المحاضرة الثالثة
خواص المواد النقية والغازات المثالية
مخرجات التعلم: تحديد منطقة الطور؛ واختيار جدول الخواص وقراءة بياناته؛ وحساب خواص البخار الرطب والاستيفاء الخطي؛ وتطبيق معادلة الغاز المثالي ضمن حدود صلاحيتها.

المحاضرة 3، الفقرة 1
المواد النقية وأطوارها

المادة النقية (Pure substance) مادة ذات تركيب كيميائي ثابت في جميع أجزائها. لا يشترط أن تكون عنصراً واحداً؛ فالماء مركّب كيميائي ويُعدّ مادة نقية. ويمكن أيضاً معاملة خليط غازي متجانس ثابت التركيب، مثل الهواء الجاف في تطبيقات مناسبة، بوصفه مادة نقية. أما خليط الزيت والماء المنفصل إلى طبقتين مختلفتي التركيب فلا يحقق هذا التعريف.

الطور (Phase) جزء متجانس من المادة له بنية فيزيائية مميزة. الأطوار الأساسية هي الصلب والسائل والغازي. وجود طورين لا يمنع نقاوة المادة؛ فالماء السائل وبخاره في حالة اتزان يمثلان مادة نقية لأن تركيبهما الكيميائي واحد. في المقابل، تتطلب المنتجات الزراعية والهواء الرطب عناية بتركيبها، ولا تُستخدم لها جداول الماء النقي بوصفها جداول للمنتج كله.

المحاضرة 3، الفقرة 2
تغير الطور بين السائل والبخار

نتتبع تسخين الماء عند ضغط ثابت أقل من الضغط الحرج، مع إتاحة تمدده. يوضح الشكل 1 في المواد المساندة تسلسل الحالات. عند بدء التسخين ترتفع درجة حرارة السائل حتى يبلغ درجة الغليان الموافقة للضغط؛ ثم يتبخر تدريجياً، وبعد اكتمال التبخر يؤدي استمرار التسخين إلى ارتفاع درجة حرارة البخار.

السائل المضغوط أو دون الإشباع: يسمى Compressed liquid أو Subcooled liquid؛ تكون درجة حرارته أقل من درجة الإشباع عند ضغطه، ولا يكون على وشك التبخر. مصطلح «مضغوط» لا يشترط وجود ضغط مرتفع جداً، بل يصف موضع الحالة بالنسبة إلى الإشباع.

السائل المشبع (Saturated liquid): سائل على وشك بدء التبخر؛ تمثل حالته الحد الفاصل بين منطقة السائل ومنطقة الخليط. بإضافة طاقة مناسبة عند الضغط الثابت يبدأ ظهور البخار.

الخليط المشبع أو البخار الرطب: يتعايش السائل والبخار في اتزان. تزداد كتلة البخار على حساب كتلة السائل أثناء التسخين، بينما تثبت درجة الحرارة عند ثبات الضغط. يشير لفظ «الرطب» هنا إلى وجود قطرات ماء سائل مع البخار.

البخار المشبع ثم المحمّص: البخار المشبع (Saturated vapor) على وشك بدء التكثف. بعد تبخر آخر قطرة، يؤدي استمرار التسخين عند الضغط نفسه إلى بخار محمّص (Superheated vapor) ، تكون حرارته أعلى من درجة الإشباع.

المحاضرة 3، الفقرة 3
الإشباع ومخططات الخواص

علاقة ضغط الإشباع بدرجة حرارته: درجة حرارة الإشباع هي الدرجة التي يتغير عندها طور المادة النقية بين السائل والبخار عند ضغط محدد. وضغط الإشباع هو الضغط الموافق لتغير الطور عند درجة حرارة محددة. على منحنى اتزان السائل والبخار ترتفع درجة الإشباع بارتفاع الضغط، لذلك لا يغلي الماء عند درجة ثابتة مستقلة عن الضغط.

$$T = T_{\text{sat}}(P) \quad ; \quad P = P_{\text{sat}}(T)$$

يغلي الماء عند نحو 100° C عندما يكون الضغط قريباً من الضغط الجوي القياسي، وليس عند كل ضغط. فالجدول A–5 يعطي 99.61° C عند 100 kPa ، و 120.21° C عند 200 kPa. الضغط الجوي القياسي يساوي 101.325 kPa ؛ لذلك يجب عدم مساواته عددياً بـ 100 kPa. خفض الضغط يتيح الغليان بدرجة أقل، وهي فكرة مهمة في التبخير تحت التفريغ للمواد الحساسة للحرارة.

قراءة مخطط درجة الحرارة–الحجم النوعي: في مخطط T–v تكون درجة الحرارة على المحور الرأسي والحجم النوعي على المحور الأفقي. يربط خط السائل المشبع حالات بدء الغليان، ويربط خط البخار المشبع حالات اكتمال التبخر. يلتقي الخطان عند النقطة الحرجة، ويحددان قبة الإشباع. الشكل (a) 2 يوضح مناطقها.

تقع منطقة السائل المضغوط إلى يسار خط السائل المشبع، ومنطقة البخار المحمّص إلى يمين خط البخار المشبع، ويقع الخليط المشبع داخل القبة. عند ضغط ثابت أدنى من الضغط الحرج يظهر التحول بين السائل والبخار كخط أفقي داخل القبة؛ إذ تثبت درجة الحرارة ويتغير الحجم النوعي ونسبتا كتلتي الطورين.

الحرارة الكامنة وتغير الخواص: عدم ارتفاع درجة الحرارة أثناء التبخر لا يعني أن الطاقة لم تتغير. فالطاقة اللازمة لتغير الطور تختلف عن الطاقة المحسوسة المرتبطة برفع درجة الحرارة. وتختلف خواص السائل المشبع عن خواص البخار المشبع عند الضغط نفسه؛ لذا لا يكفي قياس درجة حرارة بخار رطب وحدها لمعرفة إنثالبيته أو حجمه النوعي.

النقطة الحرجة (Critical point): عندها تصبح خواص السائل المشبع والبخار المشبع متماثلة، وينتهي التمييز بينهما. قيم الماء في المصدر هي:

$$T_{\text{cr}} = 373.95°C \quad ; \quad P_{\text{cr}} = 22.06\,MPa$$

$$v_{\text{cr}} = 0.003106\,m^3/kg$$

عند الضغط الحرج يختفي الفرق بين خواص الطورين عند النقطة الحرجة، ويؤول فرق إنثالبي التبخر إلى الصفر. أما عند ضغط أعلى من الحرج فلا توجد مرحلة غليان منفصلة كالخط الأفقي المعتاد. لا تُعرّف نسبة الجفاف عند النقطة الحرجة، لأن السائل والبخار لم يعودا طورين متميزين.

استقلال الخواص: تحدد خاصيتان مكثفتان مستقلتان حالة النظام البسيط القابل للانضغاط. داخل منطقة الخليط المشبع يكون الضغط ودرجة الحرارة مرتبطين بعلاقة الإشباع، فلا يمثلان خاصيتين مستقلتين. نحتاج إلى خاصية إضافية مثل نسبة الجفاف مع الضغط أو مع درجة الحرارة.

المحاضرة 3، الفقرة 4
جداول الخواص والإنثالبي — اختيار الجدول

تعطي الجداول خواص المادة عند حالات محددة، ويجب اختيار جدول المادة ومنطقة الطور قبل نقل الأرقام. نستخدم هنا جداول الماء في الملحق الأول بوحدات SI: وهو النظام الدولي للوحدات (بالفرنسية: Système international d'unités) وهو الشكل الحديث للنظام المتري. الرمز الكبير V يعني الحجم الكلي، أما v فيعني الحجم لكل وحدة كتلة؛ وبالمثل U و H كميتان كليتان، بينما u و h خاصيتان نوعيتان.

$$v = \frac{V}{m} \quad ; \quad u = \frac{U}{m} \quad ; \quad h = \frac{H}{m}$$

الإنثالبي (Enthalpy): خاصية مركبة يرمز لها بـ H ، ويُعرّف إنثالبي وحدة الكتلة بالعلاقة الآتية. يفيد هذا التجميع خصوصاً في تحليل الطاقة المصاحبة لجريان الموائع، الذي سيُدرس لاحقاً في المحاضرات القادمة.

$$h = u + Pv \tag{1}$$

$$H = U + PV \quad ; \quad 1\,kPa \cdot m^3/kg = 1\,kJ/kg$$

يمثل u الطاقة الداخلية النوعية، ويمثل Pv حاصل ضرب الضغط المطلق بالحجم النوعي. يجب توحيد الوحدات قبل الجمع. الإنثالبي خاصية حالة وليس كمية حرارة مخزونة؛ فلا تُفسّر قيمة h وحدها على أنها الحرارة التي ستنتقل إلى منتج زراعي. حساب انتقال الحرارة يحتاج إلى تحديد العملية وحالات الدخول والخروج وموازنة الطاقة.

أولاً: جداول الإشباع A–4 و A–5: يُرتب A–4 حسب درجة الحرارة، ويُرتب A–5 حسب الضغط؛ وهما يصفان حالات الإشباع نفسها بطريقتين للبحث. اختر الصف حسب الخاصية المعطاة. يشير f إلى السائل المشبع، و g إلى البخار المشبع، و fg إلى الفرق بينهما؛ فمثلاً hfg = hg − hf ، وهو إنثالبي التبخر عند شرط الإشباع المعين.

ثانياً: عند معرفة الضغط ودرجة الحرارة: اقرأ درجة الإشباع الموافقة للضغط من A–5 ثم قارنها بدرجة الحرارة المعطاة. إذا كانت الحرارة أقل منها فالحالة سائل مضغوط؛ وإذا كانت أعلى منها فالحالة بخار محمّص؛ وإذا تساوتا فهي حالة إشباع، وقد تكون سائلاً مشبعاً أو بخاراً مشبعاً أو خليطاً. يلزم وصف إضافي لتحديدها بدقة. تنطبق المقارنة في مجال وجود اتزان السائل والبخار دون النقطة الحرجة.

ثالثاً: جدول البخار المحمّص A–6: اختر مجموعة الضغط الصحيحة ثم صف درجة الحرارة؛ واقرأ v و u و h من المجموعة نفسها. انتبه إلى أن ضغط مجموعات هذا الجدول مكتوب بـ MPa ، بينما ضغط A–5 مكتوب بـ kPa. الصف الموسوم Sat. يمثل البخار المشبع عند ذلك الضغط، وليس أي خليط رطب.

رابعاً: السائل المضغوط A–7: استعمل جدوله عند توافر الحالة المطلوبة. عند غياب بيانات مناسبة يمكن غالباً تقريب v و u بخواص السائل المشبع عند درجة الحرارة نفسها، لأن تأثير الضغط عليهما ضعيف في ظروف كثيرة. تقريب الإنثالبي أقل دقة عند فروق الضغط الكبيرة؛ لذا لا يُستخدم بلا تقدير لملاءمته.

المحاضرة 3، الفقرة 4 — تابع
نسبة الجفاف والاستيفاء الخطي — حساب الخواص

نسبة الجفاف (Vapor quality) ، x: هي نسبة كتلة البخار إلى الكتلة الكلية لخليط مشبع من السائل والبخار. تسمى أيضاً جودة البخار، ويُفضّل هنا «نسبة الجفاف» لبيان معناها الكتلي. وهي بلا وحدات، وليست نسبة حجم البخار ولا مقياس نقاوة كيميائية.

$$x = \frac{m_g}{m_{total}} = \frac{m_g}{m_f + m_g} \quad (2)$$

تساوي x صفراً للسائل المشبع وواحداً للبخار المشبع، وتقع بينهما للخليط. إذا أعطيت النسبة بالمئة تُقسم على 100 قبل التعويض. لا توجد نسبة جفاف للبخار المحمّص أو للسائل المضغوط؛ فالقيمة المحسوبة خارج المجال من صفر إلى واحد تشير إلى اختيار غير مناسب لعلاقة الخليط أو إلى خطأ في البيانات.

اشتقاق علاقة الخليط: لخاصية كلية جمعية Y ، تكون قيمتها مجموع مساهمتي الطورين. بقسمة هذا المجموع على الكتلة الكلية، واستخدام أن حصة كتلة السائل تساوي واحداً ناقص نسبة الجفاف، نحصل على متوسط كتلي للخاصية النوعية y:

$$Y = m_f y_f + m_g y_g$$

$$y = (1 - x) y_f + x y_g = y_f + x(y_g - y_f)$$

$$v = v_f + x v_{fg} \quad ; \quad u = u_f + x u_{fg}$$

$$h = h_f + x h_{fg} \quad ; \quad x = \frac{y - y_f}{y_g - y_f}$$

تُؤخذ خواص f و g من صف الإشباع نفسه. يمكن استعمال العلاقة مع v أو u أو h ؛ ولا تُعمّم على كل خاصية كيفما اتفق، فالكثافة مثلاً تُحسب من $\rho = 1/v$. يجب أن تقع خاصية الخليط بين قيمتي السائل المشبع والبخار المشبع. وللحصول على الحجم أو الإنثالبي الكلي نضرب الخاصية النوعية بالكتلة الكلية.

الاستيفاء الخطي (Linear interpolation): إذا وقعت قيمة مطلوبة a بين قيمتين متجاورتين a1 و a2 في جدول مناسب، نقرّب تغير الخاصية بخط مستقيم بين النقطتين. نثبت بقية شروط الجدول، مثل الضغط عند الاستيفاء بين درجتي حرارة للبخار المحمّص:

$$y = y_1 + \frac{a - a_1}{a_2 - a_1}(y_2 - y_1)$$

اختَر صفين يحيطان بالقيمة المطلوبة ضمن منطقة الطور نفسها، ثم احسب موضعها النسبي بينهما واضربه بفرق الخاصية. الاستيفاء تقريب قد يتطلب صفوفاً أقرب عندما يتغير السلوك سريعاً. لا تمدّ الخط إلى خارج المجال ولا تستوفِ بين حالة سائل مضغوط وأخرى بخار محمّص عبر منطقة تغير الطور.

المحاضرة 3، الفقرة 5
سلوك الغاز المثالي

معادلة الحالة تربط الضغط ودرجة الحرارة والحجم النوعي. الغاز المثالي (Ideal gas) نموذج مبسط يصف هذه العلاقة بدقة مناسبة عندما تكون كثافة الغاز منخفضة ويكون بعيداً عن التكثف. يمكن استخدامه لهواء مجفف زراعي في ظروف ملائمة، بعد تحديد تركيب الهواء وافتراضات المسألة.

$$Pv = RT \tag{3}$$

$$PV = mRT \tag{4}$$

يرمز P إلى الضغط المطلق، و T إلى درجة الحرارة المطلقة، و m إلى كتلة الغاز، و R إلى ثابت الغاز النوعي. الصيغة الأولى تخص وحدة الكتلة، والثانية تخص الكتلة الكلية، (المول: عدد ثابت من الذرات، الجزيئات، والأيونات، يساوي تقريباً 6.022×10^{23} جسيم). لا نضع الحجم الكلي مكان v ، ولا نضيف الكتلة مرة أخرى إلى الصيغة النوعية.

ثابت الغاز: تختلف قيمة R باختلاف المادة، وتحسب بقسمة ثابت الغاز العام Ru على الكتلة المولية M. عند استخدام M بوحدة kg/kmol تكون الوحدات متوافقة مع القيمة الآتية:

$$R = \frac{R_u}{M} \quad ; \quad R_u = 8.31447\ kJ/(kmol \cdot K)$$

$$R_{air} = 0.2870\ kJ/(kg \cdot K) = 0.2870\ kPa \cdot m^3/(kg \cdot K)$$

تؤخذ ثوابت الغازات من الجدول A–1. استخدام ثابت الهواء لبخار الماء يعطي نتيجة خاطئة لأن تركيب المادة وكتلتها المولية مختلفان. كما لا يُستخدم الثابت العام مباشرةً مع الكتلة بالكيلوغرام؛ فالصيغة المحتوية على Ru تستخدم كمية المادة بالكيلومول.

الضغط والحرارة المطلقان: تُحوّل درجة الحرارة المئوية إلى كلفن، ويُضاف الضغط الجوي المحلي إلى الضغط المقاس نسبةً إليه. إذا كانت قراءة الجهاز ضغط تفريغ موجباً، تُطرح من الضغط الجوي للحصول على الضغط المطلق:

$$T(K) = T(°C) + 273.15$$

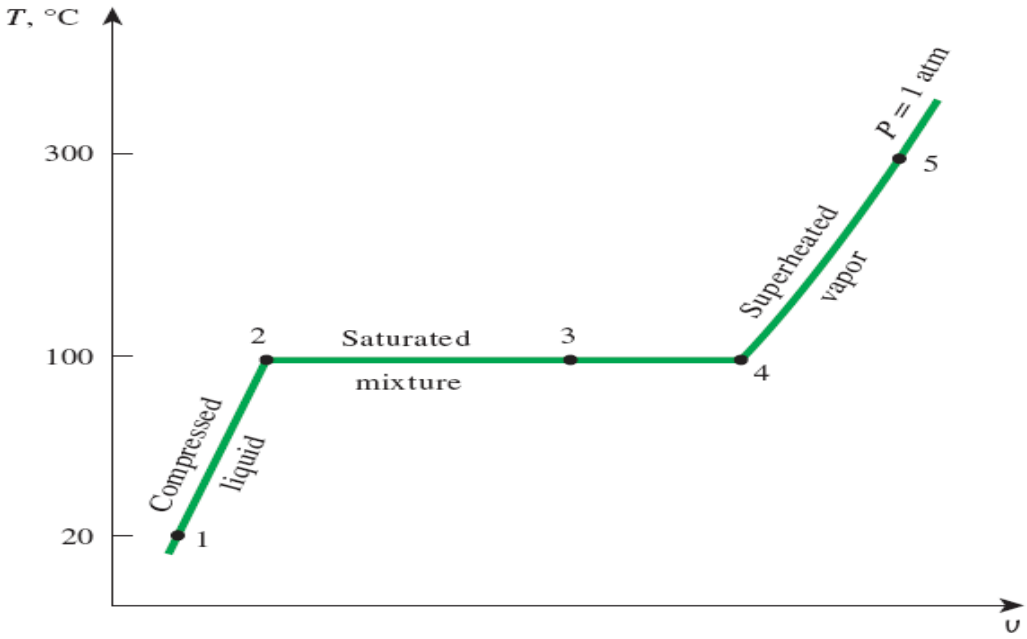
$$P_{abs} = P_{atm} + P_{gauge} = P_{atm} - P_{vac}$$

تعبر الصيغتان الأخيرتان عن طريقتين بديلتين لوصف القراءة، وليستا جمعاً لقراءتين مختلفتين. لا يجوز التعويض بدرجة مئوية أو بضغط مقاس نسبياً في معادلة الغاز المثالي. وعند ثبات كتلة الغاز وتركيبه بين حالتين يمكن استخدام:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \tag{5}$$

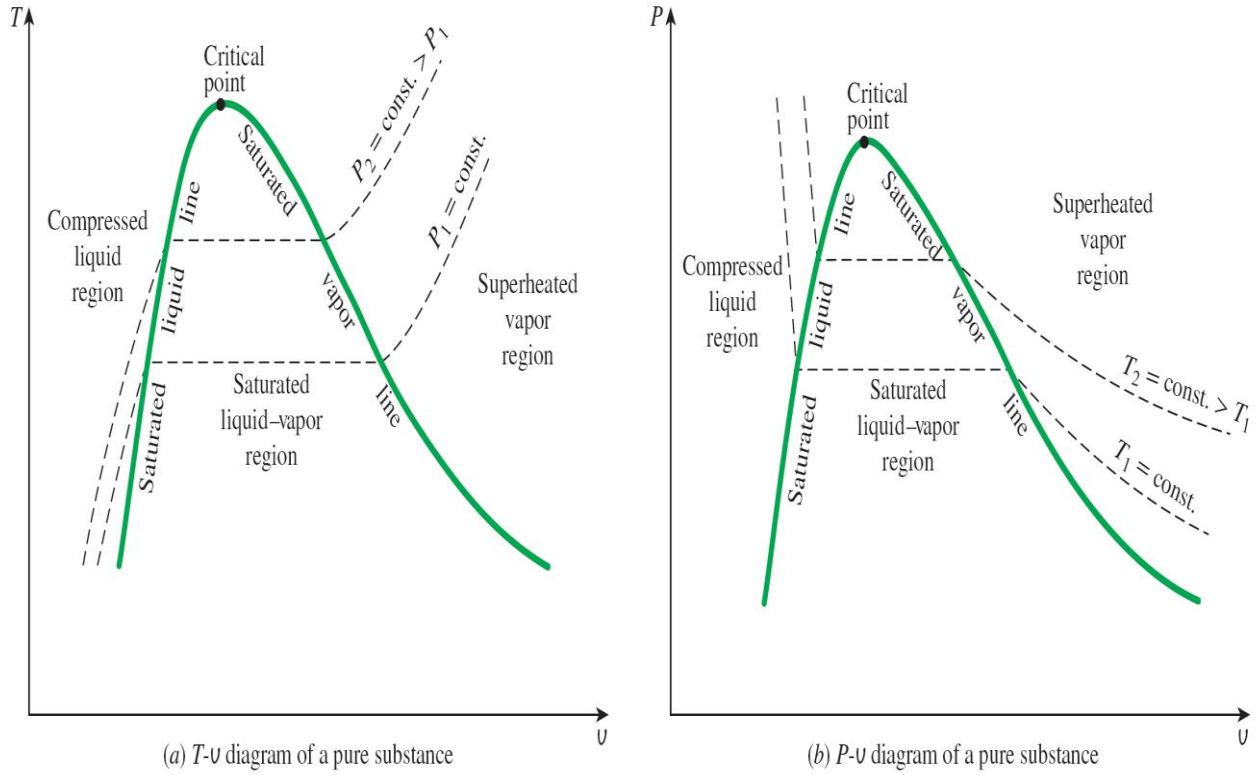
حدود التقريب: يتحسن السلوك المثالي عادةً عند انخفاض الضغط وارتفاع الحرارة مقارنةً بالظروف الحرجة للمادة. لا توجد قيمة ضغط واحدة تضمن صلاحيته لكل الغازات. قرب التكثف، وعند الكثافات المرتفعة، أو عند الحاجة إلى دقة أعلى، نرجع إلى جداول الخواص أو نموذج غاز حقيقي مناسب. ولا تُطبّق هذه المعادلة على خليط ماء سائل وبخار مشبع لحساب خواصه؛ بل تُستخدم جداول الإشباع ونسبة الجفاف.

مواد مساندة: الأشكال وتعليقاتها



الشكل **1**. مخطط T–v لعملية تسخين الماء عند ضغط ثابت.

قراءة الشكل: الانتقال من الحالة 1 إلى 2 تسخين للسائل؛ ومن 2 إلى 4 تغير طور عند ثبات الضغط ودرجة الحرارة؛ وبعد 4 تسخين للبخار المحمّص. الحالة 3 خليط من سائل وبخار مشبعين.



الشكل **2**. مخططات خواص مادة نقية:(a) مخطط T–v لمادة نقية؛ (b) مخطط P–v لمادة نقية.

يركز الشرح على الجزء (a): خط السائل المشبع يسار القبة، وخط البخار المشبع يمينها، والنقطة الحرجة عند التقائهما.

مواد مساندة: مقتطفات من جداول الخواص المستعارة في حسابات هذه المحاضرة (صفحة 8-17)

الجدول A–5: الماء المشبع — جدول الضغط

vg (m³/kg)	vf (m³/kg)	Tsat (°C)	P (kPa)
1.6941	0.001043	99.61	100
1.1594	0.001053	111.35	150
0.88578	0.001061	120.21	200
0.71873	0.001067	127.41	250

hg (kJ/kg)	hfg (kJ/kg)	hf (kJ/kg)	P (kPa)
2675.0	2257.5	417.51	100
2693.1	2226.0	467.13	150
2706.3	2201.6	504.71	200
2716.5	2181.2	535.35	250

ملاحظة القراءة: hfg فرق الإنثالبي بين البخار والسائل المشبعين. قد يظهر فرق صغير جداً عند طرح hf − hg بسبب تقريب الاعمدة؛ عند وجود عمود hfg نستعمل قيمته مباشرةً في علاقة الخليط.

الجدول A–6: الماء في منطقة البخار المحمّص

h (kJ/kg)	u (kJ/kg)	v (m³/kg)	T (°C)
2769.1	2577.1	0.95986	150
2870.7	2654.6	1.08049	200
2971.2	2731.4	1.19890	250

دليل مختصر لاختيار موضع البحث

إذا عُرف ضغط البخار الرطب استعمل A–5 ؛ وإذا عُرفت درجة حرارته استعمل A–4. إذا كانت درجة الحرارة أعلى من درجة الإشباع عند الضغط المعطى استعمل A–6. في جميع الحالات ثبّت وحدات الضغط قبل الانتقال بين الجداول، وحدد معنى الحرف السفلي قبل نقل القيمة.

ترميز f: سائل مشبع؛ g: بخار مشبع؛ fg: فرق خواص البخار والسائل. لا يمثل العمود g خواص كل أنواع البخار، بل البخار المشبع فقط.

TABLE A–1

Molar mass, gas constant, and critical-point properties

Substance	Formula	Molar mass, M kg/kmol	Gas constant, R kJ/kg·K*	*Critical-point properties* Temperature, K	Pressure, MPa	Volume, m^3/kmol
Air	—	28.97	0.2870	132.5	3.77	0.0883
Ammonia	NH_3	17.03	0.4882	405.5	11.28	0.0724
Argon	Ar	39.948	0.2081	151	4.86	0.0749
Benzene	C_6H_6	78.115	0.1064	562	4.92	0.2603
Bromine	Br_2	159.808	0.0520	584	10.34	0.1355
n-Butane	C_4H_{10}	58.124	0.1430	425.2	3.80	0.2547
Carbon dioxide	CO_2	44.01	0.1889	304.2	7.39	0.0943
Carbon monoxide	CO	28.011	0.2968	133	3.50	0.0930
Carbon tetrachloride	CCl_4	153.82	0.05405	556.4	4.56	0.2759
Chlorine	Cl_2	70.906	0.1173	417	7.71	0.1242
Chloroform	$CHCl_3$	119.38	0.06964	536.6	5.47	0.2403
Dichlorodifluoromethane (R–12)	CCl_2F_2	120.91	0.06876	384.7	4.01	0.2179
Dichlorofluoromethane (R–21)	$CHCl_2F$	102.92	0.08078	451.7	5.17	0.1973
Ethane	C_2H_6	30.070	0.2765	305.5	4.48	0.1480
Ethyl alcohol	C_2H_5OH	46.07	0.1805	516	6.38	0.1673
Ethylene	C_2H_4	28.054	0.2964	282.4	5.12	0.1242
Helium	He	4.003	2.0769	5.3	0.23	0.0578
n-Hexane	C_6H_{14}	86.179	0.09647	507.9	3.03	0.3677
Hydrogen (normal)	H_2	2.016	4.1240	33.3	1.30	0.0649
Krypton	Kr	83.80	0.09921	209.4	5.50	0.0924
Methane	CH_4	16.043	0.5182	191.1	4.64	0.0993
Methyl alcohol	CH_3OH	32.042	0.2595	513.2	7.95	0.1180
Methyl chloride	CH_3Cl	50.488	0.1647	416.3	6.68	0.1430
Neon	Ne	20.183	0.4119	44.5	2.73	0.0417
Nitrogen	N_2	28.013	0.2968	126.2	3.39	0.0899
Nitrous oxide	N_2O	44.013	0.1889	309.7	7.27	0.0961
Oxygen	O_2	31.999	0.2598	154.8	5.08	0.0780
Propane	C_3H_8	44.097	0.1885	370	4.26	0.1998
Propylene	C_3H_6	42.081	0.1976	365	4.62	0.1810
Sulfur dioxide	SO_2	64.063	0.1298	430.7	7.88	0.1217
Tetrafluoroethane (R–134a)	CF_3CH_2F	102.03	0.08149	374.2	4.059	0.1993
Trichlorofluoromethane (R–11)	CCl_3F	137.37	0.06052	471.2	4.38	0.2478
Water	H_2O	18.015	0.4615	647.1	22.06	0.0560
Xenon	Xe	131.30	0.06332	289.8	5.88	0.1186

TABLE A–4

Saturated water—Temperature table

		Specific volume, m^3/kg		*Internal energy,* kJ/kg			*Enthalpy,* kJ/kg			*Entropy,* kJ/kg·K		
Temp., T °C	Sat. Press., P_{sat} kPa	Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	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)*

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

TABLE A–5

Saturated water—Pressure table

		Specific volume, m^3/kg		*Internal energy,* kJ/kg			*Enthalpy,* kJ/kg			*Entropy,* kJ/kg·K		
Press., P kPa	Sat. temp., T_{sat} °C	Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
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)*

		Specific volume, m^3/kg		*Internal energy,* kJ/kg			*Enthalpy,* kJ/kg			*Entropy,* kJ/kg·K		
Press., P kPa	Sat. temp., T_{sat} °C	Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
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

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K
	P = 0.01 MPa (45.81°C)*				P = 0.05 MPa (81.32°C)				P = 0.10 MPa (99.61°C)			
Sat.†	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	3.5655	3132.2	3488.7	8.8362
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201	4.0279	3302.8	3705.6	9.0999
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056	8.9813	3480.6	3929.7	9.6626	4.4900	3480.4	3929.4	9.3424
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312	9.9047	3665.2	4160.4	9.8883	4.9519	3665.0	4160.2	9.5682
900	54.143	3856.9	4398.3	10.8429	10.8280	3856.8	4398.2	10.1000	5.4137	3856.7	4398.0	9.7800
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429	11.7513	4055.2	4642.7	10.3000	5.8755	4055.0	4642.6	9.9800
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326	12.6745	4259.9	4893.7	10.4897	6.3372	4259.8	4893.6	10.1698
1200	67.989	4470.9	5150.8	11.4132	13.5977	4470.8	5150.7	10.6704	6.7988	4470.7	5150.6	10.3504
1300	72.604	4687.4	5413.4	11.5857	14.5209	4687.3	5413.3	10.8429	7.2605	4687.2	5413.3	10.5229
	P = 0.20 MPa (120.21°C)				P = 0.30 MPa (133.52°C)				P = 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
	P = 0.50 MPa (151.83°C)				P = 0.60 MPa (158.83°C)				P = 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

TABLE A–6

Superheated water *(Continued)*

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K
	P = 1.00 MPa (179.88°C)				P = 1.20 MPa (187.96°C)				P = 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
	P = 1.60 MPa (201.37°C)				P = 1.80 MPa (207.11°C)				P = 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
	P = 2.50 MPa (223.95°C)				P = 3.00 MPa (233.85°C)				P = 3.50 MPa (242.56°C)			
Sat.	0.07995	2602.1	2801.9	6.2558	0.06667	2603.2	2803.2	6.1856	0.05706	2603.0	2802.7	6.1244
225	0.08026	2604.8	2805.5	6.2629								
250	0.08705	2663.3	2880.9	6.4107	0.07063	2644.7	2856.5	6.2893	0.05876	2624.0	2829.7	6.1764
300	0.09894	2762.2	3009.6	26.6459	0.08118	2750.8	2994.3	6.5412	0.06845	2738.8	2978.4	6.4484
350	0.10979	2852.5	3127.0	6.8424	0.09056	2844.4	3116.1	6.7450	0.07680	2836.0	3104.9	6.6601
400	0.12012	2939.8	3240.1	7.0170	0.09938	2933.6	3231.7	6.9235	0.08456	2927.2	3223.2	6.8428
450	0.13015	3026.2	3351.6	7.1768	0.10789	3021.2	3344.9	7.0856	0.09198	3016.1	3338.1	7.0074
500	0.13999	3112.8	3462.8	7.3254	0.11620	3108.6	3457.2	7.2359	0.09919	3104.5	3451.7	7.1593
600	0.15931	3288.5	3686.8	7.5979	0.13245	3285.5	3682.8	7.5103	0.11325	3282.5	3678.9	7.4357
700	0.17835	3469.3	3915.2	7.8455	0.14841	3467.0	3912.2	7.7590	0.12702	3464.7	3909.3	7.6855
800	0.19722	3656.2	4149.2	8.0744	0.16420	3654.3	4146.9	7.9885	0.14061	3652.5	4144.6	7.9156
900	0.21597	3849.4	4389.3	8.2882	0.17988	3847.9	4387.5	8.2028	0.15410	3846.4	4385.7	8.1304
1000	0.23466	4049.0	4635.6	8.4897	0.19549	4047.7	4634.2	8.4045	0.16751	4046.4	4632.7	8.3324
1100	0.25330	4254.7	4887.9	8.6804	0.21105	4253.6	4886.7	8.5955	0.18087	4252.5	4885.6	8.5236
1200	0.27190	4466.3	5146.0	8.8618	0.22658	4465.3	5145.1	8.7771	0.19420	4464.4	5144.1	8.7053
1300	0.29048	4683.4	5409.5	9.0349	0.24207	4682.6	5408.8	8.9502	0.20750	4681.8	5408.0	8.8786

TABLE A–6

Superheated water *(Continued)*

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K
	P = 4.0 MPa (250.35°C)				P = 4.5 MPa (257.44°C)				P = 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
	P = 6.0 MPa (275.59°C)				P = 7.0 MPa (285.83°C)				P = 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
	P = 9.0 MPa (303.35°C)				P = 10.0 MPa (311.00°C)				P = 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				
350	0.025816	2725.0	2957.3	6.0380	0.022440	2699.6	2924.0	5.9460	0.016138	2624.9	2826.6	5.7130
400	0.029960	2849.2	3118.8	6.2876	0.026436	2833.1	3097.5	6.2141	0.020030	2789.6	3040.0	6.0433
450	0.033524	2956.3	3258.0	6.4872	0.029782	2944.5	3242.4	6.4219	0.023019	2913.7	3201.5	6.2749
500	0.036793	3056.3	3387.4	6.6603	0.032811	3047.0	3375.1	6.5995	0.025630	3023.2	3343.6	6.4651
550	0.039885	3153.0	3512.0	6.8164	0.035655	3145.4	3502.0	6.7585	0.028033	3126.1	3476.5	6.6317
600	0.042861	3248.4	3634.1	6.9605	0.038378	3242.0	3625.8	6.9045	0.030306	3225.8	3604.6	6.7828
650	0.045755	3343.4	3755.2	7.0954	0.041018	3338.0	3748.1	7.0408	0.032491	3324.1	3730.2	6.9227
700	0.048589	3438.8	3876.1	7.2229	0.043597	3434.0	3870.0	7.1693	0.034612	3422.0	3854.6	7.0540
800	0.054132	3632.0	4119.2	7.4606	0.048629	3628.2	4114.5	7.4085	0.038724	3618.8	4102.8	7.2967
900	0.059562	3829.6	4365.7	7.6802	0.053547	3826.5	4362.0	7.6290	0.042720	3818.9	4352.9	7.5195
1000	0.064919	4032.4	4616.7	7.8855	0.058391	4029.9	4613.8	7.8349	0.046641	4023.5	4606.5	7.7269
1100	0.070224	4240.7	4872.7	8.0791	0.063183	4238.5	4870.3	8.0289	0.050510	4233.1	4864.5	7.9220
1200	0.075492	4454.2	5133.6	8.2625	0.067938	4452.4	5131.7	8.2126	0.054342	4447.7	5127.0	8.1065
1300	0.080733	4672.9	5399.5	8.4371	0.072667	4671.3	5398.0	8.3874	0.058147	4667.3	5394.1	8.2819

TABLE A–6

Superheated water *(Concluded)*

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K
	P = 15.0 MPa (342.16°C)				P = 17.5 MPa (354.67°C)				P = 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								
400	0.015671	2740.6	2975.7	5.8819	0.012463	2684.3	2902.4	5.7211	0.009950	2617.9	2816.9	5.5526
450	0.018477	2880.8	3157.9	6.1434	0.015204	2845.4	3111.4	6.0212	0.012721	2807.3	3061.7	5.9043
500	0.020828	2998.4	3310.8	6.3480	0.017385	2972.4	3276.7	6.2424	0.014793	2945.3	3241.2	6.1446
550	0.022945	3106.2	3450.4	6.5230	0.019305	3085.8	3423.6	6.4266	0.016571	3064.7	3396.2	6.3390
600	0.024921	3209.3	3583.1	6.6796	0.021073	3192.5	3561.3	6.5890	0.018185	3175.3	3539.0	6.5075
650	0.026804	3310.1	3712.1	6.8233	0.022742	3295.8	3693.8	6.7366	0.019695	3281.4	3675.3	6.6593
700	0.028621	3409.8	3839.1	6.9573	0.024342	3397.5	3823.5	6.8735	0.021134	3385.1	3807.8	6.7991
800	0.032121	3609.3	4091.1	7.2037	0.027405	3599.7	4079.3	7.1237	0.023870	3590.1	4067.5	7.0531
900	0.035503	3811.2	4343.7	7.4288	0.030348	3803.5	4334.6	7.3511	0.026484	3795.7	4325.4	7.2829
1000	0.038808	4017.1	4599.2	7.6378	0.033215	4010.7	4592.0	7.5616	0.029020	4004.3	4584.7	7.4950
1100	0.042062	4227.7	4858.6	7.8339	0.036029	4222.3	4852.8	7.7588	0.031504	4216.9	4847.0	7.6933
1200	0.045279	4443.1	5122.3	8.0192	0.038806	4438.5	5117.6	7.9449	0.033952	4433.8	5112.9	7.8802
1300	0.048469	4663.3	5390.3	8.1952	0.041556	4659.2	5386.5	8.1215	0.036371	4655.2	5382.7	8.0574
	P = 25.0 MPa				P = 30.0 MPa				P = 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
	P = 40.0 MPa				P = 50.0 MPa				P = 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 °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg·K
	P = 5 MPa (263.94°C)				P = 10 MPa (311.00°C)				P = 15 MPa (342.16°C)			
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
	P = 20 MPa (365.75°C)				P = 30 MPa				P = 50 MPa			
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

مثال زراعي محلول: بخار رطب لوحدة معالجة حرارية

يُجهّز بخار رطب إلى وحدة للمعالجة الحرارية لمنتج زراعي عند ضغط مطلق مقداره 200 kPa ونسبة جفاف 90%. حدّد الحجم النوعي والإنثالبي النوعي للبخار الرطب. ثم احسب كتلتي السائل والبخار والحجم الكلي والإنثالبي الكلي لكمية مقدارها 10 kg عند الحالة نفسها.

المعطيات: P = 200 kPa مطلق؛ x = 90% = 0.90 ؛ m = 10 kg. المطلوب أساساً v و h ، ثم الكميات الكلية للحالة المحددة.

النظام والافتراضات: نحلل خواص كمية من الماء عند نقطة التجهيز، قبل تبادل الطاقة مع المنتج. الماء مادة نقية، والسائل والبخار في اتزان عند ضغط موحد. لا نحسب هنا شغل جهاز أو حرارة عملية، لذلك لا يلزم افتراض أن h تساوي حرارة منقولة.

1. تحديد منطقة الطور واختيار الجدول

وصف «بخار رطب» ومعطى 0 < x < 1 يحددان منطقة الخليط المشبع. نختار A–5 لأن الضغط معلوم، ونقرأ صف 200 kPa. تكون درجة الحرارة مساوية لدرجة الإشباع 120.21° C ؛ فلا نحتاج إلى جدول البخار المحمّص ولا إلى معادلة الغاز المثالي.

2. القوانين النظرية قبل التعويض العددي

$$x = \frac{m_g}{m} \quad ; \quad m_g = xm \quad ; \quad m_f = (1 - x)m$$

$$V = m_f v_f + m_g v_g \quad ; \quad v = \frac{V}{m}$$

$$v = (1 - x)v_f + x v_g = v_f + x(v_g - v_f)$$

$$h = h_f + x h_{fg} \quad ; \quad V = mv \quad ; \quad H = mh$$

هذه علاقات خواص ومتوسطات كتلية. الحرف H هنا إنثالبي الكمية الكلي، وليس انتقال الحرارة Q. وتُقرأ جميع خواص الطرفين من صف الإشباع نفسه؛ إذ لا يجوز خلط قيمة vf عند ضغط مع قيمة vg عند ضغط آخر.

3. نقل بيانات صف الإشباع

$$v_f = 0.001061\ m^3/kg \quad ; \quad v_g = 0.88578\ m^3/kg$$

$$h_f = 504.71\ kJ/kg \quad ; \quad h_{fg} = 2201.6\ kJ/kg$$

تُستعمل قيمة hfg الجدولية مباشرةً. hg = 2706.3 kJ/kg للتحقق من حدود النتيجة. تستكمل الحسابات في الصفحة التالية.

المثال الزراعي — التعويض والتحقق من النتائج

4. حساب الحجم النوعي

$$v_{\text{fg}} = 0.88578 - 0.001061 = 0.884719\, m^3/kg$$

$$v = 0.001061 + 0.90 \times 0.884719$$

$$v = 0.7973081 \approx 0.79731\, m^3/kg$$

نضرب فرق الحجم النوعي بنسبة الجفاف ثم نضيف حجم السائل النوعي. لا تساوي v حاصل ضرب x في vg وحدهما، لأن الطور السائل يشغل حجماً أيضاً، وإن كان صغيراً هنا.

5. حساب الإنثالبي النوعي

$$h = 504.71 + 0.90 \times 2201.6$$

$$h = 504.71 + 1981.44 = 2486.15\, kJ/kg$$

6. حساب كتلتي الطورين والكميات الكلية

$$m_{\text{g}} = 0.90 \times 10 = 9\, kg$$

$$m_{\text{f}} = (1 - 0.90) \times 10 = 1\, kg$$

$$V = 10 \times 0.7973081 = 7.973081 \approx 7.9731\, m^3$$

$$H = 10 \times 2486.15 = 24861.5\, kJ$$

7. التحقق الفيزيائي والوحداتي

$$0.001061 < 0.79731 < 0.88578 \quad (m^3/kg)$$

$$504.71 < 2486.15 < 2706.3 \quad (kJ/kg)$$

تقع الخاصيتان بين قيمتي السائل والبخار المشبعين كما يجب، ومجموع كتلتي الطورين 1 + 9 = 10 kg. ضرب m³/kg في kg يعطي m³، وضرب kJ/kg في kg يعطي kJ. ويمكن التحقق بصورة مستقلة من الحجم بجمع حجمي الطورين:

$$V = 1 \times 0.001061 + 9 \times 0.88578 = 7.973081\, m^3$$

التفسير الزراعي: نسبة الجفاف 90% تعني أن 90% من الكتلة بخار، وأن 10% منها ماء سائل؛ ولا تعني أن البخار يشغل 90% من الحجم. معرفة الحالة ضرورية لتحليل تجهيز البخار، أما الطاقة التي تصل فعلياً إلى المنتج فتحتاج أيضاً إلى حالة البخار أو الماء بعد خروجه من الوحدة وإلى موازنة الطاقة.

مثال إضافي للمراجعة: الاستيفاء للبخار المحمّص

يدخل بخار إلى مبادل حراري لتسخين ماء مستخدم في تجهيز منتج زراعي عند ضغط مطلق 0.20 MPa ودرجة حرارة 175° C. أوجد تقريباً حجمه النوعي وإنثالبيه النوعي.

المعطيات والمطلوب: P = 0.20 MPa = 200 kPa ؛ T = 175° C. المطلوب v و h. نفترض ماءً نقياً في حالة اتزان محلي، وأن الاستيفاء الخطي بين الصفين المتجاورين تقريب مناسب.

1. تحديد الحالة والجدول

عند الضغط المعطى تكون Tsat = 120.21° C. وبما أن 175° C أكبر منها، فالحالة بخار محمّص. نستخدم مجموعة 0.20 MPa من A–6 ، ونثبت الضغط أثناء الاستيفاء بين 150° C و 200° C. لا نحسب نسبة جفاف لأن الحالة خارج منطقة الخليط.

2. القانون العام وترتيب الحساب

$$y = y_1 + \lambda(y_2 - y_1) \quad ; \quad \lambda = \frac{T - T_1}{T_2 - T_1}$$

تمثل y الخاصية المطلوبة v أو h. المعامل λ مقدار بلا وحدات يحدد موضع درجة الحرارة المطلوبة بين صفّي الجدول. استخدام فروق الحرارة المئوية هنا صحيح لأنها تساوي فروق الحرارة بالكلفن؛ وهذه علاقة استيفاء وليست معادلة الغاز المثالي.

3. بيانات الجدول والتعويض

$T_1 = 150°C \quad ; \quad v_1 = 0.95986\, m^3/kg \quad ; \quad h_1 = 2769.1\, kJ/kg$ (fluid)

$T_2 = 200°C \quad ; \quad v_2 = 1.08049\, m^3/kg \quad ; \quad h_2 = 2870.7\, kJ/kg$ (gas)

$$\lambda = \frac{175 - 150}{200 - 150} = \frac{25}{50} = 0.50$$

$$v = 0.95986 + 0.50(1.08049 - 0.95986)$$

$$v = 1.020175 \approx 1.02018\, m^3/kg$$

$$h = 2769.1 + 0.50(2870.7 - 2769.1) = 2819.9\, kJ/kg$$

4. التحقق والتفسير

تقع كل نتيجة بين قيمتيها الجدوليتين، وتساوي متوسطهما الحسابي لأن 175° C تقع في منتصف المسافة بين 150° C و 200 C °. النتائج تقريبية نتيجة افتراض التغير الخطي؛ ويختلف هذا التقريب عن علاقة الخليط المشبع التي تستند إلى المتوسط الكتلي بين طورين عند شرط الإشباع نفسه.

مثال إضافي للمراجعة: كتلة الهواء داخل حجرة تجفيف

تحتوي حجرة حجمها 2.00 m³، قبل تحميلها بالمنتج، على هواء جاف بدرجة حرارة 40°C. يقرأ مقياس الضغط صفراً بالنسبة إلى الجو المحيط، والضغط الجوي المحلي المعطى للمسألة 100 kPa. احسب كتلة الهواء وكثافته.

المعطيات والمطلوب: $V = 2.00\ m^3$؛ $T = 40°C$ ؛ $P_{gauge} = 0\ kPa$ ؛ $P_{atm} = 100\ kPa$
$R = 0.2870\ kPa\cdot m^3/(kg\cdot K)$. المطلوب m و ρ.

الافتراضات: الهواء جاف ثابت التركيب وخواصه موحدة في الحجرة. يعامل بوصفه غازاً مثالياً عند هذه الظروف القريبة من الضغط الجوي. الحجم المعطى كله متاح للهواء؛ ولا توجد منتجات تشغل جزءاً منه.

1. القوانين النظرية قبل التعويض

$$PV = mRT \quad \Longrightarrow \quad m = \frac{PV}{RT}$$

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

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{gauge} \quad ; \quad T(K) = T(°C) + 273.15$$

2. تحويل الضغط ودرجة الحرارة

$$P_{abs} = 100 + 0 = 100\ kPa$$

$$T = 40 + 273.15 = 313.15\ K$$

قراءة المقياس صفر لا تعني أن الضغط المطلق صفر؛ بل تعني أن ضغط الحجرة يساوي الضغط الجوي المحلي. كما لا يجوز إدخال 40 بدلاً من 313.15 في معادلة الحالة.

3. التعويض والحساب

$$RT = 0.2870 \times 313.15 = 89.87405\ kPa\cdot m^3/kg$$

$$m = \frac{100 \times 2.00}{0.2870 \times 313.15} = 2.22534 \approx 2.23\ kg$$

$$\rho = \frac{2.22534}{2.00} \approx 1.113\ kg/m^3$$

4. فحص الوحدات والمعنى الفيزيائي

$$[m] = \frac{kPa\cdot m^3}{[kPa\cdot m^3/(kg\cdot K)]\cdot K} = kg$$

الكتلة المحسوبة موجبة، والكثافة من رتبة كيلوغرام واحد لكل متر مكعب، وهو مقدار معقول للهواء عند هذه الظروف. باستخدام الكتلة غير المقربة نحصل على $mRT \approx 200\ kPa\cdot m^3$، وهي قيمة PV نفسها. إذا حُمّلت الحجرة بمنتج زراعي وجب استعمال الحجم المتبقي للهواء، وإذا كانت رطوبة الهواء مؤثرة في الدقة المطلوبة وجب تعديل النموذج لتمثيل الهواء الرطب.