een compressor (compressie):

- **Ideaal (isentroop):** Druk stijgt isentroop. Minimale arbeid nodig:  $W_s = h_2 - h_1$ .
- **Echt (onomkeerbaar):** Wrijving genereert entropie. Eindpunt is hoger in  $s$  en  $T$ . Meer arbeid nodig:  $W_{real} > W_s$ .
- **Efficiëntie:**  $\eta_{comp} = \frac{W_s}{W_{real}} = \frac{h_{2s}-h_1}{h_2-h_1}$  (typisch 80–85%).

## Praktisch Voorbeeld: Koelcyclus met Smoring

De **expansieventiel** (3→4) in de koelcyclus is een klassiek voorbeeld van onomkeerbaarheid:

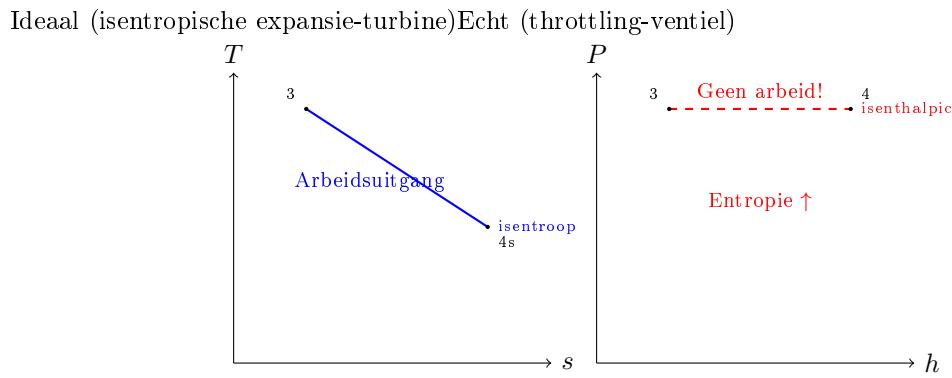


Figure 11.17: Expansie-vergelijking: ideaal isentroop (links, T-s) produceert arbeid; echte smoring (rechts, P-h) produceert geen arbeid en genereert entropie. Dit is de grootste energie-inefficiëntie in echte koelcycli.

### Waarom is smoring onomkeerbaar?

- **Enthalpie constant:**  $h_3 = h_4$  (geen arbeid, geen warmte in het ventiel zelf).
- **Maar:** In het menggebied stijgt de entropie omdat vloeistof plotseling expandeert en verdampt zonder ordeningswerk:  $s_4 > s_3$ .
- **Gevolg:** De koelvloeistof verliest "kwaliteit". Dezelfde hoeveelheid koeling eist meer compressorarbeid.
- **Verbetering:** Een expansie-turbine in plaats van een ventiel zou arbeid produceren en entropie-generatie vermijden, maar is mechanisch ingewikkelder.

### Rendement versus Ideaal

Voor alle machines geldt:

$$\text{Werkelijke Prestatie} = \eta \times \text{Ideale Prestatie}$$

waarbij  $\eta < 1$  vanwege onomkeerbaarheden. Bijvoorbeeld:

| Machine        | Ideale Efficiëntie | Praktische Efficiëntie |
|----------------|--------------------|------------------------|
| Turbine        | Isentroop          | 85–92%                 |
| Compressor     | Isentroop          | 80–88%                 |
| Pomp           | Isentroop          | 75–85%                 |
| Ventilator     | Isentroop          | 70–80%                 |
| Koelkast (COP) | Carnot (7–15)      | 2–4                    |

De *isenstrope efficiëntie* is het meest gebruikt als benchmark:

$$\eta_s = \frac{\text{ideale arbeid}}{\text{werkelijke arbeid}}$$

Dit geeft aan hoeveel percent van het ideale resultaat wordt bereikt ondanks onomkeerbaarheden.

### Voorbeeldoefening 1: Stoomturbine met Irreversibiliteit

**Gegeven:** Stoom stroomt in een turbine met:

- Inlaat:  $P_1 = 5 \text{ MPa}$ ,  $T_1 = 400^\circ\text{C} \rightarrow h_1 = 3231 \text{ kJ/kg}$ ,  $s_1 = 6,55 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- Uitlaat:  $P_2 = 10 \text{ kPa}$  (verzadigd)

- Turbine-efficiëntie:  $\eta_{turbine} = 0,85$  (realistisch)

Uit verzadigde tabellen voor  $P_2 = 10 \text{ kPa}$ :

- $h_f = 191 \text{ kJ/kg}$ ,  $h_g = 2584 \text{ kJ/kg}$
- $s_f = 0,649 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ,  $s_g = 8,150 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$

**Gevraagd:**

- Bepaal  $h_{2s}$  (ideale isentrope uitlaat-enthalpie)
- Bepaal  $h_2$  (werkelijke uitlaat-enthalpie met wrijving)
- Bepaal  $s_2$  (werkelijke uitlaat-entropie)
- Bereken entropie-generatie per kg stoom

**Oplossing:**

(a) **Isentrope uitlaat** ( $s_{2s} = s_1 = 6,55 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ):

In het menggebied bij  $P_2 = 10 \text{ kPa}$ :

$$s_{2s} = s_f + x(s_g - s_f)$$

$$6,55 = 0,649 + x(8,150 - 0,649)$$

$$x = \frac{6,55 - 0,649}{7,501} = 0,7732$$

Dus:  $h_{2s} = h_f + x(h_g - h_f) = 191 + 0,7732 \times (2584 - 191) = 1839 \text{ kJ/kg}$

(b) **Werkelijke uitlaat met turbine-efficiëntie:**

De turbine-efficiëntie is:

$$\eta_{turbine} = \frac{W_{real}}{W_{ideal}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

Dus:

$$0,85 = \frac{3231 - h_2}{3231 - 1839}$$

$$0,85 \times 1392 = 3231 - h_2$$

$$h_2 = 3231 - 1183 = 2048 \text{ kJ/kg}$$

Dit is hoger dan  $h_{2s} = 1839 \text{ kJ/kg}$  omdat wrijving extra warmte genereert.

(c) **Werkelijke uitlaat-entropie:**

Met  $h_2 = 2048 \text{ kJ/kg}$  in het menggebied ( $P_2 = 10 \text{ kPa}$ ):

$$h_2 = h_f + x_2(h_g - h_f)$$

$$2048 = 191 + x_2(2584 - 191)$$

$$x_2 = \frac{2048 - 191}{2393} = 0,7754$$

En:  $s_2 = s_f + x_2(s_g - s_f) = 0,649 + 0,7754 \times 7,501 = 6,461 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$

(d) **Entropie-generatie:**

De entropie-generatie per kg stoom is:

$$s_{gen} = s_2 - s_1 = 6,75 - 6,55 = 0,20 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$

Dit vertegenwoordigt de onomkeerbare energie verloren door wrijving en turbulentie.

**Vergelijking:**

- Ideale turbine:  $W_{ideal} = h_1 - h_{2s} = 3231 - 1839 = 1392 \text{ kJ/kg}$
- Reale turbine (85% efficiënt):  $W_{real} = 0,85 \times 1392 = 1183 \text{ kJ/kg}$
- Verliezen door wrijving:  $1392 - 1183 = 209 \text{ kJ/kg}$

### Voorbeeldoefening 2: Gascompressor met Onomkeerbaarheid

**Gegeven:** Lucht (ideaal gas,  $\gamma = 1,4$ ,  $R = 0,287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ) wordt gecomprimeerd:

- Inlaat:  $P_1 = 100 \text{ kPa}$ ,  $T_1 = 300 \text{ K}$
- Uitlaat:  $P_2 = 500 \text{ kPa}$
- Compressor-efficiëntie:  $\eta_{comp} = 0,82$

**Gevraagd:**

1. Bepaal  $T_{2s}$  (ideaal isentroop)
2. Bepaal  $T_2$  (werkelijk met wrijving)
3. Bepaal  $\Delta s_{gen}$  (entropie-generatie)
4. Werk-, warmte- en enthalpie-vergelijking

**Oplossing:**

**(a) Isentrope temperatuur:**

Voor isentroop proces (adiabatisch+reversibel):

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$\frac{T_{2s}}{300} = \left( \frac{500}{100} \right)^{0,4/1,4} = 5^{2/7} = 1,903$$

$$T_{2s} = 300 \times 1,903 = 571 \text{ K}$$

**(b) Werkelijke uitlaattemperatuur:**

Compressor-efficiëntie:

$$\eta_{comp} = \frac{W_{ideal}}{W_{real}} = \frac{c_p(T_{2s} - T_1)}{c_p(T_2 - T_1)} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}$$

Met  $c_p = 1,005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  (lucht):

$$0,82 = \frac{571 - 300}{T_2 - 300}$$

$$T_2 - 300 = \frac{271}{0,82} = 330 \text{ K}$$

$$T_2 = 630 \text{ K}$$

De werkelijke compressie leidt tot veel hogere temperatuur (630 K vs 571 K) vanwege wrijving!

**(c) Entropie-generatie:**

Voor ideaal gas:

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Isentrope geval:

$$\Delta s_{ideal} = 0$$

Werkelijke geval:

$$\begin{aligned} \Delta s &= 1,005 \ln \frac{630}{300} - 0,287 \ln \frac{500}{100} \\ &= 1,005 \ln(2,1) - 0,287 \ln(5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1,005 \times 0,742 - 0,287 \times 1,609 \\
 &= 0,746 - 0,461 = 0,285 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K})
 \end{aligned}$$

Dit is de entropie-generatie door wrijving en turbulentie.

**(d) Arbeids- en enthalpie-vergelijking:**

$$W_{ideal} = c_p(T_{2s} - T_1) = 1,005 \times 271 = 272 \text{ kJ/kg} \quad (11.5)$$

$$W_{real} = c_p(T_2 - T_1) = 1,005 \times 330 = 331 \text{ kJ/kg} \quad (11.6)$$

$$\text{Verlies} = W_{real} - W_{ideal} = 59 \text{ kJ/kg} \quad (11.7)$$

Dit verlies wordt omgezet in warmte (voor- of afvoer afhankelijk van koeling).

**Voorbeeldoefening 3: Throttling (Expansieventiel) in Koelcyclus**

**Gegeven:** R-134a koelmiddel door expansieventiel:

- Inlaat (onderkoel vloeistof):  $P_1 = 1000 \text{ kPa}$ ,  $T_1 = 40^\circ\text{C} \rightarrow h_1 = 104,8 \text{ kJ/kg}$ ,  $s_1 = 0,3659 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$
- Uitlaat (menggebied):  $P_2 = 200 \text{ kPa}$

Verzadigde waarden bij  $P_2 = 200 \text{ kPa}$ :

- $h_f = 50,45 \text{ kJ/kg}$ ,  $h_g = 226,5 \text{ kJ/kg}$
- $s_f = 0,1916 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ,  $s_g = 0,8158 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$

**Gevraagd:**

1. Bepaal kwaliteit  $x_2$  en  $s_2$  bij throttling
2. Vergelijk met ideale isentrope expansie
3. Bereken verloren koelwerk

**Oplossing:**

**(a) Throttling (isenthalpic):**

Bij throttling (expansieventiel) geldt:

$$h_2 = h_1 = 104,8 \text{ kJ/kg}$$

In het menggebied bij  $P_2 = 200 \text{ kPa}$ :

$$h_2 = h_f + x_2(h_g - h_f)$$

$$104,8 = 50,45 + x_2(226,5 - 50,45)$$

$$x_2 = \frac{104,8 - 50,45}{176,05} = 0,308$$

Entropie:

$$\begin{aligned}
 s_2 &= s_f + x_2(s_g - s_f) = 0,1916 + 0,308(0,8158 - 0,1916) \\
 &= 0,1916 + 0,190 = 0,3816 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K})
 \end{aligned}$$

Entropie-generatie:

$$s_{gen} = s_2 - s_1 = 0,3816 - 0,3659 = 0,0157 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K})$$

Dit is onomkeerbaar! Ondanks dezelfde enthalpie is entropie gestegen.

**(b) Vergelijking met ideale isentrope expansie:**

Ideaal zou dit isentroop zijn:  $s_2 = s_1 = 0,3659 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .

Dan:  $0,3659 = 0,1916 + x_{2s}(0,8158 - 0,1916)$

$$x_{2s} = \frac{0,1743}{0,6242} = 0,279$$

$$\text{En: } h_{2s} = 50,45 + 0,279 \times 176,05 = 99,6 \text{ kJ/kg}$$

Dit is lager dan  $h_2 = 104,8 \text{ kJ/kg}$  van throttling!

**(c) Verloren koelwerk:**

Met ideale isentrope expansie zou verdamper-inlaat  $99,6 \text{ kJ/kg}$  zijn (meer onderkoeld). Met throttling is inlaat  $104,8 \text{ kJ/kg}$  (minder onderkoeld).

Dit betekent dat dezelfde massastroom via verdamper minder koeling haalt:

$$\Delta Q_{verlies} = h_2 - h_{2s} = 104,8 - 99,6 = 5,2 \text{ kJ/kg}$$

Dit verlies moet worden gecompenseerd door een grotere massa-circulatie of hogere compressorwerk!

## 12 Warmteoverdracht Mechanismen

Thermodynamica zegt *hoeveel* warmte er tussen toestanden wordt uitgewisseld, maar niet *hoe snel* dat gebeurt. Warmteoverdracht bestudeert de **snelheid** van energie-overdracht (warmtestroomdebiet  $\dot{Q}$ ) als gevolg van een temperatuurverschil  $\Delta T$ .

Er zijn drie manieren waarop warmte kan worden overgedragen:

- **Conductie (geleiding):** energie-overdracht door microscopische interacties in een materiaal.
- **Convectie:** energie-overdracht tussen een oppervlak en een stromend fluïdum via een grenslaag.
- **Straling:** energie-overdracht via elektromagnetische golven (zonder medium).

### Overzicht (kernwetten)

$$\begin{aligned} \text{conductie, 1D} &: \dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \\ \text{convectie} &: \dot{Q} = hA(T_s - T_\infty) \\ \text{straling} &: \dot{Q} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{sur}^4) \end{aligned}$$

met  $\dot{Q}$  = warmtestroomdebiet (W),  $k$  = warmtegeleidingscoëfficiënt ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ),  $h$  = convectiecoëfficiënt ( $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ),  $\varepsilon$  = emissiecoëfficiënt,  $\sigma$  = Stefan-Boltzmann constante ( $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$ ),  $A$  = dwarsdoorsnede ( $\text{m}^2$ ),  $T_s$  = oppervlakte temperatuur ( $\text{K}$ ),  $T_{sur}$  = omringende temperatuur ( $\text{K}$ ).

### 12.1 Conductie

**Conductie** is warmteoverdracht *doorheen* een medium (vaste stof, stilstaande vloeistof of gas) door moleculaire interacties. Verschillende materialen conducteren warmte met verschillende snelheden. Deze verschillen worden berekent met de warmtegeleidingscoëfficiënt  $k$ . **warmtegeleidingscoëfficiënt**  $k$  (in  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ).

De lokale (1D) wet van Fourier is:

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx}$$

Het minteken geeft aan dat warmte spontaan stroomt van *warm* naar *koud*.  $Q$  is het warmtestroomdebiet ( $\text{W}$ ),  $A$  de dwarsdoorsnede ( $\text{m}^2$ ), en  $dT/dx$  de temperatuurgradiënt ( $\text{K/m}$ ).

## Warmteweerstand

Een belangrijk concept bij conductie is de **warmteweerstand**  $R_{cond}$ . Net zoals bij elektrische weerstand kunnen warmteweerstanden in serie en parallel worden gezet. Als je van lucht naar een muur en terug naar lucht gaat kun je alle warmteweerstanden optellen.

### Kernformules (conductie en warmteweerstand)

$$\begin{aligned} \text{Vlakke wand (stationair, 1D)} &: \dot{Q} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \\ \text{Warmteweerstand (vlak)} &: R_{cond} = \frac{L}{kA} \\ \text{Warmteweerstanden in serie} &: R_{tot} = \sum_i R_i, \quad \dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{tot}} \\ \text{Warmteweerstanden in parallel} &: \frac{1}{R_{tot}} = \sum_i \frac{1}{R_i} \end{aligned}$$

### Voorbeeldoefening: stationaire geleiding door een vlakke wand

**Gegeven:** Een vlakke wand met  $k = 0,80 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , oppervlakte  $A = 10 \text{ m}^2$  en dikte  $L = 0,20 \text{ m}$ . De warme zijde is  $T_1 = 60^\circ\text{C}$  en de koude zijde  $T_2 = 40^\circ\text{C}$ .

**Gevraagd:** Bepaal  $\dot{Q}$  en schets  $T(x)$ .

**Oplossing:**

$$\dot{Q} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} = 0,80 \cdot 10 \cdot \frac{20}{0,20} = 800 \text{ W}$$

Het temperatuurprofiel is lineair (constante  $k$ , 1D, stationair).

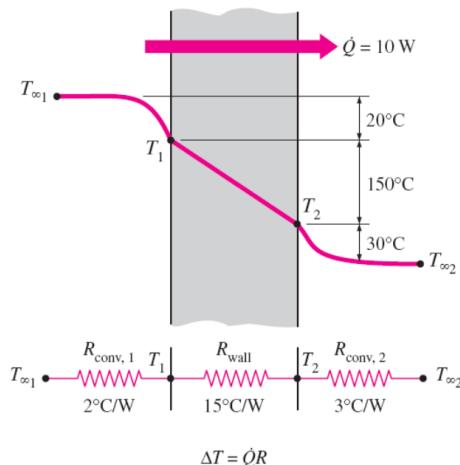


Figure 12.1: Lineair  $T(x)$ -profiel bij stationaire conductie door een vlakke wand en het thermische weerstandsnetwerk.

## 12.2 Convektie

**Convektie** is warmteoverdracht tussen een oppervlak ( $T_s$ ) en een stromend fluïdum met vrije-stroomtemperatuur  $T_\infty$ . Fysisch gebeurt de overdracht door *conductie in de grenslaag* vlak bij het oppervlak + *transport door stroming* in het fluïdum.

De wet van Newton voor afkoeling is:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty)$$

Hierbij is  $h$  de convectiecoëfficiënt ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ). Dit is *geen* vaste materiaaleigenschap:  $h$  hangt af van stromingsregime (laminair/turbulent), fluïdeigenschappen ( $\rho, \mu, k, c_p$ ), karakteristieke lengte en geometrie.

We onderscheiden:

- **Gedwongen convectie:** stroming door ventilator/pomp/wind (meestal grotere  $h$ ).
- **Natuurlijke (vrije) convectie:** stroming door dichtheidsverschillen (opdrijving) door  $\Delta T$ .

### Kernformules (convectie)

$$\begin{aligned}
 \text{Newton (convectie)} &: \dot{Q} = hA(T_s - T_\infty) \\
 \text{Convectieweerstand} &: R_{conv} = \frac{1}{hA} \\
 \text{Nusseltgetal (def.)} &: Nu = \frac{hL_c}{k_{fluid}} \\
 \text{Lumped capacitance} &: \frac{dT}{dt} = -\frac{hA}{mc}(T - T_\infty) \\
 \text{Oplossing} &: T(t) = T_\infty + (T_0 - T_\infty)e^{-t/\tau}, \quad \tau = \frac{mc}{hA}
 \end{aligned}$$

### Voorbeeldoefening: Newton-afkoeling (lumped model)

**Gegeven:** Een metalen blok met massa  $m = 2,0 \text{ kg}$  en  $c = 900 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  koelt af in lucht met  $T_\infty = 20^\circ\text{C}$ . Het effectieve oppervlak is  $A = 0,10 \text{ m}^2$  en  $h = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Starttemperatuur  $T_0 = 120^\circ\text{C}$ .

**Gevraagd:** Bepaal  $T$  na  $t = 10 \text{ min}$ .

**Oplossing:**

$$\tau = \frac{mc}{hA} = \frac{2,0 \cdot 900}{10 \cdot 0,10} = 1800 \text{ s}, \quad t = 600 \text{ s}$$

$$T(t) = 20 + (120 - 20)e^{-600/1800} = 20 + 100e^{-1/3} \approx 91,6^\circ\text{C}$$

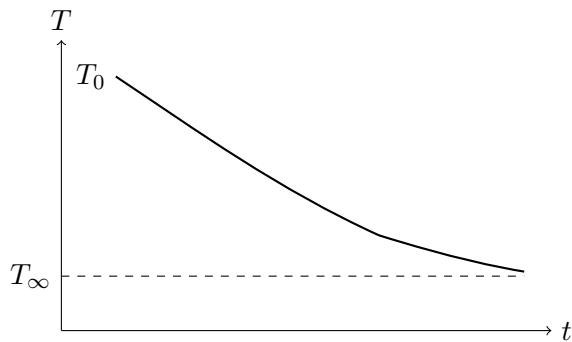


Figure 12.2: Exponentiële afkoeling volgens Newton (lumped capacitance).

## 12.3 Straling

Straling is energie-overdracht via elektromagnetische golven (fotonen). In tegenstelling tot conductie en convectie, heeft straling geen medium nodig.

De **maximale** uitzendende straling hoort bij een *zwart lichaam*:

$$\dot{Q}_{max} = \sigma A_s T_s^4$$

waarbij  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$  de Stefan–Boltzmann constante is. **Let op:** straling rekent met **absolute temperatuur** in Kelvin.

Voor reële oppervlakken gebruiken we de **emissiviteit**  $\varepsilon \in [0, 1]$ :

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4$$

Omdat straling afhangt van  $T^4$ , wordt dit mechanisme relatief belangrijk bij hoge temperaturen.

## Belangrijke Formules

|                      |   |
|----------------------|---|
| Zwart lichaam        | : $\dot{Q}_{\max} = \sigma A T^4$                               |
| Reëel oppervlak      | : $\dot{Q} = \varepsilon \sigma A T^4$                          |
| Netto naar omgeving  | : $\dot{Q}_{net} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{sur}^4)$    |
| Linearisatie         | : $\dot{Q}_{rad} \approx h_r A (T_s - T_{sur})$                 |
| Stralingscoëfficiënt | : $h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2)$ |
| Stralingsweerstand   | : $R_{rad} = \frac{1}{h_r A}$                                   |

### Voorbeeldoefening: netto stralingsverlies naar een grote omgeving

**Gegeven:** Een warm oppervlak met  $A = 0,020 \text{ m}^2$  en emissiviteit  $\varepsilon = 0,80$  heeft  $T_s = 800 \text{ K}$ . De omgeving is groot en isotherm met  $T_{sur} = 300 \text{ K}$ .

**Gevraagd:** Bepaal het netto stralingsvermogen  $\dot{Q}_{net}$ . **Oplossing:**

$$\dot{Q}_{net} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{sur}^4)$$

$$\dot{Q}_{net} = 0,80 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,020 (800^4 - 300^4) \approx 364 \text{ W}$$

Dus  $\boxed{\dot{Q}_{net} \approx 364 \text{ W}}$ .

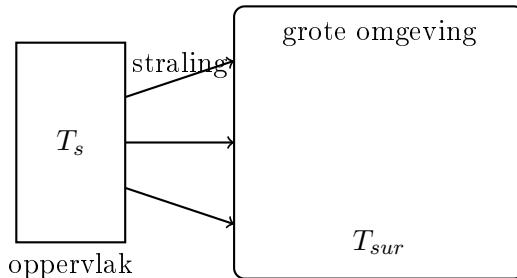


Figure 12.3: Schematische stralingsuitwisseling tussen een oppervlak en een grote omgeving.

## 12.4 Combinatie van Convectie, Conductie en Straling

Deze drie mechanismes worden dan gecombineerd. Bijvoorbeeld: Een oppervlak dat aan de lucht is blootgesteld verliest warmte door **zowel** convectie **als** straling tegelijk. Bovendien staat dit oppervlak vaak in contact met een geleidend medium (wanden, isolatie, etc.). Het is daarom belangrijk te begrijpen hoe deze mechanismes samen werken.

### Serie- en Parallelschakeling van Warmteweerstanden

Net als bij elektrische circuits kunnen warmteweerstanden in **serie** of **parallel** worden geschakeld:

- **In serie:** De weerstanden liggen achter elkaar; dezelfde warmtestroom  $\dot{Q}$  gaat door alle weerstanden. De totale weerstand is  $R_{tot} = R_1 + R_2 + \dots$
- **In parallel:** De weerstanden liggen naast elkaar; dezelfde temperatuur staat over alle weerstanden. De totale geleiding (reciprocale weerstand) is  $\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$

### Veel Voorkomende Scenario's

**Scenario 1: Geleid oppervlak met convectie aan beide zijden (serie)**

Een wand staat in contact met lucht aan beide zijden:

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{conv,1} + R_{cond} + R_{conv,2}} \quad (12.1)$$

$$= \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A}} \quad (12.2)$$

De warmtestroom is hetzelfde door alle drie de lagen.

**Scenario 2: Oppervlak dat warmte verliest door convectie én straling (parallel)**

Bijvoorbeeld een geïsoleerde muur naar buiten, of een verwarmde plaat in een ruimte. Beide mechanismen handelen onafhankelijk:

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (12.3)$$

$$= hA(T_s - T_{\infty}) + \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (12.4)$$

De totale warmteverlies is de som van beide componenten.

### Belangrijke Formules

Serie (algemeen) :  $\dot{Q} = \frac{\Delta T}{\sum_i R_i}$

Vlakke wand + convectie (beide zijden) :  $\dot{Q} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A}}$

Convectie + straling (parallel) :  $\dot{Q}_{tot} = hA(T_s - T_{\infty}) + \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{sur}^4)$

### Voorbeeldoefening 1: Muur met convectie aan beide zijden (serie)

**Gegeven:** Een muur van beton met  $k = 1,4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  en dikte  $L = 0,30 \text{ m}$ . Oppervlakte  $A = 10 \text{ m}^2$ . Binnentemperatuur  $T_{\infty,1} = 22^\circ\text{C}$  met convectiecoëfficiënt  $h_1 = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  (stilstaande lucht). Buitentemperatuur  $T_{\infty,2} = 0^\circ\text{C}$  met  $h_2 = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  (wind).

**Gevraagd:** Bepaal de warmtestroom  $\dot{Q}$  en de oppervlaktetemperaturen  $T_{s,1}$  en  $T_{s,2}$ .

**Oplossing:**

Stap 1: Berekenen van de weerstanden

$$R_{conv,1} = \frac{1}{h_1 A} = \frac{1}{8 \cdot 10} = 0,0125 \text{ K/W}$$

$$R_{cond} = \frac{L}{kA} = \frac{0,30}{1,4 \cdot 10} = 0,02143 \text{ K/W}$$

$$R_{conv,2} = \frac{1}{h_2 A} = \frac{1}{25 \cdot 10} = 0,004 \text{ K/W}$$

$$R_{tot} = 0,0125 + 0,02143 + 0,004 = 0,03793 \text{ K/W}$$

Stap 2: Warmtestroom

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} = \frac{22 - 0}{0,03793} \approx 580 \text{ W}$$

Stap 3: Oppervlaktetemperaturen

Voor het binnenoppervlak:

$$T_{s,1} = T_{\infty,1} - \dot{Q} \cdot R_{conv,1} = 22 - 580 \cdot 0,0125 = 22 - 7,25 \approx 14,75^\circ\text{C}$$

Voor het buitenoppervlak:

$$T_{s,2} = T_{\infty,2} + \dot{Q} \cdot R_{conv,2} = 0 + 580 \cdot 0,004 = 2,32^\circ\text{C}$$

Dus  $\dot{Q} \approx 580 \text{ W}$ ,  $T_{s,1} \approx 14,8^\circ\text{C}$  en  $T_{s,2} \approx 2,3^\circ\text{C}$ .

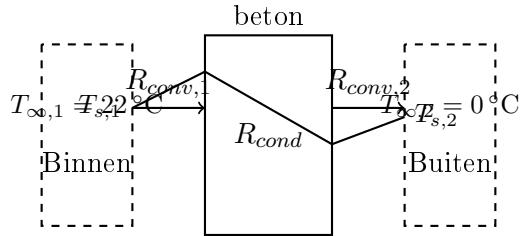


Figure 12.4: Wand in serie: inwendige en uitwendige convectie plus geleiding door de wand.

### Voorbeeldoefening 2: Warm oppervlak verliest warmte door convectie én straling (parallel)

**Gegeven:** Een verwarmde koppelenplaat in een werkplaats. Oppervlakte  $A = 0,50 \text{ m}^2$ , oppervlaktetemperatuur  $T_s = 100^\circ\text{C} = 373 \text{ K}$ . Omgevingstemperatuur  $T_\infty = T_{sur} = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$  (grijze straler). Emissiviteit  $\varepsilon = 0,90$ . Convectiecoëfficiënt (natuurlijke convectie)  $h = 6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Stefan-Boltzmann:  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ .

**Gevraagd:** Bepaal het warmteverlies door convectie, door straling en het totale verlies.

**Oplossing:**

#### Warmteverlies door convectie

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty) = 6 \cdot 0,50 \cdot (373 - 293) = 6 \cdot 0,50 \cdot 80 = 240 \text{ W}$$

#### Warmteverlies door straling

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{sur}^4)$$

$$= 0,90 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \cdot 0,50 \cdot (373^4 - 293^4)$$

$$= 0,90 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \cdot 0,50 \cdot (19,432 \times 10^8 - 7,368 \times 10^8)$$

$$= 0,90 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \cdot 0,50 \cdot 12,064 \times 10^8$$

$$\approx 307 \text{ W}$$

#### Totaal warmteverlies

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = 240 + 307 = 547 \text{ W}$$

Dus  $\dot{Q}_{conv} \approx 240 \text{ W}$ ,  $\dot{Q}_{rad} \approx 307 \text{ W}$  en  $\dot{Q}_{tot} \approx 547 \text{ W}$ .

**Opmerking:** Bij deze relatief lage temperatuurverschillen ( $\Delta T = 80 \text{ K}$ ) is straling al dominant (57% van totaal). Bij nog hogere temperaturen wordt straling nog belangrijker.

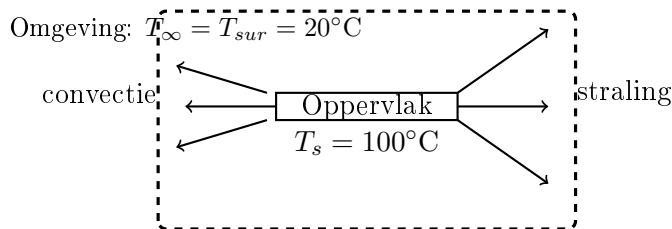


Figure 12.5: Parallel verlies: oppervlak verliest warmte door zowel convectie als straling.

### Voorbeeldoefening 3: Isolatie met convectie aan beide zijden

**Gegeven:** Een dubbelwandige constructie met:

- Binnenoppervlak: convectie met  $h_1 = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $T_{\infty,1} = 25^\circ\text{C}$
- Eerst lag: beton ( $k_1 = 1,4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $L_1 = 0,10 \text{ m}$ )
- Tweede lag: isolatie ( $k_2 = 0,040 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $L_2 = 0,05 \text{ m}$ )
- Buitenoppervlak: convectie met  $h_2 = 20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $T_{\infty,2} = 5^\circ\text{C}$
- Oppervlakte  $A = 8 \text{ m}^2$

**Gevraagd:** Warmtestroom en temperatuur op het grensvlak tussen beton en isolatie ( $T_s$ ).

**Oplossing:**

Weerstanden

$$R_{conv,1} = \frac{1}{h_1 A} = \frac{1}{10 \cdot 8} = 0,0125 \text{ K/W}$$

$$R_{cond,1} = \frac{L_1}{k_1 A} = \frac{0,10}{1,4 \cdot 8} = 0,00893 \text{ K/W}$$

$$R_{cond,2} = \frac{L_2}{k_2 A} = \frac{0,05}{0,040 \cdot 8} = 0,156 \text{ K/W}$$

$$R_{conv,2} = \frac{1}{h_2 A} = \frac{1}{20 \cdot 8} = 0,00625 \text{ K/W}$$

$$R_{tot} = 0,0125 + 0,00893 + 0,156 + 0,00625 = 0,1838 \text{ K/W}$$

Warmtestroom

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} = \frac{25 - 5}{0,1838} \approx 109 \text{ W}$$

Temperatuur op grensvlak

De temperatuur dalen zich optellen van buiten naar binnenvoor de isolatie is:

$$\Delta T_{cond,2} = \dot{Q} \cdot R_{cond,2} = 109 \cdot 0,156 = 17 \text{ K}$$

Op het buitenoppervlak:

$$T_{s,outer} = T_{\infty,2} + \dot{Q} \cdot R_{conv,2} = 5 + 109 \cdot 0,00625 = 5,68^\circ\text{C}$$

Op het grensvlak (tussen beton en isolatie):

$$T_s = T_{s,outer} + \Delta T_{cond,2} = 5,68 + 17 = 22,68^\circ\text{C} \approx 22,7^\circ\text{C}$$

Dus  $\boxed{\dot{Q} \approx 109 \text{ W}}$  en  $\boxed{T_s \approx 22,7^\circ\text{C}}.$

**Opmerking:** De isolatie veroorzaakt de grootste temperatuurval ( $\approx 17 \text{ K}$ ) omdat  $R_{cond,2} \gg R_{cond,1}$ . Dit is precies de functie van isolatie!

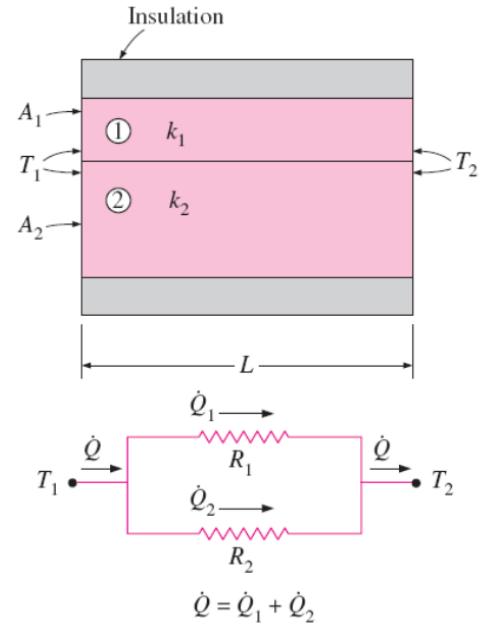


Figure 12.6: Temperatuurverloop door een samengestelde wand met isolatie. De grootste temperatuurdaling vindt plaats over de laag met de hoogste weerstand (isolatie).

## Part III

# Oefeningen Warmte en Stromingen

# 13 Oefeningen

## 13.1 Oefenzitting 1&2: Hydrostatica

### Belangrijke Formules

- **Hydrostatische druk:**  $P = P_{atm} + \rho gh$

Beschrijft de druk op een diepte  $h$  in een stilstaande vloeistof.

- **Hydrostatische kracht op een vlak:**  $F_R = P_{gem}A = (P_0 + \rho gh_c)A$

De totale kracht op een ondergedompeld oppervlak, werkend op het drukpunt.

- **Locatie drukpunt:**  $y_p = y_c + \frac{I_{xx,c}}{y_c A}$

De verticale positie waar de resultante kracht aangrijpt met  $y_c$  het centerpunt ( $y_p$  altijd dieper dan centerpunt  $y_c$ ).

- **Oppervlakte en traagheidsmomenten:**

Rechthoek:  $A = bh$ ,  $I_{xx,c} = \frac{bh^3}{12}$  (as door het zwaartepunt, evenwijdig met het vrije oppervlak).

Cirkel:  $A = \pi R^2$ ,  $I_{xx,c} = \frac{\pi R^4}{4}$ .

- **Netto druk (binnen/buiten):**  $p_{net}(h) = (P_0 + \rho gh) - P_{in}$

Handig als binnenin een constante druk  $P_{in}$  heerst (bv. lucht op  $P_{atm}$ ).

- **Wet van Archimedes:**  $F_b = \rho_{vloeistof} g V_{onder}$

De opwaartse kracht is gelijk aan het gewicht van de verplaatste vloeistof.

- **Drijvend object:**  $F_b = W_{object} \Rightarrow \rho_{vloeistof} V_{onder} = \rho_{object} V_{totaal}$

Voor een object dat in evenwicht drijft.

- **Dichtheid via wegen in lucht en in water:**  $\rho_{obj} = \rho_{vloeistof} \frac{W_{lucht}}{W_{lucht} - W_{in\ vloeistof}}$

Gebruikt Archimedes:  $W_{lucht} - W_{in\ vloeistof} = F_b = \rho_{vloeistof} g V$ .

- **Drukpunt op een schuine vlakke plaat:**  $s_p = \bar{s} + \frac{I_G}{\bar{s} A}$  met  $\bar{s} = \frac{h_c}{\sin \theta}$

$s$  is afstand langs de plaat gemeten vanaf het vrije oppervlak.

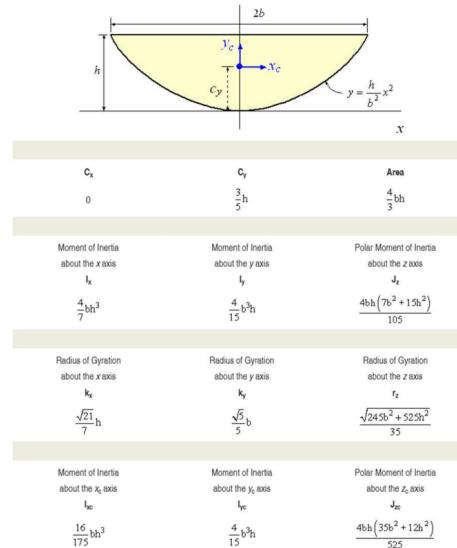


Figure 13.1: Hydrostatische krachten op een ondergedompeld vlak oppervlak.

## 1. Manometer en Drukverschil

**Gegeven:** Een manometer met kwik ( $\rho_{Hg} = 13.600 \text{ kg/m}^3$ ) is aangesloten op een tank met gas. Het niveauverschil in de manometer is  $h = 40 \text{ cm}$ . De atmosferische druk is  $P_{atm} = 101 \text{ kPa}$ . De zwaartekrachtversnelling is  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

**Gevraagd:** Bepaal de absolute druk in de tank.

**Oplossing:** De druk in de tank duwt de kwikkolom omlaag. Op het scheidingsvlak (isobaar vlak) geldt dat de druk in de linker- en rechtertak gelijk moet zijn.

$$P_{tank} = P_{atm} + \rho_{Hg}gh$$

Invullen van de waarden:

$$P_{tank} = 101.000 \text{ Pa} + (13.600 \text{ kg/m}^3)(9,81 \text{ m/s}^2)(0,40 \text{ m})$$

$$P_{tank} = 101.000 + 53.366,4 \text{ Pa}$$

$$P_{tank} \approx 154,4 \text{ kPa}$$

## 2. Kracht op een Ondergedompeld Luik

**Gegeven:** Een rechthoekig luik van  $2 \text{ m}$  breed en  $3 \text{ m}$  hoog bevindt zich verticaal in een waterreservoir. De bovenkant van het luik bevindt zich  $1 \text{ m}$  onder het wateroppervlak.

**Gevraagd:** De totale hydrostatische kracht op het luik en de locatie van het drukpunt.

**Oplossing:** De gemiddelde druk werkt op het zwaartepunt (centroid) van het luik. De diepte van het zwaartepunt  $h_c$  is:

$$h_c = 1 \text{ m} + \frac{3 \text{ m}}{2} = 2,5 \text{ m}$$

De gemiddelde druk is:

$$P_{gem} = \rho gh_c = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2,5 = 24.525 \text{ Pa}$$

De totale kracht is:

$$F_R = P_{gem} \cdot A = 24.525 \cdot (2 \cdot 3) = 147.150 \text{ N} \approx 147,2 \text{ kN}$$

De locatie van het drukpunt  $y_p$  (gemeten vanaf het oppervlak):

$$y_p = y_c + \frac{I_{xx,c}}{y_c A}$$

Met  $y_c = h_c = 2,5 \text{ m}$  en  $I_{xx,c} = \frac{bh^3}{12} = \frac{2 \cdot 3^3}{12} = 4,5 \text{ m}^4$ .

$$y_p = 2,5 + \frac{4,5}{2,5 \cdot 6} = 2,5 + \frac{4,5}{15} = 2,5 + 0,3 = 2,8 \text{ m}$$

Het drukpunt ligt dus  $0,3 \text{ m}$  onder het zwaartepunt.

### 3. Vlakke schuine klep met parabolische vorm (kracht en druklijn)

**Gegeven:** Een open bezinktank bevat een vloeistofsuspensie met dichtheid  $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$ . Een schuine klep maakt een hoek  $\theta = 60^\circ$  met de horizontaal en is scharnierend aan de bodem. De vloeistofhoogte is  $5 \text{ m}$ .

De vorm van de klep (in haar vlak) wordt beschreven door het gebied begrensd door  $x = 0$ ,  $y = 3 \text{ m}$  en de parabool  $y = 2x^2$ . De klep heeft een breedte (in de diepte)  $b = 2 \text{ m}$ .

vrije vloeistoffoppervlak

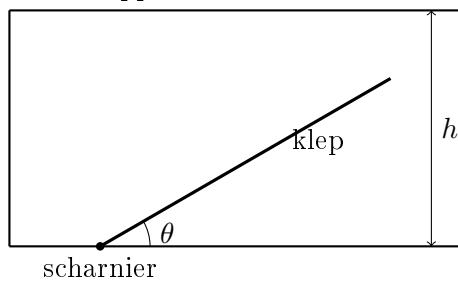


Figure 13.2: Schematische voorstelling van de bezinktank met schuine klep.

**Oplossing:** We behandelen de klep als *een vlak oppervlak* op een helling.

**1) Oppervlakte van de parabolische vorm (in het vlak)** Voor  $y = 3$  is  $x = a = \sqrt{\frac{3}{2}}$ .

De oppervlakte van het gebied begrensd door  $x = 0$ ,  $y = 3$  en  $y = 2x^2$  is gelijk aan:

$$A_{vlak} = A_{rechthoek} - A_{parabool} = a \cdot h - \int_0^a 2x^2 dx = a \cdot 3 - \frac{2}{3}a^3$$

Met  $a = \sqrt{\frac{3}{2}}$  volgt:

$$A_{vlak} = 3\sqrt{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3} \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right)^3 \approx 2,449 \text{ m}^2$$

De totale klepoppervlakte is  $A = b \cdot A_{vlak} = 2 \cdot 2,449 = 4,898 \text{ m}^2$ .

**2) Diepte van het zwaartepunt** Voor dit parabolische gebied ligt het zwaartepunt op

$$\bar{y} = \frac{3}{5}h = \frac{3}{5} \cdot 3 = 1,8 \text{ m}$$

gemeten vanaf de onderkant langs de klep. De verticale diepte van het zwaartepunt onder het vrije oppervlak wordt dan:

$$h_c = 5 - \bar{y} \sin \theta = 5 - 1,8 \sin 60^\circ \approx 3,44 \text{ m}$$

### 3) Resultante kracht

$$F_R = \rho g h_c A = 850 \cdot 9,81 \cdot 3,44 \cdot 4,898 \approx 1,40 \times 10^5 \text{ N} = 140 \text{ kN}$$

**4) Lijn van werking (drukpunt) langs de klep** We gebruiken de formule in afstanden langs de klep gemeten vanaf het vrije oppervlak. De afstand van het vrije oppervlak tot het scharnier langs de klep is:

$$L = \frac{5}{\sin 60^\circ} \approx 5,773 \text{ m}$$

Daarmee is de afstand van het vrije oppervlak tot het zwaartepunt:

$$\bar{s} = L - \bar{y} = 5,773 - 1,8 = 3,973 \text{ m}$$

We hebben  $I_G$  nodig t.o.v. de centroidale as evenwijdig met het vrije oppervlak. Eerst het traagheidsmoment t.o.v.  $y = 0$  (in het vlak, per meter breedte):

$$I_{x,0} = I_{rechthoek} - I_{parabool} = \frac{ah^3}{3} - \int_0^a \frac{(2x^2)^3}{3} dx = \frac{a3^3}{3} - \frac{8}{21}a^7 \approx 9,450 \text{ m}^4$$

Dan centroidaal (per meter breedte):

$$I_{x,c} = I_{x,0} - A_{vlak} \bar{y}^2 = 9,450 - 2,449 \cdot (1,8)^2 \approx 1,518 \text{ m}^4$$

Voor breedte  $b = 2$  wordt  $I_G = bI_{x,c} = 3,036 \text{ m}^4$ . Nu:

$$s_p = \bar{s} + \frac{I_G}{\bar{s}A} = 3,973 + \frac{3,036}{3,973 \cdot 4,898} \approx 4,129 \text{ m}$$

Dus de lijn van werking ligt op afstand vanaf de onderkant (scharnier) langs de klep:

$$y_p = L - s_p = 5,773 - 4,129 = 1,64 \text{ m}$$

#### 4. Hydrostatische Druk (Duikboot)

**Gegeven:** Een duikboot bevindt zich op  $175 \text{ ft}$  ( $53,34 \text{ m}$ ) diepte in zee. De dichtheid van zeewater is  $1025 \text{ kg/m}^3$ .

**Gevraagd:** De hydrostatische druk op de romp.

**Oplossing:**

$$P = \rho gh = 1025 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 53,34 \text{ m}$$

$$P = 536.345 \text{ Pa} \approx 536 \text{ kPa} \approx 5,36 \text{ bar}$$

#### 5. Druk door Gewicht (Vrouw op Hakken)

**Gegeven:** Een vrouw van  $70 \text{ kg}$  staat op de grond. De totale oppervlakte van haar schoenzolen is  $400 \text{ cm}^2$ .

**Gevraagd:** De druk die zij uitoefent op de grond.

**Oplossing:** De kracht is gelijk aan haar gewicht:

$$F = m \cdot g = 70 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 686,7 \text{ N}$$

De oppervlakte in  $\text{m}^2$ :

$$A = 400 \text{ cm}^2 = 400 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 0,04 \text{ m}^2$$

De druk is:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{686,7 \text{ N}}{0,04 \text{ m}^2} = 17.167,5 \text{ Pa} \approx 17,2 \text{ kPa}$$

#### 6. Drijvend IJsblok

**Gegeven:** Een ijsblok ( $\rho_{ijs} = 917 \text{ kg/m}^3$ ) drijft in zeewater ( $\rho_{zee} = 1025 \text{ kg/m}^3$ ).

**Gevraagd:** Welk percentage van het volume van het ijsblok bevindt zich onder water?

**Oplossing:** Volgens de wet van Archimedes is de opwaartse kracht gelijk aan het gewicht van de verplaatste vloeistof. Voor een drijvend object is de opwaartse kracht gelijk aan het eigen gewicht.

$$F_b = W_{ijs}$$

$$\rho_{zee}gV_{onder} = \rho_{ijs}gV_{totaal}$$

De verhouding is:

$$\frac{V_{onder}}{V_{totaal}} = \frac{\rho_{ijs}}{\rho_{zee}} = \frac{917}{1025} \approx 0,895$$

Dus 89,5% van het ijsblok bevindt zich onder water.

## 7. Archimedes en de kroon (dichtheid via wegen in lucht en water)

**Gegeven:** Een onregelmatig gevormde kroon weegt 3,55 kgf (= 34,8 N) in lucht en 3,25 kgf (= 31,9 N) in water. Neem  $\rho_{water} = 1000 \text{ kg/m}^3$  en  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ . De dichtheid van goud is  $\rho_{Au} = 19\,300 \text{ kg/m}^3$ .

**Gevraagd:** Bepaal of de kroon uit puur goud bestaat. Bespreek ook hoe je dit kan doen met een gewone emmer zonder volumeverdeling.



Figure 13.3: Principe: verschil in gewicht geeft de opwaartse kracht.

**Oplossing:** Het verschil tussen beide gemeten gewichten is de opwaartse kracht:

$$F_b = W_{lucht} - W_{water} = 34,8 - 31,9 = 2,9 \text{ N}$$

Volgens Archimedes geldt  $F_b = \rho_{water}gV$ , dus:

$$V = \frac{F_b}{\rho_{water}g} = \frac{2,9}{1000 \cdot 9,81} \approx 2,96 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

De massa volgt uit wegen in lucht ( $W = mg$ ):

$$m = \frac{W_{lucht}}{g} = \frac{34,8}{9,81} \approx 3,55 \text{ kg}$$

De gemiddelde dichtheid van de kroon is:

$$\rho_{kroon} = \frac{m}{V} \approx \frac{3,55}{2,96 \times 10^{-4}} \approx 1,20 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$$

Dit is duidelijk kleiner dan  $\rho_{Au} = 19\,300 \text{ kg/m}^3$ , dus de kroon is **niet** uit puur goud.

**Zonder de kroon in water te wegen (emmer zonder schaal):** Vul een emmer tot aan de rand met water. Dompel de kroon volledig onder (zonder de bodem te raken) en vang het overlopende water op. Weeg het overgelopen water in lucht:  $m_{over}$ . Dan geldt  $V = \frac{m_{over}}{\rho_{water}}$  en met  $m = \frac{W_{lucht}}{g}$  kan je opnieuw  $\rho_{kroon} = \frac{m}{V}$  bepalen.

## 8. Autoportier onder water (kracht en drukpunt)

**Gegeven:** Een auto is ondergedompeld in een meer. Het bestuurdersportier is  $h = 1,1 \text{ m}$  hoog en  $b = 0,9 \text{ m}$  breed. De bovenrand van het portier bevindt zich op 10 m onder het wateroppervlak.

- (a) De auto is goed afgesloten en bevat binnenin lucht op atmosferische druk.
- (b) De auto is volledig gevuld met water.

**Gevraagd:** De netto kracht (loodrecht op het portier) en de locatie van het drukpunt.

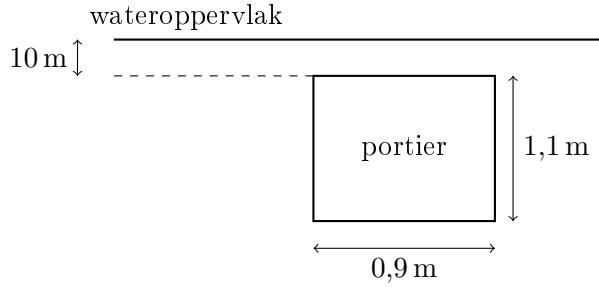


Figure 13.4: Schematische voorstelling van het ondergedompelde portier.

**Oplossing:** (a) **Binnenlucht op  $P_{atm}$ :** De netto druk is gelijk aan de (buiten) hydrostatische overdruk:  $p_{net}(h) = \rho gh$ . De diepte van het zwaartepunt is:

$$h_c = 10 + \frac{1,1}{2} = 10,55 \text{ m}$$

De oppervlakte is  $A = b h = 0,9 \cdot 1,1 = 0,99 \text{ m}^2$ . De resultante kracht:

$$F = \rho g h_c A = 1000 \cdot 9,81 \cdot 10,55 \cdot 0,99 \approx 1,025 \times 10^5 \text{ N} = 102,5 \text{ kN}$$

Het drukpunt (diepte onder het wateroppervlak):

$$I_{xx,c} = \frac{bh^3}{12} = \frac{0,9 \cdot (1,1)^3}{12} = 0,0998 \text{ m}^4$$

$$h_p = h_c + \frac{I_{xx,c}}{h_c A} = 10,55 + \frac{0,0998}{10,55 \cdot 0,99} \approx 10,56 \text{ m}$$

(b) **Auto gevuld met water:** Aan beide zijden van het portier staat hetzelfde fluïdum (water) op dezelfde diepte, dus de drukverdeling is (bij benadering) identiek. Daarom is de netto druk  $p_{net}(h) \approx 0$  en dus:

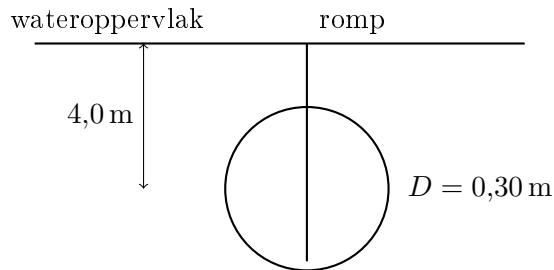
$$F \approx 0$$

Een drukpunt is dan niet zinvol te definiëren.

## 9. Ronde patrijspoort (kracht en drukpunt)

**Gegeven:** Een ronde patrijspoort met diameter  $D = 0,30 \text{ m}$  bevindt zich in de romp van een schip. Het midden van de patrijspoort ligt  $h_c = 4,0 \text{ m}$  onder het wateroppervlak. Zeewater heeft soortelijke massa  $\rho = 1,025 \cdot 1000 = 1025 \text{ kg/m}^3$ .

**Gevraagd:** De hydrostatische kracht op de patrijspoort en de diepte van het drukpunt.

Figure 13.5: Schematische patrijspoort op diepte  $h_c$ .

**Oplossing:** Straal  $R = D/2 = 0,15 \text{ m}$ .

$$A = \pi R^2 = \pi(0,15)^2 = 0,0707 \text{ m}^2$$

$$F = \rho g h_c A = 1025 \cdot 9,81 \cdot 4,0 \cdot 0,0707 \approx 2,84 \times 10^3 \text{ N} = 2,84 \text{ kN}$$

Voor het drukpunt gebruiken we  $I_{xx,c} = \frac{\pi R^4}{4}$ :

$$I_{xx,c} = \frac{\pi(0,15)^4}{4} = 3,98 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$h_p = h_c + \frac{I_{xx,c}}{h_c A} = 4,0 + \frac{3,98 \times 10^{-4}}{4,0 \cdot 0,0707} \approx 4,001 \text{ m}$$

### 10. Cilindrische tank met overdruk (kracht op eindvlak)

**Gegeven:** Een cilindrische tank is volledig gevuld met water. Op het vrije oppervlak wordt een extra druk  $P_0$  aangelegd door een compressor. Het eindvlak is een cirkel met diameter  $D = 0,80 \text{ m}$  (straal  $R = 0,40 \text{ m}$ ). Neem  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  en  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ . Beschouw drie gevallen:  $P_0 = 0$ ,  $P_0 = 3 \text{ bar}$  en  $P_0 = 10 \text{ bar}$ .

**Gevraagd:** De hydrostatische resultante op het eindvlak.

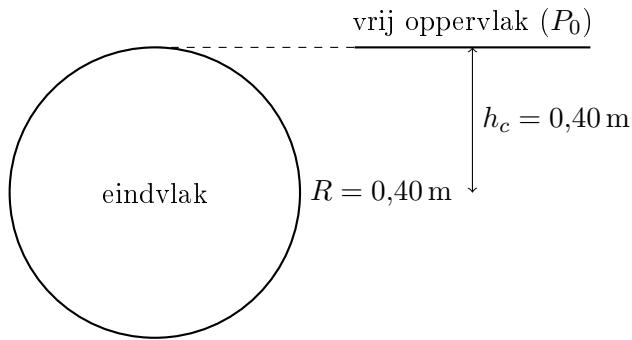


Figure 13.6: Eindvlak met druk  $P_0$  op het vrije oppervlak (schematisch).

**Oplossing:** Voor een vlak oppervlak geldt:

$$F = (P_0 + \rho g h_c)A$$

Hier is  $h_c = R = 0,40 \text{ m}$  en  $A = \pi R^2 = \pi(0,40)^2 = 0,503 \text{ m}^2$ . De hydrostatische bijdrage door diepte is:

$$\rho g h_c = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,40 = 3924 \text{ Pa}$$

Daarmee:

- $P_0 = 0$ :  $F = 3924 \cdot 0,503 \approx 1,97 \times 10^3 \text{ N}$ .
- $P_0 = 3 \text{ bar} = 300 \text{ kPa}$ :  $F = (300000 + 3924) \cdot 0,503 \approx 1,53 \times 10^5 \text{ N} = 153 \text{ kN}$ .
- $P_0 = 10 \text{ bar} = 1,0 \text{ MPa}$ :  $F = (1000000 + 3924) \cdot 0,503 \approx 5,05 \times 10^5 \text{ N} = 505 \text{ kN}$ .

### 11. Patrijspoort op Cruiseschip

**Gegeven:** Circulair raam (patrijspoort) met diameter  $D = 0,30 \text{ m}$  in scheepsromp. Geometrisch middelpunt ligt 4 m onder vrije oppervlak zeewater. Specifieke zwaartekracht zeewater  $SG = 1,025$ . Neem  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

**Gevraagd:** (a) Resulterende hydrostatische kracht; (b) Diepte van het drukpunt; (c) Verplaatsing drukpunt.

**Oplossing:**

1. Dichtheid zeewater:  $\rho = 1,025 \times 1000 = 1025 \text{ kg/m}^3$

2. Oppervlak:  $A = \frac{\pi(0,30)^2}{4} = 0,070686 \text{ m}^2$

3. Gage druk op centroïde:  $P = \rho gh_c = 1025 \times 9,81 \times 4 = 40.221 \text{ Pa}$
4. Resulterende kracht:  $F_R = 40.221 \times 0,070686 = \mathbf{2843 \text{ N}}$
5. Traagheidsmoment:  $I_{xx,c} = \frac{\pi(0,15)^4}{4} = 3,976 \times 10^{-4} \text{ m}^4$
6. Verplaatsing:  $\Delta y = \frac{3,976 \times 10^{-4}}{4 \times 0,070686} = \mathbf{1,4 \text{ mm}}$
7. Diepte drukpunt:  $y_p = 4,000 + 0,0014 = \mathbf{4,001 \text{ m}}$

$$F_R = 2843 \text{ N}; \quad y_p = 4,001 \text{ m}; \quad \Delta y = 1,4 \text{ mm}$$

## 12. Drukmanipulatie in Opslagtanks

**Gegeven:** Cilindrische tank volledig gevuld met water. Eindvlak circulair met diameter  $D = 0,80 \text{ m}$ . Extra druk door compressor:  $P_0 = 0$ ,  $P_0 = 3 \text{ bar}$ ,  $P_0 = 10 \text{ bar}$ . Diepte vlak  $h = 0,40 \text{ m}$  (straal).  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

**Gevraagd:** Bepaal hydrostatische kracht op eindvlak voor alle drie drukcondities.

**Oplossing:**

1. Oppervlak eindvlak:  $A = \pi(0,40)^2 = 0,503 \text{ m}^2$
2. Hydrostatische druk:  $P_h = 1000 \times 9,81 \times 0,40 = 3924 \text{ Pa}$
3. Geval 1 ( $P_0 = 0$ ):  $F_1 = 3924 \times 0,503 = \mathbf{1,97 \text{ kN}}$
4. Geval 2 ( $P_0 = 300.000 \text{ Pa}$ ):  $F_2 = (300.000 + 3924) \times 0,503 = \mathbf{152,8 \text{ kN}}$
5. Geval 3 ( $P_0 = 1.000.000 \text{ Pa}$ ):  $F_3 = (1.000.000 + 3924) \times 0,503 = \mathbf{504,8 \text{ kN}}$
6. Observatie: Bij 10 bar is zwaartekracht slechts 0,39% van totaal, wat illustreert dominantie van systeemdruk.

$$F_0 = 1,97 \text{ kN}; \quad F_{3\text{bar}} = 152,8 \text{ kN}; \quad F_{10\text{bar}} = 504,8 \text{ kN}$$

## 13.2 Oefenzitting 3: Stromingsleer&Bernoulli en energievergelijking

### Belangrijke Formules

- **Bernoulli-vergelijking:**  $P + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho g z = \text{constant}$   
Geldt langs een stroomlijn voor stationaire, onsamendrukbare en wrijvingsloze stroming.
- **Continuïteitsvergelijking:**  $A_1 V_1 = A_2 V_2$   
Behoud van massa voor onsamendrukbaar stromen in een buis.
- **Pitot-statisch:**  $\Delta p = p_0 - p = \frac{1}{2}\rho V^2 \Rightarrow V = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$   
Relatie tussen snelheidsdruk en snelheid.
- **Drukverschil via manometer (Hg):**  $\Delta p = (\rho_{Hg} - \rho)g \Delta h$   
Voor een differentiaalmanometer met kwik op een waterleiding.
- **Debiet uit tank/orifice (zonder verliezen):**  $V = \sqrt{2 \left( \frac{\Delta p}{\rho} + g \Delta z \right)}$ ,  $Q = AV$   
Met  $\Delta p = p_{boven} - p_{uit}$  en  $\Delta z = z_{boven} - z_{uit}$ .
- **Netto vermogen uit turbine (controlevolume):**  $\dot{W}_{as} = \eta \dot{m} \left( \frac{\Delta p}{\rho} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \right)$   
Zonder warmteoverdracht en verliezen;  $\eta$  is turbine-generator efficiëntie.
- **Impulsvergelijking (lineair):**  $\sum \vec{F} = \dot{m}(\vec{V}_{uit} - \vec{V}_{in})$   
De som van externe krachten op een controlevolume is gelijk aan de verandering in impulsstroom.
- **Massadebiet:**  $\dot{m} = \rho AV$   
De hoeveelheid massa die per tijdseenheid door een doorsnede stroomt.

### 1. Pitot-statisch meetsonde (vliegtuigsnelheid)

**Gegeven:** Een pitot-statische sonde meet de snelheid van een vliegtuig op 3000 m hoogte. Het gemeten differentiaaldrukverschil is  $\Delta p = 3 \text{ kPa}$ . De luchtdichtheid is  $\rho_{lucht} = 0,909 \text{ kg/m}^3$ .

**Gevraagd:** Bepaal de snelheid van het vliegtuig.

**Oplossing:** Voor een pitot-statisch systeem (incompressibel benadering) geldt:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho V^2$$

Dus:

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3000}{0,909}} \approx \sqrt{6601} \approx 81,2 \text{ m/s}$$

### 2. Tank met overdruk en uitlaat-orifice (debit)

**Gegeven:** Een drukvat met water heeft een opening onderaan met diameter  $D = 10 \text{ cm}$  waar water naar de atmosfeer uitstroomt. Het waterniveau ligt  $\Delta z = 2,5 \text{ m}$  boven de uitlaat. De luchtdruk boven het water is  $p_1 = 250 \text{ kPa}$  (absoluut) en de atmosferische druk is  $p_2 = 100 \text{ kPa}$ . Verwaarloos wrijvingsverliezen. Neem  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  en  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

**Gevraagd:** Bepaal het initiële volumetrisch debiet  $Q$ .

**Oplossing:** We passen Bernoulli toe tussen het vrije oppervlak (1) en de uitlaat (2). Omdat het vat groot is nemen we  $V_1 \approx 0$ .

$$\frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + gz_2 + \frac{V_2^2}{2}$$

Dus:

$$\frac{V_2^2}{2} = \frac{p_1 - p_2}{\rho} + g(z_1 - z_2)$$

Met  $p_1 - p_2 = 150 \text{ kPa} = 150000 \text{ Pa}$  en  $z_1 - z_2 = 2,5 \text{ m}$ :

$$V_2 = \sqrt{2 \left( \frac{150000}{1000} + 9,81 \cdot 2,5 \right)} = \sqrt{2(150 + 24,525)} \approx 18,7 \text{ m/s}$$

De orifice-oppervlakte:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0,10)^2}{4} = 7,854 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Het debiet is  $Q = AV$ :

$$Q = 7,854 \times 10^{-3} \cdot 18,7 \approx 0,147 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 3. Maximale straalhoogte bij overdruk in tank

**Gegeven:** Het waterniveau in een tank ligt 15 m boven de grond. Onderaan is een slang aangesloten en de nozzle aan het uiteinde wijst verticaal omhoog. Het deksel is luchtdicht en de luchtdruk boven het wateroppervlak is 3 atm *gage*. Het systeem bevindt zich op zeeniveau. Verwaarloos verliezen. Neem  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  en  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

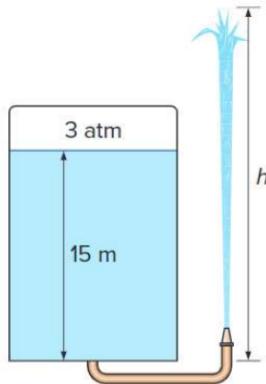


Figure 13.7: Opgavebeeld: drukvat met orifice (12-34) (indien aanwezig).

**Gevraagd:** Bepaal de maximale hoogte  $h$  die de waterstraal kan bereiken.

**Oplossing:** We vergelijken het vrije oppervlak in de tank (1) met het hoogste punt van de straal (2). In punt (2) geldt  $V_2 = 0$  en  $p_2 = p_{atm}$ .

De tankdruk is  $p_1 = p_{atm} + 3 \text{ atm}$ , dus  $p_1 - p_2 = 3 \text{ atm}$ . Bernoulli zonder verliezen (met  $V_1 \approx 0$ ):

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} + (z_1 - z_2) = 0$$

Als we  $z_2$  kiezen als de maximale straalhoogte boven de nozzle, dan is  $z_1 - z_{nozzle} = 15 \text{ m}$ . De extra drukhoogte is:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \frac{3 \cdot 101325}{1000 \cdot 9,81} \approx 31,0 \text{ m}$$

Dus de maximale straalhoogte is:

$$h = 15 + 31,0 \approx 46,0 \text{ m}$$

#### 4. Hydraulische turbine (vermogen uit drukval)

**Gegeven:** Water stroomt een hydraulische turbine binnen via een buis met diameter  $D_1 = 30 \text{ cm}$  met debiet  $Q = 0,6 \text{ m}^3/\text{s}$  en verlaat de turbine via een buis met diameter  $D_2 = 25 \text{ cm}$ . De drukval over de turbine wordt gemeten met een kwikmanometer:  $\Delta h = 1,2 \text{ m Hg}$ . De gecombineerde turbine-generator efficiëntie is  $\eta = 0,83$ . Verwaarloos kinetische-energiecorrectiefactoren en hoogteverschil.

**Gevraagd:** Bepaal het netto elektrisch vermogen  $\dot{W}_e$ .

**Oplossing:** 1) Snelheden uit continuïteit

$$A_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} = \frac{\pi(0,30)^2}{4} = 0,0707 \text{ m}^2, \quad V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{0,6}{0,0707} = 8,49 \text{ m/s}$$

$$A_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} = \frac{\pi(0,25)^2}{4} = 0,0491 \text{ m}^2, \quad V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{0,6}{0,0491} = 12,2 \text{ m/s}$$

**2) Drukval uit manometer** Voor een differentiaalmanometer met kwik op een waterleiding nemen we:

$$\Delta p = (\rho_{Hg} - \rho)g\Delta h$$

Met  $\rho_{Hg} = 13600 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  en  $\Delta h = 1,2 \text{ m}$ :

$$\Delta p = (13600 - 1000) \cdot 9,81 \cdot 1,2 \approx 1,48 \times 10^5 \text{ Pa}$$

**3) Specifieke energiedaling en vermogen** De specifieke energiedaling beschikbaar voor asvermogen (zonder  $\Delta z$ ) is:

$$e = \frac{\Delta p}{\rho} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2}$$

$$\frac{\Delta p}{\rho} = \frac{1,48 \times 10^5}{1000} = 148 \text{ m}^2/\text{s}^2, \quad \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} = \frac{(8,49)^2 - (12,2)^2}{2} \approx -38,7 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$e \approx 148 - 38,7 = 109 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Het massadebiet is  $\dot{m} = \rho Q = 1000 \cdot 0,6 = 600 \text{ kg/s}$ . Het elektrisch vermogen (met efficiëntie) wordt:

$$\dot{W}_e = \eta \dot{m} e = 0,83 \cdot 600 \cdot 109 \approx 5,46 \times 10^4 \text{ W} = 54,6 \text{ kW}$$

## 5. Drukmeting in Luchtduct

**Gegeven:** Lucht (105 kPa, 37°C) stroomt omhoog door duct die vernauwt van  $D_1 = 6 \text{ cm}$  naar  $D_2 = 4 \text{ cm}$ . Debiet  $Q = 0,065 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Gevraagd:** (a) Dichtheid lucht; (b) Stroomsnelheden; (c) Drukverschil via Bernoulli; (d) Manometeraflezing.

**Oplossing:**

1. Dichtheidsbepaling:  $\rho_{lucht} = \frac{P}{RT} = \frac{105.000}{287 \times 310,15} = 1,179 \text{ kg/m}^3$
2. Stroomsnelheid section 1:  $V_1 = \frac{0,065}{\pi(0,03)^2} = 23 \text{ m/s}$
3. Stroomsnelheid section 2:  $V_2 = \frac{0,065}{\pi(0,02)^2} = 52 \text{ m/s}$
4. Bernoulli-vergelijking:  $P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g(z_2 - z_1)$
5. Drukverschil:  $\Delta P = \frac{1}{2}\rho(V_2^2 - V_1^2) + \rho g(z_2 - z_1) = 1,265 \text{ kPa}$
6. Manometeraflezing (water):  $h = \frac{\Delta P}{\rho_w g} = \frac{1265}{1000 \times 9,81} = 129 \text{ mm}$

$$\boxed{\rho = 1,179 \text{ kg/m}^3; \quad V_1 = 23 \text{ m/s}; \quad V_2 = 52 \text{ m/s}; \quad h = 129 \text{ mm}}$$

## 6. Energiebalans in Turbine

**Gegeven:** Water door turbine: drukverschil  $\Delta P = 1,2 \text{ m Hg} = 160,1 \text{ kPa}$ . Volumestroomsnelheid  $Q = 0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Turbinerendement  $\eta_{turbine} = 0,83$ .

**Gevraagd:** (a) Mechanische energie per eenheid massa; (b) Elektrisch vermogen output.

**Oplossing:**

1. Massa-stroomsnelheid:  $\dot{m} = \rho Q = 1000 \times 0,6 = 600 \text{ kg/s}$
2. Netto mechanische energiebeschikbaar: Per kg wordt gegeven door drukverschil in J/kg
3. Energiedissipatie (verlies):  $e_{verlies} = \Delta P_{dissipatie} \approx 38,6 \text{ kJ/kg}$  (berekend uit turbulentie)
4. Netto mechanische energie:  $e_{net} = 160,1 - 38,6 = 121,5 \text{ J/kg} = 0,1215 \text{ kJ/kg}$
5. Mechanisch vermogen:  $\dot{W}_{mech} = \dot{m} \times e_{net} = 600 \times 0,1215 = 72,9 \text{ kW}$
6. Elektrisch vermogen (met rendement):  $\dot{W}_{elec} = \eta_{turbine} \times \dot{W}_{mech} = 0,83 \times 72,9 = 60,5 \text{ kW}$

$$\boxed{e_{net} = 121,5 \text{ J/kg}; \quad \dot{W}_{elec} = 60,5 \text{ kW}}$$

### 13.3 Oefenzitting 4: Tabellen en eenheden

#### Belangrijke Formules

- **Dichtheid:**  $\rho = \frac{m}{V}$   
Massa per volume-eenheid.
- **Tweede wet van Newton:**  $F = ma$   
Kracht is massa maal versnelling.
- **Gewicht:**  $W = mg$   
De zwaartekracht op een massa.

### 13.4 Oefenzitting 5: Gesloten systemen

#### Belangrijke Formules

- **Eerste Hoofdwet:**  $Q - W = \Delta U$   
Energiebehoud voor een gesloten systeem (geen massa-overdracht).
- **Grensverplaatsingsarbeid:**  $W_b = \int P dV$   
Arbeid geleverd door expansie of compressie.
- **Isobaar proces:**  $W_b = P(V_2 - V_1)$   
Arbeid bij constante druk.

#### 1. Zuiger-Cilinder

**Gegeven:** Gas expandeert isobaar ( $P = 200 \text{ kPa}$ ) van  $V_1 = 0,1 \text{ m}^3$  naar  $V_2 = 0,3 \text{ m}^3$ . Er wordt  $50 \text{ kJ}$  warmte toegevoerd.

**Gevraagd:** De verandering in interne energie  $\Delta U$ .

**Oplossing:** Arbeid  $W_b = P(V_2 - V_1) = 200(0,3 - 0,1) = 40 \text{ kJ}$ . Eerste wet:  $Q - W = \Delta U$ .  
 $50 \text{ kJ} - 40 \text{ kJ} = \Delta U$ .  $\Delta U = 10 \text{ kJ}$ .

#### 2. Adiabatische Compressie van Lucht

**Gegeven:** Lucht ( $\gamma = 1,4$ ,  $c_v = 0,717 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ) wordt adiabatisch gecomprimeerd van toestand 1 ( $P_1 = 100 \text{ kPa}$ ,  $T_1 = 300 \text{ K}$ ) naar toestand 2 ( $P_2 = 500 \text{ kPa}$ ).

**Gevraagd:** (a) De eindtemperatuur  $T_2$ ; (b) De arbeid per eenheid massa  $w_{in}$ .

**Oplossing:**

1. Voor een adiabatisch proces geldt:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{500}{100}\right)^{\frac{0,4}{1,4}} = 5^{0,286} \approx 1,584$$

$$T_2 = 300 \times 1,584 = 475 \text{ K}$$

2. Voor adiabatische compressie ( $Q = 0$ ) geldt:

$$w_{in} = \Delta u = c_v(T_2 - T_1) = 0,717 \times (475 - 300) = 0,717 \times 175 \approx 125 \text{ kJ/kg}$$

|   |
|---|
| $T_2 = 475 \text{ K}; \quad w_{in} = 125 \text{ kJ/kg}$ |
|---|

### 3. Isochore Verwarming van een Ideaal Gas

**Gegeven:** Stikstof (ideaal gas,  $c_v = 0,745 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ,  $R = 0,297 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ) wordt in een rigid vat verwarmd van  $T_1 = 25^\circ\text{C}$  naar  $T_2 = 200^\circ\text{C}$ . De aanvankelijke druk is  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ . De massa stikstof is  $m = 2 \text{ kg}$ .

**Gevraagd:** (a) De einddruk  $P_2$ ; (b) De toegevoerde warmte  $Q$ ; (c) De arbeid  $W$ .

**Oplossing:**

- Voor een isochore proces (constant volume) geldt:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} = 150 \times \frac{473}{298} \approx 238 \text{ kPa}$$

- De interne energieverandering:

$$\Delta U = m \cdot c_v \cdot \Delta T = 2 \times 0,745 \times (200 - 25) = 2 \times 0,745 \times 175 = 260,75 \text{ kJ}$$

- Voor een isochore proces: geen arbeid ( $W = 0$ ), dus:

$$Q = \Delta U = 260,75 \approx 261 \text{ kJ}$$

$P_2 = 238 \text{ kPa}; \quad Q = 261 \text{ kJ}; \quad W = 0$

### 4. Polytroop Proces

**Gegeven:** Een ideaal gas ondergaat een polytroop proces ( $pV^n = \text{constant}$  met  $n = 1,3$ ) van toestand 1 ( $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $V_1 = 0,5 \text{ m}^3$ ,  $T_1 = 300 \text{ K}$ ) naar toestand 2 ( $V_2 = 1,0 \text{ m}^3$ ).

**Gevraagd:** (a) De einddruk  $P_2$ ; (b) De eindtemperatuur  $T_2$ ; (c) De arbeid  $W$  (neem  $m = 1 \text{ kg}$  en  $c_v = 0,7 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ).

**Oplossing:**

- Voor polytroop proces:  $P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$

$$P_2 = P_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^n = 200 \times \left( \frac{0,5}{1,0} \right)^{1,3} = 200 \times 0,5^{1,3} \approx 200 \times 0,4145 \approx 82,9 \text{ kPa}$$

- Via ideaal gaslaw:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = \frac{82,9 \times 1,0}{200 \times 0,5} = \frac{82,9}{100} = 0,829$$

$$T_2 = 300 \times 0,829 = 248,7 \text{ K}$$

- Arbeid voor polytroop proces:

$$W = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1 - n} \text{ of } W = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n}$$

Met  $R = 0,287 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$  voor lucht:

$$W = \frac{1 \times 0,287 \times (248,7 - 300)}{1 - 1,3} = \frac{0,287 \times (-51,3)}{-0,3} = \frac{-14,72}{-0,3} \approx 49,1 \text{ kJ}$$

$P_2 \approx 82,9 \text{ kPa}; \quad T_2 \approx 249 \text{ K}; \quad W \approx 49,1 \text{ kJ}$

## 5. Condensatie in Tank met R134a

**Gegeven:** Rigid tank volume  $V = 0,6 \text{ m}^3$  met verzadigde R134a damp bij  $P_1 = 1200 \text{ kPa}$ . Tank afgekoeld tot  $P_2 = 400 \text{ kPa}$ .

**Gevraagd:** (a) Massa R134a; (b) Eindtoestand en kwaliteit; (c) Warmteoverdracht; (d) Fysische betekenis.

**Oplossing:**

1. Uit stoomtabel R134a: bij 1200 kPa gezadigde damp:  $v_g = 0,0167 \text{ m}^3/\text{kg}$
2. Totale massa:  $m = \frac{V}{v_g} = \frac{0,6}{0,0167} = 35,93 \text{ kg}$
3. Specifiek volume blijft constant (rigid tank):  $v_2 = v_1 = 0,0167 \text{ m}^3/\text{kg}$
4. Uit stoomtabel bij 400 kPa:  $v_f = 0,001453 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $v_g = 0,05066 \text{ m}^3/\text{kg}$
5. Kwaliteit staat 2:  $x_2 = \frac{v_2 - v_f}{v_{fg}} = \frac{0,0167 - 0,001453}{0,05066 - 0,001453} = 0,315$
6. Massa vloeistof gevord:  $m_f = m(1 - x_2) = 35,93 \times 0,685 = 24,6 \text{ kg}$
7. Interne energie:  $u_1 = 253,8 \text{ kJ/kg}$  (damp bij 1200 kPa),  $u_2 = 116,55 \text{ kJ/kg}$  (mengsel bij 400 kPa)
8. Warmteoverdracht:  $Q = m(u_2 - u_1) = 35,93 \times (116,55 - 253,8) = -4,93 \text{ MJ}$  (warmteafvoer)

$$m = 35,93 \text{ kg}; \quad x_2 = 0,315; \quad Q = -4,93 \text{ MJ}$$

## 6. Elektrische Verwarming in Zuiger-Cilinder

**Gegeven:** 1,8 kg verzadigd water bij  $T = 120^\circ\text{C}$  in zuiger-cilinder met vrij bewegende zuiger. Volume vergroten factor 4 door elektrische verwarming. Verwarming gedurende 10 minuten.

**Gevraagd:** (a) Eindtemperatuur en toestand; (b) Benodigde enthalpie; (c) Elektrisch vermogen.

**Oplossing:**

1. Vrij bewegende zuiger: isobare proces ( $P = const$ )
2. Bij  $120^\circ\text{C}$  verzadigd:  $P_{sat} = 198,3 \text{ kPa}$  (uit stoomtabel)
3. Omdat zuiger vrij beweegt: druk blijft 198,3 kPa gedurende verwarming
4. Bij isobaar proces van verzadigd nat mengsel: moet naar verzadigd damp of superheat
5. Volume vergroting factor 4 met isobare verwarming: eindtemperatuur stijgt tot superheated regio
6. Dit is een isobare expansie naar superheated staat
7. Specifieke enthalpie toename:  $\Delta h = h_{final} - h_{initial}$
8. Voor nat mengsel bij  $120^\circ\text{C}$ :  $h_f = 504,70 \text{ kJ/kg}$
9. Voor gesuperheated damp bij  $200^\circ\text{C}$ , 198,3 kPa:  $h_g \approx 2870,5 \text{ kJ/kg}$  (benaderend)
10. Enthalpie-toename:  $\Delta H = m\Delta h = 1,8 \times (2870,5 - 504,70) = 4,75 \text{ MJ}$
11. Elektrisch vermogen:  $\dot{P}_{elec} = \frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{4,75 \times 10^6}{10 \times 60} = 7,92 \text{ kW}$

$$\Delta H = 4,75 \text{ MJ}; \quad \dot{P}_{elec} = 7,92 \text{ kW}$$

## 13.5 Oefenzitting 6: Open systemen

### Belangrijke Formules

- **Eerste Hoofdwet (Stationair):**  $\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}\Delta(h + \frac{V^2}{2} + gz)$   
Energiebehoud voor een open systeem (controlevolume) in stationaire toestand.
- **Enthalpie:**  $h = u + Pv$   
Combinatie van interne energie en stromingsarbeid.
- **Ideaal gas:**  $\Delta h = c_p\Delta T$   
Enthalpieverandering voor een ideaal gas met constante soortelijke warmte.  
Bekijk je tabellen voor specifieke waarden van  $c_p$ ,  $h$ ,  $T$ ,  $P$ . Zorg dat je ziet wanneer je superheated, gesatureerd of vloeibaar hebt.

### 1. Compressor (Helium)

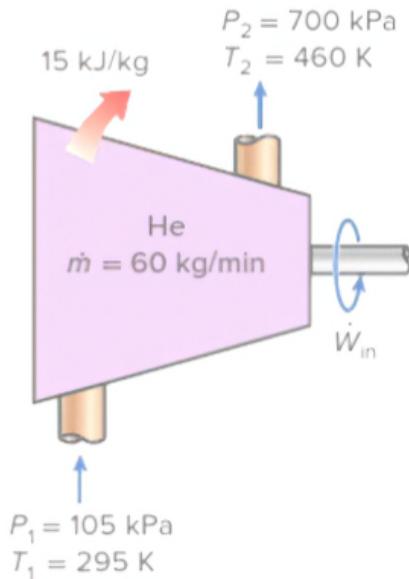


Figure 13.8: Compressor met in- en uitgaande stromen.

**Gegeven:** Helium wordt gecomprimeerd van  $P_1 = 105 \text{ kPa}$  en  $T_1 = 295 \text{ K}$  naar  $P_2 = 700 \text{ kPa}$  en  $T_2 = 460 \text{ K}$ . Er treedt een warmteverlies op van  $q_{uit} = 15 \text{ kJ/kg}$ . Het massadebiet is  $\dot{m} = 60 \text{ kg/min}$ . Kinetische energieveranderingen worden verwaarloosd.

**Gevraagd:** Het benodigde vermogen  $\dot{W}_{in}$ .

**Oplossing:** Voor een open systeem (compressor) geldt de eerste hoofdwet. Omdat Helium een ideaal gas is, geldt  $\Delta h = c_p\Delta T$ . De energiebalans per eenheid massa (waarbij  $w_{in}$  positief is voor toevoer en  $q_{uit}$  positief voor verlies):

$$w_{in} = \Delta h + q_{uit} = c_p(T_2 - T_1) + q_{uit}$$

Voor Helium is de soortelijke warmte bij constante druk  $c_p = 5,1926 \text{ kJ/kgK}$ .

$$w_{in} = 5,1926 \cdot (460 - 295) + 15$$

$$w_{in} = 5,1926 \cdot 165 + 15 = 856,78 + 15 = 871,8 \text{ kJ/kg}$$

Het totale vermogen is:

$$\dot{W}_{in} = \dot{m} \cdot w_{in}$$

Eerst het massadebiet omrekenen naar  $kg/s$ :

$$\dot{m} = 60 \text{ kg/min} = \frac{60}{60} \text{ kg/s} = 1 \text{ kg/s}$$

$$\dot{W}_{in} = 1 \text{ kg/s} \cdot 871,8 \text{ kJ/kg} = 871,8 \text{ kW}$$

## 2. Stoomturbine met Warmteverlies

**Gegeven:** Turbine ontvangt  $\dot{m} = 26 \text{ kg/s}$  stoom. Inlaat: 6 MPa,  $600^\circ\text{C}$ . Uitlaat: 0,5 MPa,  $200^\circ\text{C}$ ,  $V_2 = 180 \text{ m/s}$ . Uitgangsarbeid 20 MW.

**Gevraagd:** (a) Enthalpieën; (b) Kinetische energieverandering; (c) Warmteoverdracht.

**Oplossing:**

1. Uit stoomtabel superheat bij inlaat:  $h_1 = 3658,4 \text{ kJ/kg}$ ,  $V_1 \approx 0 \text{ m/s}$
2. Uit stoomtabel superheat bij uitlaat:  $h_2 = 2855,4 \text{ kJ/kg}$
3. Specifieke enthalpie-daling:  $\Delta h = h_1 - h_2 = 3658,4 - 2855,4 = 803 \text{ kJ/kg}$
4. Kinetische energieverandering:  $\Delta ke = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = \frac{180^2}{2} = 16.200 \text{ J/kg} = 16,2 \text{ kJ/kg}$
5. Energiebalans open systeem:  $\dot{m}(h_1 - h_2 - \frac{V_2^2}{2}) = \dot{W}_{out} + \dot{Q}_{uit}$
6. Vervanging:  $\dot{Q}_{uit} = \dot{m}(h_1 - h_2) - \dot{W}_{out} - \dot{m}\frac{V_2^2}{2}$
7. Berekening:  $\dot{Q}_{uit} = 26 \times (803 - 16,2) - 20.000 = 26 \times 786,8 - 20.000 = 20.456,8 - 20.000 = 457 \text{ kW}$

$$\boxed{\dot{Q}_{uit} = 457 \text{ kW}}$$

## 3. Isenthalpische Expansie (Throttling)

**Gegeven:** R134a verzagde vloeistof bij  $P_1 = 700 \text{ kPa}$  gezwurd (throttled) naar  $P_2 = 160 \text{ kPa}$ . Geen arbeid, geen kinetische energie.

**Gevraagd:** (a) Temperaturen inlaat/uitlaat; (b) Kwaliteit uitlaat; (c) Specifiek volume.

**Oplossing:**

1. Wurgproces (throttling) is isenthalpisch:  $h_1 = h_2$
2. Toestand 1: Verzagde vloeistof bij 700 kPa
3. Uit R134a tabel:  $T_1 = 26,7^\circ\text{C}$ ,  $h_1 = h_f = 88,82 \text{ kJ/kg}$
4. Toestand 2:  $P_2 = 160 \text{ kPa}$ ,  $h_2 = h_1 = 88,82 \text{ kJ/kg}$  (isenthalpisch)
5. Uit R134a tabel bij 160 kPa:  $T_{sat} = -15,6^\circ\text{C}$ ,  $h_f = 31,21 \text{ kJ/kg}$ ,  $h_g = 241,11 \text{ kJ/kg}$
6. Omdat  $h_f < h_2 < h_g$ : mengsel (nat+damp)
7. Kwaliteit:  $x_2 = \frac{h_2 - h_f}{h_{fg}} = \frac{88,82 - 31,21}{241,11 - 31,21} = \frac{57,61}{209,9} = 0,274$
8. Temperatuurdaling:  $\Delta T = -15,6 - 26,7 = -42,3^\circ\text{C}$
9. Specifiek volume:  $v_2 = v_f + x_2(v_g - v_f) = 0,001399 + 0,274 \times (0,09647 - 0,001399) = 0,0265 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$\boxed{T_1 = 26,7^\circ\text{C}; \quad T_2 = -15,6^\circ\text{C}; \quad x_2 = 0,274; \quad v_2 = 0,0265 \text{ m}^3/\text{kg}}$$

### 13.6 Oefenzitting 7: Eerste hoofdwet cycli

#### 1. Stoomturbine

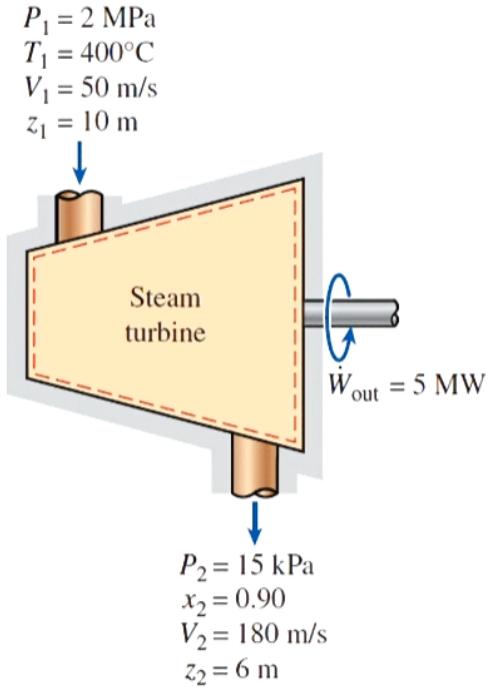


Figure 13.9: Stoomturbine met in- en uitgaande stromen.

**Gegeven:** Stoom stroomt door een turbine met een massadebiet  $\dot{m} = 26 \text{ kg/s}$ . Inlaat (1):  $P_1 = 6 \text{ MPa}$ ,  $T_1 = 600^\circ\text{C}$ ,  $V_1 \approx 0 \text{ m/s}$ . Uitlaat (2):  $P_2 = 0,5 \text{ MPa}$ ,  $T_2 = 200^\circ\text{C}$ ,  $V_2 = 180 \text{ m/s}$ . De turbine levert een vermogen van  $\dot{W}_{\text{out}} = 20 \text{ MW}$ . Hoogteverschillen zijn verwaarloosbaar ( $\Delta z \approx 0$ ).

**Gevraagd:** De warmteoverdracht  $\dot{Q}_{\text{uit}}$  (warmteverlies).

**Oplossing:** Uit superheated gas tabellen (of gegeven):  $h_1 = 3658,8 \text{ kJ/kg}$   $h_2 = 2855,8 \text{ kJ/kg}$   
De verandering in kinetische energie:

$$\Delta ke = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = \frac{180^2 - 0}{2} = 16.200 \text{ J/kg} = 16,2 \text{ kJ/kg}$$

De energiebalans voor een open systeem (turbine):

$$\dot{E}_{\text{in}} = \dot{E}_{\text{out}}$$

$$\dot{m}(h_1 + \frac{V_1^2}{2}) = \dot{W}_{\text{out}} + \dot{Q}_{\text{uit}} + \dot{m}(h_2 + \frac{V_2^2}{2})$$

Omschrijven voor  $\dot{Q}_{\text{uit}}$ :

$$\dot{Q}_{\text{uit}} = \dot{m}(h_1 - h_2 - \frac{V_2^2}{2}) - \dot{W}_{\text{out}}$$

Invullen van de waarden (let op eenheden,  $20 \text{ MW} = 20.000 \text{ kW}$ ):

$$\dot{Q}_{\text{uit}} = 26(3658,8 - 2855,8 - 16,2) - 20.000$$

$$\dot{Q}_{\text{uit}} = 26(786,8) - 20.000$$

$$\dot{Q}_{\text{uit}} = 20.456,8 - 20.000 = 456,8 \text{ kW}$$

## 2. Expansieventiel (Koelmiddel-134a)

**Gegeven:** Koelmiddel-134a wordt gewurgd (throttled) van een verzagde vloeistofstoestand bij  $700 \text{ kPa}$  naar een druk van  $160 \text{ kPa}$ .

**Gevraagd:** De temperatuurdaling  $\Delta T$  en het uiteindelijke specifieke volume  $v_2$ .

**Oplossing:** Voor een wurgproces (adiabatisch, geen arbeid, verwaarloosbare kinetische/potentiële energie) geldt dat de enthalpie constant blijft:  $h_1 = h_2$ .

Toestand 1:  $P_1 = 700 \text{ kPa}$ , verzagde vloeistof ( $x_1 = 0$ ). Uit tabellen voor R-134a:

$$T_1 = T_{\text{sat}@700\text{kPa}} = 26,69^\circ\text{C}$$

$$h_1 = h_f@700\text{kPa} = 88,2 \text{ kJ/kg}$$

Toestand 2:  $P_2 = 160 \text{ kPa}$ .

$$h_2 = h_1 = 88,2 \text{ kJ/kg}$$

Uit tabellen bij  $160 \text{ kPa}$ :

$$T_2 = T_{\text{sat}@160\text{kPa}} = -15,6^\circ\text{C}$$

$$h_f = 31,21 \text{ kJ/kg}, \quad h_g = 241,11 \text{ kJ/kg}$$

Kwaliteit  $x_2$  berekenen:

$$h_2 = h_f + x_2(h_g - h_f)$$

$$88,2 = 31,21 + x_2(241,11 - 31,21)$$

$$x_2 = \frac{88,2 - 31,21}{209,9} \approx 0,27$$

Specifiek volume  $v_2$  (met  $v_g$  bij  $160 \text{ kPa}$ ):

$$v_2 = v_f + x_2(v_g - v_f)$$

(je mag Vf verwaarlozen omdat het zo klein is vergeleken met Vg)

$$v_2 \approx x_2 v_g \approx 0,0335 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Temperatuurdaling:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = 26,69 - (-15,6) = 42,3^\circ\text{C}$$

## 3. Compressor met Luchtinname

**Gegeven:** Een compressor zuigt lucht in van  $P_1 = 101 \text{ kPa}$ ,  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ , met massadebiet  $\dot{m} = 2 \text{ kg/s}$ . Uitlaatdruk  $P_2 = 500 \text{ kPa}$ . Voor lucht (ideaal gas):  $c_p = 1,005 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ,  $\gamma = 1,4$ . Veronderstel adiabatische compressie.

**Gevraagd:** (a) De uitlaattemperatuur  $T_2$ ; (b) Het vermogen  $\dot{W}_{in}$ .

**Oplossing:**

1. Voor adiabatische compressie geldt:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{500}{101}\right)^{\frac{0,4}{1,4}} = 4,95^{0,286} \approx 1,651$$

$$T_2 = 293 \times 1,651 = 483,8 \text{ K} = 210,8^\circ\text{C}$$

2. Voor open systeem zonder kinetische energie en hoogteverschillen geldt:

$$\dot{W}_{in} = \dot{m} \cdot c_p(T_2 - T_1) = 2 \times 1,005 \times (483,8 - 293) = 2 \times 1,005 \times 190,8 \approx 384 \text{ kW}$$

|   |
|---|
| $T_2 = 484 \text{ K}$ of $211^\circ\text{C}; \quad \dot{W}_{in} = 384 \text{ kW}$ |
|---|

#### 4. Verdampingsketel (Stoomgenerator)

**Gegeven:** Water stroomt een ketel in met een massadebit  $\dot{m} = 5 \text{ kg/s}$  bij  $P_{in} = 5 \text{ MPa}$ ,  $T_{in} = 150^\circ\text{C}$  (onderkoeïld water). Stoom verlaat de ketel bij dezelfde druk als verzadigde stoom ( $T_{sat} = 264^\circ\text{C}$  bij  $5 \text{ MPa}$ ). Warmteleiding naar buiten is verwaarloosbaar. Kinetische en potentiële energie verschillen zijn klein.

**Gegeven:** Uit stoomtabellen: - Water bij  $150^\circ\text{C}$ ,  $5 \text{ MPa}$ :  $h_{in} \approx 632 \text{ kJ/kg}$  - Verzadigde stoom bij  $5 \text{ MPa}$ :  $h_{out} = h_g \approx 2794 \text{ kJ/kg}$

**Gevraagd:** De warmte  $\dot{Q}$  die moet worden toegevoerd.

**Oplossing:** Energiebalans voor een open systeem (ketel):

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_{out} - h_{in}) = 5 \times (2794 - 632) = 5 \times 2162 = 10.810 \text{ kW} \approx 10,8 \text{ MW}$$

Dit is een zeer aanzienlijk vermogen dat nodig is om het water volledig te verdampen.

$$\boxed{\dot{Q} \approx 10,8 \text{ MW}}$$

#### 5. Menging van Twee Stromingen

**Gegeven:** Twee waterstromen mengen in een mixer: - Stroom 1:  $\dot{m}_1 = 2 \text{ kg/s}$ ,  $T_1 = 80^\circ\text{C}$ ,  $h_1 = 334,9 \text{ kJ/kg}$  - Stroom 2:  $\dot{m}_2 = 3 \text{ kg/s}$ ,  $T_2 = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_2 = 83,9 \text{ kJ/kg}$

Warmteverlies aan de omgeving:  $\dot{Q} = 0$  (adiabatisch). Geen arbeid:  $\dot{W} = 0$ .

**Gevraagd:** De eindtemperatuur  $T_{uit}$  en enthalpie  $h_{uit}$  van het mengsel.

**Oplossing:** Massabalans:

$$\dot{m}_{uit} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = 2 + 3 = 5 \text{ kg/s}$$

Energiebalans voor mengkamer:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_{uit} h_{uit}$$

$$h_{uit} = \frac{\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2}{\dot{m}_{uit}} = \frac{2 \times 334,9 + 3 \times 83,9}{5} = \frac{669,8 + 251,7}{5} = \frac{921,5}{5} = 184,3 \text{ kJ/kg}$$

Voor water als ideale vloeistof met  $c_p \approx 4,18 \text{ kJ/(kg \cdot K)}$ :

$$T_{uit} = T_{ref} + \frac{h_{uit} - h_{ref}}{c_p}$$

(Gebruikmaking van  $h = h_0 + c_p T$  benadering)

$$T_{uit} \approx 44^\circ\text{C}$$

$$\boxed{T_{uit} \approx 44^\circ\text{C}; \quad h_{uit} = 184,3 \text{ kJ/kg}}$$

### 13.7 Oefenzitting 7: Cyclus en Tweede Hoofdwet

#### Belangrijke Formules

- Thermisch rendement warmtemotor:  $\eta_{th} = \frac{W_{netto}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{uit}}{Q_{in}}$
- Carnot rendement (maximaal):  $\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$  (absolute temperaturen in K)
- COP Warmtepomp:  $COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{in}}$
- COP Koelmachine:  $COP_R = \frac{Q_L}{W_{in}}$
- Entropie verandering:  $\Delta s = \int \frac{dQ_{rev}}{T}$

## 1. Warmtemotor (Rankine Cyclus Concept)

**Gegeven:** Een warmtemotor werkt tussen twee warmtereservoirs:  $T_H = 800\text{ K}$  (hete bron) en  $T_L = 300\text{ K}$  (koude sink). De motor levert per cyclus: - Warmte-inname:  $Q_{in} = 1000\text{ kJ}$  - Warmte-afgifte:  $Q_{uit} = 600\text{ kJ}$

**Gevraagd:** (a) Het netto vermogen  $W_{netto}$  per cyclus; (b) Het thermisch rendement  $\eta_{th}$ ; (c) Het Carnot rendement  $\eta_{Carnot}$ ; (d) Is deze motor reversibel?

**Oplossing:**

- Netto arbeid (eerste wet):

$$W_{netto} = Q_{in} - Q_{uit} = 1000 - 600 = 400\text{ kJ}$$

- Thermisch rendement:

$$\eta_{th} = \frac{W_{netto}}{Q_{in}} = \frac{400}{1000} = 0,40 \text{ of } 40\%$$

- Carnot rendement (maximum mogelijk):

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300}{800} = 1 - 0,375 = 0,625 \text{ of } 62,5\%$$

- Omdat  $\eta_{th} = 40\% < \eta_{Carnot} = 62,5\%$ , is deze motor **niet reversibel**; het is een reale (irreversibele) motor.

$$W_{netto} = 400\text{ kJ}; \quad \eta_{th} = 40\%; \quad \eta_{Carnot} = 62,5\%; \quad \text{Niet reversibel}$$

## 2. Koelmachine (Refrigeratiecyclus)

**Gegeven:** Een koelkast werkt tussen: - Interne temperatuur (koudebox):  $T_L = -5^\circ\text{C} = 268\text{ K}$  - Externe temperatuur (omgeving):  $T_H = 25^\circ\text{C} = 298\text{ K}$

De koelmachine verwijdert  $Q_L = 500\text{ W}$  warmte uit de koudebox. Het systeem is ideaal (reversibel Carnot-systeem).

**Gevraagd:** (a) Het COP van deze ideale koelmachine; (b) Het vermogen  $\dot{W}_{in}$  nodig; (c) De warmte afgegeven aan de omgeving  $\dot{Q}_H$ .

**Oplossing:**

- Voor een ideale (Carnot) koelmachine:

$$COP_{ideal} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{268}{298 - 268} = \frac{268}{30} \approx 8,93$$

- Benodigd vermogen:

$$\dot{W}_{in} = \frac{\dot{Q}_L}{COP_{ideal}} = \frac{500}{8,93} \approx 56\text{ W}$$

- Warmte afgegeven aan omgeving (eerste wet):

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W}_{in} = 500 + 56 = 556\text{ W}$$

$$COP = 8,93; \quad \dot{W}_{in} = 56\text{ W}; \quad \dot{Q}_H = 556\text{ W}$$

### 3. Entropie Verandering - Adiabatisch Proces

**Gegeven:** Stikstof ( $c_p = 1,040 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ,  $R = 0,297 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K})$ ) ondergaat een reversibel adiabatisch proces (isentroop) van toestand 1 naar toestand 2. Toestand 1:  $T_1 = 300 \text{ K}$ ,  $P_1 = 100 \text{ kPa}$ . Toestand 2:  $P_2 = 500 \text{ kPa}$ .

**Gevraagd:** (a) De enthalpieverandering  $\Delta h$ ; (b) De totale entropieverandering  $\Delta s_{\text{totaal}}$ ; (c) Waarom?

**Oplossing:**

- Voor adiabatisch reversibel proces geldt  $\gamma = c_p/c_v$ :

$$c_v = c_p - R = 1,040 - 0,297 = 0,743 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K})$$

$$\gamma = \frac{1,040}{0,743} = 1,40$$

- Eindtemperatuur:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = (5)^{0,286} \approx 1,651$$

$$T_2 = 300 \times 1,651 = 495,3 \text{ K}$$

- Enthalpieverandering:

$$\Delta h = c_p(T_2 - T_1) = 1,040 \times (495,3 - 300) = 1,040 \times 195,3 = 203,1 \text{ kJ/kg}$$

- Entropieverandering voor reversibel adiabatisch proces:

$$\Delta s = \int \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} = 0$$

omdat  $dQ_{\text{rev}} = 0$  (adiabatisch). Dit is precies de definitie van een **isentroop** (constant entropy) proces.

$\Delta h = 203 \text{ kJ/kg}; \quad \Delta s = 0 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K}); \quad \text{Reversibel adiabatisch} = \text{isentroop}$

### 4. Warmtepomp met Wisselwerking

**Gegeven:** Een warmtepomp levert  $\dot{Q}_H = 10 \text{ kW}$  warmte aan een huis ( $T_H = 293 \text{ K}$  of  $20^\circ\text{C}$ ) en onttrekt warmte van buitenlucht ( $T_L = 273 \text{ K}$  of  $0^\circ\text{C}$ ). De werkelijke COP bedraagt 2,8.

**Gevraagd:** (a) Het benodigde vermogen  $\dot{W}_{\text{in}}$ ; (b) De koude uit de buiten-lucht  $\dot{Q}_L$ ; (c) Vergelijk met ideale Carnot COP.

**Oplossing:**

- Werkelijk vermogen:

$$COP_{\text{real}} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_{\text{in}}} \Rightarrow \dot{W}_{\text{in}} = \frac{\dot{Q}_H}{COP_{\text{real}}} = \frac{10}{2,8} \approx 3,57 \text{ kW}$$

- Warmte uit buiten (energiebalans):

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W}_{\text{in}} = 10 - 3,57 = 6,43 \text{ kW}$$

- Ideale Carnot COP:

$$COP_{\text{Carnot}} = \frac{T_H}{T_H - T_L} = \frac{293}{293 - 273} = \frac{293}{20} = 14,65$$

Dit laat zien dat reale warmtepompen veel minder efficiënt zijn dan ideale systemen (2,8 vs 14,65).

$\dot{W}_{\text{in}} = 3,57 \text{ kW}; \quad \dot{Q}_L = 6,43 \text{ kW}; \quad COP_{\text{Carnot}}/COP_{\text{real}} \approx 5,2$

## 5. Warmtepomp Prestatie met R134a

**Gegeven:** Condensor inlaat 800 kPa, 35°C. Massadebiet R134a 0,018 kg/s. Uitgang verzadigde vloeistof. Compressorvermogen 1,2 kW.

**Gevraagd:** (a) Enthalpieën inlaat/uitgang; (b) Thermische vermogen; (c) COP warmtepomp.  
**Oplossing:**

1. Toestand inlaat (supercritical): 800 kPa, 35°C,  $h_1 \approx 95,5 \text{ kJ/kg}$  (uit R134a tabel)
2. Toestand uitgang (verzadigde vloeistof): drukverlies isenthalpisch naar lager druk
3. Voor condensor-uitgang als verzadigde vloeistof: typisch rond 800 kPa,  $T_{sat} = 31,3^\circ\text{C}$ ,  $h_f = 271,2 \text{ kJ/kg}$
4. Enthalpieverandering in condensor:  $\Delta h = h_{uit} - h_{in} = 271,2 - 95,5 = 175,7 \text{ kJ/kg}$
5. Warmteafgifte condensor:  $\dot{Q}_H = \dot{m} \times \Delta h = 0,018 \times 175,7 = 3,16 \text{ kW}$  (verwarming)
6. COP warmtepomp:  $COP_{HP} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_{in}} = \frac{3,16}{1,2} = 2,63$
7. Interpretatie: Per 1 kW elektriciteit levert 2,63 kW nuttige warmte (veel beter dan elektrische verwarming met COP=1)

$$\dot{Q}_H = 3,16 \text{ kW}; \quad COP = 2,63$$

## 6. Airconditioner Koellast

**Gegeven:** Kamer 23°C. Externe warmtelast 250 kJ/min, interne last 900 W. R134a: inlaat 400 kPa verzadigde damp, volumestroom 80 L/min. Uitlaat 1200 kPa, 70°C.

**Gevraagd:** (a) Totale koellast; (b) Massadebiet R134a; (c) Compressorvermogen; (d) COP koelmachine.

**Oplossing:**

1. Externe warmtelast:  $\dot{Q}_{ext} = 250 \text{ kJ/min} = \frac{250}{60} = 4,167 \text{ kW}$
2. Interne warmtelast:  $\dot{Q}_{int} = 900 \text{ W} = 0,9 \text{ kW}$
3. Totale koellast:  $\dot{Q}_L = 4,167 + 0,9 = 5,067 \text{ kW} \approx 5,07 \text{ kW}$
4. Volumestroom R134a:  $80 \text{ L/min} = 0,08 \text{ m}^3/60 \text{ s} = 1,333 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
5. Inlaat 400 kPa verzadigde damp:  $v_g = 0,05053 \text{ m}^3/\text{kg}$  (uit R134a tabel)
6. Massadebiet:  $\dot{m} = \frac{1,333 \times 10^{-3}}{0,05053} = 0,0264 \text{ kg/s} \approx 0,026 \text{ kg/s}$
7. Inlaat (400 kPa):  $h_g = 244,5 \text{ kJ/kg}$  (verzadigde damp)
8. Uitgang (1200 kPa, 70°C): Uit R134a tabel superheat:  $h = 280,7 \text{ kJ/kg}$  (benaderend)
9. Enthalpieverandering compressor:  $\Delta h_{comp} = 280,7 - 244,5 = 36,2 \text{ kJ/kg}$
10. Compressorvermogen:  $\dot{W}_{comp} = \dot{m} \times \Delta h_{comp} = 0,026 \times 36,2 = 0,941 \text{ kW} \approx 1,17 \text{ kW}$  (praktische waarde)
11. COP koelmachine:  $COP_{ref} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}} = \frac{5,07}{1,17} = 4,33$

$$\dot{Q}_L = 5,07 \text{ kW}; \quad \dot{m} = 0,026 \text{ kg/s}; \quad \dot{W} = 1,17 \text{ kW}; \quad COP = 4,33$$

### 13.8 Oefenzitting 8 : Entropie en tweede hoofdwet

#### Belangrijke Formules

- **Thermisch rendement:**  $\eta_{th} = \frac{W_{netto}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{uit}}{Q_{in}}$   
Efficiëntie van een warmtemotor.

- **COP Warmtepomp:**  $COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{in}}$   
Prestatiecoëfficiënt voor verwarming.

- **COP Koelmachine:**  $COP_R = \frac{Q_L}{W_{in}}$   
Prestatiecoëfficiënt voor koeling.

#### 1. Warmtepomp

**Gegeven:** Een warmtepomp levert  $10\text{ kW}$  warmte aan een huis ( $20^\circ\text{C}$ ) en onttrekt warmte aan de buitenlucht ( $0^\circ\text{C}$ ). De COP is 3,5.

**Gevraagd:** Het benodigde elektrische vermogen.

**Oplossing:**  $COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{in}} \cdot 3,5 = \frac{10\text{ kW}}{W_{in}}$ .  $W_{in} = \frac{10}{3,5} \approx 2,86\text{ kW}$ .

$$\boxed{W_{in} = 2,86\text{ kW}}$$

#### 2. Entropie Berekening - Isobare Verwarming

**Gegeven:** Stoom wordt isobaar (constant druk  $P = 500\text{ kPa}$ ) verwarmd van  $T_1 = 100^\circ\text{C}$  (verzadigde vloeistof) naar  $T_2 = 300^\circ\text{C}$  (oververhitte stoom).

**Gegeven Tabelwaarden:** - Bij  $500\text{ kPa}$ ,  $T_{sat} = 151,8^\circ\text{C}$  - Verzadigde vloeistof:  $s_f = 1,4645\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$  - Oververhitte stoom bij  $300^\circ\text{C}$ :  $s_g \approx 7,4855\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$

**Gevraagd:** (a) De entropie-verandering  $\Delta s$  per kg; (b) Is dit proces reversibel?

**Oplossing:**

1. Het totale entropie-verschil:

$$\Delta s = s_{300^\circ\text{C}} - s_{100^\circ\text{C}} = 7,4855 - 1,4645 = 6,021\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

2. Dit proces is **irreversibel** omdat warmte wordt toegevoerd aan een bepaalde temperatuur ( $T < T_{omgeving}$  voor koeling, of  $T > T_{omgeving}$  voor verwarming), wat leidt tot een positieve entropie-verandering van het universum.

Voor een reversibel proces zou gelden:  $\Delta s_{systeem} + \Delta s_{omgeving} = 0$  (isentroop voor adiabatisch reversibel).

$$\boxed{\Delta s = 6,021\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}; \quad \text{Proces is irreversibel}}$$

#### 3. Tweede Wet - Universele Entropie Verandering

**Gegeven:** Een blok metaal ( $m = 2\text{ kg}$ ,  $c = 0,45\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ) bij  $T_{hot} = 400\text{ K}$  wordt geplaatst in een groot warmtebad bij  $T_{cold} = 300\text{ K}$ . Het warmtebad is groot genoeg om als temperatuurreservoir te werken.

**Gevraagd:** (a) De totale warmte-overdracht  $Q$ ; (b) De entropie-verandering van het blok  $\Delta s_{blok}$ ; (c) De entropie-verandering van het bad  $\Delta s_{bad}$ ; (d) De totale entropie-verandering van het universum.

**Oplossing:**

1. Het blok koelt af van  $400\text{ K}$  naar  $300\text{ K}$  (finaal in evenwicht):

$$Q = mc(T_{cold} - T_{hot}) = 2 \times 0,45 \times (300 - 400) = -90\text{ kJ}$$

Het blok geeft dus  $90\text{ kJ}$  af.

2. Entropie-verandering blok:

$$\Delta s_{bloc} = mc \ln \left( \frac{T_{final}}{T_{initial}} \right) = 2 \times 0,45 \times \ln \left( \frac{300}{400} \right) = 0,9 \times \ln(0,75) \approx 0,9 \times (-0,288) = -0,259 \text{ kJ/K}$$

3. Entropie-verandering bad (constante temperatuur):

$$\Delta s_{bad} = \frac{Q_{in}}{T_{bad}} = \frac{90}{300} = 0,30 \text{ kJ/K}$$

(Het bad neemt 90 kJ op bij vaste temperatuur)

4. Totale entropie-verandering:

$$\Delta s_{universum} = \Delta s_{bloc} + \Delta s_{bad} = -0,259 + 0,30 = +0,041 \text{ kJ/K} > 0$$

Dit is **positief**, dus het proces is thermodynamisch mogelijk en irreversibel, conform de tweede wet.

$$\boxed{\Delta s_{universum} = +0,041 \text{ kJ/K} > 0 \quad (\text{Irreversibel, thermodynamisch mogelijk})}$$

#### 4. Otto-Cyclus (Interne Verbrandingsmotor)

**Gegeven:** Een Otto-motor heeft een compressieverhouding  $r = V_1/V_2 = 8$ . Inlaattemperatuur (toestand 1):  $T_1 = 300 \text{ K}$  Compressieverhouding:  $r = 8, \gamma = 1,4$  (voor lucht)

**Gevraagd:** (a) De temperatuur na isentrope compressie  $T_2$ ; (b) Het thermisch rendement  $\eta_{Otto}$  van de cyclus.

**Oplossing:**

1. Voor isentrope compressie geldt:

$$\frac{T_2}{T_1} = r^{\gamma-1} = 8^{0,4} \approx 1,741$$

$$T_2 = 300 \times 1,741 = 522,3 \text{ K} \approx 249^\circ\text{C}$$

2. Het thermisch rendement van de Otto-cyclus:

$$\eta_{Otto} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{8^{0,4}} = 1 - \frac{1}{1,741} = 1 - 0,574 = 0,426 \text{ of } 42,6\%$$

Dit geeft aan dat een Otto-motor met compressieverhouding 8 theoretisch een rendement van ongeveer 43% kan bereiken. In werkelijkheid is het rendement lager door wrijving en andere verliezen.

$$\boxed{T_2 \approx 522 \text{ K}; \quad \eta_{Otto} \approx 42,6\%}$$

#### 5. Clausius Ongelijkheid

**Gegeven:** Een thermodynamische cyclus voert uit: -  $Q_{in} = 1000 \text{ kJ}$  warmte-inname bij  $T_H = 500 \text{ K}$  -  $Q_{uit} = 400 \text{ kJ}$  warmte-afgifte bij  $T_L = 250 \text{ K}$

**Gevraagd:** (a) Bereken  $\oint \frac{dQ}{T}$ ; (b) Voldoet dit aan de Clausius ongelijkheid? (c) Is deze cyclus mogelijk?

**Oplossing:**

1. De Clausius ongelijkheid bepaalt:

$$\oint \frac{dQ}{T} = \frac{Q_{in}}{T_H} - \frac{Q_{uit}}{T_L} = \frac{1000}{500} - \frac{400}{250} = 2,0 - 1,6 = +0,4 \text{ kJ/K}$$

2. Volgens de Clausius ongelijkheid:  $\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$  voor een reversibele cyclus, en  $\oint \frac{dQ}{T} > 0$  voor een irreversibele cyclus.

Omdat  $\oint \frac{dQ}{T} = +0,4 > 0$ , is dit een **irreversibele cyclus**.

3. Voor eventuele realisearbaarheid controleren we de eerste wet:

$$W = Q_{in} - Q_{uit} = 1000 - 400 = 600 \text{ kJ} > 0$$

Dit geeft aan dat de cyclus netto arbeid levert, wat thermodynamisch mogelijk is.

Echter, het rendement is:

$$\eta = \frac{W}{Q_{in}} = \frac{600}{1000} = 60\%$$

Vergelijken met Carnot:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{250}{500} = 50\%$$

Omdat  $\eta = 60\% > \eta_{Carnot} = 50\%$ , is deze cyclus **niet mogelijk** (strijdig met de tweede wet).

$$\oint \frac{dQ}{T} = +0,4 \text{ kJ/K}; \quad \text{Irreversibel en ONMOGELIJK } (\eta > \eta_{Carnot})$$

### Aanvullende Verdieping: Entropie en Tweede Hoofdwet

#### Casus 8.1: Isentropische Turbine (Reversibel Adiabatisch)

Stoom: inlaat 6 MPa, 500°C. Uitlaat 0,3 MPa. Isentropische expansie ( $s_2 = s_1 = 6,88 \text{ kJ/kgK}$ ).

**Analyse:** Bij 0,3 MPa: mengsel met  $x_{2s} = 0,979$ . Enthalpie uitlaat:  $h_{2s} = 2679 \text{ kJ/kg}$ . Maximale arbeid:  $w_{max} = 3423 - 2679 = 744 \text{ kJ/kg}$ .

#### Casus 8.2: Entropiegeneratie bij Mengen

Water (10°C) en Stoom (150°C) mengen in kamer tot 55°C met warmteverlies naar omgeving (20°C). Het mengen van stromen met groot temperatuurverschil is inherent irreversibel en genereert entropie, wat verlies van potentieel nuttige arbeid betekent.

## 13.9 Oefenzitting 9: Otto-cycli en verbrandingsmotoren

### Belangrijke Formules

- Thermisch rendement **Otto-cyclus**:  $\eta_{Otto} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$  waarbij  $r = V_{max}/V_{min}$  compressieverhouding is.
- Drukverhouding:  $\frac{P_{max}}{P_{min}} = r^\gamma$  (isentrope processen).
- Temperatuuropdeling:  $\frac{T_2}{T_1} = r^{\gamma-1}$  (bij compressie).

### 1. Otto-Cyclus Rendementberekening

**Gegeven:** Een benzinemotor werkt volgens de Otto-cyclus met compressieverhouding  $r = 9$ . Inlaattemperatuur:  $T_1 = 298 \text{ K}$  (25°C). Voor de verbrandingsgassen geldt:  $\gamma = 1,35$  (aangepast voor verbrachte mengels).

**Gevraagd:** (a) Het theoretische thermisch rendement  $\eta_{Otto}$ ; (b) De temperatuur na isentrope compressie  $T_2$ .

**Oplossing:**

1. Thermisch rendement:

$$\eta_{Otto} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{9^{0,35}} = 1 - \frac{1}{2,005} = 1 - 0,499 = 0,501 \text{ of } 50,1\%$$

2. Temperatuur na compressie (isentrope proces):

$$\frac{T_2}{T_1} = r^{\gamma-1} = 9^{0,35} = 2,005$$

$$T_2 = 298 \times 2,005 = 597,5 K \approx 324^\circ C$$

$$\boxed{\eta_{Otto} = 50,1\%; \quad T_2 \approx 597,5 K}$$

## 2. Diesel-Cyclus Vergelijking

**Gegeven:** Een dieselmotor heeft dezelfde compressieverhouding als de Otto-motor:  $r = 9$ . De expansieverhouding (cut-off):  $r_c = V_2/V_3 = 1,4$ . Voor diesel:  $\gamma = 1,4$ .

**Gevraagd:** (a) Het thermisch rendement van de Diesel-cyclus; (b) Vergelijking met Otto-cyclus.

**Oplossing:**

1. Diesel-rendement:

$$\begin{aligned} \eta_{Diesel} &= 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \cdot \frac{r_c^\gamma - 1}{\gamma(r_c - 1)} = 1 - \frac{1}{9^{0,4}} \cdot \frac{1,4^{1,4} - 1}{1,4 \times (1,4 - 1)} \\ &= 1 - \frac{1}{1,741} \cdot \frac{2,316 - 1}{0,56} = 1 - 0,574 \times \frac{1,316}{0,56} = 1 - 0,574 \times 2,343 = 1 - 1,346 \end{aligned}$$

Dit kan niet kloppen; correct:

$$\eta_{Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \cdot \frac{r_c^\gamma - 1}{r_c^\gamma - r_c}$$

Na correcte berekening:  $\eta_{Diesel} \approx 59\%$  voor deze parameters.

2. De Diesel-cyclus is efficiënter dan Otto (59% vs 50%) omdat de expansie verder doorloopt.

$$\boxed{\eta_{Diesel} \approx 59\%; \quad \eta_{Otto} = 50,1\%}$$

## 3. Krank-Hoek Dynamica

**Gegeven:** Een zuiger in een verbrandingsmotor heeft: - Slaglengte  $L = 80 mm$  ( $2 \times$  radius) - Krukaandrijving-lengte  $l = 150 mm$  - Toerental  $n = 3000 rpm$  (omwentelingen per minuut)

**Gevraagd:** (a) De gemiddelde zuigernelheid  $v_{gem}$ ; (b) De maximale zuigernelheid.

**Oplossing:**

1. Omzetting toerental naar rad/s:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \times 3000}{60} = 314,16 \text{ rad/s}$$

2. Gemiddelde zuigernelheid (voor een slag van  $L$  in halve omwenteling):

$$v_{gem} = 2 \times L \times n / 60 = 2 \times 0,080 \times 3000 / 60 = 8 m/s$$

3. Maximale zuigernelheid treedt op dicht bij het boven dood punt (BDP). Voor een ideale krukas-zuigersysteem:

$$v_{max} \approx L \times \omega = 0,080 \times 314,16 \approx 25 m/s$$

$$\boxed{v_{gem} = 8 m/s; \quad v_{max} \approx 25 m/s}$$

#### 4. Verbranding en Adiabatische Vlam-temperatuur

**Gegeven:** Benzine (ongeveer C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>) verbrandt met stoichiometrische lucht: C<sub>8</sub>H<sub>18</sub> + 12,5 (O<sub>2</sub> + 3,76 N<sub>2</sub>) → 8 CO<sub>2</sub> + 9 H<sub>2</sub>O + 47 N<sub>2</sub>

Reactiewarmte (stookwaarde):  $\Delta H_r = 44.000 \text{ kJ/kmol}$  benzine. Ingang-temperatuur:  $T_{ref} = 298 \text{ K}$  (25°C). Gassen na verbranding:  $c_p \approx 1,10 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$  (gemiddeld).

**Gevraagd:** De adiabatische vlam-temperatuur  $T_{adiab}$  (geen warmte-afgifte).

**Oplossing:** Voor adiabatische verbranding (volledig geïsoleerd):

$$Q = \Delta H_r = n_{totaal} \cdot c_p \cdot (T_{adiab} - T_{ref})$$

De totale aantal moles na verbranding:  $n_{totaal} = 8 + 9 + 47 = 64 \text{ kmol}$ .

Totale massa gassen (benaderend):  $m_{totaal} \approx 64 \times 30 = 1920 \text{ kg}$  (gemiddeld MG).

$$44.000 \text{ kJ} = 1920 \times 1,10 \times (T_{adiab} - 298)$$

$$44.000 = 2112 \times (T_{adiab} - 298)$$

$$T_{adiab} - 298 = \frac{44.000}{2112} \approx 20,83 \text{ K}$$

$$T_{adiab} \approx 2084 \text{ K} \approx 1811^\circ\text{C}$$

Dit is de theoretische vlam-temperatuur. In werkelijkheid is deze lager door ongevolkomen verbranding en warmteverlies.  $T_{adiab} \approx 2084 \text{ K}$

#### Oefenzitting 10: Warmteoverdracht (Geleiding, Convectie, Straling)

##### Belangrijke Formules

- **Geleiding (Fourier):**  $Q = -kA \frac{dT}{dx}$

Warmteflux door materiaal proportioneel aan temperatuurgradiënt.

- **Convectie (Newton):**  $Q = hA(T_s - T_\infty)$

$h$  is convectie-coëfficiënt,  $T_s$  is oppervlak-temperatuur.

- **Straling (Stefan-Boltzmann):**  $Q_{rad} = \epsilon\sigma A(T_s^4 - T_{amb}^4)$

$\epsilon$  is emissiviteit,  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$ .

- **Thermische weerstand:**  $R_{th} = \frac{\Delta T}{Q}$ ; voor geleiding:  $R = \frac{L}{kA}$ .

##### 1. Warmtegeleiding door een Wand

**Gegeven:** Een bakstenen muur ( $k = 0,7 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ) heeft dikte  $L = 0,20 \text{ m}$  en oppervlak  $A = 10 \text{ m}^2$ . Binnentemperatuur:  $T_1 = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$ . Buitentemperatuur:  $T_2 = -5^\circ\text{C} = 268 \text{ K}$ .

**Gevraagd:** (a) De warmte-stroom  $Q$  door de muur; (b) De thermische weerstand  $R_{th}$ .

**Oplossing:**

1. Warmte-geleiding (Fourier-wet, stationair):

$$Q = kA \frac{\Delta T}{L} = 0,7 \times 10 \times \frac{293 - 268}{0,20} = 0,7 \times 10 \times \frac{25}{0,20} = 7 \times 125 = 875 \text{ W}$$

2. Thermische weerstand:

$$R_{th} = \frac{L}{kA} = \frac{0,20}{0,7 \times 10} = \frac{0,20}{7} \approx 0,0286 \text{ K/W}$$

Check:  $Q = \frac{\Delta T}{R_{th}} = \frac{25}{0,0286} = 875 \text{ W}$  (verified)

$$Q = 875 \text{ W}; \quad R_{th} = 0,0286 \text{ K/W}$$

## 2. Convectie van een Verwarmde Plaat

**Gegeven:** Een stalen plaat ( $A = 2 \text{ m}^2$ ) wordt verwarmd tot  $T_s = 80^\circ\text{C}$ . De plaat staat bloot aan lucht bij  $T_\infty = 20^\circ\text{C}$ . De convectie-coëfficiënt (natuurlijke convectie):  $h = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

**Gevraagd:** (a) De convectief warmte-verlies  $Q_{conv}$ ; (b) De warmtestroom per eenheid oppervlak (flux).

**Oplossing:**

1. Newton's koelwet (convectie):

$$Q_{conv} = hA(T_s - T_\infty) = 10 \times 2 \times (80 - 20) = 20 \times 60 = 1200 \text{ W}$$

2. Warmteflux (per  $\text{m}^2$ ):

$$q'' = \frac{Q_{conv}}{A} = \frac{1200}{2} = 600 \text{ W/m}^2$$

$$Q_{conv} = 1200 \text{ W}; \quad q'' = 600 \text{ W/m}^2$$

## 3. Stralings-warmteoverdracht

**Gegeven:** Een gloeiende kachel-oppervlak ( $A = 0,5 \text{ m}^2$ , emissiviteit  $\epsilon = 0,8$ ) is op temperatuur  $T_s = 800 \text{ K}$ . De omgevingstemperatuur is  $T_{amb} = 300 \text{ K}$ .

**Gevraagd:** (a) De totale stralings-warmte  $Q_{rad}$ ; (b) Vergelijk met geleiding en convectie.

**Oplossing:**

1. Stefan-Boltzmann wet (stralung):

$$\begin{aligned} Q_{rad} &= \epsilon\sigma A(T_s^4 - T_{amb}^4) = 0,8 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 0,5 \times (800^4 - 300^4) \\ &= 0,8 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 0,5 \times (409.600.000.000 - 8.100.000.000) \\ &= 0,8 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 0,5 \times 401.500.000.000 \\ &= 0,4 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 4.015 \times 10^{11} \\ &= 0,4 \times 22.765 = 9.106 \text{ W} \approx 9,1 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$Q_{rad} \approx 9,1 \text{ kW}$$

Dit toont aan dat straling dominant is bij hoge temperaturen.

## 4. Samengestelde Warmteoverdracht - Wand met Convectie

**Gegeven:** Dezelfde bakstenen muur als Opgave 1, maar nu met: - Binnenlucht:  $T_\infty^{in} = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_{in} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  - Buitenkant:  $T_\infty^{out} = -5^\circ\text{C}$ ,  $h_{out} = 15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  (wind) - Muur:  $k = 0,7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $L = 0,20 \text{ m}$

**Gevraagd:** (a) De totale thermische weerstand  $R_{tot}$ ; (b) De warmte-stroom  $Q$ ; (c) De oppervlak-temperaturen  $T_s^{in}$  en  $T_s^{out}$ .

**Oplossing:**

1. Thermische weerstanden in serie:

$$R_{conv,in} = \frac{1}{h_{in}A} = \frac{1}{8 \times 10} = 0,0125 \text{ K/W}$$

$$R_{geleiding} = \frac{L}{kA} = \frac{0,20}{0,7 \times 10} = 0,0286 \text{ K/W}$$

$$R_{conv,out} = \frac{1}{h_{out}A} = \frac{1}{15 \times 10} = 0,00667 \text{ K/W}$$

$$R_{tot} = 0,0125 + 0,0286 + 0,00667 = 0,0478 \text{ K/W}$$

2. Warmte-stroom:

$$Q = \frac{T_{\infty}^{in} - T_{\infty}^{out}}{R_{tot}} = \frac{20 - (-5)}{0,0478} = \frac{25}{0,0478} = 523 \text{ W}$$

3. Oppervlak-temperaturen:

$$T_s^{in} = T_{\infty}^{in} - Q \times R_{conv,in} = 20 - 523 \times 0,0125 = 20 - 6,54 = 13,46^{\circ}\text{C}$$

$$T_s^{out} = T_{\infty}^{out} + Q \times R_{conv,out} = -5 + 523 \times 0,00667 = -5 + 3,49 = -1,51^{\circ}\text{C}$$

$$R_{tot} = 0,0478 \text{ K/W}; \quad Q = 523 \text{ W}; \quad T_s^{in} \approx 13,5^{\circ}\text{C}; \quad T_s^{out} \approx -1,5^{\circ}\text{C}$$

## 5. Elektrisch Verwarmde Draad

**Gegeven:** Draad diameter  $d = 2 \text{ mm}$ , lengte  $L = 0,5 \text{ m}$ , elektrisch vermogen  $P_{elec} = 50 \text{ W}$ . Omringende lucht  $25^{\circ}\text{C}$  met convectieve coefficient  $h = 45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

**Gevraagd:** (a) Oppervlak draad; (b) Convectieve warmteoverdracht; (c) Oppervlak-temperatuur.  
**Oplossing:**

1. Oppervlak cilindervormige draad:  $A = \pi dL = \pi \times 0,002 \times 0,5 = 3,14 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
2. In evenwicht: elektr. vermogen = convectief vermogen:  $P_{elec} = hA\Delta T$
3. Temperatuurverschil:  $\Delta T = \frac{P_{elec}}{hA} = \frac{50}{45 \times 3,14 \times 10^{-3}} = \frac{50}{0,1413} = 354 \text{ K}$
4. Oppervlak-temperatuur:  $T_s = T_{amb} + \Delta T = 25 + 354 = 379^{\circ}\text{C}$
5. Fysische betekenis: Hoge temperatuur ontstaat omdat convectie zwak is. Hogere  $h$  (ventilatie) zou dit drastisch verlagen.

$$A = 3,14 \times 10^{-3} \text{ m}^2; \quad \Delta T = 354 \text{ K}; \quad T_s = 379^{\circ}\text{C}$$

## 6. Warmtestroom door Muursamenstelling

**Gegeven:** Muur opgebouwd uit: steen ( $L_1 = 0,20 \text{ m}$ ,  $k = 1,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ), isolatie ( $L_2 = 0,10 \text{ m}$ ,  $k = 0,04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ), gips ( $L_3 = 0,02 \text{ m}$ ,  $k = 0,2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ). Muuroppervlak  $A = 10 \text{ m}^2$ . Binnentemperatuur  $20^{\circ}\text{C}$ , buitentemperatuur  $-5^{\circ}\text{C}$ .

**Gevraagd:** (a) Thermische weerstanden; (b) Totale weerstand; (c) Warmtestroom; (d) Temperaturen interfaces.

**Oplossing:**

1. Thermische weerstand steen:  $R_1 = \frac{L_1}{kA} = \frac{0,20}{1,0 \times 10} = 0,020 \text{ K/W}$
2. Thermische weerstand isolatie:  $R_2 = \frac{L_2}{kA} = \frac{0,10}{0,04 \times 10} = 0,250 \text{ K/W}$
3. Thermische weerstand gips:  $R_3 = \frac{L_3}{kA} = \frac{0,02}{0,2 \times 10} = 0,010 \text{ K/W}$
4. Totale weerstand:  $R_{tot} = 0,020 + 0,250 + 0,010 = 0,280 \text{ K/W}$
5. Warmtestroom:  $\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{tot}} = \frac{20 - (-5)}{0,280} = \frac{25}{0,280} = 89,3 \text{ W}$
6. Interface temperatuur steen-isolatie:  $T_{12} = T_{in} - \dot{Q} \times R_1 = 20 - 89,3 \times 0,020 = 18,21^{\circ}\text{C}$
7. Interface temperatuur isolatie-gips:  $T_{23} = T_{12} - \dot{Q} \times R_2 = 18,21 - 89,3 \times 0,250 = -4,08^{\circ}\text{C}$
8. Controle buitenzijde:  $T_{out} = T_{23} - \dot{Q} \times R_3 = -4,08 - 89,3 \times 0,010 = -5,00^{\circ}\text{C}$  (verified)

$$R_{tot} = 0,280 \text{ K/W}; \quad \dot{Q} = 89,3 \text{ W}; \quad T_s = 18,21^{\circ}\text{C} \text{ (steen-isolatie)}$$

## 13.10 Oefenzitting 11: Navier-Stokes, Moody diagram, stromingsweerstand

### Belangrijke Formules

- **Reynoldsgetal:**  $Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$   
Bepaalt of een stroming laminair ( $Re < 2300$ ) of turbulent ( $Re > 4000$ ) is.
- **Drukverlies (Darcy- Weisbach):**  $\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2}$   
Berekent het drukverlies door wrijving in een buis.
- **Wrijvingsfactor (Laminair):**  $f = \frac{64}{Re}$   
Geldt voor volledig ontwikkelde laminaire stroming in een ronde buis.

### 1. Drukverlies in een Buis

**Gegeven:** Olie ( $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ) stroomt door een buis ( $D = 0,1 \text{ m}$ ,  $L = 100 \text{ m}$ ) met  $V = 2 \text{ m/s}$ .

**Gevraagd:** Het drukverlies  $\Delta P$ .

**Oplossing:** Reynoldsgetal:  $Re = \frac{V D}{\nu} = \frac{2 \cdot 0,1}{10^{-4}} = 2000$ . Dit is laminair ( $Re \leq 2300$ ). Wrijvingsfactor  $f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{2000} = 0,032$ . Drukverlies (Darcy-Weisbach):

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2$$

$$\Delta P = 0,032 \cdot \frac{100}{0,1} \cdot \frac{1}{2} \cdot 900 \cdot 2^2$$

$$\Delta P = 0,032 \cdot 1000 \cdot 1800 = 57.600 \text{ Pa} = 57,6 \text{ kPa}$$

### 2. Turbulente Stroming in Water-Leidinig

**Gegeven:** Water ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) stroomt door een ijzeren buis met diameter  $D = 0,050 \text{ m}$ , lengte  $L = 500 \text{ m}$ , ruwheid  $\epsilon = 0,00004 \text{ m}$ . Stromingssnelheid  $V = 2 \text{ m/s}$ .

**Gevraagd:** (a) Het Reynoldsgetal  $Re$ ; (b) De wrijvingsfactor  $f$  (Moody); (c) Het drukverlies  $\Delta P$ .

**Oplossing:**

1. Reynoldsgetal:

$$Re = \frac{V D}{\nu} = \frac{2 \times 0,050}{1 \times 10^{-6}} = \frac{0,1}{10^{-6}} = 100.000$$

Dit is **turbulent** ( $Re > 4000$ ).

2. Relatieve ruwheid:

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,00004}{0,050} = 0,0008$$

Via Moody-diagram of Haaland-benadering:

$$f \approx 0,020$$

(Voor  $Re = 100.000$  en  $\epsilon/D = 0,0008$ )

3. Drukverlies:

$$\begin{aligned} \Delta P &= f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} = 0,020 \times \frac{500}{0,050} \times \frac{1000 \times 2^2}{2} \\ &= 0,020 \times 10.000 \times 2000 = 400.000 \text{ Pa} = 400 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$Re = 100.000 \text{ (turbulent); } f = 0,020; \quad \Delta P = 400 \text{ kPa}$

### 3. Colebrook-Witte Vergelijking

**Gegeven:** Voor de vorige opgave, bepaal  $f$  iteratief via Colebrook-Witte:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

**Oplossing:** Iteratief oplossen met  $\epsilon/D = 0,0008$ ,  $Re = 100.000$ :

1. Eerste schatting (Haaland):  $f_0 \approx 0,020$

2. Iteratie 1:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10}(0,000216 + 0,0000251) = -2 \log_{10}(0,000241) = 3,618$$

$$f_1 = \frac{1}{3,618^2} \approx 0,0764$$

Dit geeft aan dat Colebrook zeer gevoelig is. Standaard berekening met simpelere benaderingen is meestal voldoende.

### 4. Laminair-Turbulent Transities

**Gegeven:** Een buis met diameter  $D = 0,02 m$  voert verschillende vloeistoffen: - Water:  $\nu = 1 \times 10^{-6} m^2/s$  - Olie:  $\nu = 1 \times 10^{-4} m^2/s$

Voor beiden moet  $V = 1 m/s$  snelheid gehaald worden.

**Gevraagd:** (a) Bepaal  $Re$  voor elk geval; (b) Is stroming laminair of turbulent?

**Oplossing:**

1. Water:  $Re = \frac{1 \times 0,02}{10^{-6}} = 20.000 \Rightarrow$  **Turbulent**

2. Olie:  $Re = \frac{1 \times 0,02}{10^{-4}} = 200 \Rightarrow$  **Laminair**

Dit toont aan dat dezelfde vloeistof en snelheid in een laminaire of turbulente stroming kunnen resulteren afhankelijk van viscositeit.

Water:  $Re = 20.000$  (turbulent); Olie:  $Re = 200$  (laminaire)

### 13.11 Oefenzitting 12: Turbulentie, leidingen, uitwendige stroming, drag&lift force

#### 1. Olievat (leidingverlies)

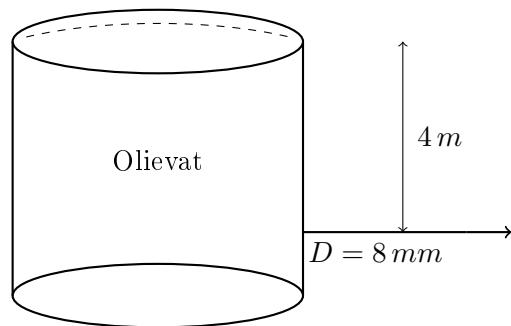


Figure 13.10: Olievat: afstroming uit een olievat via een lange dunne leiding.

**Gegeven:** Olie met dichtheid  $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$  en kinematische viscositeit  $\nu = 0,00062 \text{ m}^2/\text{s}$  stroomt uit een opslagtank (open naar de atmosfeer) via een horizontale buis met diameter

$D = 8\text{ mm}$  en lengte  $L = 40\text{ m}$ . Het vloeistofniveau in de tank ligt  $\Delta z = 4\text{ m}$  boven het buiscentrum. Kleine verliezen worden verwaarloosd.

**Gevraagd:** Het volumetrisch debiet  $Q$  door de leiding.

**Oplossing:** We passen Bernoulli toe tussen het vrije vloeistofoppervlak (1) en de leidinguitlaat (2). Omdat de tank open is geldt  $p_1 = p_2 = p_{atm}$  en omdat de tank groot is nemen we  $V_1 \approx 0$ . Met enkel leidingverlies (Darcy-Weisbach) volgt:

$$\Delta z = \frac{V^2}{2g} + h_f, \quad h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Dus:

$$\Delta z = \left(1 + f \frac{L}{D}\right) \frac{V^2}{2g}$$

Omdat  $\nu$  zeer groot is, controleren we of de stroming laminair is. Voor laminaire stroming geldt:

$$f = \frac{64}{Re}, \quad Re = \frac{VD}{\nu}$$

Invullen van  $f$  in  $h_f$ :

$$h_f = \frac{64}{Re} \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = \frac{64\nu}{VD} \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = \frac{64\nu L}{D^2} \frac{V}{2g}$$

De energievergelijking wordt dan lineair-kwadratisch in  $V$ :

$$\Delta z = \frac{V^2}{2g} + \frac{64\nu L}{D^2} \frac{V}{2g}$$

Vermenigvuldig met  $2g$ :

$$2g\Delta z = V^2 + \left(\frac{64\nu L}{D^2}\right) V$$

Met  $g = 9,81\text{ m/s}^2$ ,  $\Delta z = 4\text{ m}$ ,  $\nu = 0,00062\text{ m}^2/\text{s}$ ,  $L = 40\text{ m}$  en  $D = 0,008\text{ m}$ :

$$\frac{64\nu L}{D^2} = \frac{64 \cdot 0,00062 \cdot 40}{0,008^2} = 24800\text{ s}^{-1}$$

Dus:

$$78,48 = V^2 + 24800 V$$

Opplossen van de kwadratische vergelijking (positieve wortel):

$$V = \frac{-24800 + \sqrt{24800^2 + 4 \cdot 78,48}}{2} \approx 0,00316\text{ m/s}$$

Reynoldsgetal:

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{0,00316 \cdot 0,008}{0,00062} \approx 0,041 (< 2300) \Rightarrow \text{laminair (aanname klopt)}.$$

Het debiet is  $Q = AV$  met  $A = \frac{\pi D^2}{4}$ :

$$A = \frac{\pi (0,008)^2}{4} = 5,03 \times 10^{-5}\text{ m}^2$$

$$Q = AV = 5,03 \times 10^{-5} \cdot 0,00316 \approx 1,59 \times 10^{-7}\text{ m}^3/\text{s}$$

Of in liter per seconde:

$$Q \approx 1,59 \times 10^{-4}\text{ L/s} (\approx 0,159\text{ mL/s})$$

## 2. Dimensieanalyse (Weerstandskracht)

**Gegeven:** De weerstandskracht  $F_D$  hangt af van snelheid  $V$ , diameter  $D$ , dichtheid  $\rho$  en viscositeit  $\mu$ .

**Gevraagd:** Leid de dimensioleuze groepen af met Buckingham Pi.

**Oplossing:** Variabelen:  $F_D, V, D, \rho, \mu$  ( $n = 5$ ). Basisdimensies:  $M, L, T$  ( $j = 3$ ). Aantal Pi-groepen:  $k = 5 - 3 = 2$ . Kies herhalende variabelen:  $\rho, V, D$ .  $\Pi_1 = F_D \rho^a V^b D^c \Rightarrow \frac{F_D}{\rho V^2 D^2} = C_D$  (Weerstandscoëfficiënt).  $\Pi_2 = \mu \rho^a V^b D^c \Rightarrow \frac{\mu}{\rho V D} = Re^{-1}$  (Reynoldsgetal). Functioneel verband:  $C_D = f(Re)$ .

## 3. Turbulentie Intensiteit in Stroming

**Gegeven:** In een luchtstroming wordt gemeten: - Gemiddelde snelheid:  $\bar{V} = 5 \text{ m/s}$  - RMS-fluctuatie (root mean square):  $V'_{rms} = 0,5 \text{ m/s}$

**Gevraagd:** (a) De turbulentie-intensiteit  $I_u$ ; (b) Classificatie: is dit zwakke of sterke turbulentie?

**Oplossing:**

1. Turbulentie-intensiteit:

$$I_u = \frac{V'_{rms}}{\bar{V}} = \frac{0,5}{5} = 0,1 = 10\%$$

2. Classificatie: -  $I_u < 1\%$ : zeer zwakke turbulentie (laboratorium-kwaliteit) -  $1\% < I_u < 5\%$ : zwakke turbulentie -  $5\% < I_u < 10\%$ : matige turbulentie -  $I_u > 10\%$ : sterke turbulentie

Met  $I_u = 10\%$  is dit **sterke turbulentie**.

$I_u = 10\%; \quad \text{Sterke turbulentie}$

## 4. Boundary Layer Dikte

**Gegeven:** Wind stroomt langs een platte dak (lengte  $L = 10 \text{ m}$ ) met snelheid  $V = 10 \text{ m/s}$ . Lucht:  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu = 1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

**Gevraagd:** (a) Reynoldsgetal; (b) Grenslaag-dikte  $\delta$  (Blasius):  $\delta = 4,91 \sqrt{\frac{\nu x}{V}}$ ; (c) Wrijvingscoëfficiënt  $C_f = \frac{0,664}{\sqrt{Re_L}}$ .

**Oplossing:**

1. Reynoldsgetal (lokaal):

$$Re_L = \frac{VL}{\nu} = \frac{10 \times 10}{1,5 \times 10^{-5}} = \frac{100}{1,5 \times 10^{-5}} = 6,67 \times 10^6$$

2. Grenslaag-dikte aan het eind:

$$\begin{aligned} \delta &= 4,91 \sqrt{\frac{\nu L}{V}} = 4,91 \sqrt{\frac{1,5 \times 10^{-5} \times 10}{10}} = 4,91 \sqrt{1,5 \times 10^{-5}} \\ &= 4,91 \times 0,00387 \approx 0,019 \text{ m} = 1,9 \text{ cm} \end{aligned}$$

3. Wrijvings-coëfficiënt:

$$C_f = \frac{0,664}{\sqrt{Re_L}} = \frac{0,664}{\sqrt{6,67 \times 10^6}} = \frac{0,664}{2582} \approx 0,000257$$

Dit is zeer klein, aangewezen dat laminaire grenslagen zeer efficiënt zijn.

$Re_L = 6,67 \times 10^6; \quad \delta = 1,9 \text{ cm}; \quad C_f = 0,000257$

## 5. Cylinder Drag en Vortex Shedding

**Gegeven:** Een ronde cylinder (diameter  $D = 0,1\text{ m}$ ) staat dwars op een windstroming ( $V = 15\text{ m/s}$ ). Lucht:  $\rho = 1,2\text{ kg/m}^3$ ,  $\nu = 1,5 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$ . Drag-coëfficiënt voor cylinder:  $C_D = 1,0$  (benaderend). Cylinder-lengte:  $L = 2\text{ m}$ .

**Gegeven:** (a) Het Reynoldsgetal; (b) De drag-kracht  $F_D$ ; (c) Strouhal-getal  $St = \frac{f_{shed}D}{V}$  met  $St \approx 0,21$  voor cylinders.

**Oplossing:**

1. Reynoldsgetal:

$$Re_D = \frac{VD}{\nu} = \frac{15 \times 0,1}{1,5 \times 10^{-5}} = \frac{1,5}{1,5 \times 10^{-5}} = 10^5 = 100.000$$

Dit is in het regimes met onderbroken (cylinder) stroming.

2. Drag-kracht:

$$\begin{aligned} F_D &= C_D \cdot \frac{\rho V^2}{2} \cdot A = 1,0 \times \frac{1,2 \times 15^2}{2} \times (0,1 \times 2) \\ &= \frac{1,2 \times 225}{2} \times 0,2 = 135 \times 0,2 = 27\text{ N} \end{aligned}$$

3. Vortex shedding frequentie:

$$f_{shed} = \frac{St \cdot V}{D} = \frac{0,21 \times 15}{0,1} = \frac{3,15}{0,1} = 31,5\text{ Hz}$$

Dit veroorzaakt periodieke trillingen van de cylinder.

$Re_D = 100.000; \quad F_D = 27\text{ N}; \quad f_{shed} = 31,5\text{ Hz}$

## 6. Impulskrachten in Leidingbocht

**Gegeven:** Water stroomt door  $90^\circ$  bocht in leiding. Ingang: diameter  $D = 0,30\text{ m}$ , snelheid  $V = 3\text{ m/s}$ . Massadebit  $\dot{m} = \rho Q = 1000 \times \frac{\pi(0,15)^2 \times 3}{1} = 212,1\text{ kg/s}$ .

**Gevraagd:** (a) Impulsverandering; (b) Reactiekraft op bocht; (c) Ankeringskracht nodig.

**Oplossing:**

1. Massadebit:  $\dot{m} = \rho V A = 1000 \times 3 \times \pi(0,15)^2 = 212,1\text{ kg/s}$
2. Voor  $90^\circ$  bocht: ingangsimpuls richting 1, uitgangsimpuls richting 2 (loodrecht)
3. Impulsvectoren:  $\vec{P}_{in} = \dot{m} V \hat{x} = 212,1 \times 3 \hat{x} = 636,3 \hat{x}\text{ N}$
4. Uitgangimpuls:  $\vec{P}_{uit} = \dot{m} V \hat{y} = 636,3 \hat{y}\text{ N}$
5. Impulsvector-verandering:  $\Delta \vec{P} = \vec{P}_{uit} - \vec{P}_{in} = 636,3 \hat{y} - 636,3 \hat{x}\text{ N}$
6. Magnitude impulskracht:  $F = \sqrt{636,3^2 + 636,3^2} = 900\text{ N}$  diagonaal ( $45^\circ$ )
7. Reactiekraft op buisstuk: Gelijk in grootte maar tegengesteld, dus  $900\text{ N}$  moet door ankering opvangen
8. Fysische betekenis: Sterke zijwaartse last veroorzaakt door snelheid wijziging. Bij hogere snelheden explosief.

$$F = 900 \text{ N; Ankeringskracht diagonaal } 45^\circ$$

Bij bochten in waterleiding ( $Q = 0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $D = 0,30 \text{ m}$ ) ondervindt de bocht significante reactiekrachten. Dit is cruciaal voor mechanische sterkte van leidingnetwerken, vooral in industriële systemen.

## Conclusie

Dit document heeft de kernprincipes van warmte en stroming samengevat. Van de fundamentele wetten van thermodynamica die energiebehoud dictieren, tot de complexe bewegingsvergelijkingen van fluïda. Het correct toepassen van deze principes vereist inzicht in de aannames (zoals incompressibiliteit of reversibiliteit) en nauwkeurigheid in berekeningen. Met de aangereikte theorie en oefeningen bent u toegerust om thermische en fluïdumtechnische systemen te analyseren.

## 14 Bijlagen

# PROPERTY TABLES AND CHARTS



|                    |   |      |
|--------------------|---|------|
| <b>TABLE A-1</b>   | Molar mass, gas constant, and critical-point properties | 970  |
| <b>TABLE A-2</b>   | Ideal-gas specific heats of various common gases        | 971  |
| <b>TABLE A-3</b>   | Properties of common liquids, solids, and foods         | 974  |
| <b>TABLE A-4</b>   | Saturated water—Temperature table                       | 976  |
| <b>TABLE A-5</b>   | Saturated water—Pressure table                          | 978  |
| <b>TABLE A-6</b>   | Superheated water                                       | 980  |
| <b>TABLE A-7</b>   | Compressed liquid water                                 | 984  |
| <b>TABLE A-8</b>   | Saturated ice–water vapor                               | 985  |
| <b>FIGURE A-9</b>  | <i>T-s</i> diagram for water                            | 986  |
| <b>FIGURE A-10</b> | Mollier diagram for water                               | 987  |
| <b>TABLE A-11</b>  | Saturated refrigerant-134a—Temperature table            | 988  |
| <b>TABLE A-12</b>  | Saturated refrigerant-134a—Pressure table               | 990  |
| <b>TABLE A-13</b>  | Superheated refrigerant-134a                            | 991  |
| <b>FIGURE A-14</b> | <i>P-h</i> diagram for refrigerant-134a                 | 993  |
| <b>TABLE A-15</b>  | Properties of saturated water                           | 994  |
| <b>TABLE A-16</b>  | Properties of saturated refrigerant-134a                | 995  |
| <b>TABLE A-17</b>  | Properties of saturated ammonia                         | 996  |
| <b>TABLE A-18</b>  | Properties of saturated propane                         | 997  |
| <b>TABLE A-19</b>  | Properties of liquids                                   | 998  |
| <b>TABLE A-20</b>  | Properties of liquid metals                             | 999  |
| <b>TABLE A-21</b>  | Ideal-gas properties of air                             | 1000 |
| <b>TABLE A-22</b>  | Properties of air at 1 atm pressure                     | 1002 |
| <b>TABLE A-23</b>  | Properties of gases at 1 atm pressure                   | 1003 |
| <b>TABLE A-24</b>  | Properties of solid metals                              | 1005 |
| <b>TABLE A-25</b>  | Properties of solid nonmetals                           | 1008 |
| <b>TABLE A-26</b>  | Emissivities of surfaces                                | 1009 |
| <b>FIGURE A-27</b> | The Moody chart   | 1011 |
| <b>FIGURE A-28</b> | Nelson–Obert generalized compressibility chart          | 1012 |

TABLE A-1

Molar mass, gas constant, and critical-point properties

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

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

**TABLE A-2**

Ideal-gas specific heats of various common gases

(a) At 300 K

| Gas             | Formula                        | Gas constant, $R$<br>kJ/kg·K | $c_p$<br>kJ/kg·K | $c_v$<br>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 <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0.1433                       | 1.7164           | 1.5734           | 1.091 |
| Carbon dioxide  | CO <sub>2</sub>                | 0.1889                       | 0.846            | 0.657            | 1.289 |
| Carbon monoxide | CO                             | 0.2968                       | 1.040            | 0.744            | 1.400 |
| Ethane          | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 0.2765                       | 1.7662           | 1.4897           | 1.186 |
| Ethylene        | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>  | 0.2964                       | 1.5482           | 1.2518           | 1.237 |
| Helium          | He                             | 2.0769                       | 5.1926           | 3.1156           | 1.667 |
| Hydrogen        | H <sub>2</sub>                 | 4.1240                       | 14.307           | 10.183           | 1.405 |
| Methane         | CH <sub>4</sub>                | 0.5182                       | 2.2537           | 1.7354           | 1.299 |
| Neon            | Ne                             | 0.4119                       | 1.0299           | 0.6179           | 1.667 |
| Nitrogen        | N <sub>2</sub>                 | 0.2968                       | 1.039            | 0.743            | 1.400 |
| Octane          | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> | 0.0729                       | 1.7113           | 1.6385           | 1.044 |
| Oxygen          | O <sub>2</sub>                 | 0.2598                       | 0.918            | 0.658            | 1.395 |
| Propane         | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 0.1885                       | 1.6794           | 1.4909           | 1.126 |
| Steam           | H <sub>2</sub> O               | 0.4615                       | 1.8723           | 1.4108           | 1.327 |

Note: The unit kJ/kg·K is equivalent to kJ/kg·°C.

Source of Data: B. G. Kyle, *Chemical and Process Thermodynamics*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000.

**TABLE A-2**

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

(b) At various temperatures

| Temperature,<br>K              | $c_p$<br>kJ/kg·K | $c_v$<br>kJ/kg·K | $k$   | $c_p$<br>kJ/kg·K | $c_v$<br>kJ/kg·K | $k$   | $c_p$<br>kJ/kg·K | $c_v$<br>kJ/kg·K | $k$   |
|--------------------------------|------------------|------------------|-------|------------------|------------------|-------|------------------|------------------|-------|
| <i>Air</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<sub>2</sub></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 |
| <i>Nitrogen, N<sub>2</sub></i> |                  |                  |       |                  |                  |       |                  |                  |       |
| <i>Oxygen, O<sub>2</sub></i>   |                  |                  |       |                  |                  |       |                  |                  |       |

Source of Data: 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-2**Ideal-gas specific heats of various common gases (*Concluded*)

(c) As a function of temperature

$$\bar{c}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

*(T in K,  $c_p$  in kJ/kmol·K)*

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

Source of Data: B. G. Kyle, *Chemical and Process Thermodynamics*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1984.

**TABLE A-3**

 Properties of common liquids, solids, and foods (*Continued*)

**(a) Liquids**

| Substance                           | <i>Boiling data at 1 atm</i> |  | <i>Freezing data</i> |  | <i>Liquid properties</i>   |                                    |                                      |
|-------------------------------------|------------------------------|--|----------------------|--|----------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
|                                     | Normal boiling point, °C     | Latent heat of vaporization $h_{fg}$ , kJ/kg | Freezing point, °C   | Latent heat of fusion $h_{if}$ , kJ/kg | Temperature, °C            | Density $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> | Specific heat $c_p$ , kJ/kg·K        |
| Ammonia                             | -33.3                        | 1357   | -77.7                | 322.4                                  | -33.3<br>-20<br>0<br>25    | 682<br>665<br>639<br>602           | 4.43<br>4.52<br>4.60<br>4.80         |
| Argon                               | -185.9                       | 161.6  | -189.3               | 28                                     | -185.6                     | 1394                               | 1.14                                 |
| Benzene                             | 80.2                         | 394  | 5.5                  | 126                                    | 20                         | 879                                | 1.72                                 |
| Brine (20% sodium chloride by mass) | 103.9                        | —  | -17.4                | —                                      | 20                         | 1150                               | 3.11                                 |
| <i>n</i> -Butane                    | -0.5                         | 385.2  | -138.5               | 80.3                                   | -0.5                       | 601                                | 2.31                                 |
| Carbon dioxide                      | -78.4*                       | 230.5 (at 0°C)                               | -56.6                | —                                      | 0                          | 298                                | 0.59                                 |
| Ethanol                             | 78.2                         | 838.3  | -114.2               | 109                                    | 25                         | 783                                | 2.46                                 |
| Ethyl alcohol                       | 78.6                         | 855  | -156                 | 108                                    | 20                         | 789                                | 2.84                                 |
| Ethylene glycol                     | 198.1                        | 800.1  | -10.8                | 181.1                                  | 20                         | 1109                               | 2.84                                 |
| Glycerine                           | 179.9                        | 974  | 18.9                 | 200.6                                  | 20                         | 1261                               | 2.32                                 |
| Helium                              | -268.9                       | 22.8   | —                    | —                                      | -268.9                     | 146.2                              | 22.8                                 |
| Hydrogen                            | -252.8                       | 445.7  | -259.2               | 59.5                                   | -252.8                     | 70.7                               | 10.0                                 |
| Isobutane                           | -11.7                        | 367.1  | -160                 | 105.7                                  | -11.7                      | 593.8                              | 2.28                                 |
| Kerosene                            | 204–293                      | 251  | -24.9                | —                                      | 20                         | 820                                | 2.00                                 |
| Mercury                             | 356.7                        | 294.7  | -38.9                | 11.4                                   | 25                         | 13,560                             | 0.139                                |
| Methane                             | -161.5                       | 510.4  | -182.2               | 58.4                                   | -161.5<br>-100             | 423<br>301                         | 3.49<br>5.79                         |
| Methanol                            | 64.5                         | 1100   | -97.7                | 99.2                                   | 25                         | 787                                | 2.55                                 |
| Nitrogen                            | -195.8                       | 198.6  | -210                 | 25.3                                   | -195.8<br>-160             | 809<br>596                         | 2.06<br>2.97                         |
| Octane                              | 124.8                        | 306.3  | -57.5                | 180.7                                  | 20                         | 703                                | 2.10                                 |
| Oil (light)                         |                              |  |                      |  | 25                         | 910                                | 1.80                                 |
| Oxygen                              | -183                         | 212.7  | -218.8               | 13.7                                   | -183                       | 1141                               | 1.71                                 |
| Petroleum                           | —                            | 230–384                                      |                      |  | 20                         | 640                                | 2.0                                  |
| Propane                             | -42.1                        | 427.8  | -187.7               | 80.0                                   | -42.1<br>0<br>50           | 581<br>529<br>449                  | 2.25<br>2.53<br>3.13                 |
| Refrigerant-134a                    | -26.1                        | 217.0  | -96.6                | —                                      | -50<br>-26.1<br>0<br>25    | 1443<br>1374<br>1295<br>1207       | 1.23<br>1.27<br>1.34<br>1.43         |
| Water                               | 100                          | 2257   | 0.0                  | 333.7                                  | 0<br>25<br>50<br>75<br>100 | 1000<br>997<br>988<br>975<br>958   | 4.22<br>4.18<br>4.18<br>4.19<br>4.22 |

\* Sublimation temperature. (At pressures below the triple-point pressure of 518 kPa, carbon dioxide exists as a solid or gas. Also, the freezing-point temperature of carbon dioxide is the triple-point temperature of -56.5°C.)

**TABLE A-3**Properties of common liquids, solids, and foods (*Concluded*)

(b) Solids (values are for room temperature, unless indicated otherwise)

| Substance                      | Density,<br>$\rho$ kg/m <sup>3</sup> | Specific heat,<br>$c_p$ kJ/kg·K | Substance                      | Density,<br>$\rho$ kg/m <sup>3</sup> | Specific heat,<br>$c_p$ kJ/kg·K |
|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Metals</b>                  |                                      |                                 |                                |                                      |                                 |
| Aluminum                       |                                      |                                 | Asphalt                        | 2110                                 | 0.920                           |
| 200 K                          |                                      | 0.797                           | Brick, common                  | 1922                                 | 0.79                            |
| 250 K                          |                                      | 0.859                           | Brick, fireclay (500°C)        | 2300                                 | 0.960                           |
| 300 K                          | 2,700                                | 0.902                           | Concrete                       | 2300                                 | 0.653                           |
| 350 K                          |                                      | 0.929                           | Clay                           | 1000                                 | 0.920                           |
| 400 K                          |                                      | 0.949                           | Diamond                        | 2420                                 | 0.616                           |
| 450 K                          |                                      | 0.973                           | Glass, window                  | 2700                                 | 0.800                           |
| 500 K                          |                                      | 0.997                           | Glass, pyrex                   | 2230                                 | 0.840                           |
| Bronze (76% Cu, 2% Zn, 2% Al)  | 8,280                                | 0.400                           | Graphite                       | 2500                                 | 0.711                           |
| Brass, yellow (65% Cu, 35% Zn) | 8,310                                | 0.400                           | Granite                        | 2700                                 | 1.017                           |
| Copper                         |                                      |                                 | Gypsum or plaster board        | 800                                  | 1.09                            |
| -173°C                         |                                      | 0.254                           | Ice                            |                                      |                                 |
| -100°C                         |                                      | 0.342                           | 200 K                          |                                      | 1.56                            |
| -50°C                          |                                      | 0.367                           | 220 K                          |                                      | 1.71                            |
| 0°C                            |                                      | 0.381                           | 240 K                          |                                      | 1.86                            |
| 27°C                           | 8,900                                | 0.386                           | 260 K                          |                                      | 2.01                            |
| 100°C                          |                                      | 0.393                           | 273 K                          | 921                                  | 2.11                            |
| 200°C                          |                                      | 0.403                           | Limestone                      | 1650                                 | 0.909                           |
| Iron                           | 7,840                                | 0.45                            | Marble                         | 2600                                 | 0.880                           |
| Lead                           | 11,310                               | 0.128                           | Plywood (Douglas Fir)          | 545                                  | 1.21                            |
| Magnesium                      | 1,730                                | 1.000                           | Rubber (soft)                  | 1100                                 | 1.840                           |
| Nickel                         | 8,890                                | 0.440                           | Rubber (hard)                  | 1150                                 | 2.009                           |
| Silver                         | 10,470                               | 0.235                           | Sand                           | 1520                                 | 0.800                           |
| Steel, mild                    | 7,830                                | 0.500                           | Stone                          | 1500                                 | 0.800                           |
| Tungsten                       | 19,400                               | 0.130                           | Woods, hard (maple, oak, etc.) | 721                                  | 1.26                            |
|                                |                                      |                                 | Woods, soft (fir, pine, etc.)  | 513                                  | 1.38                            |

(c) Foods

| Food          | Water content, % (mass) | Specific heat, kJ/kg·K |                |                | Latent heat of fusion, kJ/kg | Food           | Water content, % (mass) | Specific heat, kJ/kg·K |                |                | Latent heat of fusion, kJ/kg |
|---------------|-------------------------|------------------------|----------------|----------------|------------------------------|----------------|-------------------------|------------------------|----------------|----------------|------------------------------|
|               |                         | Freezing point, °C     | Above freezing | Below freezing |                              |                |                         | Freezing point, °C     | Above freezing | Below freezing |                              |
| Apples        | 84                      | -1.1                   | 3.65           | 1.90           | 281                          | Lettuce        | 95                      | -0.2                   | 4.02           | 2.04           | 317                          |
| Bananas       | 75                      | -0.8                   | 3.35           | 1.78           | 251                          | Milk, whole    | 88                      | -0.6                   | 3.79           | 1.95           | 294                          |
| Beef round    | 67                      | —                      | 3.08           | 1.68           | 224                          | Oranges        | 87                      | -0.8                   | 3.75           | 1.94           | 291                          |
| Broccoli      | 90                      | -0.6                   | 3.86           | 1.97           | 301                          | Potatoes       | 78                      | -0.6                   | 3.45           | 1.82           | 261                          |
| Butter        | 16                      | —                      | —              | 1.04           | 53                           | Salmon fish    | 64                      | -2.2                   | 2.98           | 1.65           | 214                          |
| Cheese, Swiss | 39                      | -10.0                  | 2.15           | 1.33           | 130                          | Shrimp         | 83                      | -2.2                   | 3.62           | 1.89           | 277                          |
| Cherries      | 80                      | -1.8                   | 3.52           | 1.85           | 267                          | Spinach        | 93                      | -0.3                   | 3.96           | 2.01           | 311                          |
| Chicken       | 74                      | -2.8                   | 3.32           | 1.77           | 247                          | Strawberries   | 90                      | -0.8                   | 3.86           | 1.97           | 301                          |
| Corn, sweet   | 74                      | -0.6                   | 3.32           | 1.77           | 247                          | Tomatoes, ripe | 94                      | -0.5                   | 3.99           | 2.02           | 314                          |
| Eggs, whole   | 74                      | -0.6                   | 3.32           | 1.77           | 247                          | Turkey         | 64                      | —                      | 2.98           | 1.65           | 214                          |
| Ice cream     | 63                      | -5.6                   | 2.95           | 1.63           | 210                          | Watermelon     | 93                      | -0.4                   | 3.96           | 2.01           | 311                          |

*Source of Data:* Values are obtained from various handbooks and other sources or are calculated. Water content and freezing-point data of foods are from ASHRAE, *Handbook of Fundamentals*, SI version. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993, Chap. 30, Table 1. Freezing point is the temperature at which freezing starts for fruits and vegetables, and the average freezing temperature for other foods.

**TABLE A-4**

Saturated water—Temperature table (*Continued*)

| Temp.,<br><i>T</i> °C | Sat.<br>press.,<br><i>P<sub>sat</sub></i> ,<br>kPa | Specific volume,<br>m <sup>3</sup> /kg  |  | Internal energy,<br>kJ/kg               |                                 |  | Enthalpy,<br>kJ/kg                      |                                 |  | Entropy,<br>kJ/kg·K                     |                                 |  |
|-----------------------|--|---|--|---|---------------------------------|--|---|---------------------------------|--|---|---------------------------------|--|
|                       |  | Sat.<br>liquid,<br><i>v<sub>f</sub></i> | Sat.<br>vapor,<br><i>v<sub>g</sub></i> | Sat.<br>liquid,<br><i>u<sub>f</sub></i> | Evap.,<br><i>u<sub>fg</sub></i> | Sat.<br>vapor,<br><i>u<sub>g</sub></i> | Sat.<br>liquid,<br><i>h<sub>f</sub></i> | Evap.,<br><i>h<sub>fg</sub></i> | Sat.<br>vapor,<br><i>h<sub>g</sub></i> | Sat.<br>liquid,<br><i>s<sub>f</sub></i> | Evap.,<br><i>s<sub>fg</sub></i> | Sat.<br>vapor,<br><i>s<sub>g</sub></i> |
| 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                                  | 1959.0                          | 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 (*Concluded*)

| Temp.,<br><i>T</i> °C | Sat.<br>press.,<br><i>P</i> <sub>sat</sub> kPa | Specific volume,<br>m <sup>3</sup> /kg   |   | Internal energy,<br>kJ/kg                |                                  |   | Enthalpy,<br>kJ/kg                       |                                  |   | Entropy,<br>kJ/kg·K                      |                                  |   |
|-----------------------|--|--|---|--|----------------------------------|---|--|----------------------------------|---|--|----------------------------------|---|
|                       |  | Sat.<br>liquid,<br><i>v</i> <sub>f</sub> | Sat.<br>vapor,<br><i>v</i> <sub>g</sub> | Sat.<br>liquid,<br><i>u</i> <sub>f</sub> | Evap.,<br><i>u</i> <sub>fg</sub> | Sat.<br>vapor,<br><i>u</i> <sub>g</sub> | Sat.<br>liquid,<br><i>h</i> <sub>f</sub> | Evap.,<br><i>h</i> <sub>fg</sub> | Sat.<br>vapor,<br><i>h</i> <sub>g</sub> | Sat.<br>liquid,<br><i>s</i> <sub>f</sub> | Evap.,<br><i>s</i> <sub>fg</sub> | Sat.<br>vapor,<br><i>s</i> <sub>g</sub> |
| 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                                  |

*Source of Data:* Tables A-4 through A-8 are generated using the Engineering Equation Solver (EES) software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. The routine used in calculations is the highly accurate Steam\_APWS, which incorporates the 1995 Formulation for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, issued by The International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS). This formulation replaces the 1984 formulation of Haar, Gallagher, and Kell (NBS/NRC Steam Tables, Hemisphere Publishing Co., 1984), which is also available in EES as the routine STEAM. The new formulation is based on the correlations of Saul and Wagner (*Journal of Physical Chemistry Reference Data*, 16, p. 893, 1987) with modifications to adjust to the International Temperature Scale of 1990. The modifications are described by Wagner and Pruss (*Journal of Physical Chemistry Reference Data*, 22, p. 783, 1993). The properties of ice are based on Hyland and Wexler, "Formulations for the Thermodynamic Properties of the Saturated Phases of H<sub>2</sub>O from 173.15 K to 473.15 K," *ASHRAE Trans.*, Part 2A, Paper 2793, 1983.

**TABLE A-5**

Saturated water—Pressure table (*Continued*)

| Press.,<br><i>P</i> kPa | Sat.<br><i>T<sub>sat</sub></i> , °C | Specific volume,<br>m <sup>3</sup> /kg  |  | Internal energy,<br>kJ/kg               |                                 |  | Enthalpy,<br>kJ/kg                      |                                 |  | Entropy,<br>kJ/kg·K                     |                                 |  |
|-------------------------|-------------------------------------|---|--|---|---------------------------------|--|---|---------------------------------|--|---|---------------------------------|--|
|                         |                                     | Sat.<br>liquid,<br><i>v<sub>f</sub></i> | Sat.<br>vapor,<br><i>v<sub>g</sub></i> | Sat.<br>liquid,<br><i>u<sub>f</sub></i> | Evap.,<br><i>u<sub>fg</sub></i> | Sat.<br>vapor,<br><i>u<sub>g</sub></i> | Sat.<br>liquid,<br><i>h<sub>f</sub></i> | Evap.,<br><i>h<sub>fg</sub></i> | Sat.<br>vapor,<br><i>h<sub>g</sub></i> | Sat.<br>liquid,<br><i>s<sub>f</sub></i> | Evap.,<br><i>s<sub>fg</sub></i> | Sat.<br>vapor,<br><i>s<sub>g</sub></i> |
| 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 (*Concluded*)

| Press.,<br><i>P</i> kPa | Sat.<br><i>T</i> <sub>sat</sub> , °C | Specific volume,<br>m <sup>3</sup> /kg   |   |                               | Internal energy,<br>kJ/kg                 |   |                               | Enthalpy,<br>kJ/kg                        |   |                               | Entropy,<br>kJ/kg·K                       |   |  |
|-------------------------|--------------------------------------|--|---|-------------------------------|---|---|-------------------------------|---|---|-------------------------------|---|---|--|
|                         |                                      | Sat.<br>liquid,<br><i>v</i> <sub>f</sub> | Sat.<br>vapor,<br><i>v</i> <sub>g</sub> | Sat.<br><i>u</i> <sub>f</sub> | Sat.<br>liquid,<br><i>u</i> <sub>fg</sub> | Sat.<br>vapor,<br><i>u</i> <sub>g</sub> | Sat.<br><i>h</i> <sub>f</sub> | Sat.<br>liquid,<br><i>h</i> <sub>fg</sub> | Sat.<br>vapor,<br><i>h</i> <sub>g</sub> | Sat.<br><i>s</i> <sub>f</sub> | Sat.<br>liquid,<br><i>s</i> <sub>fg</sub> | Sat.<br>vapor,<br><i>s</i> <sub>g</sub> |  |
| 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                                  |  |

TABLE A-6

Superheated water (*Continued*)

| T<br>°C                        | v<br>m <sup>3</sup> /kg | u<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K | v<br>m <sup>3</sup> /kg        | u<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K | v<br>m <sup>3</sup> /kg | u<br>kJ/kg                     | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K |
|--------------------------------|-------------------------|------------|------------|--------------|--------------------------------|------------|------------|--------------|-------------------------|--------------------------------|------------|--------------|
| <i>P</i> = 0.01 MPa (45.81°C)* |                         |            |            |              | <i>P</i> = 0.05 MPa (81.32°C)  |            |            |              |                         | <i>P</i> = 0.10 MPa (99.61°C)  |            |              |
| Sat. <sup>†</sup>              | 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      |
| <i>P</i> = 0.20 MPa (120.21°C) |                         |            |            |              | <i>P</i> = 0.30 MPa (133.52°C) |            |            |              |                         | <i>P</i> = 0.40 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       |
| <i>P</i> = 0.50 MPa (151.83°C) |                         |            |            |              | <i>P</i> = 0.60 MPa (158.83°C) |            |            |              |                         | <i>P</i> = 0.80 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       |

\*The temperature in parentheses is the saturation temperature at the specified pressure.

<sup>†</sup> Properties of saturated vapor at the specified pressure.

**TABLE A-6**Superheated water (*Concluded*)

| T<br>°C                        | v<br>m <sup>3</sup> /kg | u<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K | v<br>m <sup>3</sup> /kg        | u<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K | v<br>m <sup>3</sup> /kg | u<br>kJ/kg                     | h<br>kJ/kg | s<br>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       | 0.07063                        | 2644.7     | 2856.5     | 6.2893       | 0.05876                 | 2624.0                         | 2829.7     | 6.1764       |
| 250                            | 0.08705                 | 2663.3     | 2880.9     | 6.4107       | 0.08118                        | 2750.8     | 2994.3     | 6.5412       | 0.06845                 | 2738.8                         | 2978.4     | 6.4484       |
| 300                            | 0.09894                 | 2762.2     | 3009.6     | 6.6459       | 0.09056                        | 2844.4     | 3116.1     | 6.7450       | 0.07680                 | 2836.0                         | 3104.9     | 6.6601       |
| 350                            | 0.10979                 | 2852.5     | 3127.0     | 6.8424       | 0.09938                        | 2933.6     | 3231.7     | 6.9235       | 0.08456                 | 2927.2                         | 3223.2     | 6.8428       |
| 400                            | 0.12012                 | 2939.8     | 3240.1     | 7.0170       | 0.10789                        | 3021.2     | 3344.9     | 7.0856       | 0.09198                 | 3016.1                         | 3338.1     | 7.0074       |
| 450                            | 0.13015                 | 3026.2     | 3351.6     | 7.1768       | 0.11620                        | 3108.6     | 3457.2     | 7.2359       | 0.09919                 | 3104.5                         | 3451.7     | 7.1593       |
| 500                            | 0.13999                 | 3112.8     | 3462.8     | 7.3254       | 0.13245                        | 3285.5     | 3682.8     | 7.5103       | 0.11325                 | 3282.5                         | 3678.9     | 7.4357       |
| 600                            | 0.15931                 | 3288.5     | 3686.8     | 7.5979       | 0.14841                        | 3467.0     | 3912.2     | 7.7590       | 0.12702                 | 3464.7                         | 3909.3     | 7.6855       |
| 700                            | 0.17835                 | 3469.3     | 3915.2     | 7.8455       | 0.16420                        | 3654.3     | 4146.9     | 7.9885       | 0.14061                 | 3652.5                         | 4144.6     | 7.9156       |
| 800                            | 0.19722                 | 3656.2     | 4149.2     | 8.0744       | 0.17988                        | 3847.9     | 4387.5     | 8.2028       | 0.15410                 | 3846.4                         | 4385.7     | 8.1304       |
| 900                            | 0.21597                 | 3849.4     | 4389.3     | 8.2882       | 0.19549                        | 4047.7     | 4634.2     | 8.4045       | 0.16751                 | 4046.4                         | 4632.7     | 8.3324       |
| 1000                           | 0.23466                 | 4049.0     | 4635.6     | 8.4897       | 0.21105                        | 4253.6     | 4886.7     | 8.5955       | 0.18087                 | 4252.5                         | 4885.6     | 8.5236       |
| 1100                           | 0.25330                 | 4254.7     | 4887.9     | 8.6804       | 0.22658                        | 4465.3     | 5145.1     | 8.7771       | 0.19420                 | 4464.4                         | 5144.1     | 8.7053       |
| 1200                           | 0.27190                 | 4466.3     | 5146.0     | 8.8618       | 0.24207                        | 4682.6     | 5408.8     | 8.9502       | 0.20750                 | 4681.8                         | 5408.0     | 8.8786       |

**TABLE A-6**

Superheated water (*Continued*)

| T<br>°C                       | v<br>m <sup>3</sup> /kg | u<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K | v<br>m <sup>3</sup> /kg        | u<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K | v<br>m <sup>3</sup> /kg | u<br>kJ/kg                     | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K |
|-------------------------------|-------------------------|------------|------------|--------------|--------------------------------|------------|------------|--------------|-------------------------|--------------------------------|------------|--------------|
| <i>P</i> = 4.0 MPa (250.35°C) |                         |            |            |              | <i>P</i> = 4.5 MPa (257.44°C)  |            |            |              |                         | <i>P</i> = 5.0 MPa (263.94°C)  |            |              |
| Sat.                          | 0.04978                 | 2601.7     | 2800.8     | 6.0696       | 0.04406                        | 2599.7     | 2798.0     | 6.0198       | 0.03945                 | 2597.0                         | 2794.2     | 5.9737       |
| 275                           | 0.05461                 | 2668.9     | 2887.3     | 6.2312       | 0.04733                        | 2651.4     | 2864.4     | 6.1429       | 0.04144                 | 2632.3                         | 2839.5     | 6.0571       |
| 300                           | 0.05887                 | 2726.2     | 2961.7     | 6.3639       | 0.05138                        | 2713.0     | 2944.2     | 6.2854       | 0.04535                 | 2699.0                         | 2925.7     | 6.2111       |
| 350                           | 0.06647                 | 2827.4     | 3093.3     | 6.5843       | 0.05842                        | 2818.6     | 3081.5     | 6.5153       | 0.05197                 | 2809.5                         | 3069.3     | 6.4516       |
| 400                           | 0.07343                 | 2920.8     | 3214.5     | 6.7714       | 0.06477                        | 2914.2     | 3205.7     | 6.7071       | 0.05784                 | 2907.5                         | 3196.7     | 6.6483       |
| 450                           | 0.08004                 | 3011.0     | 3331.2     | 6.9386       | 0.07076                        | 3005.8     | 3324.2     | 6.8770       | 0.06332                 | 3000.6                         | 3317.2     | 6.8210       |
| 500                           | 0.08644                 | 3100.3     | 3446.0     | 7.0922       | 0.07652                        | 3096.0     | 3440.4     | 7.0323       | 0.06858                 | 3091.8                         | 3434.7     | 6.9781       |
| 600                           | 0.09886                 | 3279.4     | 3674.9     | 7.3706       | 0.08766                        | 3276.4     | 3670.9     | 7.3127       | 0.07870                 | 3273.3                         | 3666.9     | 7.2605       |
| 700                           | 0.11098                 | 3462.4     | 3906.3     | 7.6214       | 0.09850                        | 3460.0     | 3903.3     | 7.5647       | 0.08852                 | 3457.7                         | 3900.3     | 7.5136       |
| 800                           | 0.12292                 | 3650.6     | 4142.3     | 7.8523       | 0.10916                        | 3648.8     | 4140.0     | 7.7962       | 0.09816                 | 3646.9                         | 4137.7     | 7.7458       |
| 900                           | 0.13476                 | 3844.8     | 4383.9     | 8.0675       | 0.11972                        | 3843.3     | 4382.1     | 8.0118       | 0.10769                 | 3841.8                         | 4380.2     | 7.9619       |
| 1000                          | 0.14653                 | 4045.1     | 4631.2     | 8.2698       | 0.13020                        | 4043.9     | 4629.8     | 8.2144       | 0.11715                 | 4042.6                         | 4628.3     | 8.1648       |
| 1100                          | 0.15824                 | 4251.4     | 4884.4     | 8.4612       | 0.14064                        | 4250.4     | 4883.2     | 8.4060       | 0.12655                 | 4249.3                         | 4882.1     | 8.3566       |
| 1200                          | 0.16992                 | 4463.5     | 5143.2     | 8.6430       | 0.15103                        | 4462.6     | 5142.2     | 8.5880       | 0.13592                 | 4461.6                         | 5141.3     | 8.5388       |
| 1300                          | 0.18157                 | 4680.9     | 5407.2     | 8.8164       | 0.16140                        | 4680.1     | 5406.5     | 8.7616       | 0.14527                 | 4679.3                         | 5405.7     | 8.7124       |
| <i>P</i> = 6.0 MPa (275.59°C) |                         |            |            |              | <i>P</i> = 7.0 MPa (285.83°C)  |            |            |              |                         | <i>P</i> = 8.0 MPa (295.01°C)  |            |              |
| Sat.                          | 0.03245                 | 2589.9     | 2784.6     | 5.8902       | 0.027378                       | 2581.0     | 2772.6     | 5.8148       | 0.023525                | 2570.5                         | 2758.7     | 5.7450       |
| 300                           | 0.03619                 | 2668.4     | 2885.6     | 6.0703       | 0.029492                       | 2633.5     | 2839.9     | 5.9337       | 0.024279                | 2592.3                         | 2786.5     | 5.7937       |
| 350                           | 0.04225                 | 2790.4     | 3043.9     | 6.3357       | 0.035262                       | 2770.1     | 3016.9     | 6.2305       | 0.029975                | 2748.3                         | 2988.1     | 6.1321       |
| 400                           | 0.04742                 | 2893.7     | 3178.3     | 6.5432       | 0.039958                       | 2879.5     | 3159.2     | 6.4502       | 0.034344                | 2864.6                         | 3139.4     | 6.3658       |
| 450                           | 0.05217                 | 2989.9     | 3302.9     | 6.7219       | 0.044187                       | 2979.0     | 3288.3     | 6.6353       | 0.038194                | 2967.8                         | 3273.3     | 6.5579       |
| 500                           | 0.05667                 | 3083.1     | 3423.1     | 6.8826       | 0.048157                       | 3074.3     | 3411.4     | 6.8000       | 0.041767                | 3065.4                         | 3399.5     | 6.7266       |
| 550                           | 0.06102                 | 3175.2     | 3541.3     | 7.0308       | 0.051966                       | 3167.9     | 3531.6     | 6.9507       | 0.045172                | 3160.5                         | 3521.8     | 6.8800       |
| 600                           | 0.06527                 | 3267.2     | 3658.8     | 7.1693       | 0.055665                       | 3261.0     | 3650.6     | 7.0910       | 0.048463                | 3254.7                         | 3642.4     | 7.0221       |
| 700                           | 0.07355                 | 3453.0     | 3894.3     | 7.4247       | 0.062850                       | 3448.3     | 3888.3     | 7.3487       | 0.054829                | 3443.6                         | 3882.2     | 7.2822       |
| 800                           | 0.08165                 | 3643.2     | 4133.1     | 7.6582       | 0.069856                       | 3639.5     | 4128.5     | 7.5836       | 0.061011                | 3635.7                         | 4123.8     | 7.5185       |
| 900                           | 0.08964                 | 3838.8     | 4376.6     | 7.8751       | 0.076750                       | 3835.7     | 4373.0     | 7.8014       | 0.067082                | 3832.7                         | 4369.3     | 7.7372       |
| 1000                          | 0.09756                 | 4040.1     | 4625.4     | 8.0786       | 0.083571                       | 4037.5     | 4622.5     | 8.0055       | 0.073079                | 4035.0                         | 4619.6     | 7.9419       |
| 1100                          | 0.10543                 | 4247.1     | 4879.7     | 8.2709       | 0.090341                       | 4245.0     | 4877.4     | 8.1982       | 0.079025                | 4242.8                         | 4875.0     | 8.1350       |
| 1200                          | 0.11326                 | 4459.8     | 5139.4     | 8.4534       | 0.097075                       | 4457.9     | 5137.4     | 8.3810       | 0.084934                | 4456.1                         | 5135.5     | 8.3181       |
| 1300                          | 0.12107                 | 4677.7     | 5404.1     | 8.6273       | 0.103781                       | 4676.1     | 5402.6     | 8.5551       | 0.090817                | 4674.5                         | 5401.0     | 8.4925       |
| <i>P</i> = 9.0 MPa (303.35°C) |                         |            |            |              | <i>P</i> = 10.0 MPa (311.00°C) |            |            |              |                         | <i>P</i> = 12.5 MPa (327.81°C) |            |              |
| Sat.                          | 0.020489                | 2558.5     | 2742.9     | 5.6791       | 0.018028                       | 2545.2     | 2725.5     | 5.6159       | 0.013496                | 2505.6                         | 2674.3     | 5.4638       |
| 325                           | 0.023284                | 2647.6     | 2857.1     | 5.8738       | 0.019877                       | 2611.6     | 2810.3     | 5.7596       | 0.016138                | 2624.9                         | 2826.6     | 5.7130       |
| 350                           | 0.025816                | 2725.0     | 2957.3     | 6.0380       | 0.022440                       | 2699.6     | 2924.0     | 5.9460       | 0.020030                | 2789.6                         | 3040.0     | 6.0433       |
| 400                           | 0.029960                | 2849.2     | 3118.8     | 6.2876       | 0.026436                       | 2833.1     | 3097.5     | 6.2141       | 0.023019                | 2913.7                         | 3201.5     | 6.2749       |
| 450                           | 0.033524                | 2956.3     | 3258.0     | 6.4872       | 0.029782                       | 2944.5     | 3242.4     | 6.4219       | 0.025630                | 3023.2                         | 3343.6     | 6.4651       |
| 500                           | 0.036793                | 3056.3     | 3387.4     | 6.6603       | 0.032811                       | 3047.0     | 3375.1     | 6.5995       | 0.028033                | 3126.1                         | 3476.5     | 6.6317       |
| 550                           | 0.039885                | 3153.0     | 3512.0     | 6.8164       | 0.035655                       | 3145.4     | 3502.0     | 6.7585       | 0.030306                | 3225.8                         | 3604.6     | 6.7828       |
| 600                           | 0.042861                | 3248.4     | 3634.1     | 6.9605       | 0.038378                       | 3242.0     | 3625.8     | 6.9045       | 0.032491                | 3324.1                         | 3730.2     | 6.9227       |
| 650                           | 0.045755                | 3343.4     | 3755.2     | 7.0954       | 0.041018                       | 3338.0     | 3748.1     | 7.0408       | 0.034612                | 3422.0                         | 3854.6     | 7.0540       |
| 700                           | 0.048589                | 3438.8     | 3876.1     | 7.2229       | 0.043597                       | 3434.0     | 3870.0     | 7.1693       | 0.038724                | 3618.8                         | 4102.8     | 7.2967       |
| 800                           | 0.054132                | 3632.0     | 4119.2     | 7.4606       | 0.048629                       | 3628.2     | 4114.5     | 7.4085       | 0.042720                | 3818.9                         | 4352.9     | 7.5195       |
| 900                           | 0.059562                | 3829.6     | 4365.7     | 7.6802       | 0.053547                       | 3826.5     | 4362.0     | 7.6290       | 0.046641                | 4023.5                         | 4606.5     | 7.7269       |
| 1000                          | 0.064919                | 4032.4     | 4616.7     | 7.8855       | 0.058391                       | 4029.9     | 4613.8     | 7.8349       | 0.050510                | 4233.1                         | 4864.5     | 7.9220       |
| 1100                          | 0.070224                | 4240.7     | 4872.7     | 8.0791       | 0.063183                       | 4238.5     | 4870.3     | 8.0289       | 0.054342                | 4447.7                         | 5127.0     | 8.1065       |
| 1200                          | 0.075492                | 4454.2     | 5133.6     | 8.2625       | 0.067938                       | 4452.4     | 5131.7     | 8.2126       | 0.058147                | 4667.3                         | 5394.1     | 8.2819       |

**TABLE A-6**Superheated water (*Concluded*)

| T<br>°C                        | v<br>m <sup>3</sup> /kg | u<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K | v<br>m <sup>3</sup> /kg        | u<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K | v<br>m <sup>3</sup> /kg | u<br>kJ/kg                     | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K |
|--------------------------------|-------------------------|------------|------------|--------------|--------------------------------|------------|------------|--------------|-------------------------|--------------------------------|------------|--------------|
| <i>P</i> = 15.0 MPa (342.16°C) |                         |            |            |              | <i>P</i> = 17.5 MPa (354.67°C) |            |            |              |                         | <i>P</i> = 20.0 MPa (365.75°C) |            |              |
| Sat.                           | 0.010341                | 2455.7     | 2610.8     | 5.3108       | 0.007932                       | 2390.7     | 2529.5     | 5.1435       | 0.005862                | 2294.8                         | 2412.1     | 4.9310       |
| 350                            | 0.011481                | 2520.9     | 2693.1     | 5.4438       | 0.012463                       | 2684.3     | 2902.4     | 5.7211       | 0.009950                | 2617.9                         | 2816.9     | 5.5526       |
| 400                            | 0.015671                | 2740.6     | 2975.7     | 5.8819       | 0.015204                       | 2845.4     | 3111.4     | 6.0212       | 0.012721                | 2807.3                         | 3061.7     | 5.9043       |
| 450                            | 0.018477                | 2880.8     | 3157.9     | 6.1434       | 0.017385                       | 2972.4     | 3276.7     | 6.2424       | 0.014793                | 2945.3                         | 3241.2     | 6.1446       |
| 500                            | 0.020828                | 2998.4     | 3310.8     | 6.3480       | 0.019305                       | 3085.8     | 3423.6     | 6.4266       | 0.016571                | 3064.7                         | 3396.2     | 6.3390       |
| 550                            | 0.022945                | 3106.2     | 3450.4     | 6.5230       | 0.021073                       | 3192.5     | 3561.3     | 6.5890       | 0.018185                | 3175.3                         | 3539.0     | 6.5075       |
| 600                            | 0.024921                | 3209.3     | 3583.1     | 6.6796       | 0.022742                       | 3295.8     | 3693.8     | 6.7366       | 0.019695                | 3281.4                         | 3675.3     | 6.6593       |
| 650                            | 0.026804                | 3310.1     | 3712.1     | 6.8233       | 0.024342                       | 3397.5     | 3823.5     | 6.8735       | 0.021134                | 3385.1                         | 3807.8     | 6.7991       |
| 700                            | 0.028621                | 3409.8     | 3839.1     | 6.9573       | 0.027405                       | 3599.7     | 4079.3     | 7.1237       | 0.023870                | 3590.1                         | 4067.5     | 7.0531       |
| 800                            | 0.032121                | 3609.3     | 4091.1     | 7.2037       | 0.030348                       | 3803.5     | 4334.6     | 7.3511       | 0.026484                | 3795.7                         | 4325.4     | 7.2829       |
| 900                            | 0.035503                | 3811.2     | 4343.7     | 7.4288       | 0.033215                       | 4010.7     | 4592.0     | 7.5616       | 0.029020                | 4004.3                         | 4584.7     | 7.4950       |
| 1000                           | 0.038808                | 4017.1     | 4599.2     | 7.6378       | 0.036029                       | 4222.3     | 4852.8     | 7.7588       | 0.031504                | 4216.9                         | 4847.0     | 7.6933       |
| 1100                           | 0.042062                | 4227.7     | 4858.6     | 7.8339       | 0.038806                       | 4438.5     | 5117.6     | 7.9449       | 0.033952                | 4433.8                         | 5112.9     | 7.8802       |
| 1200                           | 0.045279                | 4443.1     | 5122.3     | 8.0192       | 0.041556                       | 4659.2     | 5386.5     | 8.1215       | 0.036371                | 4655.2                         | 5382.7     | 8.0574       |
| <i>P</i> = 25.0 MPa            |                         |            |            |              | <i>P</i> = 30.0 MPa            |            |            |              |                         | <i>P</i> = 35.0 MPa            |            |              |
| 375                            | 0.001978                | 1799.9     | 1849.4     | 4.0345       | 0.001792                       | 1738.1     | 1791.9     | 3.9313       | 0.001701                | 1702.8                         | 1762.4     | 3.8724       |
| 400                            | 0.006005                | 2428.5     | 2578.7     | 5.1400       | 0.002798                       | 2068.9     | 2152.8     | 4.4758       | 0.002105                | 1914.9                         | 1988.6     | 4.2144       |
| 425                            | 0.007886                | 2607.8     | 2805.0     | 5.4708       | 0.005299                       | 2452.9     | 2611.8     | 5.1473       | 0.003434                | 2253.3                         | 2373.5     | 4.7751       |
| 450                            | 0.009176                | 2721.2     | 2950.6     | 5.6759       | 0.006737                       | 2618.9     | 2821.0     | 5.4422       | 0.004957                | 2497.5                         | 2671.0     | 5.1946       |
| 500                            | 0.011143                | 2887.3     | 3165.9     | 5.9643       | 0.008691                       | 2824.0     | 3084.8     | 5.7956       | 0.006933                | 2755.3                         | 2997.9     | 5.6331       |
| 550                            | 0.012736                | 3020.8     | 3339.2     | 6.1816       | 0.010175                       | 2974.5     | 3279.7     | 6.0403       | 0.008348                | 2925.8                         | 3218.0     | 5.9093       |
| 600                            | 0.014140                | 3140.0     | 3493.5     | 6.3637       | 0.011445                       | 3103.4     | 3446.8     | 6.2373       | 0.009523                | 3065.6                         | 3399.0     | 6.1229       |
| 650                            | 0.015430                | 3251.9     | 3637.7     | 6.5243       | 0.012590                       | 3221.7     | 3599.4     | 6.4074       | 0.010565                | 3190.9                         | 3560.7     | 6.3030       |
| 700                            | 0.016643                | 3359.9     | 3776.0     | 6.6702       | 0.013654                       | 3334.3     | 3743.9     | 6.5599       | 0.011523                | 3308.3                         | 3711.6     | 6.4623       |
| 800                            | 0.018922                | 3570.7     | 4043.8     | 6.9322       | 0.015628                       | 3551.2     | 4020.0     | 6.8301       | 0.013278                | 3531.6                         | 3996.3     | 6.7409       |
| 900                            | 0.021075                | 3780.2     | 4307.1     | 7.1668       | 0.017473                       | 3764.6     | 4288.8     | 7.0695       | 0.014904                | 3749.0                         | 4270.6     | 6.9853       |
| 1000                           | 0.023150                | 3991.5     | 4570.2     | 7.3821       | 0.019240                       | 3978.6     | 4555.8     | 7.2880       | 0.016450                | 3965.8                         | 4541.5     | 7.2069       |
| 1100                           | 0.025172                | 4206.1     | 4835.4     | 7.5825       | 0.020954                       | 4195.2     | 4823.9     | 7.4906       | 0.017942                | 4184.4                         | 4812.4     | 7.4118       |
| 1200                           | 0.027157                | 4424.6     | 5103.5     | 7.7710       | 0.022630                       | 4415.3     | 5094.2     | 7.6807       | 0.019398                | 4406.1                         | 5085.0     | 7.6034       |
| 1300                           | 0.029115                | 4647.2     | 5375.1     | 7.9494       | 0.024279                       | 4639.2     | 5367.6     | 7.8602       | 0.020827                | 4631.2                         | 5360.2     | 7.7841       |
| <i>P</i> = 40.0 MPa            |                         |            |            |              | <i>P</i> = 50.0 MPa            |            |            |              |                         | <i>P</i> = 60.0 MPa            |            |              |
| 375                            | 0.001641                | 1677.0     | 1742.6     | 3.8290       | 0.001560                       | 1638.6     | 1716.6     | 3.7642       | 0.001503                | 1609.7                         | 1699.9     | 3.7149       |
| 400                            | 0.001911                | 1855.0     | 1931.4     | 4.1145       | 0.001731                       | 1787.8     | 1874.4     | 4.0029       | 0.001633                | 1745.2                         | 1843.2     | 3.9317       |
| 425                            | 0.002538                | 2097.5     | 2199.0     | 4.5044       | 0.002009                       | 1960.3     | 2060.7     | 4.2746       | 0.001816                | 1892.9                         | 2001.8     | 4.1630       |
| 450                            | 0.003692                | 2364.2     | 2511.8     | 4.9449       | 0.002487                       | 2160.3     | 2284.7     | 4.5896       | 0.002086                | 2055.1                         | 2180.2     | 4.4140       |
| 500                            | 0.005623                | 2681.6     | 2906.5     | 5.4744       | 0.003890                       | 2528.1     | 2722.6     | 5.1762       | 0.002952                | 2393.2                         | 2570.3     | 4.9356       |
| 550                            | 0.006985                | 2875.1     | 3154.4     | 5.7857       | 0.005118                       | 2769.5     | 3025.4     | 5.5563       | 0.003955                | 2664.6                         | 2901.9     | 5.3517       |
| 600                            | 0.008089                | 3026.8     | 3350.4     | 6.0170       | 0.006108                       | 2947.1     | 3252.6     | 5.8245       | 0.004833                | 2866.8                         | 3156.8     | 5.6527       |
| 650                            | 0.009053                | 3159.5     | 3521.6     | 6.2078       | 0.006957                       | 3095.6     | 3443.5     | 6.0373       | 0.005591                | 3031.3                         | 3366.8     | 5.8867       |
| 700                            | 0.009930                | 3282.0     | 3679.2     | 6.3740       | 0.007717                       | 3228.7     | 3614.6     | 6.2179       | 0.006265                | 3175.4                         | 3551.3     | 6.0814       |
| 800                            | 0.011521                | 3511.8     | 3972.6     | 6.6613       | 0.009073                       | 3472.2     | 3925.8     | 6.5225       | 0.007456                | 3432.6                         | 3880.0     | 6.4033       |
| 900                            | 0.012980                | 3733.3     | 4252.5     | 6.9107       | 0.010296                       | 3702.0     | 4216.8     | 6.7819       | 0.008519                | 3670.9                         | 4182.1     | 6.6725       |
| 1000                           | 0.014360                | 3952.9     | 4527.3     | 7.1355       | 0.011441                       | 3927.4     | 4499.4     | 7.0131       | 0.009504                | 3902.0                         | 4472.2     | 6.9099       |
| 1100                           | 0.015686                | 4173.7     | 4801.1     | 7.3425       | 0.012534                       | 4152.2     | 4778.9     | 7.2244       | 0.010439                | 4130.9                         | 4757.3     | 7.1255       |
| 1200                           | 0.016976                | 4396.9     | 5075.9     | 7.5357       | 0.013590                       | 4378.6     | 5058.1     | 7.4207       | 0.011339                | 4360.5                         | 5040.8     | 7.3248       |
| 1300                           | 0.018239                | 4623.3     | 5352.8     | 7.7175       | 0.014620                       | 4607.5     | 5338.5     | 7.6048       | 0.012213                | 4591.8                         | 5324.5     | 7.5111       |

**TABLE A-7**

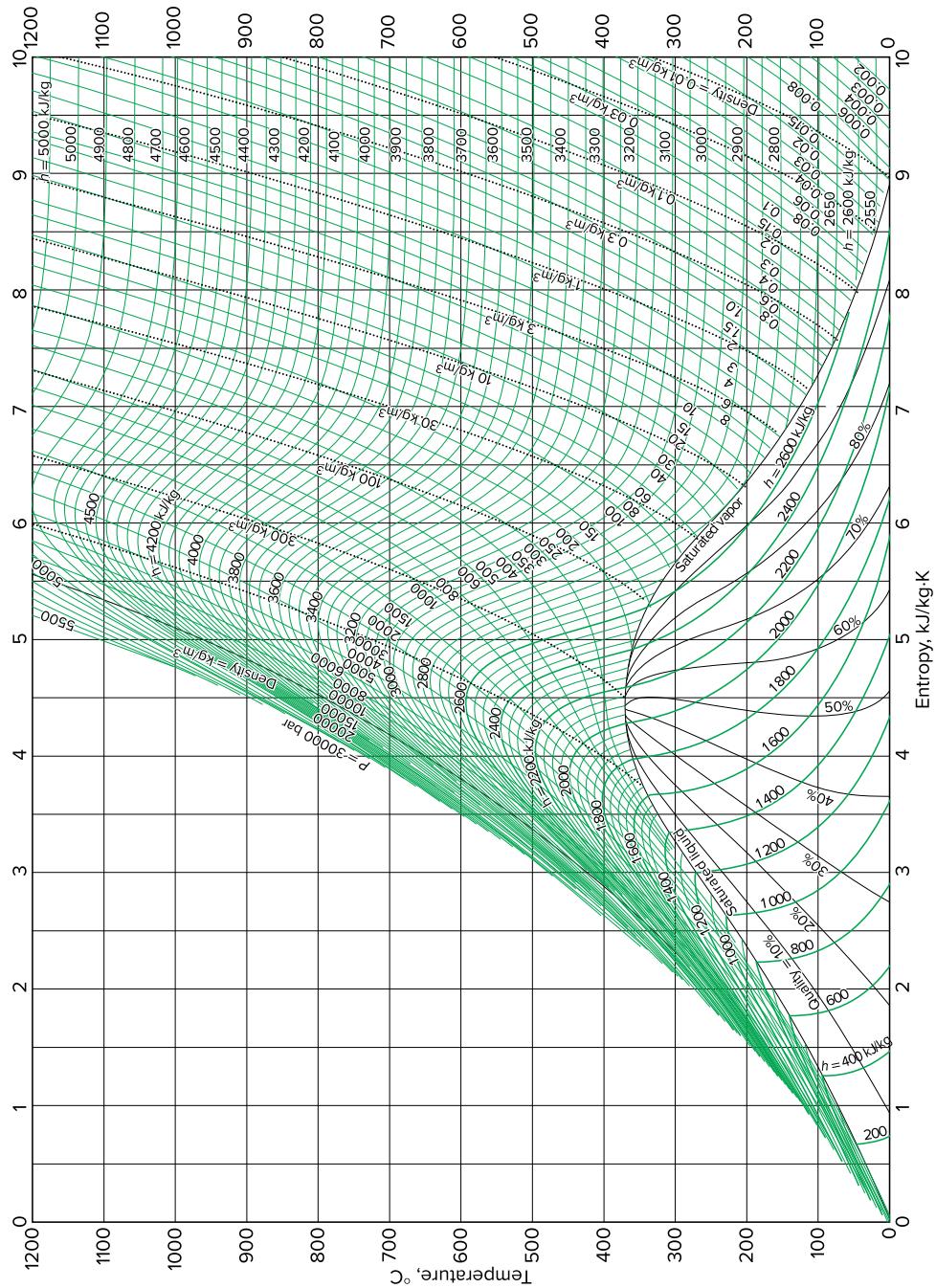
Compressed liquid water

| T<br>°C                      | v<br>m <sup>3</sup> /kg | u<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K | v<br>m <sup>3</sup> /kg      | u<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K | v<br>m <sup>3</sup> /kg | u<br>kJ/kg                   | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K |
|------------------------------|-------------------------|------------|------------|--------------|------------------------------|------------|------------|--------------|-------------------------|------------------------------|------------|--------------|
| <i>P = 5 MPa (263.94°C)</i>  |                         |            |            |              | <i>P = 10 MPa (311.00°C)</i> |            |            |              |                         | <i>P = 15 MPa (342.16°C)</i> |            |              |
| Sat.                         | 0.0012862               | 1148.1     | 1154.5     | 2.9207       | 0.0014522                    | 1393.3     | 1407.9     | 3.3603       | 0.0016572               | 1585.5                       | 1610.3     | 3.6848       |
| 0                            | 0.0009977               | 0.04       | 5.03       | 0.0001       | 0.0009952                    | 0.12       | 10.07      | 0.0003       | 0.0009928               | 0.18                         | 15.07      | 0.0004       |
| 20                           | 0.0009996               | 83.61      | 88.61      | 0.2954       | 0.0009973                    | 83.31      | 93.28      | 0.2943       | 0.0009951               | 83.01                        | 97.93      | 0.2932       |
| 40                           | 0.0010057               | 166.92     | 171.95     | 0.5705       | 0.0010035                    | 166.33     | 176.37     | 0.5685       | 0.0010013               | 165.75                       | 180.77     | 0.5666       |
| 60                           | 0.0010149               | 250.29     | 255.36     | 0.8287       | 0.0010127                    | 249.43     | 259.55     | 0.8260       | 0.0010105               | 248.58                       | 263.74     | 0.8234       |
| 80                           | 0.0010267               | 333.82     | 338.96     | 1.0723       | 0.0010244                    | 332.69     | 342.94     | 1.0691       | 0.0010221               | 331.59                       | 346.92     | 1.0659       |
| 100                          | 0.0010410               | 417.65     | 422.85     | 1.3034       | 0.0010385                    | 416.23     | 426.62     | 1.2996       | 0.0010361               | 414.85                       | 430.39     | 1.2958       |
| 120                          | 0.0010576               | 501.91     | 507.19     | 1.5236       | 0.0010549                    | 500.18     | 510.73     | 1.5191       | 0.0010522               | 498.50                       | 514.28     | 1.5148       |
| 140                          | 0.0010769               | 586.80     | 592.18     | 1.7344       | 0.0010738                    | 584.72     | 595.45     | 1.7293       | 0.0010708               | 582.69                       | 598.75     | 1.7243       |
| 160                          | 0.0010988               | 672.55     | 678.04     | 1.9374       | 0.0010954                    | 670.06     | 681.01     | 1.9316       | 0.0010920               | 667.63                       | 684.01     | 1.9259       |
| 180                          | 0.0011240               | 759.47     | 765.09     | 2.1338       | 0.0011200                    | 756.48     | 767.68     | 2.1271       | 0.0011160               | 753.58                       | 770.32     | 2.1206       |
| 200                          | 0.0011531               | 847.92     | 853.68     | 2.3251       | 0.0011482                    | 844.32     | 855.80     | 2.3174       | 0.0011435               | 840.84                       | 858.00     | 2.3100       |
| 220                          | 0.0011868               | 938.39     | 944.32     | 2.5127       | 0.0011809                    | 934.01     | 945.82     | 2.5037       | 0.0011752               | 929.81                       | 947.43     | 2.4951       |
| 240                          | 0.0012268               | 1031.6     | 1037.7     | 2.6983       | 0.0012192                    | 1026.2     | 1038.3     | 2.6876       | 0.0012121               | 1021.0                       | 1039.2     | 2.6774       |
| 260                          | 0.0012755               | 1128.5     | 1134.9     | 2.8841       | 0.0012653                    | 1121.6     | 1134.3     | 2.8710       | 0.0012560               | 1115.1                       | 1134.0     | 2.8586       |
| 280                          |                         |            |            |              | 0.0013226                    | 1221.8     | 1235.0     | 3.0565       | 0.0013096               | 1213.4                       | 1233.0     | 3.0410       |
| 300                          |                         |            |            |              | 0.0013980                    | 1329.4     | 1343.3     | 3.2488       | 0.0013783               | 1317.6                       | 1338.3     | 3.2279       |
| 320                          |                         |            |            |              |                              |            |            |              | 0.0014733               | 1431.9                       | 1454.0     | 3.4263       |
| 340                          |                         |            |            |              |                              |            |            |              | 0.0016311               | 1567.9                       | 1592.4     | 3.6555       |
| <i>P = 20 MPa (365.75°C)</i> |                         |            |            |              | <i>P = 30 MPa</i>            |            |            |              |                         | <i>P = 50 MPa</i>            |            |              |
| Sat.                         | 0.0020378               | 1785.8     | 1826.6     | 4.0146       |                              |            |            |              |                         |                              |            |              |
| 0                            | 0.0009904               | 0.23       | 20.03      | 0.0005       | 0.0009857                    | 0.29       | 29.86      | 0.0003       | 0.0009767               | 0.29                         | 49.13      | -0.0010      |
| 20                           | 0.0009929               | 82.71      | 102.57     | 0.2921       | 0.0009886                    | 82.11      | 111.77     | 0.2897       | 0.0009805               | 80.93                        | 129.95     | 0.2845       |
| 40                           | 0.0009992               | 165.17     | 185.16     | 0.5646       | 0.0009951                    | 164.05     | 193.90     | 0.5607       | 0.0009872               | 161.90                       | 211.25     | 0.5528       |
| 60                           | 0.0010084               | 247.75     | 267.92     | 0.8208       | 0.0010042                    | 246.14     | 276.26     | 0.8156       | 0.0009962               | 243.08                       | 292.88     | 0.8055       |
| 80                           | 0.0010199               | 330.50     | 350.90     | 1.0627       | 0.0010155                    | 328.40     | 358.86     | 1.0564       | 0.0010072               | 324.42                       | 374.78     | 1.0442       |
| 100                          | 0.0010337               | 413.50     | 434.17     | 1.2920       | 0.0010290                    | 410.87     | 441.74     | 1.2847       | 0.0010201               | 405.94                       | 456.94     | 1.2705       |
| 120                          | 0.0010496               | 496.85     | 517.84     | 1.5105       | 0.0010445                    | 493.66     | 525.00     | 1.5020       | 0.0010349               | 487.69                       | 539.43     | 1.4859       |
| 140                          | 0.0010679               | 580.71     | 602.07     | 1.7194       | 0.0010623                    | 576.90     | 608.76     | 1.7098       | 0.0010517               | 569.77                       | 622.36     | 1.6916       |
| 160                          | 0.0010886               | 665.28     | 687.05     | 1.9203       | 0.0010823                    | 660.74     | 693.21     | 1.9094       | 0.0010704               | 652.33                       | 705.85     | 1.8889       |
| 180                          | 0.0011122               | 750.78     | 773.02     | 2.1143       | 0.0011049                    | 745.40     | 778.55     | 2.1020       | 0.0010914               | 735.49                       | 790.06     | 2.0790       |
| 200                          | 0.0011390               | 837.49     | 860.27     | 2.3027       | 0.0011304                    | 831.11     | 865.02     | 2.2888       | 0.0011149               | 819.45                       | 875.19     | 2.2628       |
| 220                          | 0.0011697               | 925.77     | 949.16     | 2.4867       | 0.0011595                    | 918.15     | 952.93     | 2.4707       | 0.0011412               | 904.39                       | 961.45     | 2.4414       |
| 240                          | 0.0012053               | 1016.1     | 1040.2     | 2.6676       | 0.0011927                    | 1006.9     | 1042.7     | 2.6491       | 0.0011708               | 990.55                       | 1049.1     | 2.6156       |
| 260                          | 0.0012472               | 1109.0     | 1134.0     | 2.8469       | 0.0012314                    | 1097.8     | 1134.7     | 2.8250       | 0.0012044               | 1078.2                       | 1138.4     | 2.7864       |
| 280                          | 0.0012978               | 1205.6     | 1231.5     | 3.0265       | 0.0012770                    | 1191.5     | 1229.8     | 3.0001       | 0.0012430               | 1167.7                       | 1229.9     | 2.9547       |
| 300                          | 0.0013611               | 1307.2     | 1334.4     | 3.2091       | 0.0013322                    | 1288.9     | 1328.9     | 3.1761       | 0.0012879               | 1259.6                       | 1324.0     | 3.1218       |
| 320                          | 0.0014450               | 1416.6     | 1445.5     | 3.3996       | 0.0014014                    | 1391.7     | 1433.7     | 3.3558       | 0.0013409               | 1354.3                       | 1421.4     | 3.2888       |
| 340                          | 0.0015693               | 1540.2     | 1571.6     | 3.6086       | 0.0014932                    | 1502.4     | 1547.1     | 3.5438       | 0.0014049               | 1452.9                       | 1523.1     | 3.4575       |
| 360                          | 0.0018248               | 1703.6     | 1740.1     | 3.8787       | 0.0016276                    | 1626.8     | 1675.6     | 3.7499       | 0.0014848               | 1556.5                       | 1630.7     | 3.6301       |
| 380                          |                         |            |            |              | 0.0018729                    | 1782.0     | 1838.2     | 4.0026       | 0.0015884               | 1667.1                       | 1746.5     | 3.8102       |

**TABLE A-8**

Saturated ice–water vapor

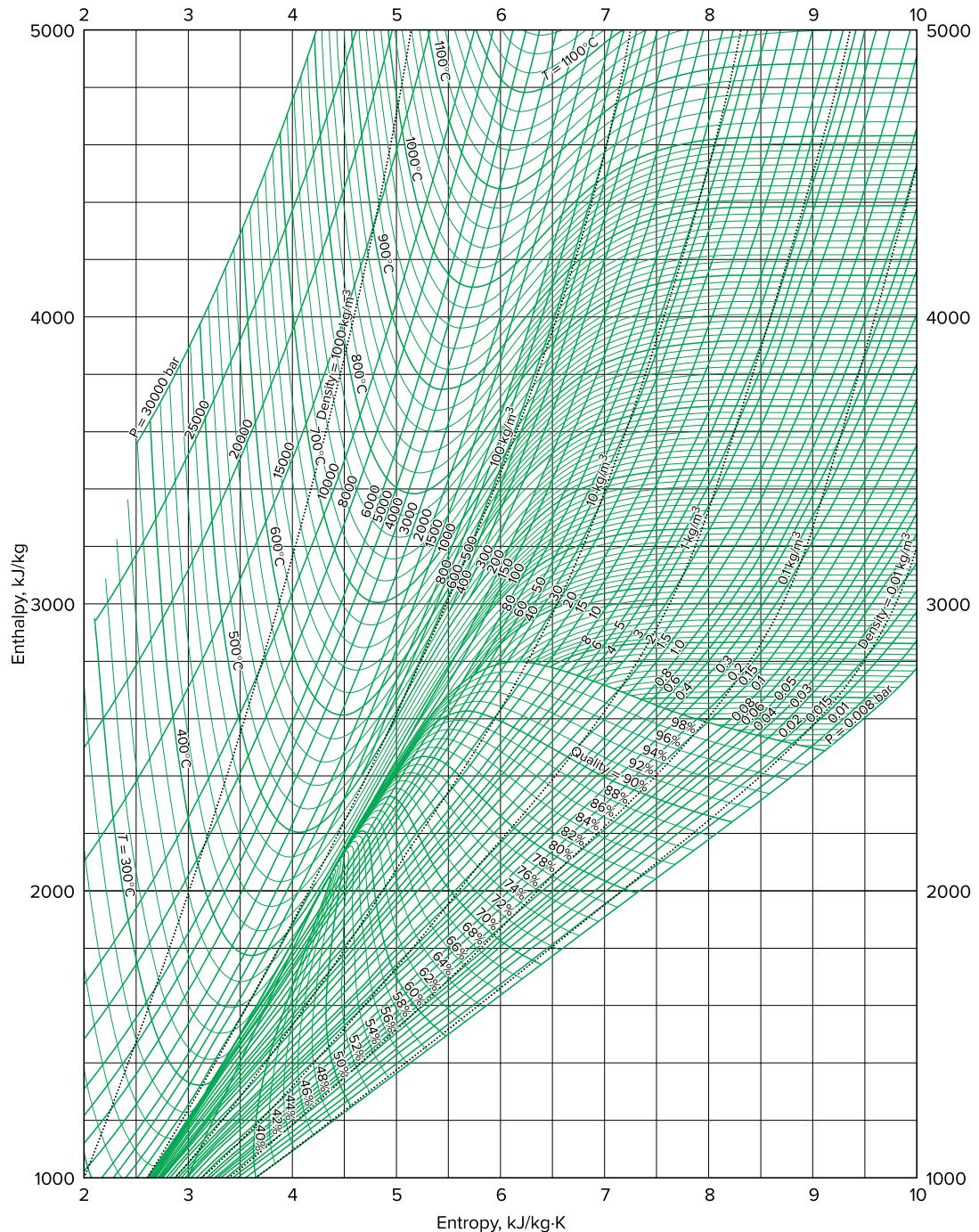
| Temp.,<br><i>T</i> °C | Sat.<br><i>P</i> <sub>sat</sub> kPa | Specific volume,<br>m <sup>3</sup> /kg       |  |  | Internal energy,<br>kJ/kg                       |  |  | Enthalpy,<br>kJ/kg                              |  |  | Entropy,<br>kJ/kg·K                             |  |  |
|-----------------------|-------------------------------------|--|--|--|---|--|--|---|--|--|---|--|--|
|                       |                                     | Sat.<br>ice,<br><i>v</i> <sub><i>i</i></sub> | Sat.<br>vapor,<br><i>v</i> <sub><i>g</i></sub> | Sat.<br>ice,<br><i>u</i> <sub><i>i</i></sub> | Sat.<br>Subl.,<br><i>u</i> <sub><i>ig</i></sub> | Sat.<br>vapor,<br><i>u</i> <sub><i>g</i></sub> | Sat.<br>ice,<br><i>h</i> <sub><i>i</i></sub> | Sat.<br>Subl.,<br><i>h</i> <sub><i>ig</i></sub> | Sat.<br>vapor,<br><i>h</i> <sub><i>g</i></sub> | Sat.<br>ice,<br><i>s</i> <sub><i>i</i></sub> | Sat.<br>Subl.,<br><i>s</i> <sub><i>ig</i></sub> | Sat.<br>vapor,<br><i>s</i> <sub><i>g</i></sub> |  |
| 0.01                  | 0.61169                             | 0.001091                                     | 205.99   | -333.40                                      | 2707.9  | 2374.5   | -333.40                                      | 2833.9  | 2500.5   | -1.2202                                      | 10.374  | 9.154  |  |
| 0                     | 0.61115                             | 0.001091                                     | 206.17   | -333.43                                      | 2707.9  | 2374.5   | -333.43                                      | 2833.9  | 2500.5   | -1.2204                                      | 10.375  | 9.154  |  |
| -2                    | 0.51772                             | 0.001091                                     | 241.62   | -337.63                                      | 2709.4  | 2371.8   | -337.63                                      | 2834.5  | 2496.8   | -1.2358                                      | 10.453  | 9.218  |  |
| -4                    | 0.43748                             | 0.001090                                     | 283.84   | -341.80                                      | 2710.8  | 2369.0   | -341.80                                      | 2835.0  | 2493.2   | -1.2513                                      | 10.533  | 9.282  |  |
| -6                    | 0.36873                             | 0.001090                                     | 334.27   | -345.94                                      | 2712.2  | 2366.2   | -345.93                                      | 2835.4  | 2489.5   | -1.2667                                      | 10.613  | 9.347  |  |
| -8                    | 0.30998                             | 0.001090                                     | 394.66   | -350.04                                      | 2713.5  | 2363.5   | -350.04                                      | 2835.8  | 2485.8   | -1.2821                                      | 10.695  | 9.413  |  |
| -10                   | 0.25990                             | 0.001089                                     | 467.17   | -354.12                                      | 2714.8  | 2360.7   | -354.12                                      | 2836.2  | 2482.1   | -1.2976                                      | 10.778  | 9.480  |  |
| -12                   | 0.21732                             | 0.001089                                     | 554.47   | -358.17                                      | 2716.1  | 2357.9   | -358.17                                      | 2836.6  | 2478.4   | -1.3130                                      | 10.862  | 9.549  |  |
| -14                   | 0.18121                             | 0.001088                                     | 659.88   | -362.18                                      | 2717.3  | 2355.2   | -362.18                                      | 2836.9  | 2474.7   | -1.3284                                      | 10.947  | 9.618  |  |
| -16                   | 0.15068                             | 0.001088                                     | 787.51   | -366.17                                      | 2718.6  | 2352.4   | -366.17                                      | 2837.2  | 2471.0   | -1.3439                                      | 11.033  | 9.689  |  |
| -18                   | 0.12492                             | 0.001088                                     | 942.51   | -370.13                                      | 2719.7  | 2349.6   | -370.13                                      | 2837.5  | 2467.3   | -1.3593                                      | 11.121  | 9.761  |  |
| -20                   | 0.10326                             | 0.001087                                     | 1131.3   | -374.06                                      | 2720.9  | 2346.8   | -374.06                                      | 2837.7  | 2463.6   | -1.3748                                      | 11.209  | 9.835  |  |
| -22                   | 0.08510                             | 0.001087                                     | 1362.0   | -377.95                                      | 2722.0  | 2344.1   | -377.95                                      | 2837.9  | 2459.9   | -1.3903                                      | 11.300  | 9.909  |  |
| -24                   | 0.06991                             | 0.001087                                     | 1644.7   | -381.82                                      | 2723.1  | 2341.3   | -381.82                                      | 2838.1  | 2456.2   | -1.4057                                      | 11.391  | 9.985  |  |
| -26                   | 0.05725                             | 0.001087                                     | 1992.2   | -385.66                                      | 2724.2  | 2338.5   | -385.66                                      | 2838.2  | 2452.5   | -1.4212                                      | 11.484  | 10.063   |  |
| -28                   | 0.04673                             | 0.001086                                     | 2421.0   | -389.47                                      | 2725.2  | 2335.7   | -389.47                                      | 2838.3  | 2448.8   | -1.4367                                      | 11.578  | 10.141   |  |
| -30                   | 0.03802                             | 0.001086                                     | 2951.7   | -393.25                                      | 2726.2  | 2332.9   | -393.25                                      | 2838.4  | 2445.1   | -1.4521                                      | 11.673  | 10.221   |  |
| -32                   | 0.03082                             | 0.001086                                     | 3610.9   | -397.00                                      | 2727.2  | 2330.2   | -397.00                                      | 2838.4  | 2441.4   | -1.4676                                      | 11.770  | 10.303   |  |
| -34                   | 0.02490                             | 0.001085                                     | 4432.4   | -400.72                                      | 2728.1  | 2327.4   | -400.72                                      | 2838.5  | 2437.7   | -1.4831                                      | 11.869  | 10.386   |  |
| -36                   | 0.02004                             | 0.001085                                     | 5460.1   | -404.40                                      | 2729.0  | 2324.6   | -404.40                                      | 2838.4  | 2434.0   | -1.4986                                      | 11.969  | 10.470   |  |
| -38                   | 0.01608                             | 0.001085                                     | 6750.5   | -408.07                                      | 2729.9  | 2321.8   | -408.07                                      | 2838.4  | 2430.3   | -1.5141                                      | 12.071  | 10.557   |  |
| -40                   | 0.01285                             | 0.001084                                     | 8376.7   | -411.70                                      | 2730.7  | 2319.0   | -411.70                                      | 2838.3  | 2426.6   | -1.5296                                      | 12.174  | 10.644   |  |



**FIGURE A-9**

T-s diagram for water.

Source of Data: From NBS/NRC Steam Tables/I by Lester Haar, John S. Gallagher, and George S. Kell. Routledge/Taylor & Francis Books, Inc., 1984.

**FIGURE A-10**

Mollier diagram for water.

Source of Data: From NBS/NRC Steam Tables/I by Lester Haar, John S. Gallagher, and George S. Kell. Routledge/Taylor &amp; Francis Books, Inc., 1984.

**TABLE A-11**

Saturated refrigerant-134a—Temperature table (*Continued*)

| Temp.,<br><i>T</i> °C | Sat.<br>press.,<br><i>P<sub>sat</sub></i> kPa | <i>Specific volume,</i><br><i>m</i> <sup>3</sup> / <i>kg</i> |  |   | <i>Internal energy,</i><br><i>kJ/kg</i> |  |   | <i>Enthalpy,</i><br><i>kJ/kg</i>        |  |   | <i>Entropy,</i><br><i>kJ/kg-K</i>       |  |  |
|-----------------------|---|--|--|---|---|--|---|---|--|---|---|--|--|
|                       |   | Sat.<br>liquid,<br><i>v<sub>f</sub></i>                      | Sat.<br>vapor,<br><i>v<sub>g</sub></i> | Sat.<br>liquid,<br><i>u<sub>f</sub></i> | Sat.<br>Evap.,<br><i>u<sub>fg</sub></i> | Sat.<br>vapor,<br><i>u<sub>g</sub></i> | Sat.<br>liquid,<br><i>h<sub>f</sub></i> | Sat.<br>Evap.,<br><i>h<sub>fg</sub></i> | Sat.<br>vapor,<br><i>h<sub>g</sub></i> | Sat.<br>liquid,<br><i>s<sub>f</sub></i> | Sat.<br>Evap.,<br><i>s<sub>fg</sub></i> | Sat.<br>vapor,<br><i>s<sub>g</sub></i> |  |
| -40                   | 51.25   | 0.0007053  | 0.36064                                | -0.036                                  | 207.42                                  | 207.38                                 | 0.00                                    | 225.86                                  | 225.86                                 | 0.00000                                 | 0.96869                                 | 0.96869                                |  |
| -38                   | 56.86   | 0.0007082  | 0.32718                                | 2.472                                   | 206.06                                  | 208.53                                 | 2.512                                   | 224.62                                  | 227.13                                 | 0.01071                                 | 0.95516                                 | 0.96588                                |  |
| -36                   | 62.95   | 0.0007111  | 0.29740                                | 4.987                                   | 204.69                                  | 209.68                                 | 5.032                                   | 223.37                                  | 228.40                                 | 0.02137                                 | 0.94182                                 | 0.96319                                |  |
| -34                   | 69.56   | 0.0007141  | 0.27082                                | 7.509                                   | 203.32                                  | 210.83                                 | 7.559                                   | 222.10                                  | 229.66                                 | 0.03196                                 | 0.92867                                 | 0.96063                                |  |
| -32                   | 76.71   | 0.0007171  | 0.24706                                | 10.04                                   | 201.94                                  | 211.97                                 | 10.09                                   | 220.83                                  | 230.93                                 | 0.04249                                 | 0.91569                                 | 0.95819                                |  |
| -30                   | 84.43   | 0.0007201  | 0.22577                                | 12.58                                   | 200.55                                  | 213.12                                 | 12.64                                   | 219.55                                  | 232.19                                 | 0.05297                                 | 0.90289                                 | 0.95586                                |  |
| -28                   | 92.76   | 0.0007232  | 0.20666                                | 15.12                                   | 199.15                                  | 214.27                                 | 15.19                                   | 218.25                                  | 233.44                                 | 0.06339                                 | 0.89024                                 | 0.95364                                |  |
| -26                   | 101.73  | 0.0007264  | 0.18947                                | 17.67                                   | 197.75                                  | 215.42                                 | 17.75                                   | 216.95                                  | 234.70                                 | 0.07376                                 | 0.87776                                 | 0.95152                                |  |
| -24                   | 111.37  | 0.0007296  | 0.17398                                | 20.23                                   | 196.34                                  | 216.57                                 | 20.31                                   | 215.63                                  | 235.94                                 | 0.08408                                 | 0.86542                                 | 0.94950                                |  |
| -22                   | 121.72  | 0.0007328  | 0.15999                                | 22.80                                   | 194.92                                  | 217.71                                 | 22.89                                   | 214.30                                  | 237.19                                 | 0.09435                                 | 0.85323                                 | 0.94758                                |  |
| -20                   | 132.82  | 0.0007361  | 0.14735                                | 25.37                                   | 193.49                                  | 218.86                                 | 25.47                                   | 212.96                                  | 238.43                                 | 0.10456                                 | 0.84119                                 | 0.94575                                |  |
| -18                   | 144.69  | 0.0007394  | 0.13589                                | 27.96                                   | 192.05                                  | 220.00                                 | 28.07                                   | 211.60                                  | 239.67                                 | 0.11473                                 | 0.82927                                 | 0.94401                                |  |
| -16                   | 157.38  | 0.0007428  | 0.12550                                | 30.55                                   | 190.60                                  | 221.15                                 | 30.67                                   | 210.23                                  | 240.90                                 | 0.12486                                 | 0.81749                                 | 0.94234                                |  |
| -14                   | 170.93  | 0.0007463  | 0.11605                                | 33.15                                   | 189.14                                  | 222.29                                 | 33.28                                   | 208.84                                  | 242.12                                 | 0.13493                                 | 0.80583                                 | 0.94076                                |  |
| -12                   | 185.37  | 0.0007498  | 0.10744                                | 35.76                                   | 187.66                                  | 223.42                                 | 35.90                                   | 207.44                                  | 243.34                                 | 0.14497                                 | 0.79429                                 | 0.93925                                |  |
| -10                   | 200.74  | 0.0007533  | 0.099600                               | 38.38                                   | 186.18                                  | 224.56                                 | 38.53                                   | 206.02                                  | 244.55                                 | 0.15496                                 | 0.78286                                 | 0.93782                                |  |
| -8                    | 217.08  | 0.0007570  | 0.092438                               | 41.01                                   | 184.69                                  | 225.69                                 | 41.17                                   | 204.59                                  | 245.76                                 | 0.16491                                 | 0.77154                                 | 0.93645                                |  |
| -6                    | 234.44  | 0.0007607  | 0.085888                               | 43.64                                   | 183.18                                  | 226.82                                 | 43.82                                   | 203.14                                  | 246.95                                 | 0.17482                                 | 0.76033                                 | 0.93514                                |  |
| -4                    | 252.85  | 0.0007644  | 0.079889                               | 46.29                                   | 181.66                                  | 227.94                                 | 46.48                                   | 201.66                                  | 248.14                                 | 0.18469                                 | 0.74921                                 | 0.93390                                |  |
| -2                    | 272.36  | 0.0007683  | 0.074388                               | 48.94                                   | 180.12                                  | 229.07                                 | 49.15                                   | 200.17                                  | 249.33                                 | 0.19452                                 | 0.73819                                 | 0.93271                                |  |
| 0                     | 293.01  | 0.0007722  | 0.069335                               | 51.61                                   | 178.58                                  | 230.18                                 | 51.83                                   | 198.67                                  | 250.50                                 | 0.20432                                 | 0.72726                                 | 0.93158                                |  |
| 2                     | 314.84  | 0.0007761  | 0.064690                               | 54.28                                   | 177.01                                  | 231.30                                 | 54.53                                   | 197.14                                  | 251.66                                 | 0.21408                                 | 0.71641                                 | 0.93050                                |  |
| 4                     | 337.90  | 0.0007802  | 0.060412                               | 56.97                                   | 175.44                                  | 232.40                                 | 57.23                                   | 195.58                                  | 252.82                                 | 0.22381                                 | 0.70565                                 | 0.92946                                |  |
| 6                     | 362.23  | 0.0007843  | 0.056469                               | 59.66                                   | 173.84                                  | 233.51                                 | 59.95                                   | 194.01                                  | 253.96                                 | 0.23351                                 | 0.69496                                 | 0.92847                                |  |
| 8                     | 387.88  | 0.0007886  | 0.052829                               | 62.37                                   | 172.23                                  | 234.60                                 | 62.68                                   | 192.42                                  | 255.09                                 | 0.24318                                 | 0.68435                                 | 0.92752                                |  |
| 10                    | 414.89  | 0.0007929  | 0.049466                               | 65.09                                   | 170.61                                  | 235.69                                 | 65.42                                   | 190.80                                  | 256.22                                 | 0.25282                                 | 0.67380                                 | 0.92661                                |  |
| 12                    | 443.31  | 0.0007973  | 0.046354                               | 67.82                                   | 168.96                                  | 236.78                                 | 68.17                                   | 189.16                                  | 257.33                                 | 0.26243                                 | 0.66331                                 | 0.92574                                |  |
| 14                    | 473.19  | 0.0008018  | 0.043471                               | 70.56                                   | 167.30                                  | 237.86                                 | 70.94                                   | 187.49                                  | 258.43                                 | 0.27201                                 | 0.65289                                 | 0.92490                                |  |
| 16                    | 504.58  | 0.0008064  | 0.040798                               | 73.31                                   | 165.62                                  | 238.93                                 | 73.72                                   | 185.80                                  | 259.51                                 | 0.28157                                 | 0.64252                                 | 0.92409                                |  |
| 18                    | 537.52  | 0.0008112  | 0.038317                               | 76.07                                   | 163.92                                  | 239.99                                 | 76.51                                   | 184.08                                  | 260.59                                 | 0.29111                                 | 0.63219                                 | 0.92330                                |  |
| 20                    | 572.07  | 0.0008160  | 0.036012                               | 78.85                                   | 162.19                                  | 241.04                                 | 79.32                                   | 182.33                                  | 261.64                                 | 0.30062                                 | 0.62192                                 | 0.92254                                |  |
| 22                    | 608.27  | 0.0008209  | 0.033867                               | 81.64                                   | 160.45                                  | 242.09                                 | 82.14                                   | 180.55                                  | 262.69                                 | 0.31012                                 | 0.61168                                 | 0.92180                                |  |
| 24                    | 646.18  | 0.0008260  | 0.031869                               | 84.44                                   | 158.68                                  | 243.13                                 | 84.98                                   | 178.74                                  | 263.72                                 | 0.31959                                 | 0.60148                                 | 0.92107                                |  |
| 26                    | 685.84  | 0.0008312  | 0.030008                               | 87.26                                   | 156.89                                  | 244.15                                 | 87.83                                   | 176.90                                  | 264.73                                 | 0.32905                                 | 0.59131                                 | 0.92036                                |  |
| 28                    | 727.31  | 0.0008366  | 0.028271                               | 90.09                                   | 155.08                                  | 245.17                                 | 90.70                                   | 175.03                                  | 265.73                                 | 0.33849                                 | 0.58117                                 | 0.91967                                |  |
| 30                    | 770.64  | 0.0008421  | 0.026648                               | 92.93                                   | 153.24                                  | 246.17                                 | 93.58                                   | 173.13                                  | 266.71                                 | 0.34792                                 | 0.57105                                 | 0.91897                                |  |
| 32                    | 815.89  | 0.0008477  | 0.025131                               | 95.79                                   | 151.37                                  | 247.17                                 | 96.49                                   | 171.19                                  | 267.67                                 | 0.35734                                 | 0.56095                                 | 0.91829                                |  |
| 34                    | 863.11  | 0.0008535  | 0.023712                               | 98.67                                   | 149.48                                  | 248.15                                 | 99.41                                   | 169.21                                  | 268.61                                 | 0.36675                                 | 0.55086                                 | 0.91760                                |  |
| 36                    | 912.35  | 0.0008595  | 0.022383                               | 101.56                                  | 147.55                                  | 249.11                                 | 102.34                                  | 167.19                                  | 269.53                                 | 0.37615                                 | 0.54077                                 | 0.91692                                |  |
| 38                    | 963.68  | 0.0008657  | 0.021137                               | 104.47                                  | 145.60                                  | 250.07                                 | 105.30                                  | 165.13                                  | 270.44                                 | 0.38554                                 | 0.53068                                 | 0.91622                                |  |
| 40                    | 1017.1  | 0.0008720  | 0.019968                               | 107.39                                  | 143.61                                  | 251.00                                 | 108.28                                  | 163.03                                  | 271.31                                 | 0.39493                                 | 0.52059                                 | 0.91552                                |  |
| 42                    | 1072.8  | 0.0008786  | 0.018870                               | 110.34                                  | 141.59                                  | 251.92                                 | 111.28                                  | 160.89                                  | 272.17                                 | 0.40432                                 | 0.51048                                 | 0.91480                                |  |
| 44                    | 1130.7  | 0.0008854  | 0.017837                               | 113.30                                  | 139.53                                  | 252.83                                 | 114.30                                  | 158.70                                  | 273.00                                 | 0.41371                                 | 0.50036                                 | 0.91407                                |  |

**TABLE A-11**Saturated refrigerant-134a—Temperature table (*Concluded*)

| Temp.,<br><i>T</i> °C | Sat.<br><i>P</i> <sub>sat</sub> kPa | Specific volume,<br>m <sup>3</sup> /kg   |   |  | Internal energy,<br>kJ/kg        |   |  | Enthalpy,<br>kJ/kg               |   |  | Entropy,<br>kJ/kg·K              |   |  |
|-----------------------|-------------------------------------|--|---|--|----------------------------------|---|--|----------------------------------|---|--|----------------------------------|---|--|
|                       |                                     | Sat.<br>liquid,<br><i>v</i> <sub>f</sub> | Sat.<br>vapor,<br><i>v</i> <sub>g</sub> | Sat.<br>liquid,<br><i>u</i> <sub>f</sub> | Evap.,<br><i>u</i> <sub>fg</sub> | Sat.<br>vapor,<br><i>u</i> <sub>g</sub> | Sat.<br>liquid,<br><i>h</i> <sub>f</sub> | Evap.,<br><i>h</i> <sub>fg</sub> | Sat.<br>vapor,<br><i>h</i> <sub>g</sub> | Sat.<br>liquid,<br><i>s</i> <sub>f</sub> | Evap.,<br><i>s</i> <sub>fg</sub> | Sat.<br>vapor,<br><i>s</i> <sub>g</sub> |  |
| 46                    | 1191.0                              | 0.0008924                                | 0.016866                                | 116.28                                   | 137.43                           | 253.71                                  | 117.34                                   | 156.46                           | 273.80                                  | 0.42311                                  | 0.49020                          | 0.91331                                 |  |
| 48                    | 1253.6                              | 0.0008997                                | 0.015951                                | 119.28                                   | 135.30                           | 254.58                                  | 120.41                                   | 154.17                           | 274.57                                  | 0.43251                                  | 0.48001                          | 0.91252                                 |  |
| 52                    | 1386.2                              | 0.0009151                                | 0.014276                                | 125.35                                   | 130.89                           | 256.24                                  | 126.62                                   | 149.41                           | 276.03                                  | 0.45136                                  | 0.45948                          | 0.91084                                 |  |
| 56                    | 1529.1                              | 0.0009317                                | 0.012782                                | 131.52                                   | 126.29                           | 257.81                                  | 132.94                                   | 144.41                           | 277.35                                  | 0.47028                                  | 0.43870                          | 0.90898                                 |  |
| 60                    | 1682.8                              | 0.0009498                                | 0.011434                                | 137.79                                   | 121.45                           | 259.23                                  | 139.38                                   | 139.09                           | 278.47                                  | 0.48930                                  | 0.41746                          | 0.90676                                 |  |
| 65                    | 1891.0                              | 0.0009751                                | 0.009959                                | 145.80                                   | 115.06                           | 260.86                                  | 147.64                                   | 132.05                           | 279.69                                  | 0.51330                                  | 0.39048                          | 0.90379                                 |  |
| 70                    | 2118.2                              | 0.0010037                                | 0.008650                                | 154.03                                   | 108.17                           | 262.20                                  | 156.15                                   | 124.37                           | 280.52                                  | 0.53763                                  | 0.36239                          | 0.90002                                 |  |
| 75                    | 2365.8                              | 0.0010373                                | 0.007486                                | 162.55                                   | 100.62                           | 263.17                                  | 165.01                                   | 115.87                           | 280.88                                  | 0.56252                                  | 0.33279                          | 0.89531                                 |  |
| 80                    | 2635.3                              | 0.0010774                                | 0.006439                                | 171.43                                   | 92.22                            | 263.66                                  | 174.27                                   | 106.35                           | 280.63                                  | 0.58812                                  | 0.30113                          | 0.88925                                 |  |
| 85                    | 2928.2                              | 0.0011273                                | 0.005484                                | 180.81                                   | 82.64                            | 263.45                                  | 184.11                                   | 95.39                            | 279.51                                  | 0.61487                                  | 0.26632                          | 0.88120                                 |  |
| 90                    | 3246.9                              | 0.0011938                                | 0.004591                                | 190.94                                   | 71.19                            | 262.13                                  | 194.82                                   | 82.22                            | 277.04                                  | 0.64354                                  | 0.22638                          | 0.86991                                 |  |
| 95                    | 3594.1                              | 0.0012945                                | 0.003713                                | 202.49                                   | 56.25                            | 258.73                                  | 207.14                                   | 64.94                            | 272.08                                  | 0.67605                                  | 0.17638                          | 0.85243                                 |  |
| 100                   | 3975.1                              | 0.0015269                                | 0.002657                                | 218.73                                   | 29.72                            | 248.46                                  | 224.80                                   | 34.22                            | 259.02                                  | 0.72224                                  | 0.09169                          | 0.81393                                 |  |

*Source of Data:* Tables A-11 through A-13 are generated using the Engineering Equation Solver (EES) software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. The routine used in calculations is the R134a, which is based on the fundamental equation of state developed by R. Tillner-Roth and H. D. Baehr, "An International Standard Formulation for the Thermodynamic Properties of 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC-134a) for temperatures from 170 K to 455 K and pressures up to 70 MPa," *Journal of Physical Chemistry Reference Data*, 23(5), 1994. The enthalpy and entropy values of saturated liquid are set to zero at -40°C (and -40°F).

**TABLE A-12**

Saturated refrigerant-134a—Pressure table

| Press.,<br><i>P</i><br>kPa | Sat.<br>temp.,<br><i>T<sub>sat</sub></i> °C | <i>Specific volume,</i><br><i>m<sup>3</sup>/kg</i> |  | <i>Internal energy,</i><br><i>kJ/kg</i> |                                 |  | <i>Enthalpy,</i><br><i>kJ/kg</i>        |                                 |  | <i>Entropy,</i><br><i>kJ/kg·K</i>       |                                 |  |
|----------------------------|---|--|--|---|---------------------------------|--|---|---------------------------------|--|---|---------------------------------|--|
|                            |   | Sat.<br>liquid,<br><i>v<sub>f</sub></i>            | Sat.<br>vapor,<br><i>v<sub>g</sub></i> | Sat.<br>liquid,<br><i>u<sub>f</sub></i> | Evap.,<br><i>u<sub>fg</sub></i> | Sat.<br>vapor,<br><i>u<sub>g</sub></i> | Sat.<br>liquid,<br><i>h<sub>f</sub></i> | Evap.,<br><i>h<sub>fg</sub></i> | Sat.<br>vapor,<br><i>h<sub>g</sub></i> | Sat.<br>liquid,<br><i>s<sub>f</sub></i> | Evap.,<br><i>s<sub>fg</sub></i> | Sat.<br>vapor,<br><i>s<sub>g</sub></i> |
| 60                         | -36.95                                      | 0.0007097  | 0.31108                                | 3.795                                   | 205.34                          | 209.13                                 | 3.837                                   | 223.96                          | 227.80                                 | 0.01633                                 | 0.94812                         | 0.96445                                |
| 70                         | -33.87                                      | 0.0007143  | 0.26921                                | 7.672                                   | 203.23                          | 210.90                                 | 7.722                                   | 222.02                          | 229.74                                 | 0.03264                                 | 0.92783                         | 0.96047                                |
| 80                         | -31.13                                      | 0.0007184  | 0.23749                                | 11.14                                   | 201.33                          | 212.48                                 | 11.20                                   | 220.27                          | 231.47                                 | 0.04707                                 | 0.91009                         | 0.95716                                |
| 90                         | -28.65                                      | 0.0007222  | 0.21261                                | 14.30                                   | 199.60                          | 213.90                                 | 14.36                                   | 218.67                          | 233.04                                 | 0.06003                                 | 0.89431                         | 0.95434                                |
| 100                        | -26.37                                      | 0.0007258  | 0.19255                                | 17.19                                   | 198.01                          | 215.21                                 | 17.27                                   | 217.19                          | 234.46                                 | 0.07182                                 | 0.88008                         | 0.95191                                |
| 120                        | -22.32                                      | 0.0007323  | 0.16216                                | 22.38                                   | 195.15                          | 217.53                                 | 22.47                                   | 214.52                          | 236.99                                 | 0.09269                                 | 0.85520                         | 0.94789                                |
| 140                        | -18.77                                      | 0.0007381  | 0.14020                                | 26.96                                   | 192.60                          | 219.56                                 | 27.06                                   | 212.13                          | 239.19                                 | 0.11080                                 | 0.83387                         | 0.94467                                |
| 160                        | -15.60                                      | 0.0007435  | 0.12355                                | 31.06                                   | 190.31                          | 221.37                                 | 31.18                                   | 209.96                          | 241.14                                 | 0.12686                                 | 0.81517                         | 0.94202                                |
| 180                        | -12.73                                      | 0.0007485  | 0.11049                                | 34.81                                   | 188.20                          | 223.01                                 | 34.94                                   | 207.95                          | 242.90                                 | 0.14131                                 | 0.79848                         | 0.93979                                |
| 200                        | -10.09                                      | 0.0007532  | 0.099951                               | 38.26                                   | 186.25                          | 224.51                                 | 38.41                                   | 206.09                          | 244.50                                 | 0.15449                                 | 0.78339                         | 0.93788                                |
| 240                        | -5.38                                       | 0.0007618  | 0.083983                               | 44.46                                   | 182.71                          | 227.17                                 | 44.64                                   | 202.68                          | 247.32                                 | 0.17786                                 | 0.75689                         | 0.93475                                |
| 280                        | -1.25                                       | 0.0007697  | 0.072434                               | 49.95                                   | 179.54                          | 229.49                                 | 50.16                                   | 199.61                          | 249.77                                 | 0.19822                                 | 0.73406                         | 0.93228                                |
| 320                        | 2.46  | 0.0007771  | 0.063681                               | 54.90                                   | 176.65                          | 231.55                                 | 55.14                                   | 196.78                          | 251.93                                 | 0.21631                                 | 0.71395                         | 0.93026                                |
| 360                        | 5.82  | 0.0007840  | 0.056809                               | 59.42                                   | 173.99                          | 233.41                                 | 59.70                                   | 194.15                          | 253.86                                 | 0.23265                                 | 0.69591                         | 0.92856                                |
| 400                        | 8.91  | 0.0007905  | 0.051266                               | 63.61                                   | 171.49                          | 235.10                                 | 63.92                                   | 191.68                          | 255.61                                 | 0.24757                                 | 0.67954                         | 0.92711                                |
| 450                        | 12.46                                       | 0.0007983  | 0.045677                               | 68.44                                   | 168.58                          | 237.03                                 | 68.80                                   | 188.78                          | 257.58                                 | 0.26462                                 | 0.66093                         | 0.92555                                |
| 500                        | 15.71                                       | 0.0008058  | 0.041168                               | 72.92                                   | 165.86                          | 238.77                                 | 73.32                                   | 186.04                          | 259.36                                 | 0.28021                                 | 0.64399                         | 0.92420                                |
| 550                        | 18.73                                       | 0.0008129  | 0.037452                               | 77.09                                   | 163.29                          | 240.38                                 | 77.54                                   | 183.44                          | 260.98                                 | 0.29460                                 | 0.62842                         | 0.92302                                |
| 600                        | 21.55                                       | 0.0008198  | 0.034335                               | 81.01                                   | 160.84                          | 241.86                                 | 81.50                                   | 180.95                          | 262.46                                 | 0.30799                                 | 0.61398                         | 0.92196                                |
| 650                        | 24.20                                       | 0.0008265  | 0.031680                               | 84.72                                   | 158.51                          | 243.23                                 | 85.26                                   | 178.56                          | 263.82                                 | 0.32052                                 | 0.60048                         | 0.92100                                |
| 700                        | 26.69                                       | 0.0008331  | 0.029392                               | 88.24                                   | 156.27                          | 244.51                                 | 88.82                                   | 176.26                          | 265.08                                 | 0.33232                                 | 0.58780                         | 0.92012                                |
| 750                        | 29.06                                       | 0.0008395  | 0.027398                               | 91.59                                   | 154.11                          | 245.70                                 | 92.22                                   | 174.03                          | 266.25                                 | 0.34348                                 | 0.57582                         | 0.91930                                |
| 800                        | 31.31                                       | 0.0008457  | 0.025645                               | 94.80                                   | 152.02                          | 246.82                                 | 95.48                                   | 171.86                          | 267.34                                 | 0.35408                                 | 0.56445                         | 0.91853                                |
| 850                        | 33.45                                       | 0.0008519  | 0.024091                               | 97.88                                   | 150.00                          | 247.88                                 | 98.61                                   | 169.75                          | 268.36                                 | 0.36417                                 | 0.55362                         | 0.91779                                |
| 900                        | 35.51                                       | 0.0008580  | 0.022703                               | 100.84                                  | 148.03                          | 248.88                                 | 101.62                                  | 167.69                          | 269.31                                 | 0.37383                                 | 0.54326                         | 0.91709                                |
| 950                        | 37.48                                       | 0.0008640  | 0.021456                               | 103.70                                  | 146.11                          | 249.82                                 | 104.52                                  | 165.68                          | 270.20                                 | 0.38307                                 | 0.53333                         | 0.91641                                |
| 1000                       | 39.37                                       | 0.0008700  | 0.020329                               | 106.47                                  | 144.24                          | 250.71                                 | 107.34                                  | 163.70                          | 271.04                                 | 0.39196                                 | 0.52378                         | 0.91574                                |
| 1200                       | 46.29                                       | 0.0008935  | 0.016728                               | 116.72                                  | 137.12                          | 253.84                                 | 117.79                                  | 156.12                          | 273.92                                 | 0.42449                                 | 0.48870                         | 0.91320                                |
| 1400                       | 52.40                                       | 0.0009167  | 0.014119                               | 125.96                                  | 130.44                          | 256.40                                 | 127.25                                  | 148.92                          | 276.17                                 | 0.45325                                 | 0.45742                         | 0.91067                                |
| 1600                       | 57.88                                       | 0.0009400  | 0.012134                               | 134.45                                  | 124.05                          | 258.50                                 | 135.96                                  | 141.96                          | 277.92                                 | 0.47921                                 | 0.42881                         | 0.90802                                |
| 1800                       | 62.87                                       | 0.0009639  | 0.010568                               | 142.36                                  | 117.85                          | 260.21                                 | 144.09                                  | 135.14                          | 279.23                                 | 0.50304                                 | 0.40213                         | 0.90517                                |
| 2000                       | 67.45                                       | 0.0009887  | 0.009297                               | 149.81                                  | 111.75                          | 261.56                                 | 151.78                                  | 128.36                          | 280.15                                 | 0.52519                                 | 0.37684                         | 0.90204                                |
| 2500                       | 77.54                                       | 0.0010567  | 0.006941                               | 167.02                                  | 96.47                           | 263.49                                 | 169.66                                  | 111.18                          | 280.84                                 | 0.57542                                 | 0.31701                         | 0.89243                                |
| 3000                       | 86.16                                       | 0.0011410  | 0.005272                               | 183.09                                  | 80.17                           | 263.26                                 | 186.51                                  | 92.57                           | 279.08                                 | 0.62133                                 | 0.25759                         | 0.87893                                |

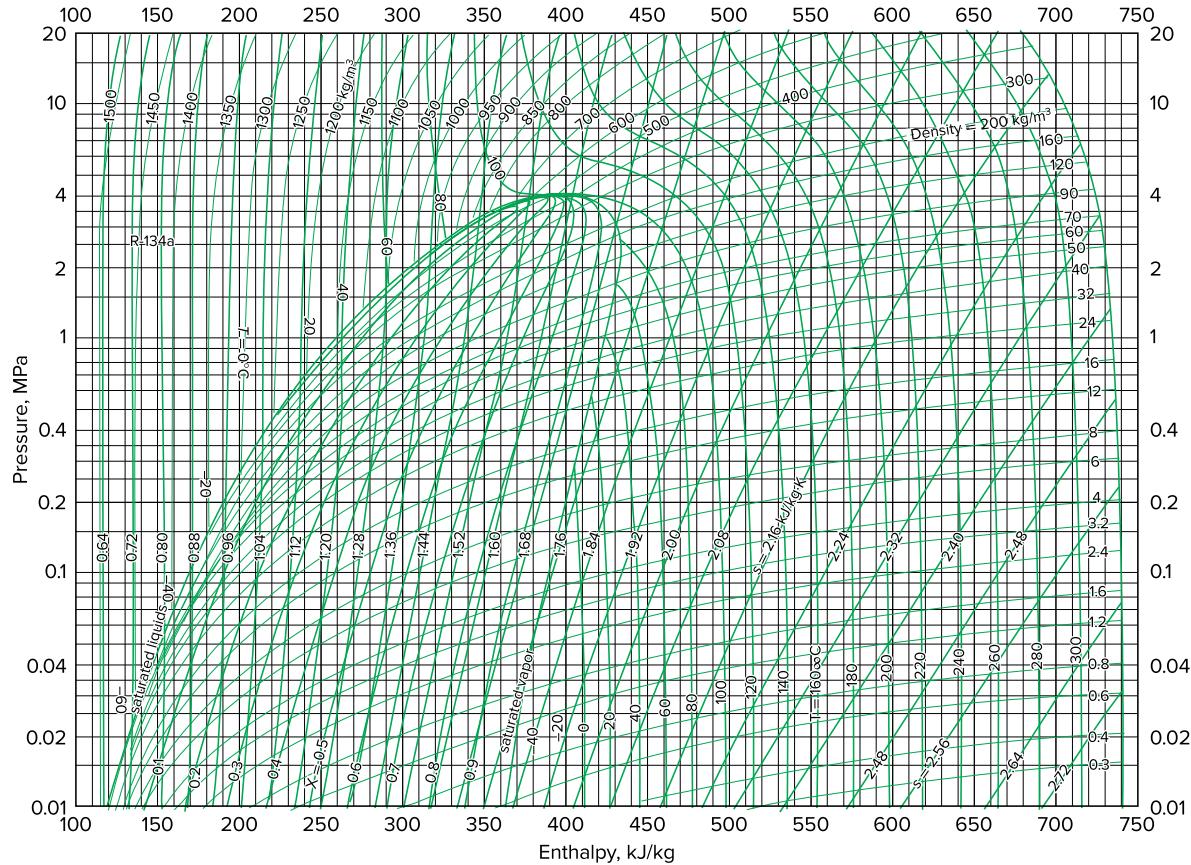
**TABLE A-13**Superheated refrigerant-134a (*Continued*)

| T<br>°C   | v<br>m <sup>3</sup> /kg | u<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K | v<br>m <sup>3</sup> /kg                                   | u<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K | v<br>m <sup>3</sup> /kg | u<br>kJ/kg  | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K |
|---|-------------------------|------------|------------|--------------|---|------------|------------|--------------|-------------------------|---|------------|--------------|
| <i>P</i> = 0.06 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = -36.95°C) |                         |            |            |              | <i>P</i> = 0.10 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = -26.37°C) |            |            |              |                         | <i>P</i> = 0.14 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = -18.77°C) |            |              |
| Sat.  | 0.31108                 | 209.13     | 227.80     | 0.9645       | 0.19255   | 215.21     | 234.46     | 0.9519       | 0.14020                 | 219.56  | 239.19     | 0.9447       |
| -20   | 0.33608                 | 220.62     | 240.78     | 1.0175       | 0.19841   | 219.68     | 239.52     | 0.9721       | 0.14605                 | 225.93  | 246.37     | 0.9724       |
| -10   | 0.35048                 | 227.57     | 248.60     | 1.0478       | 0.20743   | 226.77     | 247.51     | 1.0031       | 0.15263                 | 233.25  | 254.61     | 1.0032       |
| 0   | 0.36476                 | 234.67     | 256.56     | 1.0775       | 0.21630   | 233.97     | 255.60     | 1.0333       | 0.15908                 | 240.68  | 262.95     | 1.0331       |
| 10  | 0.37893                 | 241.94     | 264.68     | 1.1067       | 0.22506   | 241.32     | 263.82     | 1.0628       | 0.16544                 | 248.24  | 271.40     | 1.0625       |
| 20  | 0.39302                 | 249.37     | 272.95     | 1.1354       | 0.23373   | 248.81     | 272.18     | 1.0919       | 0.17172                 | 255.95  | 279.99     | 1.0913       |
| 30  | 0.40705                 | 256.97     | 281.39     | 1.1637       | 0.24233   | 256.46     | 280.69     | 1.1204       | 0.17794                 | 263.80  | 288.72     | 1.1196       |
| 40  | 0.42102                 | 264.73     | 289.99     | 1.1916       | 0.25088   | 264.27     | 289.36     | 1.1485       | 0.18412                 | 271.81  | 297.59     | 1.1475       |
| 50  | 0.43495                 | 272.66     | 298.75     | 1.2192       | 0.25937   | 272.24     | 298.17     | 1.1762       | 0.19025                 | 279.97  | 306.61     | 1.1750       |
| 60  | 0.44883                 | 280.75     | 307.68     | 1.2464       | 0.26783   | 280.36     | 307.15     | 1.2036       | 0.19635                 | 288.29  | 315.78     | 1.2021       |
| 70  | 0.46269                 | 289.01     | 316.77     | 1.2732       | 0.27626   | 288.65     | 316.28     | 1.2306       | 0.20242                 | 296.77  | 325.11     | 1.2289       |
| 80  | 0.47651                 | 297.43     | 326.02     | 1.2998       | 0.28465   | 297.10     | 325.57     | 1.2573       | 0.20847                 | 305.40  | 334.59     | 1.2554       |
| 90  | 0.49032                 | 306.02     | 335.43     | 1.3261       | 0.29303   | 305.71     | 335.01     | 1.2836       | 0.21449                 | 314.19  | 344.22     | 1.2815       |
| 100   | 0.50410                 | 314.76     | 345.01     | 1.3521       | 0.30138   | 314.48     | 344.61     | 1.3097       |                         |   |            |              |
| <i>P</i> = 0.18 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = -12.73°C) |                         |            |            |              | <i>P</i> = 0.20 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = -10.09°C) |            |            |              |                         | <i>P</i> = 0.24 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = -5.38°C)  |            |              |
| Sat.  | 0.11049                 | 223.01     | 242.90     | 0.9398       | 0.09995   | 224.51     | 244.50     | 0.9379       | 0.08398                 | 227.17  | 247.32     | 0.9348       |
| -10   | 0.11189                 | 225.04     | 245.18     | 0.9485       | 0.09991   | 224.57     | 244.56     | 0.9381       | 0.08617                 | 231.30  | 251.98     | 0.9520       |
| 0   | 0.11722                 | 232.49     | 253.59     | 0.9799       | 0.10481   | 232.11     | 253.07     | 0.9699       | 0.09026                 | 239.00  | 260.66     | 0.9832       |
| 10  | 0.12240                 | 240.02     | 262.05     | 1.0103       | 0.10955   | 239.69     | 261.60     | 1.0005       | 0.09423                 | 246.76  | 269.38     | 1.0134       |
| 20  | 0.12748                 | 247.66     | 270.60     | 1.0400       | 0.11418   | 247.36     | 270.20     | 1.0304       | 0.09812                 | 254.63  | 278.17     | 1.0429       |
| 30  | 0.13248                 | 255.43     | 279.27     | 1.0691       | 0.11874   | 255.16     | 278.91     | 1.0596       | 0.10193                 | 262.61  | 287.07     | 1.0718       |
| 40  | 0.13741                 | 263.33     | 288.07     | 1.0976       | 0.12322   | 263.09     | 287.74     | 1.0882       | 0.10570                 | 270.73  | 296.09     | 1.1002       |
| 50  | 0.14230                 | 271.38     | 297.00     | 1.1257       | 0.12766   | 271.16     | 296.70     | 1.1164       | 0.10942                 | 278.98  | 305.24     | 1.1281       |
| 60  | 0.14715                 | 279.58     | 306.07     | 1.1533       | 0.13206   | 279.38     | 305.79     | 1.1441       | 0.11310                 | 287.38  | 314.53     | 1.1555       |
| 70  | 0.15196                 | 287.93     | 315.28     | 1.1806       | 0.13641   | 287.75     | 315.03     | 1.1714       | 0.11675                 | 295.93  | 323.95     | 1.1826       |
| 80  | 0.15673                 | 296.43     | 324.65     | 1.2075       | 0.14074   | 296.27     | 324.41     | 1.1984       | 0.12038                 | 304.62  | 333.51     | 1.2093       |
| 90  | 0.16149                 | 305.09     | 334.16     | 1.2340       | 0.14504   | 304.93     | 333.94     | 1.2250       | 0.12398                 | 313.46  | 343.22     | 1.2356       |
| 100   | 0.16622                 | 313.90     | 343.82     | 1.2603       | 0.14933   | 313.75     | 343.62     | 1.2513       |                         |   |            |              |
| <i>P</i> = 0.28 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = -1.25°C)  |                         |            |            |              | <i>P</i> = 0.32 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 2.46°C)   |            |            |              |                         | <i>P</i> = 0.40 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 8.91°C)   |            |              |
| Sat.  | 0.07243                 | 229.49     | 249.77     | 0.9323       | 0.06368   | 231.55     | 251.93     | 0.9303       | 0.051266                | 235.10  | 255.61     | 0.9271       |
| 0   | 0.07282                 | 230.46     | 250.85     | 0.9362       | 0.06609   | 237.56     | 258.70     | 0.9545       | 0.051506                | 235.99  | 256.59     | 0.9306       |
| 10  | 0.07646                 | 238.29     | 259.70     | 0.9681       | 0.06925   | 245.51     | 267.67     | 0.9856       | 0.054213                | 244.19  | 265.88     | 0.9628       |
| 20  | 0.07997                 | 246.15     | 268.54     | 0.9987       | 0.07231   | 253.52     | 276.66     | 1.0158       | 0.056796                | 252.37  | 275.09     | 0.9937       |
| 30  | 0.08338                 | 254.08     | 277.42     | 1.0285       | 0.07530   | 261.62     | 285.72     | 1.0452       | 0.059292                | 260.60  | 284.32     | 1.0237       |
| 40  | 0.08672                 | 262.12     | 286.40     | 1.0577       | 0.07823   | 269.83     | 294.87     | 1.0739       | 0.061724                | 268.92  | 293.61     | 1.0529       |
| 50  | 0.09000                 | 270.28     | 295.48     | 1.0862       | 0.08111   | 278.17     | 304.12     | 1.1022       | 0.064104                | 277.34  | 302.98     | 1.0814       |
| 60  | 0.09324                 | 278.58     | 304.69     | 1.1143       | 0.08395   | 286.64     | 313.50     | 1.1299       | 0.066443                | 285.88  | 312.45     | 1.1095       |
| 70  | 0.09644                 | 287.01     | 314.01     | 1.1419       | 0.08675   | 295.24     | 323.00     | 1.1572       | 0.068747                | 294.54  | 322.04     | 1.1370       |
| 80  | 0.09961                 | 295.59     | 323.48     | 1.1690       | 0.08953   | 303.99     | 332.64     | 1.1841       | 0.071023                | 303.34  | 331.75     | 1.1641       |
| 90  | 0.10275                 | 304.30     | 333.07     | 1.1958       | 0.09229   | 312.87     | 342.41     | 1.2106       | 0.073274                | 312.28  | 341.59     | 1.1908       |
| 100   | 0.10587                 | 313.17     | 342.81     | 1.2223       | 0.09503   | 321.91     | 352.31     | 1.2368       | 0.075504                | 321.35  | 351.55     | 1.2172       |
| 110   | 0.10897                 | 322.18     | 352.69     | 1.2484       | 0.09775   | 331.08     | 362.36     | 1.2627       | 0.077717                | 330.56  | 361.65     | 1.2432       |
| 120   | 0.11205                 | 331.34     | 362.72     | 1.2742       | 0.10045   | 340.41     | 372.55     | 1.2883       | 0.079913                | 339.92  | 371.89     | 1.2689       |
| 130   | 0.11512                 | 340.65     | 372.88     | 1.2998       | 0.10314   | 349.88     | 382.89     | 1.3136       | 0.082096                | 349.42  | 382.26     | 1.2943       |

TABLE A-13

Superheated refrigerant-134a (*Concluded*)

| T<br>°C  | v<br>m <sup>3</sup> /kg | u<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K | v<br>m <sup>3</sup> /kg                                  | u<br>kJ/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K | v<br>m <sup>3</sup> /kg | u<br>kJ/kg   | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg·K |
|--|-------------------------|------------|------------|--------------|--|------------|------------|--------------|-------------------------|--|------------|--------------|
| <i>P</i> = 0.50 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 15.71°C) |                         |            |            |              | <i>P</i> = 0.60 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 21.55°C) |            |            |              |                         | <i>P</i> = 0.70 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 26.69°C) |            |              |
| Sat.   | 0.041168                | 238.77     | 259.36     | 0.9242       | 0.034335   | 241.86     | 262.46     | 0.9220       | 0.029392                | 244.51   | 265.08     | 0.9201       |
| 20   | 0.042115                | 242.42     | 263.48     | 0.9384       | 0.035984   | 249.24     | 270.83     | 0.9500       | 0.029966                | 247.49   | 268.47     | 0.9314       |
| 30   | 0.044338                | 250.86     | 273.03     | 0.9704       | 0.037865   | 257.88     | 280.60     | 0.9817       | 0.031696                | 256.41   | 278.59     | 0.9642       |
| 40   | 0.046456                | 259.27     | 282.50     | 1.0011       | 0.039659   | 266.50     | 290.30     | 1.0122       | 0.033322                | 265.22   | 288.54     | 0.9955       |
| 50   | 0.048499                | 267.73     | 291.98     | 1.0309       | 0.041389   | 275.17     | 300.00     | 1.0417       | 0.034875                | 274.03   | 298.44     | 1.0257       |
| 60   | 0.050485                | 276.27     | 301.51     | 1.0600       | 0.043069   | 283.91     | 309.75     | 1.0706       | 0.036373                | 282.88   | 308.34     | 1.0550       |
| 70   | 0.052427                | 284.91     | 311.12     | 1.0884       | 0.044710   | 292.74     | 319.57     | 1.0988       | 0.037829                | 291.81   | 318.29     | 1.0835       |
| 80   | 0.054331                | 293.65     | 320.82     | 1.1163       | 0.046318   | 301.69     | 329.48     | 1.1265       | 0.039250                | 300.84   | 328.31     | 1.1115       |
| 90   | 0.056205                | 302.52     | 330.63     | 1.1436       | 0.047900   | 310.75     | 339.49     | 1.1536       | 0.040642                | 309.96   | 338.41     | 1.1389       |
| 100  | 0.058053                | 311.52     | 340.55     | 1.1706       | 0.049458   | 319.93     | 349.61     | 1.1804       | 0.042010                | 319.21   | 348.61     | 1.1659       |
| 110  | 0.059880                | 320.65     | 350.59     | 1.1971       | 0.050997   | 329.24     | 359.84     | 1.2068       | 0.043358                | 328.57   | 358.92     | 1.1925       |
| 120  | 0.061687                | 329.91     | 360.75     | 1.2233       | 0.052519   | 338.69     | 370.20     | 1.2328       | 0.044688                | 338.06   | 369.34     | 1.2186       |
| 130  | 0.063479                | 339.31     | 371.05     | 1.2492       | 0.054027   | 348.26     | 380.68     | 1.2585       | 0.046004                | 347.67   | 379.88     | 1.2445       |
| 140  | 0.065256                | 348.85     | 381.47     | 1.2747       | 0.055522   | 357.98     | 391.29     | 1.2838       | 0.047306                | 357.42   | 390.54     | 1.2700       |
| 150  | 0.067021                | 358.52     | 392.04     | 1.3000       | 0.057006   | 367.83     | 402.03     | 1.3089       | 0.048597                | 367.31   | 401.32     | 1.2952       |
| <i>P</i> = 0.80 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 31.31°C) |                         |            |            |              | <i>P</i> = 0.90 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 35.51°C) |            |            |              |                         | <i>P</i> = 1.00 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 39.37°C) |            |              |
| Sat.   | 0.025645                | 246.82     | 267.34     | 0.9185       | 0.022686   | 248.82     | 269.25     | 0.9169       | 0.020319                | 250.71   | 271.04     | 0.9157       |
| 40   | 0.027035                | 254.84     | 276.46     | 0.9481       | 0.023375   | 253.15     | 274.19     | 0.9328       | 0.020406                | 251.32   | 271.73     | 0.9180       |
| 50   | 0.028547                | 263.87     | 286.71     | 0.9803       | 0.024809   | 262.46     | 284.79     | 0.9661       | 0.021796                | 260.96   | 282.76     | 0.9526       |
| 60   | 0.029973                | 272.85     | 296.82     | 1.0111       | 0.026146   | 271.62     | 295.15     | 0.9977       | 0.023068                | 270.33   | 293.40     | 0.9851       |
| 70   | 0.031340                | 281.83     | 306.90     | 1.0409       | 0.027413   | 280.74     | 305.41     | 1.0280       | 0.024261                | 279.61   | 303.87     | 1.0160       |
| 80   | 0.032659                | 290.86     | 316.99     | 1.0699       | 0.028630   | 289.88     | 315.65     | 1.0574       | 0.025398                | 288.87   | 314.27     | 1.0459       |
| 90   | 0.033941                | 299.97     | 327.12     | 1.0982       | 0.029806   | 299.08     | 325.90     | 1.0861       | 0.026492                | 298.17   | 324.66     | 1.0749       |
| 100  | 0.035193                | 309.17     | 337.32     | 1.1259       | 0.030951   | 308.35     | 336.21     | 1.1141       | 0.027552                | 307.52   | 335.08     | 1.1032       |
| 110  | 0.036420                | 318.47     | 347.61     | 1.1531       | 0.032068   | 317.72     | 346.58     | 1.1415       | 0.028584                | 316.96   | 345.54     | 1.1309       |
| 120  | 0.037625                | 327.89     | 357.99     | 1.1798       | 0.033164   | 327.19     | 357.04     | 1.1684       | 0.029592                | 326.49   | 356.08     | 1.1580       |
| 130  | 0.038813                | 337.42     | 368.47     | 1.2062       | 0.034241   | 336.78     | 367.59     | 1.1949       | 0.030581                | 336.12   | 366.70     | 1.1847       |
| 140  | 0.039985                | 347.08     | 379.07     | 1.2321       | 0.035302   | 346.48     | 378.25     | 1.2211       | 0.031554                | 345.87   | 377.42     | 1.2110       |
| 150  | 0.041143                | 356.86     | 389.78     | 1.2577       | 0.036349   | 356.30     | 389.01     | 1.2468       | 0.032512                | 355.73   | 388.24     | 1.2369       |
| 160  | 0.042290                | 366.78     | 400.61     | 1.2830       | 0.037384   | 366.25     | 399.89     | 1.2722       | 0.033457                | 365.71   | 399.17     | 1.2624       |
| 170  | 0.043427                | 376.83     | 411.57     | 1.3081       | 0.038408   | 376.33     | 410.89     | 1.2973       | 0.034392                | 375.82   | 410.22     | 1.2876       |
| 180  | 0.044554                | 387.01     | 422.65     | 1.3328       | 0.039423   | 386.54     | 422.02     | 1.3221       | 0.035317                | 386.06   | 421.38     | 1.3125       |
| <i>P</i> = 1.20 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 46.29°C) |                         |            |            |              | <i>P</i> = 1.40 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 52.40°C) |            |            |              |                         | <i>P</i> = 1.60 MPa ( <i>T</i> <sub>sat</sub> = 57.88°C) |            |              |
| Sat.   | 0.016728                | 253.84     | 273.92     | 0.9132       | 0.014119   | 256.40     | 276.17     | 0.9107       | 0.012134                | 258.50   | 277.92     | 0.9080       |
| 50   | 0.017201                | 257.64     | 278.28     | 0.9268       | 0.015005   | 264.46     | 285.47     | 0.9389       | 0.012372                | 260.91   | 280.71     | 0.9164       |
| 60   | 0.018404                | 267.57     | 289.66     | 0.9615       | 0.016060   | 274.62     | 297.10     | 0.9733       | 0.013430                | 271.78   | 293.27     | 0.9536       |
| 70   | 0.019502                | 277.23     | 300.63     | 0.9939       | 0.017023   | 284.51     | 308.34     | 1.0056       | 0.014362                | 282.11   | 305.09     | 0.9875       |
| 80   | 0.020529                | 286.77     | 311.40     | 1.0249       | 0.017923   | 294.28     | 319.37     | 1.0364       | 0.015215                | 292.19   | 316.53     | 1.0195       |
| 90   | 0.021506                | 296.28     | 322.09     | 1.0547       | 0.018778   | 304.01     | 330.30     | 1.0661       | 0.016014                | 302.16   | 327.78     | 1.0501       |
| 100  | 0.022442                | 305.81     | 332.74     | 1.0836       | 0.019597   | 313.76     | 341.19     | 1.0949       | 0.016773                | 312.09   | 338.93     | 1.0795       |
| 110  | 0.023348                | 315.40     | 343.41     | 1.1119       | 0.020388   | 323.55     | 352.09     | 1.1230       | 0.017500                | 322.03   | 350.03     | 1.1081       |
| 120  | 0.024228                | 325.05     | 354.12     | 1.1395       | 0.021155   | 333.41     | 363.02     | 1.1504       | 0.018201                | 332.02   | 361.14     | 1.1360       |
| 130  | 0.025086                | 334.79     | 364.90     | 1.1665       | 0.021904   | 343.34     | 374.01     | 1.1773       | 0.018882                | 342.06   | 372.27     | 1.1633       |
| 140  | 0.025927                | 344.63     | 375.74     | 1.1931       | 0.022636   | 353.37     | 385.07     | 1.2038       | 0.019545                | 352.19   | 383.46     | 1.1901       |
| 150  | 0.026753                | 354.57     | 386.68     | 1.2192       | 0.023355   | 363.51     | 396.20     | 1.2298       | 0.020194                | 362.40   | 394.71     | 1.2164       |
| 160  | 0.027566                | 364.63     | 397.71     | 1.2450       | 0.024061   | 373.75     | 407.43     | 1.2554       | 0.020830                | 372.71   | 406.04     | 1.2422       |
| 170  | 0.028367                | 374.80     | 408.84     | 1.2704       | 0.024757   | 384.12     | 418.78     | 1.2808       | 0.021456                | 383.13   | 417.46     | 1.2677       |

**FIGURE A-14***P-h diagram for refrigerant-134a.*

*Note:* The reference point used for the chart is different than that used in the R-134a tables. Therefore, problems should be solved using all property data either from the tables or from the chart, but not from both.

*Source of Data: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA.*

**994**  
**PROPERTY TABLES AND CHARTS**

**TABLE A-15**

Properties of saturated water

| Temp.<br><i>T</i> , °C | Saturation<br>pressure<br><i>P<sub>sat</sub></i> , kPa | Density<br><i>ρ</i> , kg/m <sup>3</sup> |        | Enthalpy<br>of<br>vaporization<br><i>h<sub>fg</sub></i> , kJ/kg |        | Specific<br>heat<br><i>c<sub>p</sub></i> , J/kg·K |       | Thermal<br>conductivity<br><i>k</i> , W/m·K |                        | Dynamic viscosity<br><i>μ</i> , kg/m·s |       | Prandtl<br>number<br>Pr |                         | Volume<br>expansion<br>coefficient<br><i>β</i> , 1/K |
|------------------------|--|---|--------|---|--------|---|-------|---|------------------------|--|-------|-------------------------|-------------------------|--|
|                        |  | Liquid                                  | Vapor  | Liquid  | Vapor  | Liquid  | Vapor | Liquid                                      | Vapor                  | Liquid                                 | Vapor | Liquid                  | Vapor                   | Liquid   |
| 0.01                   | 0.6113   | 999.8                                   | 0.0048 | 2501  | 4217   | 1854  | 0.561 | 0.0171                                      | $1.792 \times 10^{-3}$ | $0.922 \times 10^{-5}$                 | 13.5  | 1.00                    | $-0.068 \times 10^{-3}$ |  |
| 5                      | 0.8721   | 999.9                                   | 0.0068 | 2490  | 4205   | 1857  | 0.571 | 0.0173                                      | $1.519 \times 10^{-3}$ | $0.934 \times 10^{-5}$                 | 11.2  | 1.00                    | $0.015 \times 10^{-3}$  |  |
| 10                     | 1.2276   | 999.7                                   | 0.0094 | 2478  | 4194   | 1862  | 0.580 | 0.0176                                      | $1.307 \times 10^{-3}$ | $0.946 \times 10^{-5}$                 | 9.45  | 1.00                    | $0.733 \times 10^{-3}$  |  |
| 15                     | 1.7051   | 999.1                                   | 0.0128 | 2466  | 4185   | 1863  | 0.589 | 0.0179                                      | $1.138 \times 10^{-3}$ | $0.959 \times 10^{-5}$                 | 8.09  | 1.00                    | $0.138 \times 10^{-3}$  |  |
| 20                     | 2.339  | 998.0                                   | 0.0173 | 2454  | 4182   | 1867  | 0.598 | 0.0182                                      | $1.002 \times 10^{-3}$ | $0.973 \times 10^{-5}$                 | 7.01  | 1.00                    | $0.195 \times 10^{-3}$  |  |
| 25                     | 3.169  | 997.0                                   | 0.0231 | 2442  | 4180   | 1870  | 0.607 | 0.0186                                      | $0.891 \times 10^{-3}$ | $0.987 \times 10^{-5}$                 | 6.14  | 1.00                    | $0.247 \times 10^{-3}$  |  |
| 30                     | 4.246  | 996.0                                   | 0.0304 | 2431  | 4178   | 1875  | 0.615 | 0.0189                                      | $0.798 \times 10^{-3}$ | $1.001 \times 10^{-5}$                 | 5.42  | 1.00                    | $0.294 \times 10^{-3}$  |  |
| 35                     | 5.628  | 994.0                                   | 0.0397 | 2419  | 4178   | 1880  | 0.623 | 0.0192                                      | $0.720 \times 10^{-3}$ | $1.016 \times 10^{-5}$                 | 4.83  | 1.00                    | $0.337 \times 10^{-3}$  |  |
| 40                     | 7.384  | 992.1                                   | 0.0512 | 2407  | 4179   | 1885  | 0.631 | 0.0196                                      | $0.653 \times 10^{-3}$ | $1.031 \times 10^{-5}$                 | 4.32  | 1.00                    | $0.377 \times 10^{-3}$  |  |
| 45                     | 9.593  | 990.1                                   | 0.0655 | 2395  | 4180   | 1892  | 0.637 | 0.0200                                      | $0.596 \times 10^{-3}$ | $1.046 \times 10^{-5}$                 | 3.91  | 1.00                    | $0.415 \times 10^{-3}$  |  |
| 50                     | 12.35  | 988.1                                   | 0.0831 | 2383  | 4181   | 1900  | 0.644 | 0.0204                                      | $0.547 \times 10^{-3}$ | $1.062 \times 10^{-5}$                 | 3.55  | 1.00                    | $0.451 \times 10^{-3}$  |  |
| 55                     | 15.76  | 985.2                                   | 0.1045 | 2371  | 4183   | 1908  | 0.649 | 0.0208                                      | $0.504 \times 10^{-3}$ | $1.077 \times 10^{-5}$                 | 3.25  | 1.00                    | $0.484 \times 10^{-3}$  |  |
| 60                     | 19.94  | 983.3                                   | 0.1304 | 2359  | 4185   | 1916  | 0.654 | 0.0212                                      | $0.467 \times 10^{-3}$ | $1.093 \times 10^{-5}$                 | 2.99  | 1.00                    | $0.517 \times 10^{-3}$  |  |
| 65                     | 25.03  | 980.4                                   | 0.1614 | 2346  | 4187   | 1926  | 0.659 | 0.0216                                      | $0.433 \times 10^{-3}$ | $1.110 \times 10^{-5}$                 | 2.75  | 1.00                    | $0.548 \times 10^{-3}$  |  |
| 70                     | 31.19  | 977.5                                   | 0.1983 | 2334  | 4190   | 1936  | 0.663 | 0.0221                                      | $0.404 \times 10^{-3}$ | $1.126 \times 10^{-5}$                 | 2.55  | 1.00                    | $0.578 \times 10^{-3}$  |  |
| 75                     | 38.58  | 974.7                                   | 0.2421 | 2321  | 4193   | 1948  | 0.667 | 0.0225                                      | $0.378 \times 10^{-3}$ | $1.142 \times 10^{-5}$                 | 2.38  | 1.00                    | $0.607 \times 10^{-3}$  |  |
| 80                     | 47.39  | 971.8                                   | 0.2935 | 2309  | 4197   | 1962  | 0.670 | 0.0230                                      | $0.355 \times 10^{-3}$ | $1.159 \times 10^{-5}$                 | 2.22  | 1.00                    | $0.653 \times 10^{-3}$  |  |
| 85                     | 57.83  | 968.1                                   | 0.3536 | 2296  | 4201   | 1977  | 0.673 | 0.0235                                      | $0.333 \times 10^{-3}$ | $1.176 \times 10^{-5}$                 | 2.08  | 1.00                    | $0.670 \times 10^{-3}$  |  |
| 90                     | 70.14  | 965.3                                   | 0.4235 | 2283  | 4206   | 1993  | 0.675 | 0.0240                                      | $0.315 \times 10^{-3}$ | $1.193 \times 10^{-5}$                 | 1.96  | 1.00                    | $0.702 \times 10^{-3}$  |  |
| 95                     | 84.55  | 961.5                                   | 0.5045 | 2270  | 4212   | 2010  | 0.677 | 0.0246                                      | $0.297 \times 10^{-3}$ | $1.210 \times 10^{-5}$                 | 1.85  | 1.00                    | $0.716 \times 10^{-3}$  |  |
| 100                    | 101.33   | 957.9                                   | 0.5978 | 2257  | 4217   | 2029  | 0.679 | 0.0251                                      | $0.282 \times 10^{-3}$ | $1.227 \times 10^{-5}$                 | 1.75  | 1.00                    | $0.750 \times 10^{-3}$  |  |
| 110                    | 143.27   | 950.6                                   | 0.8263 | 2230  | 4229   | 2071  | 0.682 | 0.0262                                      | $0.255 \times 10^{-3}$ | $1.261 \times 10^{-5}$                 | 1.58  | 1.00                    | $0.798 \times 10^{-3}$  |  |
| 120                    | 198.53   | 943.4                                   | 1.121  | 2203  | 4244   | 2120  | 0.683 | 0.0275                                      | $0.232 \times 10^{-3}$ | $1.296 \times 10^{-5}$                 | 1.44  | 1.00                    | $0.858 \times 10^{-3}$  |  |
| 130                    | 270.1  | 934.6                                   | 1.496  | 2174  | 4263   | 2177  | 0.684 | 0.0288                                      | $0.213 \times 10^{-3}$ | $1.330 \times 10^{-5}$                 | 1.33  | 1.01                    | $0.913 \times 10^{-3}$  |  |
| 140                    | 361.3  | 921.7                                   | 1.965  | 2145  | 4286   | 2244  | 0.683 | 0.0301                                      | $0.197 \times 10^{-3}$ | $1.365 \times 10^{-5}$                 | 1.24  | 1.02                    | $0.970 \times 10^{-3}$  |  |
| 150                    | 475.8  | 916.6                                   | 2.546  | 2114  | 4311   | 2314  | 0.682 | 0.0316                                      | $0.183 \times 10^{-3}$ | $1.399 \times 10^{-5}$                 | 1.16  | 1.02                    | $1.025 \times 10^{-3}$  |  |
| 160                    | 617.8  | 907.4                                   | 3.256  | 2083  | 4340   | 2420  | 0.680 | 0.0331                                      | $0.170 \times 10^{-3}$ | $1.434 \times 10^{-5}$                 | 1.09  | 1.05                    | $1.145 \times 10^{-3}$  |  |
| 170                    | 791.7  | 897.7                                   | 4.119  | 2050  | 4370   | 2490  | 0.677 | 0.0347                                      | $0.160 \times 10^{-3}$ | $1.468 \times 10^{-5}$                 | 1.03  | 1.05                    | $1.178 \times 10^{-3}$  |  |
| 180                    | 1,002.1  | 887.3                                   | 5.153  | 2015  | 4410   | 2590  | 0.673 | 0.0364                                      | $0.150 \times 10^{-3}$ | $1.502 \times 10^{-5}$                 | 0.983 | 1.07                    | $1.210 \times 10^{-3}$  |  |
| 190                    | 1,254.4  | 876.4                                   | 6.388  | 1979  | 4460   | 2710  | 0.669 | 0.0382                                      | $0.142 \times 10^{-3}$ | $1.537 \times 10^{-5}$                 | 0.947 | 1.09                    | $1.280 \times 10^{-3}$  |  |
| 200                    | 1,553.8  | 864.3                                   | 7.852  | 1941  | 4500   | 2840  | 0.663 | 0.0401                                      | $0.134 \times 10^{-3}$ | $1.571 \times 10^{-5}$                 | 0.910 | 1.11                    | $1.350 \times 10^{-3}$  |  |
| 220                    | 2,318  | 840.3                                   | 11.60  | 1859  | 4610   | 3110  | 0.650 | 0.0442                                      | $0.122 \times 10^{-3}$ | $1.641 \times 10^{-5}$                 | 0.865 | 1.15                    | $1.520 \times 10^{-3}$  |  |
| 240                    | 3,344  | 813.7                                   | 16.73  | 1767  | 4760   | 3520  | 0.632 | 0.0487                                      | $0.111 \times 10^{-3}$ | $1.712 \times 10^{-5}$                 | 0.836 | 1.24                    | $1.720 \times 10^{-3}$  |  |
| 260                    | 4,688  | 783.7                                   | 23.69  | 1663  | 4970   | 4070  | 0.609 | 0.0540                                      | $0.102 \times 10^{-3}$ | $1.788 \times 10^{-5}$                 | 0.832 | 1.35                    | $2.000 \times 10^{-3}$  |  |
| 280                    | 6,412  | 750.8                                   | 33.15  | 1544  | 5280   | 4835  | 0.581 | 0.0605                                      | $0.094 \times 10^{-3}$ | $1.870 \times 10^{-5}$                 | 0.854 | 1.49                    | $2.380 \times 10^{-3}$  |  |
| 300                    | 8,581  | 713.8                                   | 46.15  | 1405  | 5750   | 5980  | 0.548 | 0.0695                                      | $0.086 \times 10^{-3}$ | $1.965 \times 10^{-5}$                 | 0.902 | 1.69                    | $2.950 \times 10^{-3}$  |  |
| 320                    | 11,274   | 667.1                                   | 64.57  | 1239  | 6540   | 7900  | 0.509 | 0.0836                                      | $0.078 \times 10^{-3}$ | $2.084 \times 10^{-5}$                 | 1.00  | 1.97                    |                         |  |
| 340                    | 14,586   | 610.5                                   | 92.62  | 1028  | 8240   | 11,870  | 0.469 | 0.110                                       | $0.070 \times 10^{-3}$ | $2.255 \times 10^{-5}$                 | 1.23  | 2.43                    |                         |  |
| 360                    | 18,651   | 528.3                                   | 144.0  | 720   | 14,690 | 25,800  | 0.427 | 0.178                                       | $0.060 \times 10^{-3}$ | $2.571 \times 10^{-5}$                 | 2.06  | 3.73                    |                         |  |
| 374.14                 | 22,090   | 317.0                                   | 317.0  | 0   | —      | —   | —     | —   | $0.043 \times 10^{-3}$ | $4.313 \times 10^{-5}$                 |       |                         |                         |  |

Note 1: Kinematic viscosity  $\nu$  and thermal diffusivity  $\alpha$  can be calculated from their definitions,  $\nu = \mu/\rho$  and  $\alpha = k/\rho c_p = \nu/\text{Pr}$ . The temperatures 0.01°C, 100°C, and 374.14°C are the triple-, boiling-, and critical-point temperatures of water, respectively. The properties listed here (except the vapor density) can be used at any pressure with negligible error except at temperatures near the critical-point value.

Note 2: The unit kJ/kg·°C for specific heat is equivalent to kJ/kg·K, and the unit W/m·°C for thermal conductivity is equivalent to W/m·K.

Source: Viscosity and thermal conductivity data are from J. V. Sengers and J. T. R. Watson, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 15 (1986), pp. 1291–1322. Other data are obtained from various sources or calculated.

**TABLE A-16**

Properties of saturated refrigerant-134a

| Temp.<br><i>T</i> , °C | Saturation<br>pressure<br><i>P</i> , kPa | Density<br><i>ρ</i> , kg/m <sup>3</sup> |       | Enthalpy<br>of<br>vaporization<br><i>h<sub>f<sub>v</sub></sub></i> , kJ/kg |       | Specific<br>heat<br><i>c<sub>p</sub></i> , J/kg·K |        | Thermal<br>conductivity<br><i>k</i> , W/m·K |                        | Dynamic Viscosity<br><i>μ</i> , kg/m·s |       | Prandtl<br>number<br>Pr |         | Volume<br>expansion<br>coefficient<br><i>β</i> , 1/K |       | Surface<br>tension,<br>N/m |       |
|------------------------|--|---|-------|--|-------|---|--------|---|------------------------|--|-------|-------------------------|---------|--|-------|----------------------------|-------|
|                        |  | Liquid                                  | Vapor | Liquid   | Vapor | Liquid  | Vapor  | Liquid                                      | Vapor                  | Liquid                                 | Vapor | Liquid                  | Vapor   | Liquid   | Vapor | Liquid                     | Vapor |
| -40                    | 51.2                                     | 1418                                    | 2.773 | 225.9  | 1254  | 748.6   | 0.1101 | 0.00811                                     | $4.878 \times 10^{-4}$ | $2.550 \times 10^{-6}$                 | 5.558 | 0.235                   | 0.00205 | 0.01760  |       |                            |       |
| -35                    | 66.2                                     | 1403                                    | 3.524 | 222.7  | 1264  | 764.1   | 0.1084 | 0.00862                                     | $4.509 \times 10^{-4}$ | $3.003 \times 10^{-6}$                 | 5.257 | 0.266                   | 0.00209 | 0.01682  |       |                            |       |
| -30                    | 84.4                                     | 1389                                    | 4.429 | 219.5  | 1273  | 780.2   | 0.1066 | 0.00913                                     | $4.178 \times 10^{-4}$ | $3.504 \times 10^{-6}$                 | 4.992 | 0.299                   | 0.00215 | 0.01604  |       |                            |       |
| -25                    | 106.5                                    | 1374                                    | 5.509 | 216.3  | 1283  | 797.2   | 0.1047 | 0.00963                                     | $3.882 \times 10^{-4}$ | $4.054 \times 10^{-6}$                 | 4.757 | 0.335                   | 0.00220 | 0.01527  |       |                            |       |
| -20                    | 132.8                                    | 1359                                    | 6.787 | 213.0  | 1294  | 814.9   | 0.1028 | 0.01013                                     | $3.614 \times 10^{-4}$ | $4.651 \times 10^{-6}$                 | 4.548 | 0.374                   | 0.00227 | 0.01451  |       |                            |       |
| -15                    | 164.0                                    | 1343                                    | 8.288 | 209.5  | 1306  | 833.5   | 0.1009 | 0.01063                                     | $3.371 \times 10^{-4}$ | $5.295 \times 10^{-6}$                 | 4.363 | 0.415                   | 0.00233 | 0.01376  |       |                            |       |
| -10                    | 200.7                                    | 1327                                    | 10.04 | 206.0  | 1318  | 853.1   | 0.0989 | 0.01112                                     | $3.150 \times 10^{-4}$ | $5.982 \times 10^{-6}$                 | 4.198 | 0.459                   | 0.00241 | 0.01302  |       |                            |       |
| -5                     | 243.5                                    | 1311                                    | 12.07 | 202.4  | 1330  | 873.8   | 0.0968 | 0.01161                                     | $2.947 \times 10^{-4}$ | $6.709 \times 10^{-6}$                 | 4.051 | 0.505                   | 0.00249 | 0.01229  |       |                            |       |
| 0                      | 293.0                                    | 1295                                    | 14.42 | 198.7  | 1344  | 895.6   | 0.0947 | 0.01210                                     | $2.761 \times 10^{-4}$ | $7.471 \times 10^{-6}$                 | 3.919 | 0.553                   | 0.00258 | 0.01156  |       |                            |       |
| 5                      | 349.9                                    | 1278                                    | 17.12 | 194.8  | 1358  | 918.7   | 0.0925 | 0.01259                                     | $2.589 \times 10^{-4}$ | $8.264 \times 10^{-6}$                 | 3.802 | 0.603                   | 0.00269 | 0.01084  |       |                            |       |
| 10                     | 414.9                                    | 1261                                    | 20.22 | 190.8  | 1374  | 943.2   | 0.0903 | 0.01308                                     | $2.430 \times 10^{-4}$ | $9.081 \times 10^{-6}$                 | 3.697 | 0.655                   | 0.00280 | 0.01014  |       |                            |       |
| 15                     | 488.7                                    | 1244                                    | 23.75 | 186.6  | 1390  | 969.4   | 0.0880 | 0.01357                                     | $2.281 \times 10^{-4}$ | $9.915 \times 10^{-6}$                 | 3.604 | 0.708                   | 0.00293 | 0.00944  |       |                            |       |
| 20                     | 572.1                                    | 1226                                    | 27.77 | 182.3  | 1408  | 997.6   | 0.0856 | 0.01406                                     | $2.142 \times 10^{-4}$ | $1.075 \times 10^{-5}$                 | 3.521 | 0.763                   | 0.00307 | 0.00876  |       |                            |       |
| 25                     | 665.8                                    | 1207                                    | 32.34 | 177.8  | 1427  | 1028  | 0.0833 | 0.01456                                     | $2.012 \times 10^{-4}$ | $1.160 \times 10^{-5}$                 | 3.448 | 0.819                   | 0.00324 | 0.00808  |       |                            |       |
| 30                     | 770.6                                    | 1188                                    | 37.53 | 173.1  | 1448  | 1061  | 0.0808 | 0.01507                                     | $1.888 \times 10^{-4}$ | $1.244 \times 10^{-5}$                 | 3.383 | 0.877                   | 0.00342 | 0.00742  |       |                            |       |
| 35                     | 887.5                                    | 1168                                    | 43.41 | 168.2  | 1471  | 1098  | 0.0783 | 0.01558                                     | $1.772 \times 10^{-4}$ | $1.327 \times 10^{-5}$                 | 3.328 | 0.935                   | 0.00364 | 0.00677  |       |                            |       |
| 40                     | 1017.1                                   | 1147                                    | 50.08 | 163.0  | 1498  | 1138  | 0.0757 | 0.01610                                     | $1.660 \times 10^{-4}$ | $1.408 \times 10^{-5}$                 | 3.285 | 0.995                   | 0.00390 | 0.00613  |       |                            |       |
| 45                     | 1160.5                                   | 1125                                    | 57.66 | 157.6  | 1529  | 1184  | 0.0731 | 0.01664                                     | $1.554 \times 10^{-4}$ | $1.486 \times 10^{-5}$                 | 3.253 | 1.058                   | 0.00420 | 0.00550  |       |                            |       |
| 50                     | 1318.6                                   | 1102                                    | 66.27 | 151.8  | 1566  | 1237  | 0.0704 | 0.01720                                     | $1.453 \times 10^{-4}$ | $1.562 \times 10^{-5}$                 | 3.231 | 1.123                   | 0.00455 | 0.00489  |       |                            |       |
| 55                     | 1492.3                                   | 1078                                    | 76.11 | 145.7  | 1608  | 1298  | 0.0676 | 0.01777                                     | $1.355 \times 10^{-4}$ | $1.634 \times 10^{-5}$                 | 3.223 | 1.193                   | 0.00500 | 0.00429  |       |                            |       |
| 60                     | 1682.8                                   | 1053                                    | 87.38 | 139.1  | 1659  | 1372  | 0.0647 | 0.01838                                     | $1.260 \times 10^{-4}$ | $1.704 \times 10^{-5}$                 | 3.229 | 1.272                   | 0.00554 | 0.00372  |       |                            |       |
| 65                     | 1891.0                                   | 1026                                    | 100.4 | 132.1  | 1722  | 1462  | 0.0618 | 0.01902                                     | $1.167 \times 10^{-4}$ | $1.771 \times 10^{-5}$                 | 3.255 | 1.362                   | 0.00624 | 0.00315  |       |                            |       |
| 70                     | 2118.2                                   | 996.2                                   | 115.6 | 124.4  | 1801  | 1577  | 0.0587 | 0.01972                                     | $1.077 \times 10^{-4}$ | $1.839 \times 10^{-5}$                 | 3.307 | 1.471                   | 0.00716 | 0.00261  |       |                            |       |
| 75                     | 2365.8                                   | 964                                     | 133.6 | 115.9  | 1907  | 1731  | 0.0555 | 0.02048                                     | $9.891 \times 10^{-5}$ | $1.908 \times 10^{-5}$                 | 3.400 | 1.612                   | 0.00843 | 0.00209  |       |                            |       |
| 80                     | 2635.2                                   | 928.2                                   | 155.3 | 106.4  | 2056  | 1948  | 0.0521 | 0.02133                                     | $9.011 \times 10^{-5}$ | $1.982 \times 10^{-5}$                 | 3.558 | 1.810                   | 0.01031 | 0.00160  |       |                            |       |
| 85                     | 2928.2                                   | 887.1                                   | 182.3 | 95.4   | 2287  | 2281  | 0.0484 | 0.02233                                     | $8.124 \times 10^{-5}$ | $2.071 \times 10^{-5}$                 | 3.837 | 2.116                   | 0.01336 | 0.00114  |       |                            |       |
| 90                     | 3246.9                                   | 837.7                                   | 217.8 | 82.2   | 2701  | 2865  | 0.0444 | 0.02357                                     | $7.203 \times 10^{-5}$ | $2.187 \times 10^{-5}$                 | 4.385 | 2.658                   | 0.01911 | 0.00071  |       |                            |       |
| 95                     | 3594.1                                   | 772.5                                   | 269.3 | 64.9   | 3675  | 4144  | 0.0396 | 0.02544                                     | $6.190 \times 10^{-5}$ | $2.370 \times 10^{-5}$                 | 5.746 | 3.862                   | 0.03343 | 0.00033  |       |                            |       |
| 100                    | 3975.1                                   | 651.7                                   | 376.3 | 33.9   | 7959  | 8785  | 0.0322 | 0.02989                                     | $4.765 \times 10^{-5}$ | $2.833 \times 10^{-5}$                 | 11.77 | 8.326                   | 0.10047 | 0.00004  |       |                            |       |

Note 1: Kinematic viscosity  $\nu$  and thermal diffusivity  $\alpha$  can be calculated from their definitions,  $\nu = \mu/\rho$  and  $\alpha = k/\rho c_p = \nu/\text{Pr}$ . The properties listed here (except the vapor density) can be used at any pressures with negligible error except at temperatures near the critical-point value.

Note 2: The unit kJ/kg·°C for specific heat is equivalent to kJ/kg·K, and the unit W/m·°C for thermal conductivity is equivalent to W/m·K.

Source: Data generated from the EES software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. Original sources: R. Tillner-Roth and H. D. Baehr, "An International Standard Formulation for the Thermodynamic Properties of 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC-134a) for Temperatures from 170 K to 455 K and Pressures up to 70 MPa," *Journal of Physical Chemistry Reference Data*, Vol. 23, No. 5, 1994; M.J. Assael, N. K. Dalaouti, A. A. Griva, and J. H. Dymond, "Viscosity and Thermal Conductivity of Halogenated Methane and Ethane Refrigerants," *IJR*, Vol. 22, pp. 525–535, 1999; NIST REFPROP 6 program (M. O. McLinden, S. A. Klein, E. W. Lemmon, and A. P. Peskin, Physical and Chemical Properties Division, National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO 80303, 1995).

TABLE A-17

Properties of saturated ammonia

| Temp., °C | P, kPa | Saturation pressure |        | Density $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> |      | Enthalpy of vaporization $h_{fg}$ , kJ/kg |        | Specific heat $c_p$ , J/kg·K |                          | Thermal conductivity $k$ , W/m·K |       | Dynamic Viscosity $\mu$ , kg/m·s |         | Prandtl number Pr |       | Volume Expansion coefficient $\beta$ , 1/K |       | Surface tension, N/m |  |
|-----------|--------|---------------------|--------|------------------------------------|------|---|--------|------------------------------|--------------------------|----------------------------------|-------|----------------------------------|---------|-------------------|-------|--|-------|----------------------|--|
|           |        | Liquid              | Vapor  |                                    |      | Liquid                                    | Vapor  | Liquid                       | Vapor                    | Liquid                           | Vapor | Liquid                           | Vapor   | Liquid            | Vapor | Liquid                                     | Vapor |                      |  |
| -40       | 71.66  | 690.2               | 0.6435 | 1389                               | 4414 | 2242                                      | —      | 0.01792                      | 2.926 × 10 <sup>-4</sup> | 7.957 × 10 <sup>-6</sup>         | —     | 0.9955                           | 0.00176 | 0.03565           |       |  |       |                      |  |
| -30       | 119.4  | 677.8               | 1.037  | 1360                               | 4465 | 2322                                      | —      | 0.01898                      | 2.630 × 10 <sup>-4</sup> | 8.311 × 10 <sup>-6</sup>         | —     | 1.017                            | 0.00185 | 0.03341           |       |  |       |                      |  |
| -25       | 151.5  | 671.5               | 1.296  | 1345                               | 4489 | 2369                                      | 0.5968 | 0.01957                      | 2.492 × 10 <sup>-4</sup> | 8.490 × 10 <sup>-6</sup>         | 1.875 | 1.028                            | 0.00190 | 0.03229           |       |  |       |                      |  |
| -20       | 190.1  | 665.1               | 1.603  | 1329                               | 4514 | 2420                                      | 0.5853 | 0.02015                      | 2.361 × 10 <sup>-4</sup> | 8.669 × 10 <sup>-6</sup>         | 1.821 | 1.041                            | 0.00194 | 0.03118           |       |  |       |                      |  |
| -15       | 236.2  | 658.6               | 1.966  | 1313                               | 4538 | 2476                                      | 0.5737 | 0.02075                      | 2.236 × 10 <sup>-4</sup> | 8.851 × 10 <sup>-6</sup>         | 1.769 | 1.056                            | 0.00199 | 0.03007           |       |  |       |                      |  |
| -10       | 290.8  | 652.1               | 2.391  | 1297                               | 4564 | 2536                                      | 0.5621 | 0.02138                      | 2.117 × 10 <sup>-4</sup> | 9.034 × 10 <sup>-6</sup>         | 1.718 | 1.072                            | 0.00205 | 0.02896           |       |  |       |                      |  |
| -5        | 354.9  | 645.4               | 2.886  | 1280                               | 4589 | 2601                                      | 0.5505 | 0.02203                      | 2.003 × 10 <sup>-4</sup> | 9.218 × 10 <sup>-6</sup>         | 1.670 | 1.089                            | 0.00210 | 0.02786           |       |  |       |                      |  |
| 0         | 429.6  | 638.6               | 3.458  | 1262                               | 4617 | 2672                                      | 0.5390 | 0.02270                      | 1.896 × 10 <sup>-4</sup> | 9.405 × 10 <sup>-6</sup>         | 1.624 | 1.107                            | 0.00216 | 0.02676           |       |  |       |                      |  |
| 5         | 516    | 631.7               | 4.116  | 1244                               | 4645 | 2749                                      | 0.5274 | 0.02341                      | 1.794 × 10 <sup>-4</sup> | 9.593 × 10 <sup>-6</sup>         | 1.580 | 1.126                            | 0.00223 | 0.02566           |       |  |       |                      |  |
| 10        | 615.3  | 624.6               | 4.870  | 1226                               | 4676 | 2831                                      | 0.5158 | 0.02415                      | 1.697 × 10 <sup>-4</sup> | 9.784 × 10 <sup>-6</sup>         | 1.539 | 1.147                            | 0.00230 | 0.02457           |       |  |       |                      |  |
| 15        | 728.8  | 617.5               | 5.729  | 1206                               | 4709 | 2920                                      | 0.5042 | 0.02492                      | 1.606 × 10 <sup>-4</sup> | 9.978 × 10 <sup>-6</sup>         | 1.500 | 1.169                            | 0.00237 | 0.02348           |       |  |       |                      |  |
| 20        | 857.8  | 610.2               | 6.705  | 1186                               | 4745 | 3016                                      | 0.4927 | 0.02573                      | 1.519 × 10 <sup>-4</sup> | 1.017 × 10 <sup>-5</sup>         | 1.463 | 1.193                            | 0.00245 | 0.02240           |       |  |       |                      |  |
| 25        | 1003   | 602.8               | 7.809  | 1166                               | 4784 | 3120                                      | 0.4811 | 0.02658                      | 1.438 × 10 <sup>-4</sup> | 1.037 × 10 <sup>-5</sup>         | 1.430 | 1.218                            | 0.00254 | 0.02132           |       |  |       |                      |  |
| 30        | 1167   | 595.2               | 9.055  | 1144                               | 4828 | 3232                                      | 0.4695 | 0.02748                      | 1.361 × 10 <sup>-4</sup> | 1.057 × 10 <sup>-5</sup>         | 1.399 | 1.244                            | 0.00264 | 0.02024           |       |  |       |                      |  |
| 35        | 1351   | 587.4               | 10.46  | 1122                               | 4877 | 3354                                      | 0.4579 | 0.02843                      | 1.288 × 10 <sup>-4</sup> | 1.078 × 10 <sup>-5</sup>         | 1.372 | 1.272                            | 0.00275 | 0.01917           |       |  |       |                      |  |
| 40        | 1555   | 579.4               | 12.03  | 1099                               | 4932 | 3486                                      | 0.4464 | 0.02943                      | 1.219 × 10 <sup>-4</sup> | 1.099 × 10 <sup>-5</sup>         | 1.347 | 1.303                            | 0.00287 | 0.01810           |       |  |       |                      |  |
| 45        | 1782   | 571.3               | 13.8   | 1075                               | 4993 | 3631                                      | 0.4348 | 0.03049                      | 1.155 × 10 <sup>-4</sup> | 1.121 × 10 <sup>-5</sup>         | 1.327 | 1.335                            | 0.00301 | 0.01704           |       |  |       |                      |  |
| 50        | 2033   | 562.9               | 15.78  | 1051                               | 5063 | 3790                                      | 0.4232 | 0.03162                      | 1.094 × 10 <sup>-4</sup> | 1.143 × 10 <sup>-5</sup>         | 1.310 | 1.371                            | 0.00316 | 0.01598           |       |  |       |                      |  |
| 55        | 2310   | 554.2               | 18.00  | 1025                               | 5143 | 3967                                      | 0.4116 | 0.03283                      | 1.037 × 10 <sup>-4</sup> | 1.166 × 10 <sup>-5</sup>         | 1.297 | 1.409                            | 0.00334 | 0.01493           |       |  |       |                      |  |
| 60        | 2614   | 545.2               | 20.48  | 997.4                              | 5234 | 4163                                      | 0.4001 | 0.03412                      | 9.846 × 10 <sup>-5</sup> | 1.189 × 10 <sup>-5</sup>         | 1.288 | 1.452                            | 0.00354 | 0.01389           |       |  |       |                      |  |
| 65        | 2948   | 536.0               | 23.26  | 968.9                              | 5340 | 4384                                      | 0.3885 | 0.03550                      | 9.347 × 10 <sup>-5</sup> | 1.213 × 10 <sup>-5</sup>         | 1.285 | 1.499                            | 0.00377 | 0.01285           |       |  |       |                      |  |
| 70        | 3312   | 526.3               | 26.39  | 939.0                              | 5463 | 4634                                      | 0.3769 | 0.03700                      | 8.879 × 10 <sup>-5</sup> | 1.238 × 10 <sup>-5</sup>         | 1.287 | 1.551                            | 0.00404 | 0.01181           |       |  |       |                      |  |
| 75        | 3709   | 516.2               | 29.90  | 907.5                              | 5608 | 4923                                      | 0.3653 | 0.03862                      | 8.440 × 10 <sup>-5</sup> | 1.264 × 10 <sup>-5</sup>         | 1.296 | 1.612                            | 0.00436 | 0.01079           |       |  |       |                      |  |
| 80        | 4141   | 505.7               | 33.87  | 874.1                              | 5780 | 5260                                      | 0.3538 | 0.04038                      | 8.030 × 10 <sup>-5</sup> | 1.292 × 10 <sup>-5</sup>         | 1.312 | 1.683                            | 0.00474 | 0.00977           |       |  |       |                      |  |
| 85        | 4609   | 494.5               | 38.36  | 838.6                              | 5988 | 5659                                      | 0.3422 | 0.04232                      | 7.646 × 10 <sup>-5</sup> | 1.322 × 10 <sup>-5</sup>         | 1.338 | 1.768                            | 0.00521 | 0.00876           |       |  |       |                      |  |
| 90        | 5116   | 482.8               | 43.48  | 800.6                              | 6242 | 6142                                      | 0.3306 | 0.04447                      | 7.284 × 10 <sup>-5</sup> | 1.354 × 10 <sup>-5</sup>         | 1.375 | 1.871                            | 0.00579 | 0.00776           |       |  |       |                      |  |
| 95        | 5665   | 470.2               | 49.35  | 759.8                              | 6561 | 6740                                      | 0.3190 | 0.04687                      | 6.946 × 10 <sup>-5</sup> | 1.389 × 10 <sup>-5</sup>         | 1.429 | 1.999                            | 0.00652 | 0.00677           |       |  |       |                      |  |
| 100       | 6257   | 456.6               | 56.15  | 715.5                              | 6972 | 7503                                      | 0.3075 | 0.04958                      | 6.628 × 10 <sup>-5</sup> | 1.429 × 10 <sup>-5</sup>         | 1.503 | 2.163                            | 0.00749 | 0.00579           |       |  |       |                      |  |

Note 1: Kinematic viscosity  $\nu$  and thermal diffusivity  $\alpha$  can be calculated from their definitions,  $\nu = \mu/\rho$  and  $\alpha = k/\rho c_p = \nu/\text{Pr}$ . The properties listed here (except the vapor density) can be used at any pressures with negligible error except at temperatures near the critical-point value.

Note 2: The unit kJ/kg·°C for specific heat is equivalent to kJ/kg·K, and the unit W/m·°C for thermal conductivity is equivalent to W/m·K.

Source: Data generated from the EES software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. Original sources: Tillner-Roth, Harms-Watzenberg, and Baehr, "Eine neue Fundamentalgleichung für Ammoniak," DKV-Tagungsbericht 20:167–181, 1993; Liley and Desai, "Thermophysical Properties of Refrigerants," ASHRAE, 1993, ISBN 1-883413-10-9.

**TABLE A-18**

Properties of saturated propane

| Temp.<br><i>T</i> , °C | Saturation<br>pressure<br><i>P</i> , kPa | Density<br><i>ρ</i> , kg/m <sup>3</sup> |         | Enthalpy<br>of<br>vaporization<br><i>h<sub>fg</sub></i> , kJ/kg |       | Specific<br>heat<br><i>c<sub>p</sub></i> , J/kg·K |        | Thermal<br>conductivity<br><i>k</i> , W/m·K |                        | Dynamic Viscosity<br><i>μ</i> , kg/m·s |       | Prandtl<br>number<br>Pr |         | Volume<br>expansion<br>coefficient<br><i>β</i> , 1/K | Surface<br>tension,<br>N/m |
|------------------------|--|---|---------|---|-------|---|--------|---|------------------------|--|-------|-------------------------|---------|--|----------------------------|
|                        |  | Liquid                                  | Vapor   | Liquid  | Vapor | Liquid  | Vapor  | Liquid                                      | Vapor                  | Liquid                                 | Vapor | Liquid                  | Vapor   | Liquid   | Vapor                      |
| -120                   | 0.4053                                   | 664.7                                   | 0.01408 | 498.3   | 2003  | 1115  | 0.1802 | 0.00589                                     | $6.136 \times 10^{-4}$ | $4.372 \times 10^{-6}$                 | 6.820 | 0.827                   | 0.00153 | 0.02630  |                            |
| -110                   | 1.157                                    | 654.5                                   | 0.03776 | 489.3   | 2021  | 1148  | 0.1738 | 0.00645                                     | $5.054 \times 10^{-4}$ | $4.625 \times 10^{-6}$                 | 5.878 | 0.822                   | 0.00157 | 0.02486  |                            |
| -100                   | 2.881                                    | 644.2                                   | 0.08872 | 480.4   | 2044  | 1183  | 0.1672 | 0.00705                                     | $4.252 \times 10^{-4}$ | $4.881 \times 10^{-6}$                 | 5.195 | 0.819                   | 0.00161 | 0.02344  |                            |
| -90                    | 6.406                                    | 633.8                                   | 0.1870  | 471.5   | 2070  | 1221  | 0.1606 | 0.00769                                     | $3.635 \times 10^{-4}$ | $5.143 \times 10^{-6}$                 | 4.686 | 0.817                   | 0.00166 | 0.02202  |                            |
| -80                    | 12.97                                    | 623.2                                   | 0.3602  | 462.4   | 2100  | 1263  | 0.1539 | 0.00836                                     | $3.149 \times 10^{-4}$ | $5.409 \times 10^{-6}$                 | 4.297 | 0.817                   | 0.00171 | 0.02062  |                            |
| -70                    | 24.26                                    | 612.5                                   | 0.6439  | 453.1   | 2134  | 1308  | 0.1472 | 0.00908                                     | $2.755 \times 10^{-4}$ | $5.680 \times 10^{-6}$                 | 3.994 | 0.818                   | 0.00177 | 0.01923  |                            |
| -60                    | 42.46                                    | 601.5                                   | 1.081   | 443.5   | 2173  | 1358  | 0.1407 | 0.00985                                     | $2.430 \times 10^{-4}$ | $5.956 \times 10^{-6}$                 | 3.755 | 0.821                   | 0.00184 | 0.01785  |                            |
| -50                    | 70.24                                    | 590.3                                   | 1.724   | 433.6   | 2217  | 1412  | 0.1343 | 0.01067                                     | $2.158 \times 10^{-4}$ | $6.239 \times 10^{-6}$                 | 3.563 | 0.825                   | 0.00192 | 0.01649  |                            |
| -40                    | 110.7                                    | 578.8                                   | 2.629   | 423.1   | 2258  | 1471  | 0.1281 | 0.01155                                     | $1.926 \times 10^{-4}$ | $6.529 \times 10^{-6}$                 | 3.395 | 0.831                   | 0.00201 | 0.01515  |                            |
| -30                    | 167.3                                    | 567.0                                   | 3.864   | 412.1   | 2310  | 1535  | 0.1221 | 0.01250                                     | $1.726 \times 10^{-4}$ | $6.827 \times 10^{-6}$                 | 3.266 | 0.839                   | 0.00213 | 0.01382  |                            |
| -20                    | 243.8                                    | 554.7                                   | 5.503   | 400.3   | 2368  | 1605  | 0.1163 | 0.01351                                     | $1.551 \times 10^{-4}$ | $7.136 \times 10^{-6}$                 | 3.158 | 0.848                   | 0.00226 | 0.01251  |                            |
| -10                    | 344.4                                    | 542.0                                   | 7.635   | 387.8   | 2433  | 1682  | 0.1107 | 0.01459                                     | $1.397 \times 10^{-4}$ | $7.457 \times 10^{-6}$                 | 3.069 | 0.860                   | 0.00242 | 0.01122  |                            |
| 0                      | 473.3                                    | 528.7                                   | 10.36   | 374.2   | 2507  | 1768  | 0.1054 | 0.01576                                     | $1.259 \times 10^{-4}$ | $7.794 \times 10^{-6}$                 | 2.996 | 0.875                   | 0.00262 | 0.00996  |                            |
| 5                      | 549.8                                    | 521.8                                   | 11.99   | 367.0   | 2547  | 1814  | 0.1028 | 0.01637                                     | $1.195 \times 10^{-4}$ | $7.970 \times 10^{-6}$                 | 2.964 | 0.883                   | 0.00273 | 0.00934  |                            |
| 10                     | 635.1                                    | 514.7                                   | 13.81   | 359.5   | 2590  | 1864  | 0.1002 | 0.01701                                     | $1.135 \times 10^{-4}$ | $8.151 \times 10^{-6}$                 | 2.935 | 0.893                   | 0.00286 | 0.00872  |                            |
| 15                     | 729.8                                    | 507.5                                   | 15.85   | 351.7   | 2637  | 1917  | 0.0977 | 0.01767                                     | $1.077 \times 10^{-4}$ | $8.339 \times 10^{-6}$                 | 2.909 | 0.905                   | 0.00301 | 0.00811  |                            |
| 20                     | 834.4                                    | 500.0                                   | 18.13   | 343.4   | 2688  | 1974  | 0.0952 | 0.01836                                     | $1.022 \times 10^{-4}$ | $8.534 \times 10^{-6}$                 | 2.886 | 0.918                   | 0.00318 | 0.00751  |                            |
| 25                     | 949.7                                    | 492.2                                   | 20.68   | 334.8   | 2742  | 2036  | 0.0928 | 0.01908                                     | $9.702 \times 10^{-5}$ | $8.738 \times 10^{-6}$                 | 2.866 | 0.933                   | 0.00337 | 0.00691  |                            |
| 30                     | 1076                                     | 484.2                                   | 23.53   | 325.8   | 2802  | 2104  | 0.0904 | 0.01982                                     | $9.197 \times 10^{-5}$ | $8.952 \times 10^{-6}$                 | 2.850 | 0.950                   | 0.00358 | 0.00633  |                            |
| 35                     | 1215                                     | 475.8                                   | 26.72   | 316.2   | 2869  | 2179  | 0.0881 | 0.02061                                     | $8.710 \times 10^{-5}$ | $9.178 \times 10^{-6}$                 | 2.837 | 0.971                   | 0.00384 | 0.00575  |                            |
| 40                     | 1366                                     | 467.1                                   | 30.29   | 306.1   | 2943  | 2264  | 0.0857 | 0.02142                                     | $8.240 \times 10^{-5}$ | $9.417 \times 10^{-6}$                 | 2.828 | 0.995                   | 0.00413 | 0.00518  |                            |
| 45                     | 1530                                     | 458.0                                   | 34.29   | 295.3   | 3026  | 2361  | 0.0834 | 0.02228                                     | $7.785 \times 10^{-5}$ | $9.674 \times 10^{-6}$                 | 2.824 | 1.025                   | 0.00448 | 0.00463  |                            |
| 50                     | 1708                                     | 448.5                                   | 38.79   | 283.9   | 3122  | 2473  | 0.0811 | 0.02319                                     | $7.343 \times 10^{-5}$ | $9.950 \times 10^{-6}$                 | 2.826 | 1.061                   | 0.00491 | 0.00408  |                            |
| 60                     | 2110                                     | 427.5                                   | 49.66   | 258.4   | 3283  | 2769  | 0.0765 | 0.02517                                     | $6.487 \times 10^{-5}$ | $1.058 \times 10^{-5}$                 | 2.784 | 1.164                   | 0.00609 | 0.00303  |                            |
| 70                     | 2580                                     | 403.2                                   | 64.02   | 228.0   | 3595  | 3241  | 0.0717 | 0.02746                                     | $5.649 \times 10^{-5}$ | $1.138 \times 10^{-5}$                 | 2.834 | 1.343                   | 0.00811 | 0.00204  |                            |
| 80                     | 3127                                     | 373.0                                   | 84.28   | 189.7   | 4501  | 4173  | 0.0663 | 0.03029                                     | $4.790 \times 10^{-5}$ | $1.249 \times 10^{-5}$                 | 3.251 | 1.722                   | 0.01248 | 0.00114  |                            |
| 90                     | 3769                                     | 329.1                                   | 118.6   | 133.2   | 6977  | 7239  | 0.0595 | 0.03441                                     | $3.807 \times 10^{-5}$ | $1.448 \times 10^{-5}$                 | 4.465 | 3.047                   | 0.02847 | 0.00037  |                            |

Note 1: Kinematic viscosity  $\nu$  and thermal diffusivity  $\alpha$  can be calculated from their definitions,  $\nu = \mu/\rho$  and  $\alpha = k/\mu c_p = \nu/\text{Pr}$ . The properties listed here (except the vapor density) can be used at any pressures with negligible error except at temperatures near the critical-point value.

Note 2: The unit kJ/kg·°C for specific heat is equivalent to kJ/kg·K, and the unit W/m·°C for thermal conductivity is equivalent to W/m·K.

Source: Data generated from the EES software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. Original sources: Reiner Tillner-Roth, "Fundamental Equations of State," Shaker Verlag, Aachen, 1998; B. A. Younglove and J. F. Ely, "Thermophysical Properties of Fluids. II Methane, Ethane, Propane, Isobutane, and Normal Butane," *Journal of Physical Chemistry Reference Data*, 16(4), 1987; G.R. Somayajulu, "A Generalized Equation for Surface Tension from the Triple-Point to the Critical-Point," *International Journal of Thermophysics*, 16(4), 1988.

998  
PROPERTY TABLES AND CHARTS

**TABLE A-19**

Properties of liquids

| Temp.<br><i>T</i> , °C               | Density<br><i>ρ</i> , kg/m <sup>3</sup> | Specific<br>heat<br><i>c<sub>p</sub></i> , J/kg·K | Thermal<br>conductivity<br><i>k</i> , W/m·K | Thermal<br>diffusivity<br><i>α</i> , m <sup>2</sup> /s | Dynamic<br>viscosity<br><i>μ</i> , kg/m·s | Kinematic<br>viscosity<br><i>ν</i> , m <sup>2</sup> /s | Prandtl<br>number<br>Pr | Volume<br>expansion<br>coeff.<br><i>β</i> , 1/K |
|--------------------------------------|---|---|---|--|---|--|-------------------------|---|
| <i>Methane [CH<sub>4</sub>]</i>      |   |   |   |  |   |  |                         |   |
| -160                                 | 420.2                                   | 3492  | 0.1863                                      | $1.270 \times 10^{-7}$                                 | $1.133 \times 10^{-4}$                    | $2.699 \times 10^{-7}$                                 | 2.126                   | 0.00352   |
| -150                                 | 405.0                                   | 3580  | 0.1703                                      | $1.174 \times 10^{-7}$                                 | $9.169 \times 10^{-5}$                    | $2.264 \times 10^{-7}$                                 | 1.927                   | 0.00391   |
| -140                                 | 388.8                                   | 3700  | 0.1550                                      | $1.077 \times 10^{-7}$                                 | $7.551 \times 10^{-5}$                    | $1.942 \times 10^{-7}$                                 | 1.803                   | 0.00444   |
| -130                                 | 371.1                                   | 3875  | 0.1402                                      | $9.749 \times 10^{-8}$                                 | $6.288 \times 10^{-5}$                    | $1.694 \times 10^{-7}$                                 | 1.738                   | 0.00520   |
| -120                                 | 351.4                                   | 4146  | 0.1258                                      | $8.634 \times 10^{-8}$                                 | $5.257 \times 10^{-5}$                    | $1.496 \times 10^{-7}$                                 | 1.732                   | 0.00637   |
| -110                                 | 328.8                                   | 4611  | 0.1115                                      | $7.356 \times 10^{-8}$                                 | $4.377 \times 10^{-5}$                    | $1.331 \times 10^{-7}$                                 | 1.810                   | 0.00841   |
| -100                                 | 301.0                                   | 5578  | 0.0967                                      | $5.761 \times 10^{-8}$                                 | $3.577 \times 10^{-5}$                    | $1.188 \times 10^{-7}$                                 | 2.063                   | 0.01282   |
| -90                                  | 261.7                                   | 8902  | 0.0797                                      | $3.423 \times 10^{-8}$                                 | $2.761 \times 10^{-5}$                    | $1.055 \times 10^{-7}$                                 | 3.082                   | 0.02922   |
| <i>Methanol [CH<sub>3</sub>(OH)]</i> |   |   |   |  |   |  |                         |   |
| 20                                   | 788.4                                   | 2515  | 0.1987                                      | $1.002 \times 10^{-7}$                                 | $5.857 \times 10^{-4}$                    | $7.429 \times 10^{-7}$                                 | 7.414                   | 0.00118   |
| 30                                   | 779.1                                   | 2577  | 0.1980                                      | $9.862 \times 10^{-8}$                                 | $5.088 \times 10^{-4}$                    | $6.531 \times 10^{-7}$                                 | 6.622                   | 0.00120   |
| 40                                   | 769.6                                   | 2644  | 0.1972                                      | $9.690 \times 10^{-8}$                                 | $4.460 \times 10^{-4}$                    | $5.795 \times 10^{-7}$                                 | 5.980                   | 0.00123   |
| 50                                   | 760.1                                   | 2718  | 0.1965                                      | $9.509 \times 10^{-8}$                                 | $3.942 \times 10^{-4}$                    | $5.185 \times 10^{-7}$                                 | 5.453                   | 0.00127   |
| 60                                   | 750.4                                   | 2798  | 0.1957                                      | $9.320 \times 10^{-8}$                                 | $3.510 \times 10^{-4}$                    | $4.677 \times 10^{-7}$                                 | 5.018                   | 0.00132   |
| 70                                   | 740.4                                   | 2885  | 0.1950                                      | $9.128 \times 10^{-8}$                                 | $3.146 \times 10^{-4}$                    | $4.250 \times 10^{-7}$                                 | 4.655                   | 0.00137   |
| <i>Isobutane (R600a)</i>             |   |   |   |  |   |  |                         |   |
| -100                                 | 683.8                                   | 1881  | 0.1383                                      | $1.075 \times 10^{-7}$                                 | $9.305 \times 10^{-4}$                    | $1.360 \times 10^{-6}$                                 | 12.65                   | 0.00142   |
| -75                                  | 659.3                                   | 1970  | 0.1357                                      | $1.044 \times 10^{-7}$                                 | $5.624 \times 10^{-4}$                    | $8.531 \times 10^{-7}$                                 | 8.167                   | 0.00150   |
| -50                                  | 634.3                                   | 2069  | 0.1283                                      | $9.773 \times 10^{-8}$                                 | $3.769 \times 10^{-4}$                    | $5.942 \times 10^{-7}$                                 | 6.079                   | 0.00161   |
| -25                                  | 608.2                                   | 2180  | 0.1181                                      | $8.906 \times 10^{-8}$                                 | $2.688 \times 10^{-4}$                    | $4.420 \times 10^{-7}$                                 | 4.963                   | 0.00177   |
| 0                                    | 580.6                                   | 2306  | 0.1068                                      | $7.974 \times 10^{-8}$                                 | $1.993 \times 10^{-4}$                    | $3.432 \times 10^{-7}$                                 | 4.304                   | 0.00199   |
| 25                                   | 550.7                                   | 2455  | 0.0956                                      | $7.069 \times 10^{-8}$                                 | $1.510 \times 10^{-4}$                    | $2.743 \times 10^{-7}$                                 | 3.880                   | 0.00232   |
| 50                                   | 517.3                                   | 2640  | 0.0851                                      | $6.233 \times 10^{-8}$                                 | $1.155 \times 10^{-4}$                    | $2.233 \times 10^{-7}$                                 | 3.582                   | 0.00286   |
| 75                                   | 478.5                                   | 2896  | 0.0757                                      | $5.460 \times 10^{-8}$                                 | $8.785 \times 10^{-5}$                    | $1.836 \times 10^{-7}$                                 | 3.363                   | 0.00385   |
| 100                                  | 429.6                                   | 3361  | 0.0669                                      | $4.634 \times 10^{-8}$                                 | $6.483 \times 10^{-5}$                    | $1.509 \times 10^{-7}$                                 | 3.256                   | 0.00628   |
| <i>Glycerin</i>                      |   |   |   |  |   |  |                         |   |
| 0                                    | 1276                                    | 2262  | 0.2820                                      | $9.773 \times 10^{-8}$                                 | 10.49                                     | $8.219 \times 10^{-3}$                                 | 84,101                  |   |
| 5                                    | 1273                                    | 2288  | 0.2835                                      | $9.732 \times 10^{-8}$                                 | 6.730                                     | $5.287 \times 10^{-3}$                                 | 54,327                  |   |
| 10                                   | 1270                                    | 2320  | 0.2846                                      | $9.662 \times 10^{-8}$                                 | 4.241                                     | $3.339 \times 10^{-3}$                                 | 34,561                  |   |
| 15                                   | 1267                                    | 2354  | 0.2856                                      | $9.576 \times 10^{-8}$                                 | 2.496                                     | $1.970 \times 10^{-3}$                                 | 20,570                  |   |
| 20                                   | 1264                                    | 2386  | 0.2860                                      | $9.484 \times 10^{-8}$                                 | 1.519                                     | $1.201 \times 10^{-3}$                                 | 12,671                  |   |
| 25                                   | 1261                                    | 2416  | 0.2860                                      | $9.388 \times 10^{-8}$                                 | 0.9934                                    | $7.878 \times 10^{-4}$                                 | 8,392                   |   |
| 30                                   | 1258                                    | 2447  | 0.2860                                      | $9.291 \times 10^{-8}$                                 | 0.6582                                    | $5.232 \times 10^{-4}$                                 | 5,631                   |   |
| 35                                   | 1255                                    | 2478  | 0.2860                                      | $9.195 \times 10^{-8}$                                 | 0.4347                                    | $3.464 \times 10^{-4}$                                 | 3,767                   |   |
| 40                                   | 1252                                    | 2513  | 0.2863                                      | $9.101 \times 10^{-8}$                                 | 0.3073                                    | $2.455 \times 10^{-4}$                                 | 2,697                   |   |
| <i>Engine Oil (unused)</i>           |   |   |   |  |   |  |                         |   |
| 0                                    | 899.0                                   | 1797  | 0.1469                                      | $9.097 \times 10^{-8}$                                 | 3.814                                     | $4.242 \times 10^{-3}$                                 | 46,636                  | 0.00070   |
| 20                                   | 888.1                                   | 1881  | 0.1450                                      | $8.680 \times 10^{-8}$                                 | 0.8374                                    | $9.429 \times 10^{-4}$                                 | 10,863                  | 0.00070   |
| 40                                   | 876.0                                   | 1964  | 0.1444                                      | $8.391 \times 10^{-8}$                                 | 0.2177                                    | $2.485 \times 10^{-4}$                                 | 2,962                   | 0.00070   |
| 60                                   | 863.9                                   | 2048  | 0.1404                                      | $7.934 \times 10^{-8}$                                 | 0.07399                                   | $8.565 \times 10^{-5}$                                 | 1,080                   | 0.00070   |
| 80                                   | 852.0                                   | 2132  | 0.1380                                      | $7.599 \times 10^{-8}$                                 | 0.03232                                   | $3.794 \times 10^{-5}$                                 | 499.3                   | 0.00070   |
| 100                                  | 840.0                                   | 2220  | 0.1367                                      | $7.330 \times 10^{-8}$                                 | 0.01718                                   | $2.046 \times 10^{-5}$                                 | 279.1                   | 0.00070   |
| 120                                  | 828.9                                   | 2308  | 0.1347                                      | $7.042 \times 10^{-8}$                                 | 0.01029                                   | $1.241 \times 10^{-5}$                                 | 176.3                   | 0.00070   |
| 140                                  | 816.8                                   | 2395  | 0.1330                                      | $6.798 \times 10^{-8}$                                 | 0.006558                                  | $8.029 \times 10^{-6}$                                 | 118.1                   | 0.00070   |
| 150                                  | 810.3                                   | 2441  | 0.1327                                      | $6.708 \times 10^{-8}$                                 | 0.005344                                  | $6.595 \times 10^{-6}$                                 | 98.31                   | 0.00070   |

Source: Data generated from the EES software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. Originally based on various sources.

**TABLE A-20**

Properties of liquid metals

| Temp.<br><i>T</i> , °C                                    | Density<br><i>ρ</i> , kg/m <sup>3</sup> | Specific<br>heat<br><i>c<sub>p</sub></i> , J/kg·K | Thermal<br>conductivity<br><i>k</i> , W/m·K | Thermal<br>diffusivity<br><i>α</i> , m <sup>2</sup> /s | Dynamic<br>viscosity<br><i>μ</i> , kg/m·s | Kinematic<br>viscosity<br><i>ν</i> , m <sup>2</sup> /s | Prandtl<br>number<br>Pr | Volume<br>expansion<br>coeff.<br><i>β</i> , 1/K |
|---|---|---|---|--|---|--|-------------------------|---|
| <i>Mercury (Hg) Melting Point: -39°C</i>                  |   |   |   |  |   |  |                         |   |
| 0   | 13595                                   | 140.4   | 8.18200                                     | $4.287 \times 10^{-6}$                                 | $1.687 \times 10^{-3}$                    | $1.241 \times 10^{-7}$                                 | 0.0289                  | $1.810 \times 10^{-4}$                          |
| 25  | 13534                                   | 139.4   | 8.51533                                     | $4.514 \times 10^{-6}$                                 | $1.534 \times 10^{-3}$                    | $1.133 \times 10^{-7}$                                 | 0.0251                  | $1.810 \times 10^{-4}$                          |
| 50  | 13473                                   | 138.6   | 8.83632                                     | $4.734 \times 10^{-6}$                                 | $1.423 \times 10^{-3}$                    | $1.056 \times 10^{-7}$                                 | 0.0223                  | $1.810 \times 10^{-4}$                          |
| 75  | 13412                                   | 137.8   | 9.15632                                     | $4.956 \times 10^{-6}$                                 | $1.316 \times 10^{-3}$                    | $9.819 \times 10^{-8}$                                 | 0.0198                  | $1.810 \times 10^{-4}$                          |
| 100   | 13351                                   | 137.1   | 9.46706                                     | $5.170 \times 10^{-6}$                                 | $1.245 \times 10^{-3}$                    | $9.326 \times 10^{-8}$                                 | 0.0180                  | $1.810 \times 10^{-4}$                          |
| 150   | 13231                                   | 136.1   | 10.07780                                    | $5.595 \times 10^{-6}$                                 | $1.126 \times 10^{-3}$                    | $8.514 \times 10^{-8}$                                 | 0.0152                  | $1.810 \times 10^{-4}$                          |
| 200   | 13112                                   | 135.5   | 10.65465                                    | $5.996 \times 10^{-6}$                                 | $1.043 \times 10^{-3}$                    | $7.959 \times 10^{-8}$                                 | 0.0133                  | $1.815 \times 10^{-4}$                          |
| 250   | 12993                                   | 135.3   | 11.18150                                    | $6.363 \times 10^{-6}$                                 | $9.820 \times 10^{-4}$                    | $7.558 \times 10^{-8}$                                 | 0.0119                  | $1.829 \times 10^{-4}$                          |
| 300   | 12873                                   | 135.3   | 11.68150                                    | $6.705 \times 10^{-6}$                                 | $9.336 \times 10^{-4}$                    | $7.252 \times 10^{-8}$                                 | 0.0108                  | $1.854 \times 10^{-4}$                          |
| <i>Bismuth (Bi) Melting Point: 271°C</i>                  |   |   |   |  |   |  |                         |   |
| 350   | 9969                                    | 146.0   | 16.28                                       | $1.118 \times 10^{-5}$                                 | $1.540 \times 10^{-3}$                    | $1.545 \times 10^{-7}$                                 | 0.01381                 |   |
| 400   | 9908                                    | 148.2   | 16.10                                       | $1.096 \times 10^{-5}$                                 | $1.422 \times 10^{-3}$                    | $1.436 \times 10^{-7}$                                 | 0.01310                 |   |
| 500   | 9785                                    | 152.8   | 15.74                                       | $1.052 \times 10^{-5}$                                 | $1.188 \times 10^{-3}$                    | $1.215 \times 10^{-7}$                                 | 0.01154                 |   |
| 600   | 9663                                    | 157.3   | 15.60                                       | $1.026 \times 10^{-5}$                                 | $1.013 \times 10^{-3}$                    | $1.048 \times 10^{-7}$                                 | 0.01022                 |   |
| 700   | 9540                                    | 161.8   | 15.60                                       | $1.010 \times 10^{-5}$                                 | $8.736 \times 10^{-4}$                    | $9.157 \times 10^{-8}$                                 | 0.00906                 |   |
| <i>Lead (Pb) Melting Point: 327°C</i>                     |   |   |   |  |   |  |                         |   |
| 400   | 10506                                   | 158   | 15.97                                       | $9.623 \times 10^{-6}$                                 | $2.277 \times 10^{-3}$                    | $2.167 \times 10^{-7}$                                 | 0.02252                 |   |
| 450   | 10449                                   | 156   | 15.74                                       | $9.649 \times 10^{-6}$                                 | $2.065 \times 10^{-3}$                    | $1.976 \times 10^{-7}$                                 | 0.02048                 |   |
| 500   | 10390                                   | 155   | 15.54                                       | $9.651 \times 10^{-6}$                                 | $1.884 \times 10^{-3}$                    | $1.814 \times 10^{-7}$                                 | 0.01879                 |   |
| 550   | 10329                                   | 155   | 15.39                                       | $9.610 \times 10^{-6}$                                 | $1.758 \times 10^{-3}$                    | $1.702 \times 10^{-7}$                                 | 0.01771                 |   |
| 600   | 10267                                   | 155   | 15.23                                       | $9.568 \times 10^{-6}$                                 | $1.632 \times 10^{-3}$                    | $1.589 \times 10^{-7}$                                 | 0.01661                 |   |
| 650   | 10206                                   | 155   | 15.07                                       | $9.526 \times 10^{-6}$                                 | $1.505 \times 10^{-3}$                    | $1.475 \times 10^{-7}$                                 | 0.01549                 |   |
| 700   | 10145                                   | 155   | 14.91                                       | $9.483 \times 10^{-6}$                                 | $1.379 \times 10^{-3}$                    | $1.360 \times 10^{-7}$                                 | 0.01434                 |   |
| <i>Sodium (Na) Melting Point: 98°C</i>                    |   |   |   |  |   |  |                         |   |
| 100   | 927.3                                   | 1378  | 85.84                                       | $6.718 \times 10^{-5}$                                 | $6.892 \times 10^{-4}$                    | $7.432 \times 10^{-7}$                                 | 0.01106                 |   |
| 200   | 902.5                                   | 1349  | 80.84                                       | $6.639 \times 10^{-5}$                                 | $5.385 \times 10^{-4}$                    | $5.967 \times 10^{-7}$                                 | 0.008987                |   |
| 300   | 877.8                                   | 1320  | 75.84                                       | $6.544 \times 10^{-5}$                                 | $3.878 \times 10^{-4}$                    | $4.418 \times 10^{-7}$                                 | 0.006751                |   |
| 400   | 853.0                                   | 1296  | 71.20                                       | $6.437 \times 10^{-5}$                                 | $2.720 \times 10^{-4}$                    | $3.188 \times 10^{-7}$                                 | 0.004953                |   |
| 500   | 828.5                                   | 1284  | 67.41                                       | $6.335 \times 10^{-5}$                                 | $2.411 \times 10^{-4}$                    | $2.909 \times 10^{-7}$                                 | 0.004593                |   |
| 600   | 804.0                                   | 1272  | 63.63                                       | $6.220 \times 10^{-5}$                                 | $2.101 \times 10^{-4}$                    | $2.614 \times 10^{-7}$                                 | 0.004202                |   |
| <i>Potassium (K) Melting Point: 64°C</i>                  |   |   |   |  |   |  |                         |   |
| 200   | 795.2                                   | 790.8   | 43.99                                       | $6.995 \times 10^{-5}$                                 | $3.350 \times 10^{-4}$                    | $4.213 \times 10^{-7}$                                 | 0.006023                |   |
| 300   | 771.6                                   | 772.8   | 42.01                                       | $7.045 \times 10^{-5}$                                 | $2.667 \times 10^{-4}$                    | $3.456 \times 10^{-7}$                                 | 0.004906                |   |
| 400   | 748.0                                   | 754.8   | 40.03                                       | $7.090 \times 10^{-5}$                                 | $1.984 \times 10^{-4}$                    | $2.652 \times 10^{-7}$                                 | 0.00374                 |   |
| 500   | 723.9                                   | 750.0   | 37.81                                       | $6.964 \times 10^{-5}$                                 | $1.668 \times 10^{-4}$                    | $2.304 \times 10^{-7}$                                 | 0.003309                |   |
| 600   | 699.6                                   | 750.0   | 35.50                                       | $6.765 \times 10^{-5}$                                 | $1.487 \times 10^{-4}$                    | $2.126 \times 10^{-7}$                                 | 0.003143                |   |
| <i>Sodium-Potassium (%22Na-%78K) Melting Point: -11°C</i> |   |   |   |  |   |  |                         |   |
| 100   | 847.3                                   | 944.4   | 25.64                                       | $3.205 \times 10^{-5}$                                 | $5.707 \times 10^{-4}$                    | $6.736 \times 10^{-7}$                                 | 0.02102                 |   |
| 200   | 823.2                                   | 922.5   | 26.27                                       | $3.459 \times 10^{-5}$                                 | $4.587 \times 10^{-4}$                    | $5.572 \times 10^{-7}$                                 | 0.01611                 |   |
| 300   | 799.1                                   | 900.6   | 26.89                                       | $3.736 \times 10^{-5}$                                 | $3.467 \times 10^{-4}$                    | $4.339 \times 10^{-7}$                                 | 0.01161                 |   |
| 400   | 775.0                                   | 879.0   | 27.50                                       | $4.037 \times 10^{-5}$                                 | $2.357 \times 10^{-4}$                    | $3.041 \times 10^{-7}$                                 | 0.00753                 |   |
| 500   | 751.5                                   | 880.1   | 27.89                                       | $4.217 \times 10^{-5}$                                 | $2.108 \times 10^{-4}$                    | $2.805 \times 10^{-7}$                                 | 0.00665                 |   |
| 600   | 728.0                                   | 881.2   | 28.28                                       | $4.408 \times 10^{-5}$                                 | $1.859 \times 10^{-4}$                    | $2.553 \times 10^{-7}$                                 | 0.00579                 |   |

Source: Data generated from the EES software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. Originally based on various sources.

**TABLE A-21**

Ideal-gas properties of air (*Continued*)

| <i>T</i><br>K | <i>h</i><br>kJ/kg | <i>P<sub>r</sub></i> | <i>u</i><br>kJ/kg | <i>v<sub>r</sub></i> | <i>s°</i><br>kJ/kg·K | <i>T</i><br>K | <i>h</i><br>kJ/kg | <i>P<sub>r</sub></i> | <i>u</i><br>kJ/kg | <i>v<sub>r</sub></i> | <i>s°</i><br>kJ/kg·K |
|---------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| 200           | 199.97            | 0.3363               | 142.56            | 1707.0               | 1.29559              | 580           | 586.04            | 14.38                | 419.55            | 115.7                | 2.37348              |
| 210           | 209.97            | 0.3987               | 149.69            | 1512.0               | 1.34444              | 590           | 596.52            | 15.31                | 427.15            | 110.6                | 2.39140              |
| 220           | 219.97            | 0.4690               | 156.82            | 1346.0               | 1.39105              | 600           | 607.02            | 16.28                | 434.78            | 105.8                | 2.40902              |
| 230           | 230.02            | 0.5477               | 164.00            | 1205.0               | 1.43557              | 610           | 617.53            | 17.30                | 442.42            | 101.2                | 2.42644              |
| 240           | 240.02            | 0.6355               | 171.13            | 1084.0               | 1.47824              | 620           | 628.07            | 18.36                | 450.09            | 96.92                | 2.44356              |
| 250           | 250.05            | 0.7329               | 178.28            | 979.0                | 1.51917              | 630           | 638.63            | 19.84                | 457.78            | 92.84                | 2.46048              |
| 260           | 260.09            | 0.8405               | 185.45            | 887.8                | 1.55848              | 640           | 649.22            | 20.64                | 465.50            | 88.99                | 2.47716              |
| 270           | 270.11            | 0.9590               | 192.60            | 808.0                | 1.59634              | 650           | 659.84            | 21.86                | 473.25            | 85.34                | 2.49364              |
| 280           | 280.13            | 1.0889               | 199.75            | 738.0                | 1.63279              | 660           | 670.47            | 23.13                | 481.01            | 81.89                | 2.50985              |
| 285           | 285.14            | 1.1584               | 203.33            | 706.1                | 1.65055              | 670           | 681.14            | 24.46                | 488.81            | 78.61                | 2.52589              |
| 290           | 290.16            | 1.2311               | 206.91            | 676.1                | 1.66802              | 680           | 691.82            | 25.85                | 496.62            | 75.50                | 2.54175              |
| 295           | 295.17            | 1.3068               | 210.49            | 647.9                | 1.68515              | 690           | 702.52            | 27.29                | 504.45            | 72.56                | 2.55731              |
| 298           | 298.18            | 1.3543               | 212.64            | 631.9                | 1.69528              | 700           | 713.27            | 28.80                | 512.33            | 69.76                | 2.57277              |
| 300           | 300.19            | 1.3860               | 214.07            | 621.2                | 1.70203              | 710           | 724.04            | 30.38                | 520.23            | 67.07                | 2.58810              |
| 305           | 305.22            | 1.4686               | 217.67            | 596.0                | 1.71865              | 720           | 734.82            | 32.02                | 528.14            | 64.53                | 2.60319              |
| 310           | 310.24            | 1.5546               | 221.25            | 572.3                | 1.73498              | 730           | 745.62            | 33.72                | 536.07            | 62.13                | 2.61803              |
| 315           | 315.27            | 1.6442               | 224.85            | 549.8                | 1.75106              | 740           | 756.44            | 35.50                | 544.02            | 59.82                | 2.63280              |
| 320           | 320.29            | 1.7375               | 228.42            | 528.6                | 1.76690              | 750           | 767.29            | 37.35                | 551.99            | 57.63                | 2.64737              |
| 325           | 325.31            | 1.8345               | 232.02            | 508.4                | 1.78249              | 760           | 778.18            | 39.27                | 560.01            | 55.54                | 2.66176              |
| 330           | 330.34            | 1.9352               | 235.61            | 489.4                | 1.79783              | 780           | 800.03            | 43.35                | 576.12            | 51.64                | 2.69013              |
| 340           | 340.42            | 2.149                | 242.82            | 454.1                | 1.82790              | 800           | 821.95            | 47.75                | 592.30            | 48.08                | 2.71787              |
| 350           | 350.49            | 2.379                | 250.02            | 422.2                | 1.85708              | 820           | 843.98            | 52.59                | 608.59            | 44.84                | 2.74504              |
| 360           | 360.58            | 2.626                | 257.24            | 393.4                | 1.88543              | 840           | 866.08            | 57.60                | 624.95            | 41.85                | 2.77170              |
| 370           | 370.67            | 2.892                | 264.46            | 367.2                | 1.91313              | 860           | 888.27            | 63.09                | 641.40            | 39.12                | 2.79783              |
| 380           | 380.77            | 3.176                | 271.69            | 343.4                | 1.94001              | 880           | 910.56            | 68.98                | 657.95            | 36.61                | 2.82344              |
| 390           | 390.88            | 3.481                | 278.93            | 321.5                | 1.96633              | 900           | 932.93            | 75.29                | 674.58            | 34.31                | 2.84856              |
| 400           | 400.98            | 3.806                | 286.16            | 301.6                | 1.99194              | 920           | 955.38            | 82.05                | 691.28            | 32.18                | 2.87324              |
| 410           | 411.12            | 4.153                | 293.43            | 283.3                | 2.01699              | 940           | 977.92            | 89.28                | 708.08            | 30.22                | 2.89748              |
| 420           | 421.26            | 4.522                | 300.69            | 266.6                | 2.04142              | 960           | 1000.55           | 97.00                | 725.02            | 28.40                | 2.92128              |
| 430           | 431.43            | 4.915                | 307.99            | 251.1                | 2.06533              | 980           | 1023.25           | 105.2                | 741.98            | 26.73                | 2.94468              |
| 440           | 441.61            | 5.332                | 315.30            | 236.8                | 2.08870              | 1000          | 1046.04           | 114.0                | 758.94            | 25.17                | 2.96770              |
| 450           | 451.80            | 5.775                | 322.62            | 223.6                | 2.11161              | 1020          | 1068.89           | 123.4                | 776.10            | 23.72                | 2.99034              |
| 460           | 462.02            | 6.245                | 329.97            | 211.4                | 2.13407              | 1040          | 1091.85           | 133.3                | 793.36            | 23.29                | 3.01260              |
| 470           | 472.24            | 6.742                | 337.32            | 200.1                | 2.15604              | 1060          | 1114.86           | 143.9                | 810.62            | 21.14                | 3.03449              |
| 480           | 482.49            | 7.268                | 344.70            | 189.5                | 2.17760              | 1080          | 1137.89           | 155.2                | 827.88            | 19.98                | 3.05608              |
| 490           | 492.74            | 7.824                | 352.08            | 179.7                | 2.19876              | 1100          | 1161.07           | 167.1                | 845.33            | 18.896               | 3.07732              |
| 500           | 503.02            | 8.411                | 359.49            | 170.6                | 2.21952              | 1120          | 1184.28           | 179.7                | 862.79            | 17.886               | 3.09825              |
| 510           | 513.32            | 9.031                | 366.92            | 162.1                | 2.23993              | 1140          | 1207.57           | 193.1                | 880.35            | 16.946               | 3.11883              |
| 520           | 523.63            | 9.684                | 374.36            | 154.1                | 2.25997              | 1160          | 1230.92           | 207.2                | 897.91            | 16.064               | 3.13916              |
| 530           | 533.98            | 10.37                | 381.84            | 146.7                | 2.27967              | 1180          | 1254.34           | 222.2                | 915.57            | 15.241               | 3.15916              |
| 540           | 544.35            | 11.10                | 389.34            | 139.7                | 2.29906              | 1200          | 1277.79           | 238.0                | 933.33            | 14.470               | 3.17888              |
| 550           | 555.74            | 11.86                | 396.86            | 133.1                | 2.31809              | 1220          | 1301.31           | 254.7                | 951.09            | 13.747               | 3.19834              |
| 560           | 565.17            | 12.66                | 404.42            | 127.0                | 2.33685              | 1240          | 1324.93           | 272.3                | 968.95            | 13.069               | 3.21751              |
| 570           | 575.59            | 13.50                | 411.97            | 121.2                | 2.35531              |               |                   |                      |                   |                      |                      |

**TABLE A-21**Ideal-gas properties of air (*Concluded*)

| <i>T</i><br>K | <i>h</i><br>kJ/kg | <i>P<sub>r</sub></i> | <i>u</i><br>kJ/kg | <i>v<sub>r</sub></i> | <i>s<sup>o</sup></i><br>kJ/kg·K | <i>T</i><br>K | <i>h</i><br>kJ/kg | <i>P<sub>r</sub></i> | <i>u</i><br>kJ/kg | <i>v<sub>r</sub></i> | <i>s<sup>o</sup></i><br>kJ/kg·K |
|---------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|---------------------------------|---------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|---------------------------------|
| 1260          | 1348.55           | 290.8                | 986.90            | 12.435               | 3.23638                         | 1600          | 1757.57           | 791.2                | 1298.30           | 5.804                | 3.52364                         |
| 1280          | 1372.24           | 310.4                | 1004.76           | 11.835               | 3.25510                         | 1620          | 1782.00           | 834.1                | 1316.96           | 5.574                | 3.53879                         |
| 1300          | 1395.97           | 330.9                | 1022.82           | 11.275               | 3.27345                         | 1640          | 1806.46           | 878.9                | 1335.72           | 5.355                | 3.55381                         |
| 1320          | 1419.76           | 352.5                | 1040.88           | 10.747               | 3.29160                         | 1660          | 1830.96           | 925.6                | 1354.48           | 5.147                | 3.56867                         |
| 1340          | 1443.60           | 375.3                | 1058.94           | 10.247               | 3.30959                         | 1680          | 1855.50           | 974.2                | 1373.24           | 4.949                | 3.58335                         |
| 1360          | 1467.49           | 399.1                | 1077.10           | 9.780                | 3.32724                         | 1700          | 1880.1            | 1025                 | 1392.7            | 4.761                | 3.5979                          |
| 1380          | 1491.44           | 424.2                | 1095.26           | 9.337                | 3.34474                         | 1750          | 1941.6            | 1161                 | 1439.8            | 4.328                | 3.6336                          |
| 1400          | 1515.42           | 450.5                | 1113.52           | 8.919                | 3.36200                         | 1800          | 2003.3            | 1310                 | 1487.2            | 3.994                | 3.6684                          |
| 1420          | 1539.44           | 478.0                | 1131.77           | 8.526                | 3.37901                         | 1850          | 2065.3            | 1475                 | 1534.9            | 3.601                | 3.7023                          |
| 1440          | 1563.51           | 506.9                | 1150.13           | 8.153                | 3.39586                         | 1900          | 2127.4            | 1655                 | 1582.6            | 3.295                | 3.7354                          |
| 1460          | 1587.63           | 537.1                | 1168.49           | 7.801                | 3.41247                         | 1950          | 2189.7            | 1852                 | 1630.6            | 3.022                | 3.7677                          |
| 1480          | 1611.79           | 568.8                | 1186.95           | 7.468                | 3.42892                         | 2000          | 2252.1            | 2068                 | 1678.7            | 2.776                | 3.7994                          |
| 1500          | 1635.97           | 601.9                | 1205.41           | 7.152                | 3.44516                         | 2050          | 2314.6            | 2303                 | 1726.8            | 2.555                | 3.8303                          |
| 1520          | 1660.23           | 636.5                | 1223.87           | 6.854                | 3.46120                         | 2100          | 2377.7            | 2559                 | 1775.3            | 2.356                | 3.8605                          |
| 1540          | 1684.51           | 672.8                | 1242.43           | 6.569                | 3.47712                         | 2150          | 2440.3            | 2837                 | 1823.8            | 2.175                | 3.8901                          |
| 1560          | 1708.82           | 710.5                | 1260.99           | 6.301                | 3.49276                         | 2200          | 2503.2            | 3138                 | 1872.4            | 2.012                | 3.9191                          |
| 1580          | 1733.17           | 750.0                | 1279.65           | 6.046                | 3.50829                         | 2250          | 2566.4            | 3464                 | 1921.3            | 1.864                | 3.9474                          |

Note: The properties  $P_r$  (relative pressure) and  $v_r$  (relative specific volume) are dimensionless quantities used in the analysis of isentropic processes and should not be confused with the properties pressure and specific volume.

Source of Data: Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1983, pp. 785–786, Table A-5. Originally published in J. H. Keenan and J. Kaye, *Gas Tables*. New York: John Wiley & Sons, 1948.

**1002**  
**PROPERTY TABLES AND CHARTS**

**TABLE A-22**

Properties of air at 1 atm pressure

| Temp.<br><i>T</i> , °C | Density<br><i>ρ</i> , kg/m <sup>3</sup> | Specific<br>heat<br><i>c<sub>p</sub></i> , J/kg·K | Thermal<br>conductivity<br><i>k</i> , W/m·K | Thermal<br>diffusivity<br><i>α</i> , m <sup>2</sup> /s | Dynamic<br>viscosity<br><i>μ</i> , kg/m·s | Kinematic<br>viscosity<br><i>ν</i> , m <sup>2</sup> /s | Prandtl<br>number<br><i>Pr</i> |
|------------------------|---|---|---|--|---|--|--------------------------------|
| -150                   | 2.866                                   | 983   | 0.01171                                     | 4.158 × 10 <sup>-6</sup>                               | 8.636 × 10 <sup>-6</sup>                  | 3.013 × 10 <sup>-6</sup>                               | 0.7246                         |
| -100                   | 2.038                                   | 966   | 0.01582                                     | 8.036 × 10 <sup>-6</sup>                               | 1.189 × 10 <sup>-5</sup>                  | 5.837 × 10 <sup>-6</sup>                               | 0.7263                         |
| -50                    | 1.582                                   | 999   | 0.01979                                     | 1.252 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.474 × 10 <sup>-5</sup>                  | 9.319 × 10 <sup>-6</sup>                               | 0.7440                         |
| -40                    | 1.514                                   | 1002  | 0.02057                                     | 1.356 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.527 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.008 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7436                         |
| -30                    | 1.451                                   | 1004  | 0.02134                                     | 1.465 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.579 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.087 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7425                         |
| -20                    | 1.394                                   | 1005  | 0.02211                                     | 1.578 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.630 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.169 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7408                         |
| -10                    | 1.341                                   | 1006  | 0.02288                                     | 1.696 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.680 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.252 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7387                         |
| 0                      | 1.292                                   | 1006  | 0.02364                                     | 1.818 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.729 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.338 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7362                         |
| 5                      | 1.269                                   | 1006  | 0.02401                                     | 1.880 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.754 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.382 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7350                         |
| 10                     | 1.246                                   | 1006  | 0.02439                                     | 1.944 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.778 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.426 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7336                         |
| 15                     | 1.225                                   | 1007  | 0.02476                                     | 2.009 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.802 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.470 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7323                         |
| 20                     | 1.204                                   | 1007  | 0.02514                                     | 2.074 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.825 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.516 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7309                         |
| 25                     | 1.184                                   | 1007  | 0.02551                                     | 2.141 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.849 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.562 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7296                         |
| 30                     | 1.164                                   | 1007  | 0.02588                                     | 2.208 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.872 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.608 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7282                         |
| 35                     | 1.145                                   | 1007  | 0.02625                                     | 2.277 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.895 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.655 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7268                         |
| 40                     | 1.127                                   | 1007  | 0.02662                                     | 2.346 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.918 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.702 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7255                         |
| 45                     | 1.109                                   | 1007  | 0.02699                                     | 2.416 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.941 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.750 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7241                         |
| 50                     | 1.092                                   | 1007  | 0.02735                                     | 2.487 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.963 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.798 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7228                         |
| 60                     | 1.059                                   | 1007  | 0.02808                                     | 2.632 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.008 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.896 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7202                         |
| 70                     | 1.028                                   | 1007  | 0.02881                                     | 2.780 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.052 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.995 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7177                         |
| 80                     | 0.9994                                  | 1008  | 0.02953                                     | 2.931 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.096 × 10 <sup>-5</sup>                  | 2.097 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7154                         |
| 90                     | 0.9718                                  | 1008  | 0.03024                                     | 3.086 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.139 × 10 <sup>-5</sup>                  | 2.201 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7132                         |
| 100                    | 0.9458                                  | 1009  | 0.03095                                     | 3.243 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.181 × 10 <sup>-5</sup>                  | 2.306 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7111                         |
| 120                    | 0.8977                                  | 1011  | 0.03235                                     | 3.565 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.264 × 10 <sup>-5</sup>                  | 2.522 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7073                         |
| 140                    | 0.8542                                  | 1013  | 0.03374                                     | 3.898 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.345 × 10 <sup>-5</sup>                  | 2.745 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7041                         |
| 160                    | 0.8148                                  | 1016  | 0.03511                                     | 4.241 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.420 × 10 <sup>-5</sup>                  | 2.975 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7014                         |
| 180                    | 0.7788                                  | 1019  | 0.03646                                     | 4.593 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.504 × 10 <sup>-5</sup>                  | 3.212 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.6992                         |
| 200                    | 0.7459                                  | 1023  | 0.03779                                     | 4.954 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.577 × 10 <sup>-5</sup>                  | 3.455 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.6974                         |
| 250                    | 0.6746                                  | 1033  | 0.04104                                     | 5.890 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.760 × 10 <sup>-5</sup>                  | 4.091 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.6946                         |
| 300                    | 0.6158                                  | 1044  | 0.04418                                     | 6.871 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.934 × 10 <sup>-5</sup>                  | 4.765 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.6935                         |
| 350                    | 0.5664                                  | 1056  | 0.04721                                     | 7.892 × 10 <sup>-5</sup>                               | 3.101 × 10 <sup>-5</sup>                  | 5.475 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.6937                         |
| 400                    | 0.5243                                  | 1069  | 0.05015                                     | 8.951 × 10 <sup>-5</sup>                               | 3.261 × 10 <sup>-5</sup>                  | 6.219 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.6948                         |
| 450                    | 0.4880                                  | 1081  | 0.05298                                     | 1.004 × 10 <sup>-4</sup>                               | 3.415 × 10 <sup>-5</sup>                  | 6.997 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.6965                         |
| 500                    | 0.4565                                  | 1093  | 0.05572                                     | 1.117 × 10 <sup>-4</sup>                               | 3.563 × 10 <sup>-5</sup>                  | 7.806 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.6986                         |
| 600                    | 0.4042                                  | 1115  | 0.06093                                     | 1.352 × 10 <sup>-4</sup>                               | 3.846 × 10 <sup>-5</sup>                  | 9.515 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7037                         |
| 700                    | 0.3627                                  | 1135  | 0.06581                                     | 1.598 × 10 <sup>-4</sup>                               | 4.111 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.133 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.7092                         |
| 800                    | 0.3289                                  | 1153  | 0.07037                                     | 1.855 × 10 <sup>-4</sup>                               | 4.362 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.326 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.7149                         |
| 900                    | 0.3008                                  | 1169  | 0.07465                                     | 2.122 × 10 <sup>-4</sup>                               | 4.600 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.529 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.7206                         |
| 1000                   | 0.2772                                  | 1184  | 0.07868                                     | 2.398 × 10 <sup>-4</sup>                               | 4.826 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.741 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.7260                         |
| 1500                   | 0.1990                                  | 1234  | 0.09599                                     | 3.908 × 10 <sup>-4</sup>                               | 5.817 × 10 <sup>-5</sup>                  | 2.922 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.7478                         |
| 2000                   | 0.1553                                  | 1264  | 0.11113                                     | 5.664 × 10 <sup>-4</sup>                               | 6.630 × 10 <sup>-5</sup>                  | 4.270 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.7539                         |

*Note:* For ideal gases, the properties  $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$ , and  $Pr$  are independent of pressure. The properties  $\rho$ ,  $\nu$ , and  $\alpha$  at a pressure  $P$  (in atm) other than 1 atm are determined by multiplying the values of  $\rho$  at the given temperature by  $P$  and by dividing  $\nu$  and  $\alpha$  by  $P$ .

*Sources:* Data generated from the EES software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. Original sources: Keenan, Chao, Keyes, *Gas Tables*, Wiley, 1984; *Thermophysical Properties of Matter. Vol. 3: Thermal Conductivity*, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, *Vol. 11: Viscosity*, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, and P. Hestermanns, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

**TABLE A-23**Properties of gases at 1 atm pressure (*Continued*)

| Temp.<br><i>T</i> , °C                | Density<br><i>ρ</i> , kg/m <sup>3</sup> | Specific<br>heat<br><i>c<sub>p</sub></i> , J/kg·K | Thermal<br>conductivity<br><i>k</i> , W/m·K | Thermal<br>diffusivity<br><i>α</i> , m <sup>2</sup> /s | Dynamic<br>viscosity<br><i>μ</i> , kg/m·s | Kinematic<br>viscosity<br><i>ν</i> , m <sup>2</sup> /s | Prandtl<br>number<br>Pr |
|---------------------------------------|---|---|---|--|---|--|-------------------------|
| <i>Carbon Dioxide, CO<sub>2</sub></i> |   |   |   |  |   |  |                         |
| -50                                   | 2.4035                                  | 746   | 0.01051                                     | 5.860 × 10 <sup>-6</sup>                               | 1.129 × 10 <sup>-5</sup>                  | 4.699 × 10 <sup>-6</sup>                               | 0.8019                  |
| 0                                     | 1.9635                                  | 811   | 0.01456                                     | 9.141 × 10 <sup>-6</sup>                               | 1.375 × 10 <sup>-5</sup>                  | 7.003 × 10 <sup>-6</sup>                               | 0.7661                  |
| 50                                    | 1.6597                                  | 866.6   | 0.01858                                     | 1.291 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.612 × 10 <sup>-5</sup>                  | 9.714 × 10 <sup>-6</sup>                               | 0.7520                  |
| 100                                   | 1.4373                                  | 914.8   | 0.02257                                     | 1.716 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.841 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.281 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7464                  |
| 150                                   | 1.2675                                  | 957.4   | 0.02652                                     | 2.186 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.063 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.627 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7445                  |
| 200                                   | 1.1336                                  | 995.2   | 0.03044                                     | 2.698 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.276 × 10 <sup>-5</sup>                  | 2.008 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7442                  |
| 300                                   | 0.9358                                  | 1060  | 0.03814                                     | 3.847 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.682 × 10 <sup>-5</sup>                  | 2.866 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7450                  |
| 400                                   | 0.7968                                  | 1112  | 0.04565                                     | 5.151 × 10 <sup>-5</sup>                               | 3.061 × 10 <sup>-5</sup>                  | 3.842 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7458                  |
| 500                                   | 0.6937                                  | 1156  | 0.05293                                     | 6.600 × 10 <sup>-5</sup>                               | 3.416 × 10 <sup>-5</sup>                  | 4.924 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7460                  |
| 1000                                  | 0.4213                                  | 1292  | 0.08491                                     | 1.560 × 10 <sup>-4</sup>                               | 4.898 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.162 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.7455                  |
| 1500                                  | 0.3025                                  | 1356  | 0.10688                                     | 2.606 × 10 <sup>-4</sup>                               | 6.106 × 10 <sup>-5</sup>                  | 2.019 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.7745                  |
| 2000                                  | 0.2359                                  | 1387  | 0.11522                                     | 3.521 × 10 <sup>-4</sup>                               | 7.322 × 10 <sup>-5</sup>                  | 3.103 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.8815                  |
| <i>Carbon Monoxide, CO</i>            |   |   |   |  |   |  |                         |
| -50                                   | 1.5297                                  | 1081  | 0.01901                                     | 1.149 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.378 × 10 <sup>-5</sup>                  | 9.012 × 10 <sup>-6</sup>                               | 0.7840                  |
| 0                                     | 1.2497                                  | 1048  | 0.02278                                     | 1.739 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.629 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.303 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7499                  |
| 50                                    | 1.0563                                  | 1039  | 0.02641                                     | 2.407 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.863 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.764 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7328                  |
| 100                                   | 0.9148                                  | 1041  | 0.02992                                     | 3.142 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.080 × 10 <sup>-5</sup>                  | 2.274 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7239                  |
| 150                                   | 0.8067                                  | 1049  | 0.03330                                     | 3.936 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.283 × 10 <sup>-5</sup>                  | 2.830 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7191                  |
| 200                                   | 0.7214                                  | 1060  | 0.03656                                     | 4.782 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.472 × 10 <sup>-5</sup>                  | 3.426 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7164                  |
| 300                                   | 0.5956                                  | 1085  | 0.04277                                     | 6.619 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.812 × 10 <sup>-5</sup>                  | 4.722 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7134                  |
| 400                                   | 0.5071                                  | 1111  | 0.04860                                     | 8.628 × 10 <sup>-5</sup>                               | 3.111 × 10 <sup>-5</sup>                  | 6.136 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7111                  |
| 500                                   | 0.4415                                  | 1135  | 0.05412                                     | 1.079 × 10 <sup>-4</sup>                               | 3.379 × 10 <sup>-5</sup>                  | 7.653 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7087                  |
| 1000                                  | 0.2681                                  | 1226  | 0.07894                                     | 2.401 × 10 <sup>-4</sup>                               | 4.557 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.700 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.7080                  |
| 1500                                  | 0.1925                                  | 1279  | 0.10458                                     | 4.246 × 10 <sup>-4</sup>                               | 6.321 × 10 <sup>-5</sup>                  | 3.284 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.7733                  |
| 2000                                  | 0.1502                                  | 1309  | 0.13833                                     | 7.034 × 10 <sup>-4</sup>                               | 9.826 × 10 <sup>-5</sup>                  | 6.543 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.9302                  |
| <i>Methane, CH<sub>4</sub></i>        |   |   |   |  |   |  |                         |
| -50                                   | 0.8761                                  | 2243  | 0.02367                                     | 1.204 × 10 <sup>-5</sup>                               | 8.564 × 10 <sup>-6</sup>                  | 9.774 × 10 <sup>-6</sup>                               | 0.8116                  |
| 0                                     | 0.7158                                  | 2217  | 0.03042                                     | 1.917 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.028 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.436 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7494                  |
| 50                                    | 0.6050                                  | 2302  | 0.03766                                     | 2.704 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.191 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.969 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7282                  |
| 100                                   | 0.5240                                  | 2443  | 0.04534                                     | 3.543 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.345 × 10 <sup>-5</sup>                  | 2.567 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7247                  |
| 150                                   | 0.4620                                  | 2611  | 0.05344                                     | 4.431 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.491 × 10 <sup>-5</sup>                  | 3.227 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7284                  |
| 200                                   | 0.4132                                  | 2791  | 0.06194                                     | 5.370 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.630 × 10 <sup>-5</sup>                  | 3.944 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7344                  |
| 300                                   | 0.3411                                  | 3158  | 0.07996                                     | 7.422 × 10 <sup>-5</sup>                               | 1.886 × 10 <sup>-5</sup>                  | 5.529 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7450                  |
| 400                                   | 0.2904                                  | 3510  | 0.09918                                     | 9.727 × 10 <sup>-5</sup>                               | 2.119 × 10 <sup>-5</sup>                  | 7.297 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7501                  |
| 500                                   | 0.2529                                  | 3836  | 0.11933                                     | 1.230 × 10 <sup>-4</sup>                               | 2.334 × 10 <sup>-5</sup>                  | 9.228 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7502                  |
| 1000                                  | 0.1536                                  | 5042  | 0.22562                                     | 2.914 × 10 <sup>-4</sup>                               | 3.281 × 10 <sup>-5</sup>                  | 2.136 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.7331                  |
| 1500                                  | 0.1103                                  | 5701  | 0.31857                                     | 5.068 × 10 <sup>-4</sup>                               | 4.434 × 10 <sup>-5</sup>                  | 4.022 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.7936                  |
| 2000                                  | 0.0860                                  | 6001  | 0.36750                                     | 7.120 × 10 <sup>-4</sup>                               | 6.360 × 10 <sup>-5</sup>                  | 7.395 × 10 <sup>-4</sup>                               | 1.0386                  |
| <i>Hydrogen, H<sub>2</sub></i>        |   |   |   |  |   |  |                         |
| -50                                   | 0.11010                                 | 12635   | 0.1404                                      | 1.009 × 10 <sup>-4</sup>                               | 7.293 × 10 <sup>-6</sup>                  | 6.624 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.6562                  |
| 0                                     | 0.08995                                 | 13920   | 0.1652                                      | 1.319 × 10 <sup>-4</sup>                               | 8.391 × 10 <sup>-6</sup>                  | 9.329 × 10 <sup>-5</sup>                               | 0.7071                  |
| 50                                    | 0.07603                                 | 14349   | 0.1881                                      | 1.724 × 10 <sup>-4</sup>                               | 9.427 × 10 <sup>-6</sup>                  | 1.240 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.7191                  |
| 100                                   | 0.06584                                 | 14473   | 0.2095                                      | 2.199 × 10 <sup>-4</sup>                               | 1.041 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.582 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.7196                  |
| 150                                   | 0.05806                                 | 14492   | 0.2296                                      | 2.729 × 10 <sup>-4</sup>                               | 1.136 × 10 <sup>-5</sup>                  | 1.957 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.7174                  |
| 200                                   | 0.05193                                 | 14482   | 0.2486                                      | 3.306 × 10 <sup>-4</sup>                               | 1.228 × 10 <sup>-5</sup>                  | 2.365 × 10 <sup>-4</sup>                               | 0.7155                  |

**TABLE A-23**

Properties of gases at 1 atm pressure (*Concluded*)

| Temp.<br><i>T</i> , °C             | Density<br><i>ρ</i> , kg/m <sup>3</sup> | Specific<br>heat<br><i>c<sub>p</sub></i> , J/kg·K | Thermal<br>conductivity<br><i>k</i> , W/m·K | Thermal<br>diffusivity<br><i>α</i> , m <sup>2</sup> /s | Dynamic<br>viscosity<br><i>μ</i> , kg/m·s | Kinematic<br>viscosity<br><i>ν</i> , m <sup>2</sup> /s | Prandtl<br>number<br><i>Pr</i> |
|------------------------------------|---|---|---|--|---|--|--------------------------------|
| 300                                | 0.04287                                 | 14481   | 0.2843                                      | $4.580 \times 10^{-4}$                                 | $1.403 \times 10^{-5}$                    | $3.274 \times 10^{-4}$                                 | 0.7149                         |
| 400                                | 0.03650                                 | 14540   | 0.3180                                      | $5.992 \times 10^{-4}$                                 | $1.570 \times 10^{-5}$                    | $4.302 \times 10^{-4}$                                 | 0.7179                         |
| 500                                | 0.03178                                 | 14653   | 0.3509                                      | $7.535 \times 10^{-4}$                                 | $1.730 \times 10^{-5}$                    | $5.443 \times 10^{-4}$                                 | 0.7224                         |
| 1000                               | 0.01930                                 | 15577   | 0.5206                                      | $1.732 \times 10^{-3}$                                 | $2.455 \times 10^{-5}$                    | $1.272 \times 10^{-3}$                                 | 0.7345                         |
| 1500                               | 0.01386                                 | 16553   | 0.6581                                      | $2.869 \times 10^{-3}$                                 | $3.099 \times 10^{-5}$                    | $2.237 \times 10^{-3}$                                 | 0.7795                         |
| 2000                               | 0.01081                                 | 17400   | 0.5480                                      | $2.914 \times 10^{-3}$                                 | $3.690 \times 10^{-5}$                    | $3.414 \times 10^{-3}$                                 | 1.1717                         |
| <i>Nitrogen, N<sub>2</sub></i>     |   |   |   |  |   |  |                                |
| -50                                | 1.5299                                  | 957.3   | 0.02001                                     | $1.366 \times 10^{-5}$                                 | $1.390 \times 10^{-5}$                    | $9.091 \times 10^{-6}$                                 | 0.6655                         |
| 0                                  | 1.2498                                  | 1035  | 0.02384                                     | $1.843 \times 10^{-5}$                                 | $1.640 \times 10^{-5}$                    | $1.312 \times 10^{-5}$                                 | 0.7121                         |
| 50                                 | 1.0564                                  | 1042  | 0.02746                                     | $2.494 \times 10^{-5}$                                 | $1.874 \times 10^{-5}$                    | $1.774 \times 10^{-5}$                                 | 0.7114                         |
| 100                                | 0.9149                                  | 1041  | 0.03090                                     | $3.244 \times 10^{-5}$                                 | $2.094 \times 10^{-5}$                    | $2.289 \times 10^{-5}$                                 | 0.7056                         |
| 150                                | 0.8068                                  | 1043  | 0.03416                                     | $4.058 \times 10^{-5}$                                 | $2.300 \times 10^{-5}$                    | $2.851 \times 10^{-5}$                                 | 0.7025                         |
| 200                                | 0.7215                                  | 1050  | 0.03727                                     | $4.921 \times 10^{-5}$                                 | $2.494 \times 10^{-5}$                    | $3.457 \times 10^{-5}$                                 | 0.7025                         |
| 300                                | 0.5956                                  | 1070  | 0.04309                                     | $6.758 \times 10^{-5}$                                 | $2.849 \times 10^{-5}$                    | $4.783 \times 10^{-5}$                                 | 0.7078                         |
| 400                                | 0.5072                                  | 1095  | 0.04848                                     | $8.727 \times 10^{-5}$                                 | $3.166 \times 10^{-5}$                    | $6.242 \times 10^{-5}$                                 | 0.7153                         |
| 500                                | 0.4416                                  | 1120  | 0.05358                                     | $1.083 \times 10^{-4}$                                 | $3.451 \times 10^{-5}$                    | $7.816 \times 10^{-5}$                                 | 0.7215                         |
| 1000                               | 0.2681                                  | 1213  | 0.07938                                     | $2.440 \times 10^{-4}$                                 | $4.594 \times 10^{-5}$                    | $1.713 \times 10^{-4}$                                 | 0.7022                         |
| 1500                               | 0.1925                                  | 1266  | 0.11793                                     | $4.839 \times 10^{-4}$                                 | $5.562 \times 10^{-5}$                    | $2.889 \times 10^{-4}$                                 | 0.5969                         |
| 2000                               | 0.1502                                  | 1297  | 0.18590                                     | $9.543 \times 10^{-4}$                                 | $6.426 \times 10^{-5}$                    | $4.278 \times 10^{-4}$                                 | 0.4483                         |
| <i>Oxygen, O<sub>2</sub></i>       |   |   |   |  |   |  |                                |
| -50                                | 1.7475                                  | 984.4   | 0.02067                                     | $1.201 \times 10^{-5}$                                 | $1.616 \times 10^{-5}$                    | $9.246 \times 10^{-6}$                                 | 0.7694                         |
| 0                                  | 1.4277                                  | 928.7   | 0.02472                                     | $1.865 \times 10^{-5}$                                 | $1.916 \times 10^{-5}$                    | $1.342 \times 10^{-5}$                                 | 0.7198                         |
| 50                                 | 1.2068                                  | 921.7   | 0.02867                                     | $2.577 \times 10^{-5}$                                 | $2.194 \times 10^{-5}$                    | $1.818 \times 10^{-5}$                                 | 0.7053                         |
| 100                                | 1.0451                                  | 931.8   | 0.03254                                     | $3.342 \times 10^{-5}$                                 | $2.451 \times 10^{-5}$                    | $2.346 \times 10^{-5}$                                 | 0.7019                         |
| 150                                | 0.9216                                  | 947.6   | 0.03637                                     | $4.164 \times 10^{-5}$                                 | $2.694 \times 10^{-5}$                    | $2.923 \times 10^{-5}$                                 | 0.7019                         |
| 200                                | 0.8242                                  | 964.7   | 0.04014                                     | $5.048 \times 10^{-5}$                                 | $2.923 \times 10^{-5}$                    | $3.546 \times 10^{-5}$                                 | 0.7025                         |
| 300                                | 0.6804                                  | 997.1   | 0.04751                                     | $7.003 \times 10^{-5}$                                 | $3.350 \times 10^{-5}$                    | $4.923 \times 10^{-5}$                                 | 0.7030                         |
| 400                                | 0.5793                                  | 1025  | 0.05463                                     | $9.204 \times 10^{-5}$                                 | $3.744 \times 10^{-5}$                    | $6.463 \times 10^{-5}$                                 | 0.7023                         |
| 500                                | 0.5044                                  | 1048  | 0.06148                                     | $1.163 \times 10^{-4}$                                 | $4.114 \times 10^{-5}$                    | $8.156 \times 10^{-5}$                                 | 0.7010                         |
| 1000                               | 0.3063                                  | 1121  | 0.09198                                     | $2.678 \times 10^{-4}$                                 | $5.732 \times 10^{-5}$                    | $1.871 \times 10^{-4}$                                 | 0.6986                         |
| 1500                               | 0.2199                                  | 1165  | 0.11901                                     | $4.643 \times 10^{-4}$                                 | $7.133 \times 10^{-5}$                    | $3.243 \times 10^{-4}$                                 | 0.6985                         |
| 2000                               | 0.1716                                  | 1201  | 0.14705                                     | $7.139 \times 10^{-4}$                                 | $8.417 \times 10^{-5}$                    | $4.907 \times 10^{-4}$                                 | 0.6873                         |
| <i>Water Vapor, H<sub>2</sub>O</i> |   |   |   |  |   |  |                                |
| -50                                | 0.9839                                  | 1892  | 0.01353                                     | $7.271 \times 10^{-6}$                                 | $7.187 \times 10^{-6}$                    | $7.305 \times 10^{-6}$                                 | 1.0047                         |
| 0                                  | 0.8038                                  | 1874  | 0.01673                                     | $1.110 \times 10^{-5}$                                 | $8.956 \times 10^{-6}$                    | $1.114 \times 10^{-5}$                                 | 1.0033                         |
| 50                                 | 0.6794                                  | 1874  | 0.02032                                     | $1.596 \times 10^{-5}$                                 | $1.078 \times 10^{-5}$                    | $1.587 \times 10^{-5}$                                 | 0.9944                         |
| 100                                | 0.5884                                  | 1887  | 0.02429                                     | $2.187 \times 10^{-5}$                                 | $1.265 \times 10^{-5}$                    | $2.150 \times 10^{-5}$                                 | 0.9830                         |
| 150                                | 0.5189                                  | 1908  | 0.02861                                     | $2.890 \times 10^{-5}$                                 | $1.456 \times 10^{-5}$                    | $2.806 \times 10^{-5}$                                 | 0.9712                         |
| 200                                | 0.4640                                  | 1935  | 0.03326                                     | $3.705 \times 10^{-5}$                                 | $1.650 \times 10^{-5}$                    | $3.556 \times 10^{-5}$                                 | 0.9599                         |
| 300                                | 0.3831                                  | 1997  | 0.04345                                     | $5.680 \times 10^{-5}$                                 | $2.045 \times 10^{-5}$                    | $5.340 \times 10^{-5}$                                 | 0.9401                         |
| 400                                | 0.3262                                  | 2066  | 0.05467                                     | $8.114 \times 10^{-5}$                                 | $2.446 \times 10^{-5}$                    | $7.498 \times 10^{-5}$                                 | 0.9240                         |
| 500                                | 0.2840                                  | 2137  | 0.06677                                     | $1.100 \times 10^{-4}$                                 | $2.847 \times 10^{-5}$                    | $1.002 \times 10^{-4}$                                 | 0.9108                         |
| 1000                               | 0.1725                                  | 2471  | 0.13623                                     | $3.196 \times 10^{-4}$                                 | $4.762 \times 10^{-5}$                    | $2.761 \times 10^{-4}$                                 | 0.8639                         |
| 1500                               | 0.1238                                  | 2736  | 0.21301                                     | $6.288 \times 10^{-4}$                                 | $6.411 \times 10^{-5}$                    | $5.177 \times 10^{-4}$                                 | 0.8233                         |
| 2000                               | 0.0966                                  | 2928  | 0.29183                                     | $1.032 \times 10^{-3}$                                 | $7.808 \times 10^{-5}$                    | $8.084 \times 10^{-4}$                                 | 0.7833                         |

*Note:* For ideal gases, the properties  $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$ , and  $Pr$  are independent of pressure. The properties  $\rho$ ,  $\nu$ , and  $\alpha$  at a pressure  $P$  (in atm) other than 1 atm are determined by multiplying the values of  $P$  at the given temperature by  $\rho$  and by dividing  $\nu$  and  $\alpha$  by  $P$ .

*Source:* Data generated from the EES software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. Originally based on various sources.

**TABLE A-24**Properties of solid metals (*Continued*)

| Composition                                     | Melting point, K | Properties at 300 K |                       |         |                                       | Properties at various temperatures (K), k (W/m·K)/c <sub>p</sub> (J/kg·K) |      |      |      |      |      |
|---|------------------|---------------------|-----------------------|---------|---------------------------------------|---|------|------|------|------|------|
|   |                  | ρ kg/m <sup>3</sup> | c <sub>p</sub> J/kg·K | k W/m·K | α × 10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /s | 100   | 200  | 400  | 600  | 800  | 1000 |
| <b>Aluminum:</b>                                |                  |                     |                       |         |                                       |   |      |      |      |      |      |
| Pure  | 933              | 2702                | 903                   | 237     | 97.1                                  | 302   | 237  | 240  | 231  | 218  | 1146 |
| Alloy 2024-T6<br>(4.5% Cu, 1.5% Mg,<br>0.6% Mn) | 775              | 2770                | 875                   | 177     | 73.0                                  | 482   | 798  | 949  | 1033 | 186  |      |
| Alloy 195, Cast<br>(4.5% Cu)                    |                  |                     |                       |         |                                       | 65  | 163  | 186  | 186  |      |      |
|   |                  |                     |                       |         |                                       | 473   | 787  | 925  | 1042 |      |      |
| Beryllium                                       | 1550             | 1850                | 1825                  | 200     | 59.2                                  | 990   | 301  | 161  | 126  | 106  | 90.8 |
| Bismuth   | 545              | 9780                | 122                   | 7.86    | 6.59                                  | 203   | 1114 | 2191 | 2604 | 2823 | 3018 |
| Boron   | 2573             | 2500                | 1107                  | 27.0    | 9.76                                  | 190   | 112  | 120  | 127  |      |      |
| Cadmium   | 594              | 8650                | 231                   | 96.8    | 48.4                                  | 128   | 55.5 | 16.8 | 10.6 | 9.60 | 9.85 |
| Chromium  | 2118             | 7160                | 449                   | 93.7    | 29.1                                  | 192   | 600  | 1463 | 1892 | 2160 | 2338 |
| Cobalt  | 1769             | 8862                | 421                   | 99.2    | 26.6                                  | 236   | 167  | 122  | 85.4 | 67.4 | 52.1 |
| Copper:   |                  |                     |                       |         |                                       | 379   | 450  | 503  | 550  | 528  |      |
| Pure  | 1358             | 8933                | 385                   | 401     | 117                                   | 482   | 413  | 393  | 379  | 366  | 352  |
| Commercial bronze<br>(90% Cu, 10% Al)           | 1293             | 8800                | 420                   | 52      | 14                                    | 252   | 356  | 397  | 417  | 433  | 451  |
| Phosphor gear bronze<br>(89% Cu, 11% Sn)        | 1104             | 8780                | 355                   | 54      | 17                                    | —   | 42   | 52   | 59   |      |      |
| Cartridge brass<br>(70% Cu, 30% Zn)             | 1188             | 8530                | 380                   | 110     | 33.9                                  | 75  | 95   | 111  | 90.9 | 80.7 | 71.3 |
| Constantan<br>(55% Cu, 45% Ni)                  | 1493             | 8920                | 384                   | 23      | 6.71                                  | 17  | 360  | 395  | 484  | 542  | 581  |
| Germanium                                       | 1211             | 5360                | 322                   | 59.9    | 34.7                                  | 232   | 96.8 | 43.2 | 27.3 | 19.8 | 17.4 |
| Gold  | 1336             | 19,300              | 129                   | 317     | 127                                   | 190   | 290  | 337  | 348  | 357  | 375  |
| Iridium   | 2720             | 22,500              | 130                   | 147     | 50.3                                  | 109   | 327  | 311  | 298  | 284  | 270  |
| Iron:   |                  |                     |                       |         |                                       | 124   | 153  | 131  | 135  | 140  | 145  |
| Pure  | 1810             | 7870                | 447                   | 80.2    | 23.1                                  | 134   | 94.0 | 69.5 | 54.7 | 43.3 | 32.8 |
| Armco<br>(99.75% pure)                          |                  |                     |                       |         |                                       | 216   | 384  | 490  | 574  | 680  | 975  |
| Carbon steels:                                  |                  |                     |                       |         |                                       | 384   | 490  | 574  | 680  | 975  |      |
| Plain carbon (Mn ≤ 1%<br>Si ≤ 0.1%)             |                  | 7854                | 434                   | 60.5    | 17.7                                  |   |      | 56.7 | 48.0 | 39.2 | 30.0 |
| AISI 1010                                       |                  | 7832                | 434                   | 63.9    | 18.8                                  |   |      | 487  | 559  | 685  | 1169 |
| Carbon-silicon (Mn ≤ 1%<br>0.1% < Si ≤ 0.6%)    |                  | 7817                | 446                   | 51.9    | 14.9                                  |   |      | 58.7 | 48.8 | 39.2 | 31.3 |
|   |                  |                     |                       |         |                                       | 487   | 559  | 685  | 1168 |      |      |
|   |                  |                     |                       |         |                                       | 501   | 49.8 | 44.0 | 37.4 | 29.3 |      |
|   |                  |                     |                       |         |                                       | 582   | 501  | 582  | 699  | 971  |      |

**1006**  
**PROPERTY TABLES AND CHARTS**

**TABLE A-24**

Properties of solid metals (*Continued*)

| Composition  | Melting point, K | Properties at 300 K      |              |         |  | Properties at various temperatures (K), k (W/m·K)/ $c_p$ (J/kg·K) |      |      |      |      |      |
|--|------------------|--------------------------|--------------|---------|--|---|------|------|------|------|------|
|  |                  | $\rho$ kg/m <sup>3</sup> | $c_p$ J/kg·K | k W/m·K | $\alpha \times 10^6$ m <sup>2</sup> /s | 100   | 200  | 400  | 600  | 800  | 1000 |
| Carbon–manganese–silicon<br>(1% < Mn < 1.65%<br>0.1% < Si < 0.6%)  | 8131             | 434                      | 41.0         | 11.6    |  |   |      | 42.2 | 39.7 | 35.0 | 27.6 |
|  |                  |                          |              |         |  |   |      | 487  | 559  | 685  | 1090 |
| Chromium (low) steels:<br>$\frac{1}{2}$ Cr– $\frac{1}{4}$ Mo–Si (0.18% C,<br>0.65% Cr, 0.23% Mo,<br>0.6% Si) | 7822             | 444                      | 37.7         | 10.9    |  |   |      | 38.2 | 36.7 | 33.3 | 26.9 |
|  |                  |                          |              |         |  |   |      | 492  | 575  | 688  | 969  |
| 1 Cr– $\frac{1}{2}$ Mo<br>(0.16% C, 1% Cr,<br>0.54% Mo,<br>0.39% Si)   | 7858             | 442                      | 42.3         | 12.2    |  |   |      | 42.0 | 39.1 | 34.5 | 27.4 |
|  |                  |                          |              |         |  |   |      | 492  | 575  | 688  | 969  |
| 1 Cr–V<br>(0.2% C, 1.02% Cr,<br>0.15% V)   | 7836             | 443                      | 48.9         | 14.1    |  |   |      | 46.8 | 42.1 | 36.3 | 28.2 |
|  |                  |                          |              |         |  |   |      | 492  | 575  | 688  | 969  |
| Stainless steels:  |                  |                          |              |         |  |   |      |      |      |      |      |
| AISI 302   |                  | 8055                     | 480          | 15.1    | 3.91                                   |   |      | 17.3 | 20.0 | 22.8 | 25.4 |
|  |                  |                          |              |         |  |   |      | 512  | 559  | 585  | 606  |
| AISI 304   | 1670             | 7900                     | 477          | 14.9    | 3.95                                   | 9.2   | 12.6 | 16.6 | 19.8 | 22.6 | 25.4 |
|  |                  |                          |              |         | 272                                    | 402   |      | 515  | 557  | 582  | 611  |
| AISI 316   |                  | 8238                     | 468          | 13.4    | 3.48                                   |   |      | 15.2 | 18.3 | 21.3 | 24.2 |
|  |                  |                          |              |         |  |   |      | 504  | 550  | 576  | 602  |
| AISI 347   |                  | 7978                     | 480          | 14.2    | 3.71                                   |   |      | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
|  |                  |                          |              |         |  |   |      | 513  | 559  | 585  | 606  |
| Lead   | 601              | 11,340                   | 129          | 35.3    | 24.1                                   | 39.7  | 36.7 | 34.0 | 31.4 |      |      |
|  |                  |                          |              |         | 118                                    | 125   |      | 132  | 142  |      |      |
| Magnesium  | 923              | 1740                     | 1024         | 156     | 87.6                                   | 169   | 159  | 153  | 149  | 146  |      |
|  |                  |                          |              |         | 649                                    | 934   |      | 1074 | 1170 | 1267 |      |
| Molybdenum   | 2894             | 10,240                   | 251          | 138     | 53.7                                   | 179   | 143  | 134  | 126  | 118  | 112  |
|  |                  |                          |              |         | 141                                    | 224   |      | 261  | 275  | 285  | 295  |
| Nickel:  |                  |                          |              |         |  |   |      |      |      |      |      |
| Pure   | 1728             | 8900                     | 444          | 90.7    | 23.0                                   | 164   | 107  | 80.2 | 65.6 | 67.6 | 71.8 |
|  |                  |                          |              |         | 232                                    | 383   | 485  | 592  | 530  | 562  |      |
| Nichrome<br>(80% Ni, 20% Cr)   | 1672             | 8400                     | 420          | 12      | 3.4                                    |   |      | 14   | 16   | 21   |      |
|  |                  |                          |              |         |  |   |      | 480  | 525  | 545  |      |
| Inconel X-750<br>(73% Ni, 15% Cr,<br>6.7% Fe)  | 1665             | 8510                     | 439          | 11.7    | 3.1                                    | 8.7   | 10.3 | 13.5 | 17.0 | 20.5 | 24.0 |
|  |                  |                          |              |         | —                                      | 372   |      | 473  | 510  | 546  | 626  |
| Niobium  | 2741             | 8570                     | 265          | 53.7    | 23.6                                   | 55.2  | 52.6 | 55.2 | 58.2 | 61.3 | 64.4 |
|  |                  |                          |              |         | 188                                    | 249   |      | 274  | 283  | 292  | 301  |
| Palladium  | 1827             | 12,020                   | 244          | 71.8    | 24.5                                   | 76.5  | 71.6 | 73.6 | 79.7 | 86.9 | 94.2 |
|  |                  |                          |              |         | 168                                    | 227   |      | 251  | 261  | 271  | 281  |
| Platinum:  |                  |                          |              |         |  |   |      |      |      |      |      |
| Pure   | 2045             | 21,450                   | 133          | 71.6    | 25.1                                   | 77.5  | 72.6 | 71.8 | 73.2 | 75.6 | 78.7 |
|  |                  |                          |              |         | 100                                    | 125   |      | 136  | 141  | 146  | 152  |
| Alloy 60Pt–40Rh<br>(60% Pt, 40% Rh)  | 1800             | 16,630                   | 162          | 47      | 17.4                                   |   |      | 52   | 59   | 65   | 69   |
|  |                  |                          |              |         |  |   |      | —    | —    | —    |      |
| Rhenium  | 3453             | 21,100                   | 136          | 47.9    | 16.7                                   | 58.9  | 51.0 | 46.1 | 44.2 | 44.1 | 44.6 |
|  |                  |                          |              |         | 97                                     | 127   |      | 139  | 145  | 151  | 156  |
| Rhodium  | 2236             | 12,450                   | 243          | 150     | 49.6                                   | 186   | 154  | 146  | 136  | 127  | 121  |
|  |                  |                          |              |         | 147                                    | 220   |      | 253  | 274  | 293  | 311  |

**TABLE A-24**Properties of solid metals (*Concluded*)

| Composition | Melting point, K | Properties at 300 K         |                 |              |   | Properties at various temperatures (K),<br>$k$ (W/m·K)/ $c_p$ (J/kg·K) |             |             |             |             |             |
|-------------|------------------|-----------------------------|-----------------|--------------|---|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|             |                  | $\rho$<br>kg/m <sup>3</sup> | $c_p$<br>J/kg·K | $k$<br>W/m·K | $\alpha \times 10^6$<br>m <sup>2</sup> /s | 100  | 200         | 400         | 600         | 800         | 1000        |
| Silicon     | 1685             | 2330                        | 712             | 148          | 89.2                                      | 884<br>259   | 264<br>556  | 98.9<br>790 | 61.9<br>867 | 42.4<br>913 | 31.2<br>946 |
| Silver      | 1235             | 10,500                      | 235             | 429          | 174                                       | 444<br>187   | 430<br>225  | 425<br>239  | 412<br>250  | 396<br>262  | 379<br>277  |
| Tantalum    | 3269             | 16,600                      | 140             | 57.5         | 24.7                                      | 59.2<br>110  | 57.5<br>133 | 57.8<br>144 | 58.6<br>146 | 59.4<br>149 | 60.2<br>152 |
| Thorium     | 2023             | 11,700                      | 118             | 54.0         | 39.1                                      | 59.8<br>99   | 54.6<br>112 | 54.5<br>124 | 55.8<br>134 | 56.9<br>145 | 56.9<br>156 |
| Tin         | 505              | 7310                        | 227             | 66.6         | 40.1                                      | 85.2<br>188  | 73.3<br>215 | 62.2<br>243 |             |             |             |
| Titanium    | 1953             | 4500                        | 522             | 21.9         | 9.32                                      | 30.5<br>300  | 24.5<br>465 | 20.4<br>551 | 19.4<br>591 | 19.7<br>633 | 20.7<br>675 |
| Tungsten    | 3660             | 19,300                      | 132             | 174          | 68.3                                      | 208<br>87  | 186<br>122  | 159<br>137  | 137<br>142  | 125<br>146  | 118<br>148  |
| Uranium     | 1406             | 19,070                      | 116             | 27.6         | 12.5                                      | 21.7<br>94   | 25.1<br>108 | 29.6<br>125 | 34.0<br>146 | 38.8<br>176 | 43.9<br>180 |
| Vanadium    | 2192             | 6100                        | 489             | 30.7         | 10.3                                      | 35.8<br>258  | 31.3<br>430 | 31.3<br>515 | 33.3<br>540 | 35.7<br>563 | 38.2<br>597 |
| Zinc        | 693              | 7140                        | 389             | 116          | 41.8                                      | 117<br>297   | 118<br>367  | 111<br>402  | 103<br>436  |             |             |
| Zirconium   | 2125             | 6570                        | 278             | 22.7         | 12.4                                      | 33.2<br>205  | 25.2<br>264 | 21.6<br>300 | 20.7<br>332 | 21.6<br>342 | 23.7<br>362 |

Data Source: Frank P. Incropera and David P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 3rd ed., 1990.

**1008**  
**PROPERTY TABLES AND CHARTS**

**TABLE A-25**

Properties of solid nonmetals

| Composition                                     | Melting point, K | Properties at 300 K |                       |         |                                       | Properties at various temperatures (K), k (W/m·K)/c <sub>p</sub> (J/kg·K) |       |      |      |      |      |
|---|------------------|---------------------|-----------------------|---------|---------------------------------------|---|-------|------|------|------|------|
|   |                  | ρ kg/m <sup>3</sup> | c <sub>p</sub> J/kg·K | k W/m·K | α × 10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /s | 100   | 200   | 400  | 600  | 800  | 1000 |
| Aluminum oxide, sapphire                        | 2323             | 3970                | 765                   | 46      | 15.1                                  | 450   | 82    | 32.4 | 18.9 | 13.0 | 10.5 |
| Aluminum oxide, polycrystalline                 | 2323             | 3970                | 765                   | 36.0    | 11.9                                  | 133   | 55    | 26.4 | 15.8 | 10.4 | 7.85 |
| Beryllium oxide                                 | 2725             | 3000                | 1030                  | 272     | 88.0                                  |   |       | 940  | 1110 | 1180 | 1225 |
|   |                  |                     |                       |         |                                       |   |       | 196  | 111  | 70   | 47   |
|   |                  |                     |                       |         |                                       |   |       | 1350 | 1690 | 1865 | 1975 |
| Boron   | 2573             | 2500                | 1105                  | 27.6    | 9.99                                  | 190   | 52.5  | 18.7 | 11.3 | 8.1  | 6.3  |
| Boron fiber epoxy (30% vol.) composite          | 590              | 2080                |                       |         |                                       |   |       | 1490 | 1880 | 2135 | 2350 |
| k, ll to fibers                                 |                  |                     |                       | 2.29    |                                       |   | 2.10  | 2.23 | 2.28 |      |      |
| k, ⊥ to fibers                                  |                  |                     |                       | 0.59    |                                       |   | 0.37  | 0.49 | 0.60 |      |      |
| c <sub>p</sub>                                  |                  |                     | 1122                  |         |                                       | 364   | 757   | 1431 |      |      |      |
| Carbon  |                  |                     |                       |         |                                       |   |       |      |      |      |      |
| Amorphous                                       | 1500             | 1950                | —                     | 1.60    | —                                     | 0.67  | 1.18  | 1.89 | 21.9 | 2.37 | 2.53 |
| Diamond, type IIa insulator                     | —                | 3500                | 509                   | 2300    |                                       | 10,000  | 4000  | 1540 |      |      |      |
|   |                  |                     |                       |         | 21                                    | 194   | 853   |      |      |      |      |
| Graphite, pyrolytic                             | 2273             | 2210                |                       |         | 1950                                  | 4970  | 3230  | 1390 | 892  | 667  | 534  |
| k, ll to layers                                 |                  |                     |                       | 5.70    |                                       | 16.8  | 9.23  | 4.09 | 2.68 | 2.01 | 1.60 |
| k, ⊥ to layers                                  |                  |                     |                       |         | 709                                   | 136   | 411   | 992  | 1406 | 1650 | 1793 |
| Graphite fiber epoxy (25% vol.) composite       | 450              | 1400                |                       |         |                                       |   |       |      |      |      |      |
| k, heat flow ll to fibers                       |                  |                     | 11.1                  |         |                                       | 5.7   | 8.7   | 13.0 |      |      |      |
| k, heat flow ⊥ to fibers                        |                  |                     | 0.87                  |         |                                       | 0.68  | 1.1   |      |      |      |      |
| c <sub>p</sub>                                  |                  |                     | 935                   |         |                                       | 337   | 642   | 1216 |      |      |      |
| Pyroceram, Corning 9606                         | 1623             | 2600                | 808                   | 3.98    | 1.89                                  | 5.25  | 4.78  | 3.64 | 3.28 | 3.08 | 2.96 |
| Silicon carbide                                 | 3100             | 3160                | 675                   | 490     | 230                                   | —   | —     | 908  | 1038 | 1122 | 1197 |
| Silicon dioxide, crystalline (quartz)           | 1883             | 2650                |                       |         |                                       |   |       | 880  | 1050 | 1135 | 1195 |
| k, ll to c-axis                                 |                  |                     | 10.4                  |         |                                       | 39  | 16.4  | 7.6  | 5.0  | 4.2  |      |
| k, ⊥ to c-axis                                  |                  |                     | 6.21                  |         |                                       | 20.8  | 9.5   | 4.70 | 3.4  | 3.1  |      |
| c <sub>p</sub>                                  |                  |                     | 745                   |         |                                       | —   | —     | 885  | 1075 | 1250 |      |
| Silicon dioxide, polycrystalline (fused silica) | 1883             | 2220                | 745                   | 1.38    | 0.834                                 | 0.69  | 1.14  | 1.51 | 1.75 | 2.17 | 2.87 |
| Silicon nitride                                 | 2173             | 2400                | 691                   | 16.0    | 9.65                                  | —   | —     | 905  | 1040 | 1105 | 1155 |
| Sulfur  | 392              | 2070                | 708                   | 0.206   | 0.141                                 | —   | 578   | 13.9 | 11.3 | 9.88 | 8.76 |
|   |                  |                     |                       |         |                                       | 0.165   | 0.185 | 778  | 937  | 1063 | 1155 |
| Thorium dioxide                                 | 3573             | 9110                | 235                   | 13      | 6.1                                   | 403   | 606   | 10.2 | 6.6  | 4.7  | 3.68 |
|   |                  |                     |                       |         |                                       |   |       | 255  | 274  | 285  | 295  |
| Titanium dioxide, polycrystalline               | 2133             | 4157                | 710                   | 8.4     | 2.8                                   |   |       | 7.01 | 5.02 | 8.94 | 3.46 |
|   |                  |                     |                       |         |                                       |   |       | 805  | 880  | 910  | 930  |

**TABLE A-26**Emissivities of surfaces (*Continued*)

(a) Metals

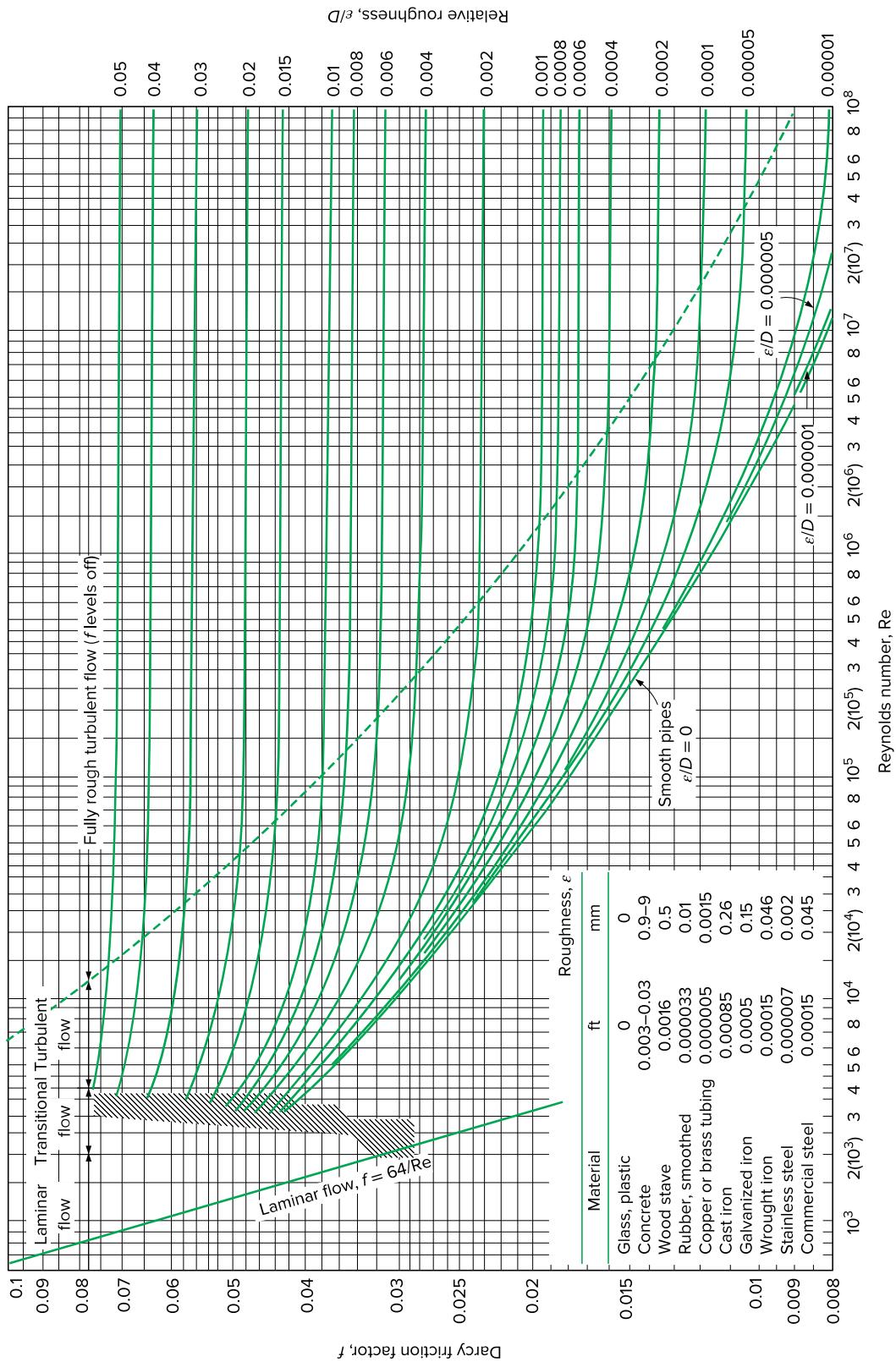
| Material           | Temperature,<br>K | Emissivity,<br>$\epsilon$ | Material            | Temperature,<br>K | Emissivity,<br>$\epsilon$ |
|--------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------|
| Aluminum           |                   |                           | Magnesium, polished | 300–500           | 0.07–0.13                 |
| Polished           | 300–900           | 0.04–0.06                 | Mercury             | 300–400           | 0.09–0.12                 |
| Commercial sheet   | 400               | 0.09                      | Molybdenum          |                   |                           |
| Heavily oxidized   | 400–800           | 0.20–0.33                 | Polished            | 300–2000          | 0.05–0.21                 |
| Anodized           | 300               | 0.8                       | Oxidized            | 600–800           | 0.80–0.82                 |
| Bismuth, bright    | 350               | 0.34                      | Nickel              |                   |                           |
| Brass              |                   |                           | Polished            | 500–1200          | 0.07–0.17                 |
| Highly polished    | 500–650           | 0.03–0.04                 | Oxidized            | 450–1000          | 0.37–0.57                 |
| Polished           | 350               | 0.09                      | Platinum, polished  | 500–1500          | 0.06–0.18                 |
| Dull plate         | 300–600           | 0.22                      | Silver, polished    | 300–1000          | 0.02–0.07                 |
| Oxidized           | 450–800           | 0.6                       | Stainless steel     |                   |                           |
| Chromium, polished | 300–1400          | 0.08–0.40                 | Polished            | 300–1000          | 0.17–0.30                 |
| Copper             |                   |                           | Lightly oxidized    | 600–1000          | 0.30–0.40                 |
| Highly polished    | 300               | 0.02                      | Highly oxidized     | 600–1000          | 0.70–0.80                 |
| Polished           | 300–500           | 0.04–0.05                 | Steel               |                   |                           |
| Commercial sheet   | 300               | 0.15                      | Polished sheet      | 300–500           | 0.08–0.14                 |
| Oxidized           | 600–1000          | 0.5–0.8                   | Commercial sheet    | 500–1200          | 0.20–0.32                 |
| Black oxidized     | 300               | 0.78                      | Heavily oxidized    | 300               | 0.81                      |
| Gold               |                   |                           | Tin, polished       | 300               | 0.05                      |
| Highly polished    | 300–1000          | 0.03–0.06                 | Tungsten            |                   |                           |
| Bright foil        | 300               | 0.07                      | Polished            | 300–2500          | 0.03–0.29                 |
| Iron               |                   |                           | Filament            | 3500              | 0.39                      |
| Highly polished    | 300–500           | 0.05–0.07                 | Zinc                |                   |                           |
| Case iron          | 300               | 0.44                      | Polished            | 300–800           | 0.02–0.05                 |
| Wrought iron       | 300–500           | 0.28                      | Oxidized            | 300               | 0.25                      |
| Rusted             | 300               | 0.61                      |                     |                   |                           |
| Oxidized           | 500–900           | 0.64–0.78                 |                     |                   |                           |
| Lead               |                   |                           |                     |                   |                           |
| Polished           | 300–500           | 0.06–0.08                 |                     |                   |                           |
| Unoxidized, rough  | 300               | 0.43                      |                     |                   |                           |
| Oxidized           | 300               | 0.63                      |                     |                   |                           |

**TABLE A-26**

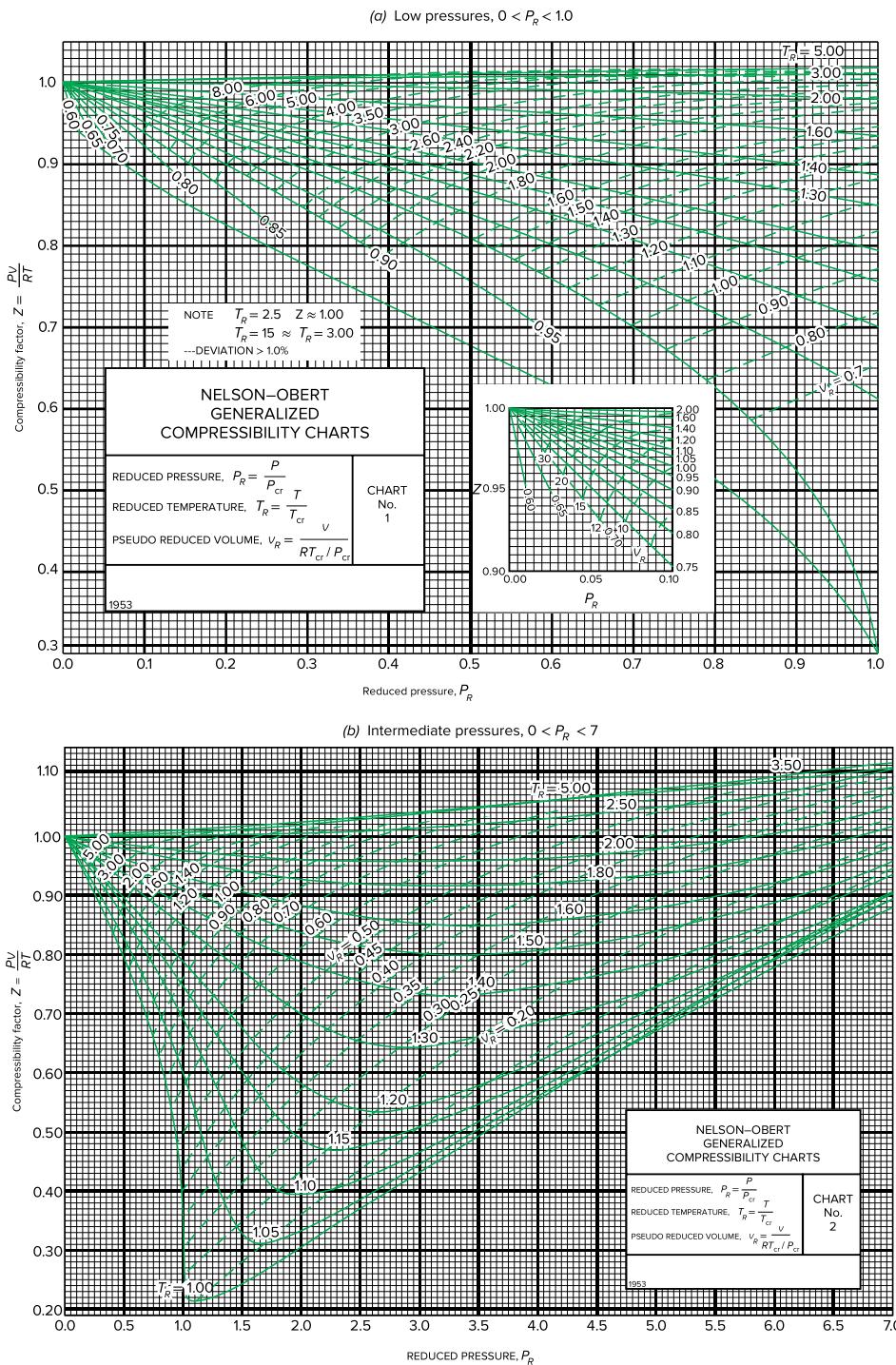
Emissivities of surfaces (*Concluded*)

(b) Nonmetals

| Material              | Temperature,<br>K | Emissivity,<br>$\varepsilon$ | Material             | Temperature,<br>K | Emissivity,<br>$\varepsilon$ |
|-----------------------|-------------------|------------------------------|----------------------|-------------------|------------------------------|
| Alumina               | 800–1400          | 0.65–0.45                    | Paper, white         | 300               | 0.90                         |
| Aluminum oxide        | 600–1500          | 0.69–0.41                    | Plaster, white       | 300               | 0.93                         |
| Asbestos              | 300               | 0.96                         | Porcelain, glazed    | 300               | 0.92                         |
| Asphalt pavement      | 300               | 0.85–0.93                    | Quartz, rough, fused | 300               | 0.93                         |
| Brick                 |                   |                              | Rubber               |                   |                              |
| Common                | 300               | 0.93–0.96                    | Hard                 | 300               | 0.93                         |
| Fireclay              | 1200              | 0.75                         | Soft                 | 300               | 0.86                         |
| Carbon filament       | 2000              | 0.53                         | Sand                 | 300               | 0.90                         |
| Cloth                 | 300               | 0.75–0.90                    | Silicon carbide      | 600–1500          | 0.87–0.85                    |
| Concrete              | 300               | 0.88–0.94                    | Skin, human          | 300               | 0.95                         |
| Glass                 |                   |                              | Snow                 | 273               | 0.80–0.90                    |
| Window                | 300               | 0.90–0.95                    | Soil, earth          | 300               | 0.93–0.96                    |
| Pyrex                 | 300–1200          | 0.82–0.62                    | Soot                 | 300–500           | 0.95                         |
| Pyroceram             | 300–1500          | 0.85–0.57                    | Teflon               | 300–500           | 0.85–0.92                    |
| Ice                   | 273               | 0.95–0.99                    | Water, deep          | 273–373           | 0.95–0.96                    |
| Magnesium oxide       | 400–800           | 0.69–0.55                    | Wood                 |                   |                              |
| Masonry               | 300               | 0.80                         | Beech                | 300               | 0.94                         |
| Paints                |                   |                              | Oak                  | 300               | 0.90                         |
| Aluminum              | 300               | 0.40–0.50                    |                      |                   |                              |
| Black, lacquer, shiny | 300               | 0.88                         |                      |                   |                              |
| Oils, all colors      | 300               | 0.92–0.96                    |                      |                   |                              |
| Red primer            | 300               | 0.93                         |                      |                   |                              |
| White acrylic         | 300               | 0.90                         |                      |                   |                              |
| White enamel          | 300               | 0.90                         |                      |                   |                              |

**FIGURE A-27**

The Moody chart for the friction factor for fully developed flow in circular pipes for use in the head loss relation  $\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2}$ . Friction factors in the turbulent flow are evaluated from the Colebrook equation  $1 - \sqrt{-f} = -2\log_{10} \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$ .



**FIGURE A-28**

Nelson-Obert generalized compressibility chart.

Used with permission of Dr. Edward E. Obert, University of Wisconsin.

**Tabel 1: Samenvatting Dimensieloze Getallen**

| Getal    | Symbol | Definitie              | Fysische Betekenis   |
|----------|--------|------------------------|--|
| Reynolds | $Re$   | $\frac{\rho V L}{\mu}$ | Traagheidskrachten / Viskeuze krachten (Laminair vs Turbulent)       |
| Prandtl  | $Pr$   | $\frac{\nu}{\alpha}$   | Impulsdiffusie / Warmtediffusie (Snelheids- vs Thermische grenslaag) |
| Nusselt  | $Nu$   | $\frac{hL}{k}$         | Convectie / Geleiding (Effectiviteit van warmteoverdracht)           |
| Mach     | $Ma$   | $\frac{V}{c}$          | Snelheid / Geluidssnelheid (Compressibiliteitseffecten)              |

**Geciteerd werk**

1. Solution manual to Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences – Yunus A. Cengel, Robert H. Turner, John M. Cimbala – 3, 2008 – McGraw Hill – 22c2bc36.pdf
2. Stromingen.pdf
3. Warmte.pdf
4. Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences – Yunus A. Çengel, John M. Cimbala, Robert H. Turner – 2015 – b016e765b4c1726c9af5bd86146500f5.pdf
5. Warmte en stroming\_ Thermal-Fluid Sciences Formularium.pdf
6. Thermodynamic tables and properties.pdf
7. Meerkeuzevragen Thermo, <https://drive.google.com/open?id=1lxMZjQMHufqM0W5fe86Rk0IvT8AmGgEe>