تقوم الملابس الدافئة بدور عوازل في الجوّ البارد للتقليل من كميَّةِ الحرارة المفقودة من الجسم البشري إلى محيطه الخارجي عن طريق التوصيل والحمل. وتعمل نار المخيّم على تدفئتك وتدفئة ملابسك . كما تستطيع النار أيضاً نقل الطاقة مباشرةً عن طريق التوصيل الحراريّ لكلّ ما تـــقوم بطهيه. وتُعدّ الحرارةُ انتقالاً للطاقة مثل الشغل تماماً.وتُعرَّف الحرارة على أنّها انتقال للطاقة بسبب الاختلاف في درجات الحرارة. وهناك مبدأ مفيد آخر وهو أنّ الطاقة الداخلية U هي المجموع الكلي لطاقات جزئيات النظام جميعها.

الفصل 14
الحرارة

عندما نضع قدراً مملوءًا بالماء البارد على حارقة موقد ساخنة ستزداد درجة حرارة الماء. ونقول بأنّ الحرارة "ستنساب" من الحارقة الساخنة إلى الماء البارد. وعندما يتلامس جسمان مختلفان في درجة الحرارة، فإنّ الحرارة تنساب تلقائيًّا من الجسم الأسخن إلى الجسم الأبرد. ويستمر الانسياب التلقائي للحرارة حتى تتعادل درجتا الحرارة. وإذا تُرك الجسمان متلامسين فترةً طويلةً كافيةً كي تتعادل درجتا حرارتيهما، عندها يُقال بأنّ الجسمين يخضعان لاتزانٍ حراريٍّ، حيث يتوقف بعدها الانسياب الحراريُّ بينهما. فعلى سبيل المثال، عندما يُوضع ميزان الحرارة في الفم فإنّ الحرارة تنساب من داخل تجويف الفم إلى الميزان. وعندما تصل درجة حرارة الميزان إلى درجة حرارة تجويف الفم نفسها، يقال إن ميزان الحرارة والفم قد وصلا إلى الاتزان، ليتوقف عندئذٍ أيّ انسياب للحرارة.

وغالباً ما يتمُّ الخلط بين كلّ من الحرارة ودرجة الحرارة، وهما مفهومان مختلفان تماماً. لذا، سنميّز بين هذين المفهومين بكلّ وضوح في هذا الفصل بما لا يدع مجالاً لأيّ لبس. وسنبدأ بتعريف مفهوم الحرارة واستخدامه. كما سنناقش أيضاً كيفية استخدام الحرارة في المسعر الحراري، ومدى ارتباط الحرارة بتغيير حالات المادة وعمليات انتقال الحرارة المختلفة مثل: التوصيل، والحمل، والإشعاع.

1-14 الحرارة كانتقال للطاقة

ونتكلّم بشكلٍ عام عن انسياب الحرارة: كانسيابها من حارقة الموقد إلى وعاء الحساء، أو من الشّمس إلى الأرض، أو من تجويف فم شخص إلى ميزان الحرارة. وتنساب الحرارة تلقائياً من الجسم ذي درجة الحرارة الأعلى إلى الجسم ذي درجة الحرارة الأخفض. وبالطبع، فإنّ نموذج القرن الثامن عشر للحرارة يصوّر انسياب الحرارة كحركة محتوى مائع سُمّي الحراريّ. ومع هذا، فلم يستطع أحد قياس هذا المائع الحراريّ أو اكتشافه. وأمّا في القرن التاسع عشر، فقد تمّ التوصل إلى إمكانية وصف مختلف أنواع الظواهر المرتبطة بالحرارة بطريقة منسجمة عندما استخدم نموذج جديد يتعامل مع الحرارة على أنّها شكلٌ من أشكال الشغل، كما سيتمّ مناقشتها بعد قليل. ويجب أنْ نلاحظ أولاً أنّ هناك وحدة عامة للحرارة لا تزال تستخدم إلى يومنا هذا منسوبة إلى السّعر، تُدعى "السّعر الحراريّ". واختصارها "سعر" (cal). وقد عُرّفت على أنّها "كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة غرام واحد من الماء درجة مئوية واحدة". وللدقة: فإنّ مدى درجة الحرارة تحديداً هو من 14.5°C إلى 15.5°C؛ لأنّ الحرارة المطلوبة تختلف اختلافاً طفيفا عند الدرجات المختلفة. ويقل مقدار هذا الاختلاف عن 1% خلال المدى 0 إلى 100°C مما يسهل علينا إهماله في معظم الحالات.

في حين تستخدم الوحدة التالية أكثر من استخدام السعر وهي الكيلو سعر (kcal) وتعادل 1000 سعر. وعليه، فإنّ كيلو سعر واحد (1 *kcal*) يعني مقدار الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 1 kg من الماء 1 C°. وغالباً ما يتم التعامل مع الكيلو سعر ويشار إليه وكأنه سعر ولكنه يُكتب باللغة الإنجليزية بالحرف الكبير (أي C) للدلالة على قيمته (1000 =سعر). وهذه هي الوحدة المستخدمة للدلالة على مقدار ما يحتويه الطعام من طاقة. وتبعاً لنظام الوحدات البريطاني، فيتم قياس الطاقة بدلالة الوحدات الحرارية البريطانية (Btu). وتمّ تعريف وحدة واحدة منها (1 Btu) على أنها الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 1 lb من الماء درجة فهرنهايتية واحدة (1 F°). ومن الممكن إثبات أن 1 Btu = 0.252 kcal = 1055 J (مسألة 4).

وقد تابع عدد من علماء القرن التاسع عشر فكرة ارتباط الحرارة بالطاقة ومن ضمنهم العالم الإنجليزي جيمس جول (1818–1889). وأجرى جول وآخرون عدداً من التجارب الأساسية التي ساهمت في صياغة فهمنا الحالي للحرارة على أنها انتقال للطاقة مثل الشغل. وتظهر إحدى تجارب جول (المبسطة) في (الشكل 14 – 1) حيث يسبّب سقوط الثقل دوران العجلة المجنحة. ويعمل الاحتكاك بين الماء والعجلة المجنحة على رفع درجة حرارة الماء بمقدار ضئيل جدًّا (يكاد يكون مقيسًا). ويمكن الحصول على الارتفاع نفسه في درجة الحرارة عن طريق تسخين الماء باستخدام موقد ساخن. وحدّد جول في هذه التجربة وتجارب أخرى كثيرة (يرتبط بعضها بالطاقة الكهربائية) أن مقدار الشغل المبذول يكافئ دائماً مقدار الحرارة المدخلة. ووُجد كمياً أن شغلاً مقداره 4.186 J يكافئ 1 سعر (1 cal) من الحرارة. وهذا ما يعرف **بالمكافئ الميكانيكيّ للحرارة**:

$$4.186\ \text{J} = 1\ \text{cal}$$
$$4.186\ \text{kJ} = 1\ \text{kcal}$$

وبناءً على هذه التجارب وتجارب عديدة أخرى، فقد فسر العلماء أن الحرارة ما هي إلاّ انتقال للطاقة؛ أي أنها ليست مادة أو شكلاً من أشكال الطاقة. وعليه، فعند انسياب الحرارة من الجسم الساخن إلى الجسم البارد فإنّ الطاقة هي التي تنتقل من الجسم الساخن إلى الجسم البارد. ونقول بأنّ الحرارة هي انتقال للطاقة من جسم إلى آخر بسبب الاختلاف بين درجتي حرارتيهما. وبدلالة الوحدات الدولية *(SI)*، فإنّ وحدة الحرارة هي الجول، وهي الوحدة المستخدمة لأنواع الطاقة جميعها على اختلافها. ومع هذا، فإن استخدام السعر أو الكيلو سعر مازال قائما أحياناً. ويُعرّفُ السعر في وقتنا الحالي بدلالة الجول (من خلال المكافئ الميكانيكيّ للحرارة) بدلاً من تعريفه بدلالة صفات الماء كما أعطي سابقاً. ولا يزال التعريف الأخير مستخدما لسهولته: يرفع السّعر الواحد غراما واحدا من الماء درجة مئوية واحدة، أو يرفع *1 g* سعر درجة حرارة *1 kg* من الماء درجة مئوية واحدة.

وعندما نستخدم كلمة"حرارة" فنعني انتقال الطاقة من مكانٍ أو جسمٍ ما إلى آخر عند درجة حرارةٍ أقلّ.

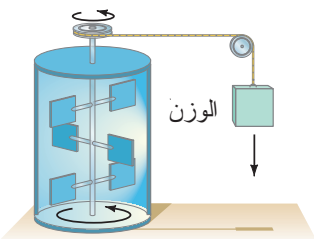
تنويه !

الحرارة ليست مائعا

السعر (وحدة)

كيلو سعر (السعر الغذائي)

BTU وحدة الحرارة البريطانية



الشكل 14 – 1 تجربة جول عن المكافئ الميكانيكيّ للحرارة.

المكافئ الميكانيكيّ للحرارة.

تعريف الحرارة: انتقال الطاقة بسبب ΔT.

تنويه !

تشير الحرارة إلى انتقال الطاقة لا إلى الطاقة نفسها.

كانت نتيجة "جول" أساسية؛ لأنّها وسّعت مبدأ الشغل والطاقة ليشمل العمليات المرتبطة بالحرارة. كما أنها أفضت إلى إثبات قانون حفظ الطاقة الذي سنناقشه بتفصيل أكثر في الفصل التالي.

المثال 14-1 قدّر التخلص من السعرات الزائدة

تطبيق الفيزياء
التّخلص من السّعرات الحراريّة

لنفترض أنّ شخصاً ما قام بأكل كميّةٍ كبيرةٍ من البوظة والحلوى تعادل 500 وحدة غذائية. وللتخلّص من هذه السّعرات الزائدة، أراد أن يقوم ببذل مقدار مكافئ من الشغل عن طريق تسلّق درج أو حبل. فما الارتفاع الكلّيّ الذي يجب أن يتسلقه؟ افترض أن كتلة المتسلق تعادل 60 kg (من أجل هذه الحسابات فقط).

النهج: يعادل مقدار الشغل المبذول (W) في صعود الدرج التغيّر في طاقة الوضع.
"$W = \Delta PE = mgh$" حيث تمثل h الارتفاع الرأسيّ المتسلّق.

الحل : إن 500 C هي 500 kcal وبدلالة الجول :

$$(500\ \text{kcal})(4.186 \times 10^3\ \text{J/kcal}) = 2.1 \times 10^6\ \text{J}.$$

والشغل المبذول لتسلّق الارتفاع الرأسيّ h هو $W = mgh$. ونحلّ لإيجاد h:

$$h = \frac{W}{mg} = \frac{2.1 \times 10^6\ \text{J}}{(60\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2)} = 3600\ \text{m}.$$

وهذا التغيّر في الارتفاع هائل جداً (أكثر من 11,000 ft).

ملحوظة: لا يستطيع الجسم البشري تحويل الطاقة بكفاءة 100%. بل قد تصل كفاءته في التحويل إلى 20%. وكما سنناقش في الفصل القادم، فإن جزءاً من الطاقة "يتمّ فقده". وعليه فعلى المتسلق أن يرتقي إلى الأعلى حوالي $(0.2)(3600\ \text{m}) \approx 700\ \text{m}$ وهو ارتفاع لا يزال كبيراً (حوالي 2300 ft).

14-2 الطاقة الداخلية

الطاقة الداخلية

يشار إلى مجموع الطاقات الكلّيّ لجزيئات الجسم جميعها بالطاقة الداخلية. (ويستخدم في بعض الأحيان مصطلح الطاقة الحرارية للدلالة على الشيء نفسه). وسنعرّف الآن مبدأ الطاقة الداخلية لأنها ستساعد في توضيح الأفكار المطروحة عن الحرارة.

التمييز بين درجة الحرارة، والطاقة الداخلية، والحرارة

تنويه !
التمييز بين الحرارة وكلّ من الطاقة الداخلية ودرجة الحرارة.

باستخدام نظرية الحركة، نستطيع توضيح الفرق بين كلٍّ من درجة الحرارة، والطاقة الداخلية، والحرارة. إنّ درجة الحرارة (بالكلفن) هي مقياس متوسط الطاقة الحركية للجزيئات الفردية. في حين تشير الطاقة الداخلية للجسم إلى الطاقة الكلية لجزيئاته جميعها. (وبناءً على ذلك، فإنّ سبيكتين ساخنتين من الحديد متساويتين في الكتلة لهما درجة الحرارة نفسها ستمتلكان معاً من الطاقة الحرارية ضعفي ما تمتلكه كلّ واحدة منهما على حدة). أمّا الحرارة فتشير إلى انتقال الطاقة من جسم إلى آخر بسبب الاختلاف في درجتي حرارتيهما.

تنويه !
يعتمد اتجاه انسياب الحرارة على درجة الحرارة (وليس على كمية الطاقة الداخلية).

لاحظ أنّ اتجاه انسياب الحرارة بين أي جسمين يعتمد على درجة حرارتيهما لا على مقدار ما يملك كلّ منهما من طاقة داخلية. ولهذا، إذا خُلِط 50 g من ماءٍ درجة حرارته 30°C مع 200 g أخرى من ماءٍ درجة حرارته 25°C فإنّ الحرارة ستنساب من الماء الذي درجة حرارته 30°C إلى الماء الذي درجة حرارته 25°C، على الرّغم من أن الطاقة الداخلية الكلية للماء الذي عند 25°C أكبرنتيجةً لكبركمية الماء عند تلك الدرجة.

الطاقة الداخلية للغاز المثالي

دعنا نحسب الطاقة الداخلية لـ n مول من غاز مثالي أحادي الذرّة (أي أنّ كلّ جزيء منه يتكون من ذرة واحدة). إنّ الطاقة الداخلية U هي مجموع الطاقات الحركية الانتقالية للذرات جميعها. ويعادل هذا المجموع متوسط الطاقة الحركية لكلّ جُزيءٍ مضروبًا في عدد الجزيئات الكلّي N:

$$U = N\left(\tfrac{1}{2}m\overline{v^2}\right)$$

وباستخدام (المعادلة 13 –8): $\overline{\text{KE}} = \frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT$

نستطيع كتابة هذا كالتالي:

$$U = \tfrac{3}{2}NkT$$

أو (نتذكر من البند 13 – 9)

$$U = \tfrac{3}{2}nRT \qquad \text{[غاز مثالي أحادي الذرة]} \quad \textbf{(14 – 1)}$$

حيث n عدد المولات. وعليه، فإنّ الطاقة الداخلية للغاز المثالي ستعتمد على كلّ من درجة الحرارة وعدد مولات الغاز فقط.

وإذا احتوت جزيئات الغاز على أكثر من ذرة واحدة، فعندها يجب أن يؤخذ بالحسبان طاقة الجزيئات الدورانية والاهتزازية (الشكل 14 – 2). وستكون الطاقة الداخلية في هذه الحالة أكبر عند درجة حرارة معينة مقارنة بتلك الطاقة للغاز أحادي الذرة. ومع هذا، ستبقى دالة في درجة الحرارة فقط للغاز المثالي.

ومع أن الطاقة الداخلية للغازات الحقيقية تعتمد بصورة عامة على درجة الحرارة، فإنها ستعتمد أيضاً إلى حدّ ما على الضغط والحجم (بسبب طاقة الوضع الذرية) خصوصاً عندما يتصرف الغاز بعيداً عن صفاته المثالية.

وتعدّ الطاقة الداخلية للسوائل والمواد الصلبة أمراً معقداً جدّاً لاحتوائها على طاقة الوضع الكهربائية المرتبطة بالقوى (أو الروابط "الكيميائية") بين الذرات والجزيئات.

3-14 الحرارة النّوعيّة

عندما تنساب الحرارة إلى داخل جسم ما، فإنّ درجة حرارته سترتفع (على افتراض عدم تغير طوره) . ويصبح السؤال الآن: ما مقدار الارتفاع في درجة الحرارة؟ ستعتمد الإجابة على المعطيات. فمنذ بداية القرن الثامن عشر، أوضحت التجارب أنّ كميّة الحرارة Q الضرورية لتغيير درجة حرارة مادة ما تتناسب طرديًّا مع كلٍّ من كتلة المادة الموجودة، والتغيّر في درجة الحرارة ΔT. ويمكن التعبير عن هذه البساطة المدهشة في الطبيعة بالمعادلة التالية:

$$Q = mc\,\Delta T \qquad \textbf{(14 – 2)}$$

حيث تمثّل c كميّةً مميّزةً للمادة تُسَمّى الحرارة النّوعيّة. ولأنّ $c = Q/m\,\Delta T$، فإنّ وحدة الحرارة النوعية هي J/kg·C° (الوحدة الدولية المناسبة) أو كيلو Kcal/kg·C°. وتعطى قيمة c للماء عند 15°C وتحت ضغطٍ جوّيٍّ ثابت (= 1 atm) كالتالي $c = 4.19 \times 10^3$ J/kg أو 1.00kcal/kg·C°. ونقول: يلزم 1 كيلو سعر من الحرارة لرفع درجة حرارة 1 kg من الماء درجة مئوية واحدة. ويعرض (الجدول 14 – 1) قيم حرارة نوعية لمواد أخرى عند 20°C. تعتمد قيم c إلى حدّ ما على درجة الحرارة (وكذلك على الضغط بشكل أقل) ويمكن اعتبار c ثابتةً إذا كانت التغيرات في درجة الحرارة صغيرة.

المثال 14-2 اعتماد انتقال الحرارة على الحرارة النّوعيّة.

لرفع درجة حرارة خزّانٍ كبيرٍ من الحديد فارغ كتلته 02-gk من 10°C إلى 90°C؟ (ب) ماذا يحدث عندما يملأ الخزان بـ 20 kg من الماء؟

النهج: نطبق (المعادلة 14 – 2) للمواد المعنية جميعها.

الحلّ : (أ) يتكوّن نظامنا من خزّان الحديد الكبير فقط. ومن (الجدول 14 – 1)، فإنّ الحرارة النوعية للحديد هي 450 J/kg.C°. والتغيّر في درجة الحرارة هو $\Delta T = (90°\text{C} - 10°\text{C}) = 80°\text{C}$. وعليه فإنّ :

$$Q = mc\,\Delta T = (20\,\text{kg})(450\,\text{J/kg}\cdot\text{C}°)(80\,\text{C}°) = 7.2 \times 10^5\,\text{J} = 720\,\text{kJ}$$

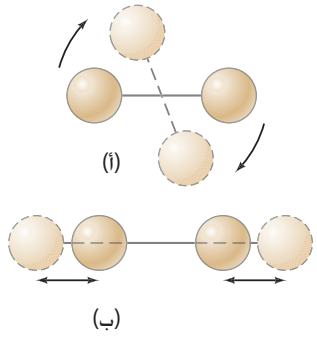
(ب) يتكوّن نظامنا الآن من خزّان الحديد الكبير بالإضافة إلى الماء. وسيتطلّب الماء بمفرده:

$$Q = mc\,\Delta T = (20\,\text{kg})(4186\,\text{J/kg}\cdot\text{C}°)(80\,\text{C}°) = 6.7 \times 10^6\,\text{J} = 6700\,\text{kJ}$$

أو 10 أضعاف ما يتطلّبه وزنٌ مكافئٌ من الحديد تقريباً. ويصبح مجموع الحرارة المدخلة إلى خزان الحديد المحتوي على 20 kg من الماء هو 7400 kJ = 720 kJ + 6700 kJ.

ملحوظة: خضع كلٌّ من خزّان الحديد الكبير والماء في الفرع (ب) للتغيّر نفسه في درجة الحرارة $\Delta T = 80$ C° ولكن مع اختلاف في حرارتيهما النوعية.

الطاقة الداخلية لغاز مثالي أحادي الذرة



الشكل 14 - 2 بالإضافة إلى الطاقة الحركية الانتقالية، تستطيع الجزيئات امتلاك : (أ) طاقة حركية دورانية. (ب) طاقة اهتزازية (طاقة حركية وطاقة مخزنة).

العلاقة بين انتقال الطاقة والتغير في درجات الحرارة

الحرارة النوعية

الجدول(14 – 1) الحرارة النوعية
(عند ضغط جوي ثابت و 20°C إلا إذا ذُكِر غير ذلك)

المادة	الحرارة النوعية c J/kg·°C	kcal/kg·°C (= cal/g·°C)
ألمنيوم	0.22	900
كحول (إيثيل)	0.58	2400
نحاس	0.093	390
زجاج	0.20	840
حديد أو فولاذ	0.11	450
رصاص	0.031	130
رخام	0.21	860
زئبق	0.033	140
فضة	0.056	230
خشب	0.4	1700
ماء		
ثلج(-5°C)	0.50	2100
سائل(51°C)	1.00	4186
بخار(110°C)	0.48	2010
الجسم البشري (متوسط)	0.83	3470
بروتين	0.4	1700

عند الحديث عن تبريد خزّان الحديد الكبير في الفرع (أ) من (المثال 14 – 2) من 90°C إلى 10°C، فهذا يعني أنّ 720 kJ من الحرارة قد انسابت من الخزّان إلى محيطها الخارجي. وبعبارةٍ أخرى فإنّ (المعادلة 14 – 2) صالحة سواءً كان انسياب الحرارة إلى الداخل أو إلى الخارج، والناجم عن الزيادة أو النقصان في درجات الحرارة. ولقد رأينا في الفرع (ب) أنّ الماء يتطلب تقريباً عشرة أضعاف كمية الحرارة التي تتطلبها كتلة مكافئة من الحديد لإحداث الفرق نفسه في درجات الحرارة. فالحرارة النوعية للماء هي من ضمن الأعلى بين المواد جميعها؛ وهذا ما يجعل من الماء مادة مثالية إمّا لتسخين الأنظمة الفضائية بالماء الساخن، أو للاستخدامات الأخرى التي تتطلب أدنى قدر من الهبوط في درجات الحرارة مقابل كميّةٍ معيّنةٍ من انتقال الحرارة. وغالباً، فإنّ الانتقال الحراري من المحتوى المائي في فطيرة التفاح هو الذي يسبب احتراق ألسنتنا عندما نتناول فطيرة ساخنة.

التأثيرات العملية للحرارة النوعية المرتفعة للماء

المثال المفاهيمي 14-3 **وعاء طهي طعام ساخن جداً.**

لنفترض أنّك نسيت وعاء طهي الطعام على الموقد لفترةٍ كافيةٍ، فارتفعت درجة حرارته إلى درجة عالية جداً (تصل إلى 200°C أو أكثر). ماذا يحدث عندما تُغرق الوعاءَ تماماً في عدّة بوصات من الماء البارد في أسفل حوضٍ لغسل الأطباق؟ وهل ستصبح درجة الحرارة النهائية في المنتصف تماماً بين درجتي الحرارة الابتدائيتين لكلّ من الماء البارد والوعاء الساخن؟ وهل سيبدأ الماء بالغليان؟ افترض أنّ كتلة الوعاء تعادل كتلة الماء تقريباً.

الإجابة: ستعلم من الخبرة أنّ الماء سيصبح دافئاً، ومع هذا لن تقترب درجة حرارته من درجة الغليان وربّما سترتفع من 10 إلى 20°C. وسيكون الارتفاع في درجة حرارة الماء أقلّ بكثيرٍ من الانخفاض في درجة حرارة الوعاء الساخن جدًّا. لماذا؟ بشكل عام، يعود السبب في ذلك إلى أن كتلة الماء تعادل بالتقريب كتلة الوعاء، أمّا الحرارة النوعية للحديد فهي أقل بمقدار عشرة أضعاف من تلك التي للماء (الجدول 14 – 1). وعندما تغادر الحرارة الوعاء لتدخل في الماء، فإن درجة حرارة الوعاء ستتغير بمقدار عشرة أضعاف التغير في درجة حرارة الماء. وبالمقابل، إذا تركت عدة قطرات من الماء تسقط على الوعاء، فإن هذا المقدار الضئيل من الكتلة المائية سيبدأ بالأزيز والغليان (لكبر كتلة الوعاء بمئات المرات مقارنةً بكتلة الماء).

الحرارة النوعية للغازات

تُعدّ الحرارة النوعية للغازات أكثر تعقيدًا من الحرارة النوعية للسوائل والمواد الصلبة التي تتغير درجات حرارتها (البند 13 – 4). فالغازات يتغير حجمها بشكل كبير جداً عند اختلاف درجات الحرارة تحت ضغط جوي ثابت كما رأينا في الفصل الثالث عشر من قوانين الغازات، أو كما رأينا من تغير كبير جدًّا في ضغط الغاز عند اختلاف درجات الحرارة وثبوت الحجم. وتعتمد حرارة الغاز النوعية بدرجة كبيرة على طريقة التغير في درجة الحرارة. وغالباً ما نتعامل مع الحرارة النوعية للغازات عند (أ) ضغط ثابت (c_p) أو (b) حجم ثابت (c_V). ويعرض(الجدول 14 – 2) بعض قيم الحرارة النوعية، حيث نرى أنّ c_p دائماً أكبر من c_V. وهذا الاختلاف عادةً ما يكون مهملًا بالنسبة إلى السوائل والمواد الصلبة. وهناك تفاصيل أكثر عن الحرارة النوعية للجزيئات ومناطق الطاقة المتماثلة في الملحق د.

جدول (14 – 2) الحرارة النوعية للغازات (kcal/ kg.C°)

الغاز	c_V (ضغط ثابت)	c_p (حجم ثابت)
بخار (100°C)	0.482	0.350
أكسجين	0.218	0.155
هيليوم	1.15	0.750
ثاني أكسيد الكربون	0.199	0.153
نيتروجين	0.248	0.177

4-14 المسعريّة (قياس الحرارة) – حلّ مسائل

سوف نشير إلى أنظمةٍ محدّدةٍ عندما نناقش الحرارة والديناميكا الحراريّة. وكما تمّ ذكره في الفصول السابقة، فإنّ النّظام هو أيّ جسم أو مجموعة من الأجسام قيد الدراسة. وسنشير إلى كلّ شيء آخر في الكون على أنّه "بيئة" أو "محيط" النظام. وهناك عدة تصنيفات للأنظمة: **النظام المغلق** وهو النظام الذي لا يسمح بتبادل المادة بينه وبين محيطه (ولكنه يسمح بتبادل الطاقة مع محيطه الخارجي). أمّا في **النظام المفتوح**، فإنّه يسمح بمرور المادة منه أو إليه (وكذلك بالنسبة إلى الطاقة). وهناك أنظمة (مثالية) كثيرة ندرسها في الفيزياء هي أنظمة مغلقة. وكذلك هناك أيضاً أنظمة كثيرة ومن ضمنها النباتات والحيوانات تُعدّ أنظمة مفتوحة؛ لأنّها تسمح بتبادل المادة مع محيطها (مثل الغذاء والأكسجين والفضلات الناتجة). ويُقال عن النظام المغلق أنّه **معزولٌ** إذا لم يُسمح بتبادل أيّ مقدار للطاقة مع محيطه مهما كان ضئيلاً، وإلاّ فإنّه لايُعدّ معزولاً.

الأنظمة

وعندما تكون أجزاءً مختلفةً من النظام المعزول عند درجات حرارة مختلفة، فإنّ الحرارة ستنساب (انتقال الطاقة) من الجـــــزء ذي درجة الحـــرارة المرتفعة إلى الجزء ذي درجة

الحرارة المنخفضة – أي داخل النظام. وإذا كان النظام معزولاً تماماً، فلن ينتقل أيّ مقدارٍ من الطاقة منه أو إليه. ويترتّب على ذلك أن يقوم حفظ الطاقة بدورٍ مهّمٍ جدًّا. إنّ مقدار الطاقة المفقودة من جزءٍ من النظام تعادل مقدار الطاقة المكتسبة من جزءٍ آخر منه:

حفظ الطاقة

الطاقة المفقودة = الطاقة المكتسبة

أو

الطاقة الخارجة من جزء = الطاقة الداخلة إلى جزء آخر

وتُعدّ هاتان العلاقتان البسيطتان مفيدتين جدًّا . ودعنا نأخذ مثالاً على ذلك.

المثال 14-4 الشاي يبرد الكوب.

إذا صُبَّ 200cm^3 من الشاي عند درجة حرارة 95°C في كوب من الزجاج كتلته 150-g عند درجة حرارة ابتدائية 25°C (الشكل 14 – 3) فما درجة الحرارة المشتركة النهائية T لكلّ من الشّاي والكوب عندما يصلان إلى الاتزان مفترضاً عدم انسياب الحرارة إلى المحيط الخارجي؟

النهج: سنطبق مبدأ حفظ الطاقة على النظام المكون من الشاي والكوب الذي سنفترضه معزولاً عن محيطه الخارجي: أيْ أنّ الحرارة التي ستغادر الشاي ستنساب إلى داخل الكوب. ونستطيع استخدام معادلة الحرارة النوعية لتحديد علاقة انسياب الحرارة مع التغير في درجات الحرارة.

الحلّ: بما أنّ معظم الشّاي ماءٌ، فإن حرارته النوعية هي $4186\ \text{J/kg}\cdot\text{C}^\circ$ (الجدول 14 – 1) وأمّا كتلته m، فهي كثافته مضروبة في حجمه ($V = 200\,\text{cm}^3 = 200 \times 10^{-6}\,\text{m}^3$):

$$[m = \rho V = (1.0 \times 10^3\ \text{kg/m}^3)(200 \times 10^{-6}\,\text{m}^3) = 0.20\,\text{kg}]$$

ونستخدم (المعادلة 14 – 2) ونطبق حفظ الطاقة، وندع T تمثل درجة الحرارة النهائية المجهولة:

الطاقة التي يكسبها الكوب = الطاقة التي يفقدها الشّاي

$$m_{\text{tea}}\,c_{\text{tea}}(95^\circ\text{C} - T) = m_{\text{cup}}\,c_{\text{cup}}(T - 25^\circ\text{C}).$$

وبعد إدخال الأرقام واستخدام (الجدول 14 – 1) ($c_{\text{cup}} = 840\ \text{J/kg}\cdot\text{C}^\circ$)، نحلّ لإيجاد T:

$$(0.20\,\text{kg})(4186\ \text{J/kg}\cdot\text{C}^\circ)(95^\circ\text{C} - T) = (0.15\,\text{kg})(840\ \text{J/kg}\cdot\text{C}^\circ)(T - 25^\circ\text{C})$$
$$79{,}500\,\text{J} - (837\,\text{J/C}^\circ)T = (126\,\text{J/C}^\circ)T - 3150\,\text{J}$$
$$T = 86^\circ\text{C}.$$

وتنخفض درجة حرارة الشاي بمقدار $9\ \text{C}^\circ$ ليصبح في حالة اتزان مع الكوب.

ملحوظة: تزداد درجة حرارة الكوب بمقدار $61\ \text{C}^\circ$ $86^\circ\text{C}–25^\circ\text{C}$. ويرتبط التغير الكبير في درجة حرارة الكوب مقارنة مع التغير الضئيل في درجة حرارة الشاي بحرارة الكوب النوعية الصغيرة مقارنةً مع حرارة الشاي النوعية المرتفعة.

ملحوظة: تعدّ ΔT في هذه الحسابات (في المعادلة 14 – 2 حيث $Q = mc\,\Delta T$) كمية موجبة على طرفي معادلة حفظ الطاقة. فعلى يسار المعادلة "الحرارة المفقودة" حيث تمثل ΔT درجة الحرارة الابتدائية مطروحاً منها درجة الحرارة النهائية $(95^\circ\text{C} - T)$. وأمّا على يمين المعادلة، فتمثل "درجة الحرارة المكتسبة" ΔT وهي درجة الحرارة النهائية مطروحاً منها درجة الحرارة الابتدائية. ومع هذا، انظر إلى طريقة الحلّ البديلة التالية:

حلّ بديل: نستطيع إعادة حلّ هذا المثال (وأمثلة أخرى) بطريقة مختلفة. ونستطيع أن نبدأ بجعل مجموع الحرارة المنتقلة إلى داخل النظام المعزول أو إلى خارجه مساوياً للصفر:

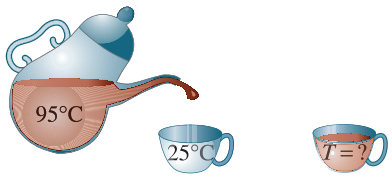
$$\Sigma Q = 0$$

ونعوّض عن كلّ حدّ بعد ذلك بدلالة $Q = mc(T_{\text{f}} - T_{\text{i}})$ حيث $\Delta T = T_{\text{f}} - T_{\text{i}}$ تمثل دائماً درجة الحرارة النهائية مطروحاً منها درجة الحرارة الابتدائية لتحتمل ΔT بعد ذلك أن تكون موجبة أو سالبة.

وفي المثال الحالي :

$$\Sigma Q = m_{\text{cup}}\,c_{\text{cup}}(T - 25^\circ\text{C}) + m_{\text{tea}}\,c_{\text{tea}}(T - 95^\circ\text{C}) = 0$$

وبالطبع، فإنّ الحدّ الثاني هو كمية سالبة حيث T أقل من 95°C. وبالتعويض بلغة الأرقام نصل إلى الجواب النهائي السابق نفسه.



الشكل 14 – 3 (المثال 14 - 4)

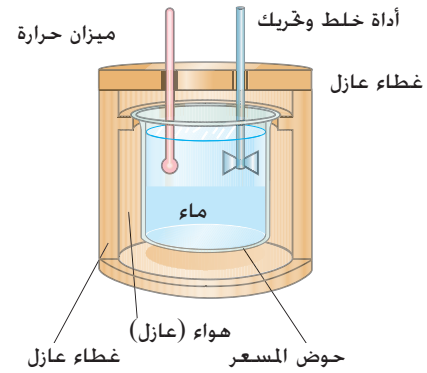
تنويه:

عند استخدام الحرارة المفقودة = الحرارة المكتسبة فإنّ ΔT هي كمية موجبة على طرفي المعادلة.

توجيه لحلّ الأسئلة.

طريقة حلّ بديلة : $\sum Q = 0$

ويستخدم المسعر الحراريّ لأخذ مثل تلك القراءات حيث يُظهر (الشّكل 14 – 4) مسعرَ ماء حراريًّا بسيطًا.



الشكل 14 – 4 مسعر الماء الحراري البسيط

ومن المهمّ جدًّا أن يكون المسعرُ معزولًا تمامًا، كي يمنع أيَّ تبادلٍ للحرارة مع المحيط الخارجيّ. ومن أهمّ تطبيقات المسعر الحراريّ استخدامُه لتحديد الحرارة النوعية للمواد. وفي التقنية المعروفة "بطريقة النماذج"، تسخّن عينة من المادة إلى درجة حرارة عالية جداً تقاس بدقة متناهية، ثمّ تُوضع هذه المادة بسرعة في ماء بارد داخل المسعر. وسيكتسب الماء وكوب المسعر الحرارة المفقودة من العينة، وبعد قياس درجة الحرارة النهائية للمزيج يتم حساب الحرارة النوعية كما هو مبين في المثال التالي:

المثال 14-5 تحديد حرارة نوعية مجهولة باستخدام المسعر الحراريّ.

يرغب أحد المهندسين في تحديد الحرارة النوعية لسبيكة فلزّيّة جديدة. فقام بتسخين عينة من السّبيكة كتلتها 0.15-kg إلى درجة حرارة 540°C. ثمّ وضعها سريعاً في كوب يحتوي ماء كتلته 400 g، ودرجة حرارته 10.0°C. علماً بأنّ كوبَ المسعرِ الحراري 200-g مصنوع من مادة الألمنيوم. (لا حاجة هنا إلى معرفة كتلة الغلاف العازل؛ لاعتقادنا بأنّ كميّةَ الهواء المحصورة بين الكوب والغلاف كافية لعزلهما عن بعضهما بعضًا لتبقى درجة حرارة الغلاف دون أيّ تغيّر يذكر). فإذا كانت درجة حرارة النظام النهائية 30.5°C، فاحسب الحرارة النّوعيّة للسّبيكة.

النهج: نطبق مبدأ حفظ الطاقة على النظام الذي يتكون من السبيكة العينة، والماء، وكوب المسعر.

الحلّ: الحرارةُ المفقودةُ تعادلُ الحرارةَ المكتسبة:

$$\begin{pmatrix}\text{الحرارة المكتسبة}\\ \text{بوساطة كوب المسعر}\\ \text{الحراري}\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}\text{الحرارة المكتسبة}\\ \text{في}\\ \text{الماء}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\text{الحرارة المفقودة}\\ \text{من}\\ \text{السبيكة}\end{pmatrix}$$

$$m_a c_a \Delta T_a = m_w c_w \Delta T_w + m_{cal} c_{cal} \Delta T_{cal}$$

حيث تشير الرموز a، و w، و cal إلى كلّ من السبيكة، والماء، والمسعر الحراري على الترتيب وأمّا الفرق في درجة الحرارة فهو كمية موجبة $(\Delta T > 0)$. وعندما نعوّض بالأرقام، ونستخدم (الجدول 14 – 1) فإنّ المعادلة تصبح كالتالي:

$$\begin{aligned}(0.150\,\text{kg})(c_a)(540°\text{C} - 30.5°\text{C}) &= (0.40\,\text{kg})(4186\,\text{J/kg}\cdot\text{C}°)(30.5°\text{C} - 10.0°\text{C})\\ &\quad + (0.20\,\text{kg})(900\,\text{J/kg}\cdot\text{C}°)(30.5°\text{C} - 10.0°\text{C})\\ 76.4\,c_a &= (34{,}300 + 3700)\,\text{J/kg}\cdot\text{C}°\\ c_a &= 500\,\text{J/kg}\cdot\text{C}°\end{aligned}$$

وعند إجراء هذه الحسابات، قمنا بإهمال أيّ كمية من الحرارة انتقلت إلى ميزان الحرارة والمحرّك (الذي استخدم لتسريع عملية انتقال الحرارة، وبالتالي التقليل من الحرارة المفقودة إلى الخارج). ويمكن أخذ هذه الكمية من الحرارة المنتقلة بالحسبان عن طريق إضافة عدة حدود إلى الجانب الأيمن للمعادلة أعلاه، لينتج بناءً عليه تصحيح بسيط جداً لقيمة c_a (انظر المسألة 14).

كن حذراً في الأمثلة والمسائل جميعها من هذا النوع، بحيث لا تهمل أيّ جسم يفقد حرارة أو يكتسبها (بدرجة معقولة). وفي المثال أعلاه، وعلى جانب المعادلة الأيسر: أيُّ جانب "الحرارة المفقودة"، فقد تمّ التّعرّف إلى الحدّ الوحيد هنا، والمحتوي على السبيكة المعدنية الساخنة. أما على الجانب الآخر: أيُّ جانب الحرارة المكتسبة" فقد أضيف الحدّان المحتويان على الماء وكوب المسعر الحراري المصنوع من الألمنيوم. ولتسهيل هذا؛ فقد تمّ إهمال كتلتين لأنهما صغيرتان جدًّا مثل كتلة ميزان الحرارة والمحرك اللتين كانتا ستؤثران بشكل طفيف جدًّا في اتزان الطاقة.

ويُستخدم **المسعر التفجيري (المسعر القنبلة)** لقياس الطاقة الحرارية المنبعثة عند احتراق مادة ما. ومن التطبيقات المهمّة على ذلك، حرق الطعام لتحديد محتواه من السعرات الحرارية وحرق البذور ومواد أخرى لتحديد "محتواها من الطاقة" أو حرارة احتراقها. ويتمُّ ذلك عن طريق وزن عيّنةٍ من المادة المعنيّة بدقة متناهية، ثمّ وضعها مع كمية فائضة من الأكسجين عند ضغطٍ عالٍ في وعاء مغلق تماماً ("القنبلة"). ثم وضع القنبلة في ماء المسعر الحراري، وتسخين السلك المار في القنبلة بسرعةٍ مما يسبب احتراق المزيج. وعندها ستكتسب القنبلة والماء الطاقة المنبعثة من عملية الاحتراق.

توجيه لحلّ الأسئلة.
تأكد من أخذ مصادر انتقال الطاقة جميعها بالحسبان

تطبيق الفيزياء
قياس المحتوى الحراري.

المثال 14-6 **قياس محتوى الطاقة لقطعة حلوى.**

سُمِح لعينة حلوى كتلتها 100 g أنْ تجفَّ قبل وضعها في المسعر الحراري القنبلة. ووُضعت القنبلة المصنوعة من الألمنيوم (كتلتها = 0.165 kg) في كوب مسعر حراري مصنوع من الألمنيوم كتلته 0.524 kg يحتوي على 2.00 kg من الماء. حدّد محتوى الطاقة لقطعة حلوى كتلتها 10-g إذا علمت أنّ درجة حرارة النظام الابتدائية هي 15.0°C، ودرجة حرارته بعد الاحتراق هي 36.0°C.

النهج: نفترض أن النظام معزول ومكوّن من عيّنة الحلوى، وكوب المسعر الحراري، والماء. ونطبق مبدأ حفظ الطاقة على النظام.

الحلّ: الطاقة المنبعثة Q من احتراق الحلوى في هذه الحالة يتم امتصاصها بوساطة النظام المكون من القنبلة، والمسعر الحراري، والماء:

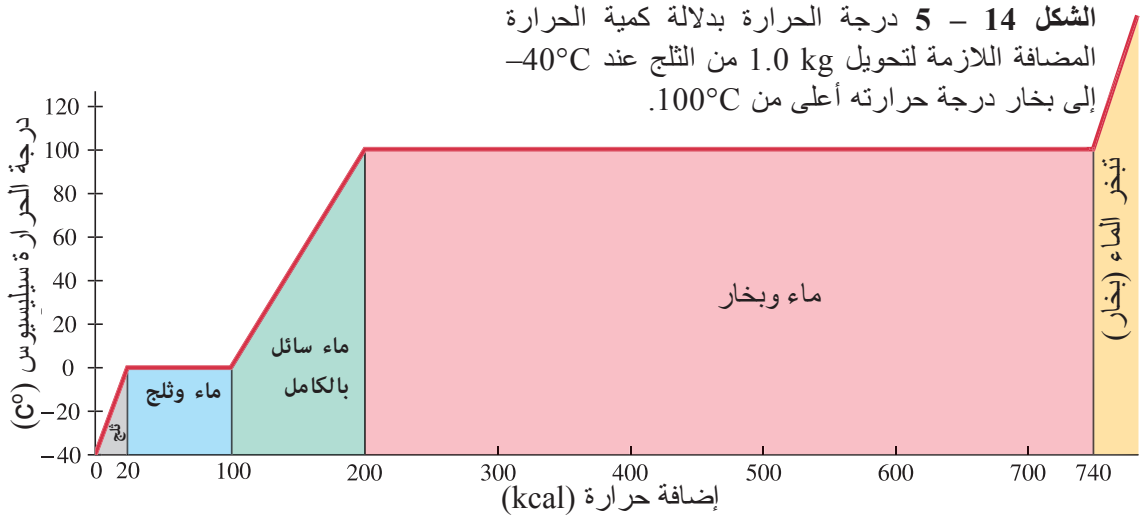
$$\begin{aligned} Q &= (m_w c_w + m_{cal} c_{cal} + m_{bomb} c_{bomb})\,\Delta T \\ &= [(2.00\text{ kg})(1.0\text{ kcal/kg}\cdot\text{C}^\circ) + (0.524\text{ kg})(0.22\text{ kcal/kg}\cdot\text{C}^\circ) \\ &\quad + (0.615\text{ kg})(0.22\text{ kcal/kg}\cdot\text{C}^\circ)][36.0^\circ\text{C} - 15.0^\circ\text{C}] = 47\text{ kcal} \end{aligned}$$

وبدلالة الجول: $Q = (47\text{ kcal})(4186\text{ J/kcal}) = 197\text{ kJ}$ وبما أنّ 47 kcal انبعثت من احتراق 10 g من الحلوى، فإنّ 100-g من الحلوى ذاتها ستحتوي على 470 من سعرات الطعام الحرارية (470°C) أو 1970 kJ.

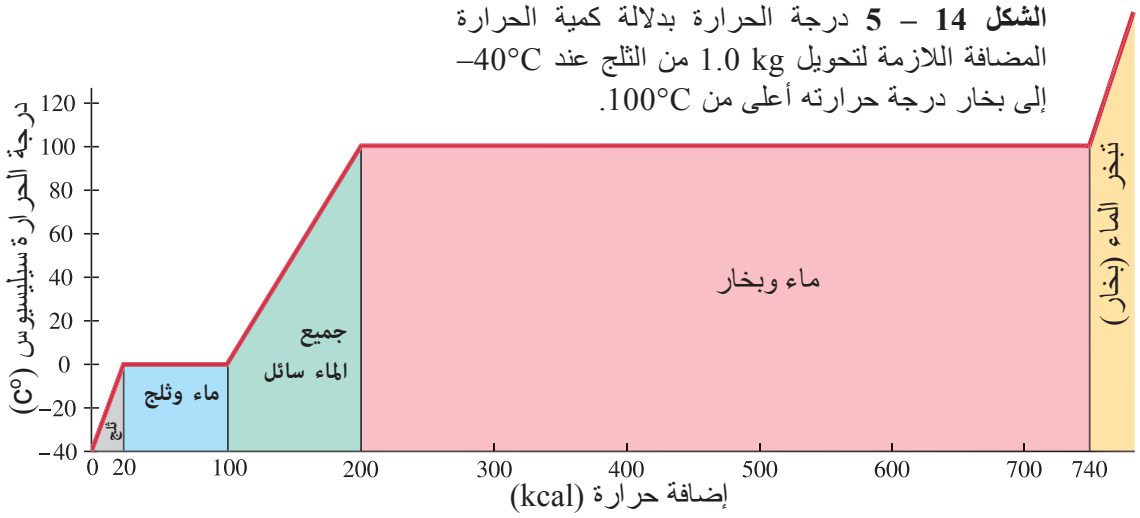
5-14 الحرارة الكامنة

عندما تغيّر المادة طورها من الصلب إلى السائل، أو من السائل إلى الغازي (انظر أيضاً البند 13 – 12) فإنّها بحاجة إلى مقدارٍ معيّن من الطاقة يساعدها على تغيير طورها. وعلى سبيل المثال، دعنا نتتبع ما يحدث عندما نسخّن مكعب ثلج كتلته 1.0-kg، ودرجة حرارته –40°C بمعدّلٍ بطيء وثابت إلى أن يتحوّل كلّه إلى ماء، ثم نسخّن الماء (السائل) الناتج إلى 100°C ليتحوّل كاملاً إلى بخار، ثمّ نسخّن البخار لدرجة أعلى من 100°C علماً بأنّ مراحل التسخين جميعها أُجريت عند ضغط جوّيّ واحد (1 atm). وكما هو موضّح في (الشكل 14 – 5)، فإنّ درجة حرارة الثلج كانت ترتفع بمعدل 2 C°/kcal من الحرارة المضافة خلال التسخين حيث: $c \approx 0.50\text{ kcal/kg}\cdot\text{C}^\circ$ [الثلج].

وعندما تصل درجة حرارة الثلج إلى 0°C، فإنّ الارتفاع في درجة حرارة الثلج سيتوقف على الرّغم من عدم توقف كميات الحرارة المضافة إليه. ويبدأ الثلج عندها بالتحوّل التدريجي إلى ماء في الحالة السائلة دون أنْ تتغير درجة حرارته. وبعد إضافة حوالي 40 kcal عند الصفر المئوي، نجد أنّ نصف كمية الثلج قد تحولت إلى ماء، أمّا النصف الآخر فبقي ثلجاً كما هو. وبعد إضافة 80 kcal أو 330 kJ، فإنّ كمية الثلج الكلية تتحول إلى ماء عند درجة الصفر المئوي. إنّ استمرار إضافة الحرارة يعمل على زيادة درجة حرارة الماء، ولكن الآن بمعدل 1 C°/kcal. وعندما تصل درجة الحرارة إلى 100°C، فإنّ أيّ زيادة في مقدار الحرارة تُعدّ عاملاً مساعداً على تغيير طور الماء من السائل إلى الغازي (بخار). ويحتاج 1.0 kg من الماء إلى حوالي 450 lcal (2260 kJ) ليتحوّل بكامله إلى بخار كي يبدأ بعد ذلك المنحنى بالازدياد مرّةً أخرى للدلالة على ارتفاع درجة حرارة البخار نتيجة الاستمرار في إضافة الحرارة.



الشكل 14 – 5 درجة الحرارة بدلالة كمية الحرارة المضافة اللازمة لتحويل 1.0 kg من الثلج عند –40°C إلى بخار درجة حرارته أعلى من 100°C.



الشكل 14 – 5 درجة الحرارة بدلالة كمية الحرارة المضافة اللازمة لتحويل 1.0 kg من الثلج عند –40°C إلى بخار درجة حرارته أعلى من 100°C.

حرارة الانصهار

حرارة التبخر

الحرارة الكامنة

تُدعى الحرارةُ اللازمة لتحويل 1.0 kg من مادّةٍ من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة حرارةَ الانصهار. ويرمز إليها بـ L_F. تساوي حرارة انصهار الماء 79.7 kcal/kg أو بدلالة الوحدات الدولية (SI) المناسبة $(= 3.33 \times 10^5\ \text{J/kg})$ 333 kJ/kg. وتدعى الحرارةُ اللازمة لتحويل مادة ما من الحالة السائلة إلى الغازية **حرارةَ التبخر**، L_V. وبالنسبة إلى الماء فهي 539 kcal/kg أو 2260 kJ/kg. وتتبع المواد الأخرى رسومات بيانية مشابهة (للشّكل 14 – 5) على الرّغم من اختلاف درجة حرارة نقطة الانصهار ودرجة حرارة نقطة الغليان تماماً مثل اختلاف الحرارة النوعية وحرارتي الانصهار والتبخّر. ويبين (الجدول 14 –3) بعض القيم لحرارتي الانصهار والتبخر لعدد من المواد، حيث تدعى كلّ منهما الحرارة الكامنة.

وتُشير حرارتا التبخر والانصهار أيضًا إلى مقدار الحرارة المنبعثة من المادة عندما تتحوّل من الحالة الغازية إلى السائلة، أو من الحالة السائلة إلى الصلبة. وعليه، فإنّ البخار يحرر 2260 kJ/kg عندما يتحول إلى سائل، في حين يُحرِّرُ الماء 333 kJ/kg عندما يصبح ثلجاً.

وتعتمد الحرارة الداخلة في تبدّل الطور على الحرارة الكامنة، بالإضافة إلى الكتلة الكلية للمادة . أيْ أنّ:

تغير الطور أو تبدّله

$$Q = mL \qquad \textbf{(3– 14)}$$

حيث L هي الحرارة الكامنة للعملية المعنية والمادة، أمّا m فهي كتلة المادة، في حين تمثل Q الحرارة المضافة أو المحررة خلال تغير الطور. وعلى سبيل المثال، فعندما يتجمد 5.00 kg من الماء عند درجة حرارة 0°C، فإنّ مقدار الطاقة المحررة: $(5.00\ \text{kg})(3.33 \times 10^5\ \text{J/kg}) = 1.67 \times 10^6\ \text{J}$

جدول (14 – 3) الحرارة الكامنة (عند 1 atm)

المادة	نقطة الانصهار (°C)	حرارة الانصهار kJ/kg	حرارة الانصهار kcal/kg*	نقطة الغليان (°C)	حرارة الغليان kJ/kg	حرارة الغليان kcal/kg*
أكسجين	– 218.8	14	3.3	– 183	210	51
نيتروجين	– 210.0	26	6.1	– 195.8	200	48
كحول إيثيلي	– 114	104	25	78	850	204
أمونيا	– 77.8	33	8.0	– 33.4	137	33
ماء	0	333	79.7	100	2260	539
رصاص	327	25	5.9	1750	870	208
فضة	961	88	21	2193	2300	558
حديد	1808	289	69.1	3023	6340	1520
تنجستن	3410	184	44	5900	4800	1150

*قيم عددية بدلالة kcal/kg وهي نفسها بدلالة cal/g

يحدث أحيانًا تغيّرٌ في الطّور عند إجراء قياساتٍ حراريّةٍ، كما يظهر المثال التالي. وبالفعل فإنّه غالباً ما يتمّ قياس الحرارة الكامنة باستخدام القياسات الحرارية.

المثال 14-7 صناعة الثّلج.

ما مقدار الطاقة اللازم طرده بوساطة حجرة التبريد (فريزر) من 1.5 kg من الماء عند درجة الحرارة 20°C لصنع ثلج عند درجة حرارة 12°C–؟

النهج: نحتاج إلى حساب الطاقة الكلية المحررة عن طريق إضافة الحرارة المنسابة إلى الخارج (1) لخفض درجة حرارة الماء من 20°C إلى 0°C، (2) لتحويل الماء إلى ثلج عند درجة حرارة الصفر المئوي (0°C) (3) لخفض درجة حرارة الثلج من الصفر المئوي إلى 12-°C.

الحـلّ: كمية الحرارة Q الضروري تحريرها من 1.5 kg من الماء هي :

$$\begin{aligned} Q &= mc_{\text{w}}(20°\text{C} - 0°\text{C}) + mL_{\text{F}} + mc_{\text{ice}}[0° - (-12°\text{C})] \\ &= (1.5\,\text{kg})(4186\,\text{J/kg}\cdot\text{C}°)(20\,\text{C}°) + (1.5\,\text{kg})(3.33 \times 10^5\,\text{J/kg}) \\ &\quad + (1.5\,\text{kg})(2100\,\text{J/kg}\cdot\text{C}°)(12\,\text{C}°) \\ &= 6.6 \times 10^5\,\text{J} = 660\,\text{kJ} \end{aligned}$$

المثال 14-8 قدر هل سينصهر الثلج؟

تمّ وضع قطعةٍ من الثلج كتلتها 0.50-kg ودرجة حرارتها 10°C-، خلال حفل استقبال في 3.0 kg من الشاي المثلج درجة حرارته 20°C. ما درجة الحرارة النهائية للمزيج؟ وما طوره؟ يمكن اعتبار الشّاي على أنّه ماء، مع إهمال أيّ انسياب حراري للمحيط الخارجي بما فيه الوعاء.

توجيه لحلّ الأسئلة.

حدّد (أو قدّر) أولاً الحالة النهائية.

النهج: قبل كتابة أيّ معادلة لنطبّق من خلالها حفظ الطاقة، يجب أنْ نحدّد ما إذا كان النظام في حالته النهائية يتكون من الثلج فقط، أم من خليط الماء والثلج، أم من الماء فقط. ولخفض درجة حرارة 3.0 kg من الماء من 20°C إلى 0°C، فإنّ النظام سيحتاج إلى تحرير مقدار من الطاقة يعادل :

$$m_{\text{w}}c_{\text{w}}(20°\text{C} - 0°\text{C}) = (3.0\,\text{kg})(4186\,\text{J/kg}\cdot\text{C}°)(20\,\text{C}°) = 250\,\text{kJ}$$

أمّا على الوجه الآخر، فإنّ رفع درجة حرارة الثلج من 10°C– إلى 0°C يتطلب:

$$m_{\text{ice}}\,c_{\text{ice}}[0°\text{C} - (-10°\text{C})] = (0.50\,\text{kg})(2100\,\text{J/kg}\cdot\text{C}°)(10\,\text{C}°) = 10.5\,\text{kJ}$$

ويتطلب تحويل الثلج إلى ماءٍ عند درجة الصفر المئوي:

$$m_{\text{ice}}\,L_{\text{F}} = (0.50\,\text{kg})(333\,\text{kJ/kg}) = 167\,\text{kJ}$$

ليصبح المجموع الكلي للطاقة: 10.5 kJ + 167 kJ = 177 kJ. وهو مقدار غير كافٍ من الطاقة لخفض درجة حرارة 3.0 kg من الماء من 20°C الـ 0°C. وعليه، فنحن نعلم أنّ المزيج في حالته النهائية سيحتوي على الماء فقط عند درجة حرارة تتراوح بين الصفر المئوي و 20°C.

ثم حدّد درجة الحرارة النهائية.

الحـلّ: لتحديد درجة الحرارة النهائية T، نطبق قانون حفظ الطاقة ونكتب :

كمية الحرارة المفقودة = كمية الحرارة المكتسبة

كمية الحرارة المفقودة اللازمة لتبريد ماء كتلته 3.0 kg من 20°C إلى T.	=	كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 0.50 kg من 0°C إلى T.	+	كمية الحرارة اللازمة لتحويل 0.50 kg من الثلج إلى الماء	+	كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 0.50 kg من الماء من 10°C- إلى 0°C.

وباستخدام بعض النتائج من الأعلى نحصل على:

$$\begin{aligned} &10.5\,\text{kJ} + 167\,\text{kJ} + (0.50\,\text{kg})(4186\,\text{J/kg}\cdot\text{C}°)(T - 0°\text{C}) \\ &\qquad = (3.0\,\text{kg})(4186\,\text{J/kg}\cdot\text{C}°)(20°\text{C} - T) \end{aligned}$$

وعند الحل لإيجاد T نحصل على:

$$T = 5.0°\text{C}$$

التمرين أ: ما مقدار الثلج الإضافي عند 10°C– اللازم في (المثال 14 – 8) لخفض درجة حرارة الشّاي إلى 0°C مع صهر الثلج ؟

طريقة حل المسائل — المسعريّة (قياس الحرارة)

1. تأكد من وجود معلوماتٍ كافيةٍ لتطبيق قانون حفظ الطاقة. واسأل نفسك: هل النظام معزول (أم معزول إلى درجة كافية للحصول على نتائج جيدة)؟ هل تستطيع حساب المصادر المهمّة جميعها لانتقال الطاقة، أو تعلم عنها؟

2. طبّق حفظ الطاقة:
الطاقة المفقودة = الطاقة المكتسبة
سيظهر حدّ للحرارة (الطاقة) لأيّ مادة في النظام سواء على يمين هذه المعادلة أو يسارها.
[وكخيار آخر، استخدم $\sum Q = 0$].

3. إذا لم يحدث تغير للطور، فإنّ كلّ حدّ في معادلة حفظ الطاقة (في الأعلى) سيبدو كالتالي :

$$Q\ (\text{المكتسبة}) = mc(T_f - T_i)$$

أو:

$$Q\ (\text{المفقودة}) = mc(T_i - T_f)$$

حيث تمثل T_i و T_f درجتي الحرارة الابتدائية والنهائية للمادة، أمّا m و c فهما الكتلة والحرارة النوعية على الترتيب.

4. إذا تغير الطور أو كان هناك احتمال لتغيره، فسنجد حدوداً في معادلة حفظ الطاقة مثل $Q = mL$ حيث L هي الحرارة الكامنة. ولكن قبل تطبيق حفظ الطاقة يجب أنْ نحدّد (أو نقدّر) حالة النظام النهائية كما رأينا في (المثال 14 – 8) عن طريق حساب قيم المساهمات المختلفة للحرارة Q.

5. تأكّدْ من ظهور كلّ حدٍّ على الجانب الصحيح لمعادلة الطاقة (الحرارة المكتسبة أو المفقودة). وأنّ ΔT كلّها موجبة.

6. لاحظ، عندما يصل النظام إلى الاتزان الحراريّ فإنّ درجة الحرارة النهائية للمواد جميعها هي نفسها. لتكون هناك قيمة وحيدة T_f.

7. حلّ معادلة الطاقة لإيجاد المجهول.

مثال 14-9 تحديد الطاقة الكامنة.

إنّ الحرارة النوعية للزئبق السائل هي 140 J/kg · C°. عند وضع 1.0 kg من زئبق سائل درجة حرارته –39°C في مسعرٍ حراريٍّ من الألمنيوم كتلته 0.50-kg، ويحتوي على 1.2 kg من ماء درجة حرارته 20.0°C وُجِد أنّ درجة حرارة المزيج 16.5°C. فما حرارة انصهار الزئبق بدلالة J/kg؟

النّهج: سنتبع طريقة حلّ المسائل خطوة خطوة.

الحـلّ:

1. هل النظام معزول؟ وضع الزئبق في المسعر الحراري وهو بالتعريف معزول جيداً. ونظامنا المعزول هو المسعر الحراري، والماء، والزئبق.

2. حفظ الطاقة. الحرارة التي يكتسبها الزئبق = الحرارة التي يفقدها الماء والمسعر الحراري.

3. و 4. تغير الأطوار. هناك تغيرٌ في الطّور. بالإضافة إلى ذلك، فنحن نستخدم معادلات الحرارة النوعية. تحتوي الحرارة التي يكتسبها الزئبق (Hg) على حدّ يمثل انصهار الزئبق :

$$Q\ (\text{انصهار الزئبق الصلب}) = m_{Hg}\, L_{Hg}$$

بالإضافة إلى حدّ يمثل تسخين الزئبق السائل من درجة حرارة –39°C إلى +16.5°C :

$$Q(\text{تسخين الزئبق السائل}) = m_{Hg}\, c_{Hg}[16.5°C - (-39°C)]$$
$$= (1.0\,kg)(140\,J/kg\cdot C°)(55.5\,C°) = 7770\,J$$

إن مصدر الطاقة التي اكتسبها الزئبق هو الماء والمسعر الحراري. ولتنخفض درجة حرارتيهما بعد ذلك:

$$Q_{cal} + Q_{H_2O} = m_{cal}\, c_{cal}(20.0°C - 16.5°C) + m_{H_2O}\, c_{H_2O}(20.0°C - 16.5°C)$$
$$= (0.50\,kg)(900\,J/kg\cdot C°)(3.5\,C°) + (1.2\,kg)(4186\,J/kg\cdot C°)(3.5\,C°)$$
$$= 19{,}200\,J$$

5. معادلة الطاقة. تخبرنا معادلة الطاقة أنّ الحرارة المفقودة من الماء وكوب المسعر الحراري يجب أن تعادل الحرارة التي يكتسبهاالزئبق:

$$Q_{cal} + Q_{H_2O} = Q\ (\text{الزئبق الصلب المنصهر}) + Q(\text{حرارة الزئبق السائل})$$

أو:

$$19{,}200\,J = m_{Hg}\, L_{Hg} + 7770\,J$$

6. درجة حرارة الاتزان. لقد أعطيت، وهي 16.5°C، وقد استخدمناها فعليًّا.

7. حلّ. إنّ المجهول في معادلة الطاقة (نقطة 5) هو L_{Hg} حرارة انصهار الزئبق الكامنة. ونحلّ المعادلة لإيجادها ونعوّض $m_{Hg} = 1.0\ kg$:

$$L_{Hg} = \frac{19{,}200\ J - 7770\ J}{1.0\ kg} = 11{,}400\ J/kg \approx 11\ kJ/kg$$

حيث قربنا النتيجة النهائية إلى رقمين مميزين.

التبخّـر

تُعدّ الحرارة الكامنة ضروريّة، لتحويل السائل إلى غاز، وهذا لا يحدث عند نقطة الغليان فقط . يستطيع الماء تغيير طوره من سائل إلى غاز حتى عند درجة حرارة الغرفة. ويطلق مفهوم التبخرعلى هذه العملية (انظر أيضًا البند 13 – 13). وتزداد قيمة حرارة تبخر الماء قليلاً مع انخفاض درجة الحرارة. وعلى سبيل المثال، فهي (585 kcal/kg) 2450 kJ/kg عند درجة حرارة 20°C مقارنةً مع (= 539 kcal/kg) 2260 kJ/kg عند درجة حرارة 100°C. وعندما يتبخر الماء، يبرد ما تبقى من السائل؛ لأنّ الطاقة الضرورية (حرارة التبخر الكامنة) تأتي من الماء نفسه. وعليه، فإنّ الطاقة الداخلية- وبالتالي درجة الحرارة -يجب أن تنخفض.*

تطبيق الفيزياء
درجة حرارة الجسم

ويعدّ تبخر الماء من جلد الإنسان أحد أهم الطرق الذي يستخدمها الجسم للتحكم في درجة حرارته . وعندما ترتفع درجة حرارة الجسم قليلاً عن المعدل الطبيعي، فإنّ منطقة قياس الحرارة في الدماغ تتحسس هذه الزيادة في درجة الحرارة، وترسل إشارة إلى الغدد العرقية لزيادة إنتاجها. وتأتي الطاقة (الحرارة الكامنة) الضرورية لتبخير هذا الماء من الجسم ليبرد الجسم نتيجة ذلك.

النظرية الحركية للحرارة الكامنة

نستطيع الاستفادة من النظرية الحركية لمعرفة سبب حاجتنا إلى طاقة لصهر المادة وتبخيرها. إنّ حرارة الانصهار الكامنة عند نقطة الانصهار لا تعمل على زيادة متوسط الطاقة الحركية (ودرجة الحرارة) لجزيئات المادة الصلبة، بل تستخدم للتغلب على طاقة الوضع التي تربط الجزيئات بعضها ببعض. أيْ أنّه يجب بذل شغل ضد قوى التجاذب هذه لتحرير الجزيئات من مواضعها في المادة الصلبة الثابتة نسبياً، فتصبح قادرة على الانتقال من موضع إلى آخر في الحالة السائلة. وبشكل مشابه، فإنّ الطاقة ضرورية لجزيئات السائل القريبة من بعضها بعضًا للهروب إلى الحالة الغازية . وتعدّ هذه العملية إعادة ترتيب عنيفة للجزيئات مقارنة بتلك التي في حالة الانصهار (ليزداد متوسط المسافة الفاصلة بين الجزيئات بشكل كبير). وبالتالي، فإنّ حرارة التبخر لمادة ما أكبر بكثيرٍ من حرارة انصهارها بشكل عام.

6-14 انتقال الطاقة : التوصيل

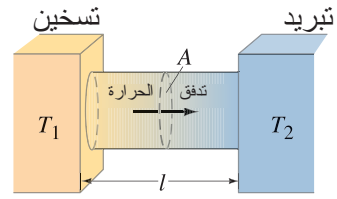
ثلاث طرق لانتقال الحرارة

يحدث انتقال الطاقة من مكان، أو من جسم إلى آخر بثلاث طرائق مختلفة هي: التوصيل والحمل والإشعاع. وسنناقش الآن كلًّا من هذه الحالات الثلاث منفردة وعلى الترتيب، على الرّغم من أنّه في الحياة العملية قد يحدث انتقال للطاقة بطريقتين أو حتى بالطرائق الثلاث مجتمعة في آن واحد . وسنتناول في هذا الجزء طريقة التوصيل.

عندما يُوضع محراك الحجر الفلزي في نار موقدة، أو ملعقة فضة في صحن حساء ساخن، فإنّ الطرف الآخر الذي تمسكه بيدك سيصبح ساخناً أيضاً على الرّغم من عدم ملامسته مصدر الحرارة مباشرةً . ونعبّر عن ذلك بأنّ الحرارة وصلت من الطرف الساخن إلى الطرف البارد.

ويمكن تخيل انتقال الحرارة بالتوصيل في مواد كثيرة من خلال تصادمات الجزيئات. فعندما يتمّ تسخين أحد طرفي جسم ما، تبدأ جزيئات هذا الطرف بالتحرك أسرع وأسرع. وعند اصطدام هذه الجزيئات مع الجزيئات الأخرى المجاورة، بطيئة الحركة، ينتقل جزء من الطاقة الحركية لتلك الجزيئات لتبدأ سرعتها بالازدياد. ومن ثمّ تقوم هذه الجزيئات بنقل جزء من طاقتها عن طريق التصادم إلى الجزيئات الأبعد على امتداد الجسم. وعليه، فإن الطاقة الحركية للحركة الحرارية تكون قد انتقلت خلال الجسم. أمّا في الفلزات، وبحسب النظرية الحديثة، فإنّ تصادمات الإلكترونات الحرة داخل الفلز يمكن تخيلها على أنّها السبب الرئيس المسؤول عن التوصيل.

* وبناءً على النظرية الحركية، فإنّ التبخّر هو عملية تبريد؛ لأنّ الجزيئات المتحركة الأسرع هي القادرة على الهروب من السطح (البند 13 – 13). وبالتالي، فإن متوسط سرعة الجزيئات المتبقية ستصبح أقل، وكنتيجة (للمعادلة 13 – 8) فإنّ درجة الحرارة ستصبح أقل أيضًا.



الشكل 14 - 6 التوصيل بين منطقتين عند درجتي حرارة T_1 و T_2. وإذا كانت T_1 أكبر من T_2، فإن الحرارة ستنساب إلى اليمين. ويعطى المعدل (بالمعادلة 14 - 4).

يحدث التوصيل الحراري بين نقطتين فقط إذا كان هناك اختلاف في درجة الحرارة بين هاتين النقطتين. وفي الحقيقة، فإنّ معدّل انسياب الحرارة خلال المادة يتناسب طرديًّا مع الفرق في درجة الحرارة بين طرفيها (نهايتيها). كما يعتمد معدّل انسياب الحرارة على شكل الجسم وحجمه. ولنقم الآن بدراسة كمية للموضوع. فنأخذ بالحسبان انسياب الحرارة خلال أسطوانة متجانسة كما هو موضح في (الشكل 14 – 6). لقد وجد عمليًّا أنّ انسياب الحرارة Q خلال فترة زمنية t يعطى بالعلاقة:

$$\frac{Q}{t} = kA\frac{T_1 - T_2}{l} \qquad \textbf{(4 – 14)}$$

حيث A هي مساحة مقطع الجسم العمودية، أمّا l فهي المسافة الفاصلة بين طرفيه، علمًا بأنّ درجة حرارة أحد الطرفين هي T_1 ودرجة حرارةالطرف الآخر T_2 و k معامل التناسب الذي يدعى الموصلية الحرارية وهو مميز لنوع المادة .ومن (المعادلة 14–4) نرى أن معدل انسياب الحرارة (ووحداتها J/s) يتناسب طرديا مع مساحة مقطع الجسم العمودية ومع انحدار درجات الحرارة $(T_1–T_2)/l$*.

ويعرض (الجدول 14 – 4) الموصلية الحرارية k لمجموعة منوعة من المواد. والمواد التي لها k مرتفعة توصل الحرارة بسرعة، ويُقال بأنّها موصلات جيدة. وتقع معظم الفلزات ضمن هذه الفئة على الرّغم من وجود فروقات واسعة بينها.ويمكن ملاحظة ذلك بسهولة عند مسك ملعقتين: إحداهما مصنوعة من الفضة والأخرى مصنوعة من الفولاذ عديم الصدأ مغموستين في قدر الحساء نفسه. وتُعدّ المواد ذات الموصلية الحراريةk المنخفضة مثل الصوف، والليف الزجاجي، وبولي يوريثان، و ريش الأوزة موصلات رديئة للحرارة. لذا، فهي عوازل جيدة. وتستطيع قيم k النسبية تفسير الظواهر البسيطة كشعور أقدامنا بالدفء عند المشي على سجادة صوفية أكثر من شعورنا بالدفء إذا سرنا على أرض مبلطة وغير مغطاة؛ وسبب هذا هو أنّ البلاط موصل للحرارة بشكل أفضل من السجاد، وعندما تنساب الحرارة من القدم إلى السجادة، فلن تستطيع قطعة السجاد التخلص منها بسرعة كافية، مما يدفع السجادة إلى الاحتفاظ بالحرارة المنسابة إليها من القدم. ومن هنا، يحصل اتزان حراري سريع بين القدم وقطعة السجاد مما يعطينا شعورًا بالدفء. أمّا البلاط فهو مصنوع من مادة ذات توصيلٍ جيّدٍ يساعد على التخلّص من الحرارة المنسابة من القدم بسرعة لتُرغَم القدم على خسارة مقدارٍ آخر من (الطاقة) الحرارة بسرعة، فتشعر القدم نتيجة ذلك بانخفاض درجة حرارتها.

المثال 14-10 **الحرارة المفقودة من خلال النوافذ.**

تُعدّ النوافذ سببًا رئيسًا لفقد الحرارة من البيت. احسب معدل انسياب الحرارة خلال زجاج نافذة مساحتها 2.0 m × 1.5 m وسمكها 3.2 mm إذا كانت درجتا الحرارة على السطحين الداخلي والخارجي لزجاج النافذة هما 15.0°C و 14.0°C على الترتيب (الشكل 14 – 7).

النهج: تنساب الحرارة عن طريق التوصيل خلال زجاج سمكه 3.2 mm من درجة الحرارة المرتفعة الداخلية إلى درجة الحرارة المنخفضة الخارجية. ونستخدم معادلة التوصيل الحراري (14 – 4).

الحل: المساحة $A = (2.0\ \text{m})(1.5\ \text{m}) = 3.0\ \text{m}^2$ والسمك $l = 3.2 \times 10^{-3}\ \text{m}$. وباستخدام (الجدول 14 – 4) لإيجاد k، نحصل على:

$$\frac{Q}{t} = kA\frac{T_1 - T_2}{l} = \frac{(0.84\ \text{J/s}\cdot\text{m}\cdot\text{C°})(3.0\ \text{m}^2)(15.0°\text{C} - 14.0°\text{C})}{(3.2 \times 10^{-3}\ \text{m})}$$
$$= 790\ \text{J/s}$$

ملحوظة: يعادل معدل انسياب الحرارة هذا:
$(790\ \text{J/s})/(4.19 \times 10^3\ \text{J/kcal}) = (0.19\ \text{kcal/s})$ أو
$(0.19\ \text{kcal/s}) \times (3600\ \text{s/h}) = 680\ \text{k cal/h}.$

* تشابه (معادلة 14 – 4) تماماً العلاقات التي تصف الانتشار (البند 13 –14) وانسياب السوائل خلال أنبوب (البند 10 – 12). وفي هذه الحالات، وُجد أن انسياب المادة يتناسب طرديًّا مع انحدار التركيز $(C_1 - C_2)/l$ أو مع انحدار الضغط $(P_1 - P_2)/l$. وهذا التشابه القريب هو ما يجعلنا نتكلم عن "انسياب" الحرارة. ومع هذا، فيجب أن نتذكر دائمًا عدم وجود مادّةٍ تنساب بهذه الطريقة. وفي الحقيقة، فإن الطاقة هي التي انتقلت.

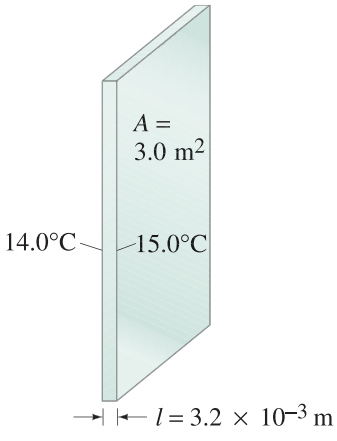
معدل انسياب الحرارة بوساطة التوصيل

الجدول(14 – 4)
الموصلية الحرارية

المادة	الموصلية الحرارية k	
	kcal/(s·m·C°)	J/(s·m·C°)
فضة	10×10^{-2}	420
نحاس	9.2×10^{-2}	380
ألمنيوم	5.0×10^{-2}	200
فولاذ	1.1×10^{-2}	40
ثلج	5×10^{-4}	2
زجاج	2.0×10^{-4}	0.84
طوب	2.0×10^{-4}	0.84
خرسانة	2.0×10^{-4}	0.84
ماء	1.4×10^{-4}	0.56
غشاء بشري	0.5×10^{-4}	0.2
خشب	0.3×10^{-4}	0.1
ليف زجاجي	0.12×10^{-4}	0.048
فلين	0.1×10^{-4}	0.042
صوف	0.1×10^{-4}	0.040
ريش وز	0.06×10^{-4}	0.025
بولي يورثين	0.06×10^{-4}	0.024
هواء	0.055×10^{-4}	0 023

لماذا نشعر بأن السجاد اكثر دفئاً من البلاط؟

تطبيق الفيزياء
الحرارة المفقودة من خلال النوافذ



الشكل 14 – 7 (المثال 14 - 10).

وربّما تلاحظ كما في (المثال 14 – 10) أن 15°C لا تمنح الدفء الكافي لغرفة المعيشة في البيت. وقد تكون الغرفة ذاتها أكثر دفئاً من ذلك، وربّما يكون محيطها الخارجي أكثر برودة من 14°C. إنّ درجتي الحرارة 15°C و 14°C هما الدرجتان اللتان تم تحديدهما بجانب سطحي النافذة مباشرة، مع احتمال انخفاض درجة الحرارة إلى هاتين القيمتين فقط بالقرب من النافذة. أي أنّ طبقة الهواء بجوار النافذة سواءً من الداخل أو الخارج تعمل كعازل. وأنّ الانخفاض الأعظم في درجات الحرارة- في معظم الأحيان- يحدث خلال طبقة الهواء هذه بالقرب من النافذة. وإذا كانت الرياح شديدةً، فإنّ الهواء خارج النافذة سيحل محلّه هواء بارد باستمرار ليصبح عندها الانحدار في درجة الحرارة خلال زجاج النافذة أعلى، ممّا يترتّب على ذلك معدل فقدان كبير للحرارة. وعند زيادة سمك طبقة الهواء عن طريق استخدام لوحين من الزجاج تفصل بينهما فجوة هوائية فإنّ كمية الحرارة المفقودة ستقل مقارنة مع تلك الحالة التي يتم فيها زيادة سمك الزجاج فقط، وتعدّ هذه النتيجة الختمية هبة من الله بأن جعل التوصيل الحراري للهواء أقلّ منه للزجاج.

تستطيع الريح أن تسبب فقدانا هائلا للحرارة

تطبيق الفيزياء
النوافذ الحرارية

وأمّا صفات عزل الملابس، فتأتي من خاصية العزل للهواء. وستعتمد أجسادنا بلا ملابس على تسخين الهواء الملامس لسطح جلدنا ليصبح أكثر ملاءمة لأنّ الهواء عازل جيد. ولكن بما أنّ الهواء متحرك، فقد يهب على شكل نسمات أو أعاصير. إضافةً إلى أن الناس لا يبقون ساكنين في مواضعهم، بل يتحركون. لذا، فإنّ الهواء الساخن غالباً ما يتبدل بهواء بارد ليزداد فرق الطاقة والحرارة المفقودة من الجسم البشري. وتبقينا الملابس دافئين عن طريق حصرها طبقة من الهواء الذي لا يعود قادراً على الحركة. وأخيراً، فليست الملابس هي التي تعمل على عزلنا ولكن السبب في ذلك هو طبقة الهواء التي تحصرها ملابسنا. ويعدّ ريش الإوزة عازلاً جيداً حيث إن نفش كمية قليلة جداً منه قادرة على حصر كمية كبيرة من الهواء.

تطبيق الفيزياء
تعمل الثياب على العزل عن طريق احتباس طبقة من الهواء في ثناياها

التمرين ب: وضِّحْ لماذا تقلل الستائر المسدلة على النوافذ من مقدار الحرارة المفقودة من البيت.

قيم R لمواد البناء

يتمُّ غالباً تحديد الصفات الحرارية لمواد البناء عن طريق إعطائها قيماً "للمقاومة الحرارية" R وخصوصاً عند معاملة هذه المواد كعوازل. وتُعرَّفُ R لمادة سمكها l حسب المعادلة التالية :

$$R = \frac{l}{k}$$

وتجمع قيمة R لعينة من مادة ما سمك العينة l وموصليتها الحرارية k في رقم واحد. وتُعطى قيم R في الولايات المتحدة الأمريكية بالوحدات البريطانية $ft^2.h.F°/Btu$ (وعلى سبيل المثال، تعني R–19 أن: $R = 19\ ft^2 \cdot h \cdot F°/Btu$). ويعطي (الجدول 14 – 5) قيم R لبعض مواد البناء العامة: ولاحظ أن قيم R تزداد طردياً مع سمك المادة. وكمثال على ذلك، فإن إنشين من الزجاج الليفي هو R–6 ونصف ذلك لأربعة إنشات (R–12 =، انظر الجدول 14 – 5).

تطبيق الفيزياء
قيم R للعزل الحراري

الجدول (14 – 5) قيم I

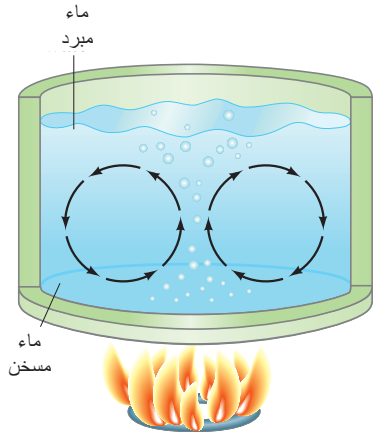
المادة	السمك	قيمة -R
زجاج	$\frac{1}{8}$ إنش	1
طوب	$3\frac{1}{2}$ إنش	1 - 0.6
خشب رقائقي	$\frac{1}{2}$ إنش	0.6
عازل ليفي زجاجي	4 إنش	12

7-14 انتقال الحرارة : الحمل

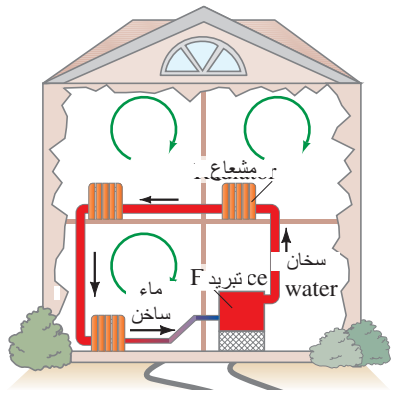
على الرّغم من أنّ السوائل والغازات موصلات غير جيدة للحرارة بشكل عام، إلا أنّها لا تزال قادرةً على نقل الحرارة بسرعةٍ فاعلةٍ عن طريق الحمل. والحمل هو عمليّةُ انسياب الحرارة بوساطة حركة الجزيئات من موضع إلى آخر. وفي حين يتضمن التوصيل حركة الجزيئات (و/أو الإلكترونات) إلى مسافات قريبة فقط لتتصادم بعد ذلك، فإنّ الحمل يتضمّن حركة عدد هائل من الجزيئات إلى مسافات بعيدة.

ويعدّ فرن الهواء–القسري مثالاً على الحمل القسري؛ حيث يتم تسخين الهواء داخل الفرن ومن ثم ينفخ هذا الهواء بوساطة مروحة إلى داخل الغرفة. ويحدث الحمل في الطبيعةأيضًا. ومن الأمثلة المألوفة على ذلك ارتفاع الهواء الساخن إلى الأعلى. فإذا نظرنا لوهلة لما يحدث للهواء المجاور للمشعاع الحراري (أو أي سخان) فنجد أن الهواء أعلى (فوق) المشعاع يتمدد نتيجة لارتفاع درجة حرارته (الفصل الثالث عشر) وتقل كثافته نتيجةً لذلك. وعندما تصبح كثافته أقلّ من كثافة الهواء البارد في الجوار، فإنّه يرتفع إلى الأعلى تماماً مثل قطعة الخشب المغمورة في الماء التي تطفو إلى الأعلى بسبب كثافتها المنخفضة مقارنة بكثافة الماء. وتمثّل تيارات المحيط الدافئة والباردة مثل تيار الخليج المنعش حملاً طبيعياً على المستوى العالمي. كما أنّ الريح مثالاً آخر على الحمل أيضاً. وبشكل عام، فإنّ الطقس ما هو إلّا نتيجة لتيارات الهواء الحمليّة.

تطبيق الفيزياء
تيارات المحيط ورياحه



الشكل 14 – 8 تيارات الحمل الحراري في وعاء ماء يسخن فوق موقد.



الشكل 14 – 9 يقوم الحمل الحراري في وعاء ماء يسخن فوق موقد بدور في تدفئة المنزل. تظهر الأسهم الدائرية

عندما يتمّ تسخين وعاءٍ مليءٍ بالماء (الشكل 14 – 8) تتكوّن تياراتُ حملٍ حراريٍّ نظرًا لارتفاع المياه الساخنة من قعر الوعاء إلى الأعلى بسبب كثافتها المتناقصة. ويتمّ تعويض الماء الساخن بوساطة الماء البارد من الأعلى. ويستخدم هذا المبدأ في أنظمة تدفئة عديدة مثل نظام مشعاع الماء الساخن المبين في (الشكل 14 –9). يتمّ تسخين الماء في الفرن، فترتفع درجة حرارته، فيتمدد ويرتفع إلى الأعلى كما هو مبين. وهذا هو سبب دوران الماء في نظام التدفئة. ويدخل الماء الساخن إلى المشعاع، فتنتقل الحرارة عن طريق التوصيل الحراري إلى الهواء ليعود بعدها الماء البارد إلى الفرن. وعليه، تستمر المياه في الدوران بسبب الحمل الحراري. وتستخدم المضخات أحيانا لرفع كفاءة الدورة. ويصبح الهواء داخل الغرفة كلّه ساخنًا أيضًا بسبب الحمل الحراري، كما هو مبيّن بالأسهم الخضراء في (الشكل 14 – 9).

وتعتمد أشكال أخرى للمواقد على الحمل الحراري. ولا تملك أفران الهواء الساخن ذات فتحات التهوية السفلية على مراوح، ولكنّها تعتمد على تيارات الحمل الحراري الطبيعي الكبيرة. وتستخدم المراوح في أنظمة أخرى. ومن المهمّ جدًّا في الحالتين أن يكون الهواء البارد قادرًا على العودة إلى الفرن لتستطيع تيارات الحمل الحراري الدوران خلال الغرفة للعمل على توزيع الحرارة داخلها بانتظام.

ومثال آخر على الحمل الحراري وتأثيره نأخذه من مشهد من "رياح وادي يوسيميتي"والذي حرره أحد علماء البيئة الأوائل "فرانسو ماتيس" حيث قال:

لقد عمدت الطبيعة على تسخين الأرض بسرعة أكبر من تسخينها للهواء. ولتصبح كلّ تلة منحدرة تتعرض لشمس الصباح بعد وقت قليل مصدرًا للحرارة. ولتبدأ على الفوربتسخين الهواء فوقها فيصبح أكثر خفةً ويبدأ بالارتفاع. ولكنّه لن يرتفع رأسيًّا إلى الأعلى لوجود طبقةٍ من الهواء البارد فوقه مباشرةً تعمل على ضغط الهواء الساخن نحو الأسفل. وليبدأ الهواء الساخن بالارتفاع بعد ذلك بالقرب من سطح المنحدر الدافئ كما هو مبيّن بالأسهم في المخطط المصاحب (شكل 14 – 10أ). ولا يمكن لزائري الوادي -على قلتهم- إلا أن يتذكروا معاناتهم الكبيرة خلال تسلقهم الطرق المتعرجة وغير المنتهية إلى الأعلى في يومٍ حار، وأنفاسهم متقطعة، والشمس تلسع ظهورهم، وسحب غبارهم تسابقهم نحو الأعلى بطريقة خانقة ومثيرة للغضب الشديد. وربّما ظنّوا في حينها أنّ ما يحدث ببساطة ما هو إلّا نتيجة حظّهم العاثر الذي جعل الغبار يرتفع معهم إلى الأعلى في ذلك اليوم تحديداً. ولكن، هذا ما يحدث دائمًا فوق أيّ منحدرٍ عملت الشمس على تدفئته.

وقد تعود كذلك الذكريات في مناسبةٍ أخرى ناجمة عن مصاحبة غيمة من الغبار للرحالة الذين كانوا يسرعون بالنزول عن المنحدر لتهبّ عليهم ريحٌ مغبّرةٌ شديدة، فتتبعهم من طريق متعرج إلى آخر، وكأنّها تتعمد ذلك باستمتاع ماكر. ويحدث هذا بما لا يدع مجالاً للشك على الجانب الآخر للمنحدر في المنطقة المظلمة من الوادي، حيث تنعكس الظروف الجوية هناك تماماً. فعندما تغادر الشمس المنحدر، تبدأ الأرض بفقدان حرارتها عن طريق الإشعاع، وتغدو درجة حرارتها أقل من درجة حرارة الهواء بسرعة كبيرة. وتنخفض درجة حرارة طبقة الهواء الملامسة لسطح الأرض تدريجياً لتصبح أثقل عند تكاثفها، وتبدأ بالزحف نحو أسفل المنحدر (شكل 14 – 10ب). وعليه، فمن الطبيعي

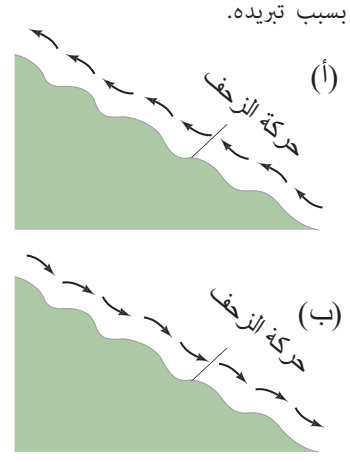
تطبيق الفيزياء

تدفئة المنزل بوساطة الحمل الحراري

تطبيق الفيزياء

الحمل الحراري فوق مسار تنزه شديد الانحدار

الشكل 14 –10 الحمل الحراري فوق مسار تنزه: (أ) حركة الهواء في الصباح إلى الأعلى بسبب تسخينه. و (ب) حركة الهواء في المساء إلى الأسفل بسبب تبريده.



حصول زحف دافئ إلى الأعلى على الجانب المضاء للمنحدر، وكذلك زحف نحو الأسفل على جانب المنحدر المظلم –ويمكن الاعتماد على هذا القانون تقريباً في أي يوم في المناطق التي لا تهب فيها الريح مثل منطقة اليوسيميتي. وتعدّ هذه الحقيقة مفيدة لشخص يخطط لرحلة، فيستفيد منها لتكون رحلته خالية تماماً من الغبار.

تطبيق الفيزياء

حرارة الجسم:
الحمل الحراري بوساطة الدم

إنّ الجسم البشري يولّد كمية هائلة من الطاقة الحرارية. ويستغل الجسم البشري عند أقصى حدٍّ فقط 20% من طاقة الطعام المتحولة داخله في عمل شغل. في حين يظهر ما يربو على 80% من طاقة الطعام المتحولة على شكل طاقة حرارية. وخلال النشاطات الخفيفة، على سبيل المثال، إذا لم يبدد الجسم هذه الطاقة الحرارية، فإن درجة حرارة الجسم سترتفع بمقدار $3C^\circ$ خلال كل ساعة. لذا، من الطبيعي أن يتخلص الجسم من هذه الطاقة أو الحرارة نحو الخارج. فهل ستنتقل الحرارة عن طريق التوصيل؟ إن درجة حرارة جلد الإنسان في الوضع الطبيعي تتراوح ما بين $33°C$ إلى $35°C$، في حين تكون درجة حرارة الجسم الداخلية $37°C$. وتظهر الحسابات البسيطة (انظر المسألة 55) أنه بسبب هذا الاختلاف البسيط في درجات الحرارة، بالإضافة إلى الموصلية الحرارية المنخفضة للأنسجة، فإن التوصيل الحراري المباشر مسؤول عن فقدان جزء بسيط من الطاقة الحرارية الواجب التخلص منها. وبدلاً من ذلك، فإن الحرارة تنقل إلى السطح بوساطة الدم. فبالإضافة إلى الوظائف الأخرى المهمة للدم جميعها، فإنه يعمل وكأنه سائل حمل ينقل الحرارة إلى أسفل سطح الجلد مباشرة. وهو بذلك يوصل الحرارة للسطح (خلال مسافة قصيرة جدًّا). وعندما تصبح الحرارة على السطح، فإنّها تنتقل إلى المحيط الخارجي عن طريق كلٍّ من الحمل الحراري، والتبخير، والإشعاع (انظر البند 14 – 8).

14-8 انتقال الحرارة: الإشعاع

يتطلب كلٌّ من التوصيل الحراري والحمل الحراري وجود وسط مادي لحمل الحرارة من المنطقة الساخنة إلى المنطقة الباردة. ولكن هناك نوع آخر من انتقال الحرارة يحدث دون وجود أي وسط مادي نهائياً؛ فأنواع الحياة على الأرض جميعها تعتمد على انتقال الطاقة من الشمس إلى الأرض خلال الفراغ الكامل (تقريباً). وهذا الشكل من انتقال الطاقة عبارة عن حرارة؛ لأن درجة حرارة سطح الشمس أعلى بكثير (6000 K) من درجة حرارة سطح الأرض. وتسمّى هذه الطريقة الإشعاع (شكل 14 – 11). إنّ الدفء الذي يصلنا من النار هو طاقة مشعة غالبًا. (ومعظم الهواء الذي يسخن بوساطة النار من مدفئة الحطب يرتفع عن طريق الحمل الحراري نحو أعلى المدخنة ولايصلنا).

وكما سنرى في الفصول القادمة، فإنّ الأشعة تتألف من أمواج كهرومغناطيسية. ويكفينا الآن القول بأنّ الأشعة التي تصلنا من الشمس تتكوّن من الضوء المرئي بالإضافة إلى أطوال موجبة أخرى كثيرة لا تكون العين البشرية حسّاسة لها، ومن ضمنها الأشعة تحت الحمراء (IR) التي تُعدّ المسؤولة الرئيسة عن تسخين الأرض.

الشكل 14 –11 قطر سطح الشمس 6000 K أكبر من سطح الكرة الأرضية

ولقد وجد أن المعدّل الذي تتبعه الأجسام لإشعاع الطاقة يتناسب طرديًّا مع الأسّ الرابع لدرجة الحرارة T بالكلفن. أي أنّ جسماً ما عند 2000 K يشع بمعدل أكبر مقداره $2^4 = 16$ ضعفاً مقارنةً مع جسمٍ آخر عند 1000 K. ويتناسب معدّلُ الإشعاع أيضاً مع مساحة الجسم الباعث A. وعليه، فإنّ معدّل خروج الطاقة من الجسم هو $\Delta Q/\Delta t$:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = e\sigma A T^4 \qquad \textbf{(5 – 14)}$$

الاشعاع $\propto T^4$

وتُدعى هذه **معادلة ستيفن – بولتزمان**. وσ هي ثابت كوني يُسَمّى **ثابت ستيفن – بولتزمان** وله قيمة :

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\,\mathrm{W/m^2 \cdot K^4}$$

اشعاعية ثابت بولتزمان

ويُسَمّى المعامل e الانبعاثية، وهو رقم بين 0 و 1، وهو ميز لسطح المادة المشعة. وتُعادل انبعاثية السطوح السود مثل الفحم الحجري 1، أمّا انبعاثية سطوح الفلزات اللامعة فتقترب من الصفر. وعليه، فهي تبعث إشعاعات أقلّ بسبب ذلك. وتعتمد قيمة e -إلى درجة ما- على درجة حرارة الجسم. إنّ السطوح اللامعة لا تبعث الإشعاعات بمقدار ضئيل جداً فقط ولكنّها لا تمتصّ منها أيضًا إلّا القليل جداً (وتعكس معظمها). أمّا الأجسام الدكناء والسود على الوجه الآخر، فتمتصُّ معظم الطاقة الساقطة عليها تقريباً. وهذا هو السبب الذي يفضل لأجله ارتداء الملابس فاتحة اللون في الأيام الحارة مقارنة بالملابس الدكناء. وعليه، **يعدّ الماص الجيد للحرارة باعثًا جيّدًا أيضًا.**

تطبيق الفيزياء

الملابس الداكنة مقابل الملابس الفاتحة

المادة الماصة الجيدة هي مادة مشعة جيدة

والأجسام لا تبعث الطاقة فقط عن طريق الاشعاع، بل تمتصُّ الطاقة من الأجسام الأخرى؛ فإذا كانت الانبعاثية لجسم ما هي e ومساحته A، وهو عند درجة حرارة T_1، فإنّه سيشع الطاقة بمعدّل $e\sigma AT_1^4$. وإذا كان الجسم محاطاً ببيئةٍ عند درجة حرارة T_2، فإنّ معدّل إشعاع محيطه الخارجي للطاقة سيتناسب مع T_2^4، في حين سيتناسب معدّل امتصاصه للطاقة من محيطه الخارجي مع أيضاً T_2^4. لذا، فإنّ محصّلة معدّل انسياب إشعاع الحرارة من الجسم سيخضع للمعادلة التالية

محصلة معدل انسياب الإشعاع الحراري

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = e\sigma A(T_1^4 - T_2^4) \qquad \textbf{(6 – 14)}$$

حيث تمثّل A مساحة سطح الجسم، أمّا T_1 فدرجة حرارته، و e هي انبعاثيته (عند درجة حرارة T_1) في حين تمثل T_2 درجة حرارة محيطه الخارجي. لاحظ أنّ معدل امتصاص الحرارة بوساطة الجسم في هذه المعادلة هو $e\sigma AT_2^4$. أي أن معامل التناسب هو نفسه لعمليتي الامتصاص والانبعاث. ويجب أن يكون هذا صحيحاً ليتطابق مع الحقيقة العملية التي تشير إلى أنّ الاتزان بين الجسم ومحيطه الخارجي يتحقق عندما يصلان إلى درجة الحرارة نفسها. أي أنّ $\Delta Q/\Delta t$ يجب أنّ تعادل الصفر عند $T_1 = T_2$. وعليه، فإنّ معاملات حدود الامتصاص والانبعاث يجب أن تتساوى. وهذا يؤكّد أنّ المشعَّ الجيّد ماصٌّ جيّدٌ.

وبسبب إشعاع الجسم ومحيطه الخارجي للطاقة، فإنّه يترتب على ذلك انتقال الطاقة من جسم إلى آخر إلاّ إذا كانت درجة حرارة الجسمين هي نفسها. ومن (المعادلة 14 – 6)، فإنّه من الواضح إذا كانت $T_1 > T_2$ فإنّ محصّلة انسياب الحرارة ستكون من الجسم إلى محيطه الخارجي ليبرد الجسم نتيجة ذلك. ولكن عندما تكون $T_1 < T_2$، فإن محصلة انسياب الحرارة ستكون من محيط الجسم الخارجي إليه ممّا يؤدّي إلى ارتفاع درجة حرارة الجسم. أمّا إذا كانت الأجزاء المختلفة للمحيط الخارجي عند درجات حرارة مختلفة، فستصبح (المعادلة 14 – 6) أكثر تعقيداً.

تطبيق الفيزياء

فقدان الجسم للحرارة عن طريق الاشعاع

المثال 14-11 قدّر التبريد عن طريق الإشعاع

يجلس لاعبٌ رياضيٌّ بملابس خفيفةٍ في غرفة تبديل ملابس ذات جدران دكناء، ودرجة حرارة $15^\circ C$. قدّر معدّل فقدان الحرارة عن طريق الإشعاع مفترضاً أنّ درجة حرارة الجلد هي $34^\circ C$ و $e = 0.70$ وافترض أنّ مساحة سطح الجسم غير الملامسة للمقعد $1.5 m^2$.

النهج: نستطيع أن نفترض تقديراً تقريبياً باستخدام الفرضيّات المعطاة إضافةً إلى (المعادلة 14– 6) ونعوّض درجات الحرارة بالكلفن.

الحلّ: من المعادلة :

$$\begin{aligned}\frac{\Delta Q}{\Delta t} &= e\sigma A(T_1^4 - T_2^4)\\ &= (0.70)(5.67 \times 10^{-8}\,W/m^2\cdot K^4)(1.5\,m^2)[(307\,K)^4 - (288\,K)^4]\\ &= 120\,W\end{aligned}$$

ملحوظة: الانبعاث الناتج من هذا الرياضي المسترخي يزيد قليلاً عمّا يستخدمه مصباح كهربائي تصنيفه 100-W.

توجيه لحلّ الأسئلة.

يجب أن تستخدم درجة الحرارة بالكلفن

إنّ الشخص المسترخي يولّد بشكل طبيعي حرارة داخلية بمعدّل يقارب مايولّده المصباح الكهربائي المصنف 100 W (الفصل 15) وهو أقل من مقدار الحرارة المفقودة عن طريق الإشعاع كما حُسبت في هذا المثال. وعليه، فإنّ درجة حرارة الشخص تنخفض ليشعر الشخص بتعبٍ شديد. وغالباً ما يتجاوب الجسم مع فقدان الحرارة الشديد عن طريق زيادة معدّل العمليّات الأيضيّة (البند 15–3)، وتُعدّ الرجفة إحدى الطرائق التي يزيد الجسم بوساطتها معدّلَ عملياته الأيضيّة. وبالطبع، فإنّ الملابس تساعد على هذا كثيراً. يوضح (المثال 14 – 11) أن الشخص قد يشعر بعدم الراحة حتى وإن كانت درجة حرارة الهواء داخل الغرفة $25^\circ C$، وهي بذلك تكون غرفة دافئة. وإذا كانت جدران الغرفة وأرضها باردين، فإن الإشعاع سيحدث باتجاههم بصرف النظر عن مدى دفء هواء الغرفة. وبالفعل، فقد تم تقدير فقدان الحرارة بوساطة الإشعاع من شخص طبيعي جالس في غرفة طبيعية على أنه يعادل 50% من فقدان الحرارة الكلي. وتعدّ الغرف مريحة فقط عندما تكون جدرانها وأرضها دافئة، وبالمقابل يكون الهواء في داخلها أقل دفئاً. ويمكن تدفئة أرض الغرف وجدرانها بوساطة قنوات ماء ساخن، أو وحدات تدفئة كهربائية. وأصبحت أنظمة التدفئة هذه أكثر انتشاراً في يومنا هذا. ومن المثير أن تعلم أنّه وقبل أكثر من 2000 عام استخدم الرومان في مناطق امبراطوريتهم جميعها،

تطبيق الفيزياء

الغرفة المريحة

تؤثر درجة حرارة الجدران والمحيط الخارجي إضافة إلى الهواء على مستوى الراحة.

وحتى في المناطق البعيدة جدًّا على أطرافها (في بريطانيا كمثال) قنوات المياه الساخنة والبخار في أرضيات منازلهم لتدفئتها.

المثال 14-12 **قدّر** **إبريقا شاي.**

إذا كان لديك إبريقا شاي: أحدهما خزفي ($e = 0.70$) والآخر فلزّي لامع ($e = 0.10$)، يحتوي كلٌّ منهما على 0.75 L من الشاي عند درجة حرارة 95°C. (أ) قدّر معدل فقدان الحرارة من كلٍّ منهما. (ب) قدّر مقدار الهبوط في درجة الحرارة بعد 30 دقيقة لكلّ منهما. وافترض أنّ درجة حرارة محيطهما الخارجي هي 20°C، وأنّ الحرارة تفقد عن طريق الإشعاع فقط.

النهج: أعطينا المعلومات الضرورية جميعها لحساب الحرارة المفقودة عن طريق الإشعاع باستثناء المساحة. ويحتوي كلُّ إبريق شاي على 0.75 L. ونستطيع أن نعدّه مكعب الشكل وطول ضلعه 10 cm (الحجم = 1.0L) مع احتمالية فقدانه لحرارته من خلال خمسة من وجوهه الستة. ولتقدير الانخفاض في درجة الحرارة في (ب)؛ نستخدم مبدأ الحرارة النوعية، ونهمل مساهمة الإبريقين مقارنة بمساهمة الماء.

الحلّ: (أ) المساحة السطحية للإبريق الذي عُدَّ مكعباً(بالتقريب) وطول ضلعه 10 cm بدلالة خمسة وجوه فقط هي $5 \times (0.1\,\text{m})^2 = 5 \times 10^{-2}\,\text{m}^2$ تقريباً. وعليه، فإنّ معدل فقدان الحرارة حوالي:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta Q}{\Delta t} &= e\sigma A(T_1^4 - T_2^4)\\ &= e(5.67 \times 10^{-8}\,\text{W/m}^2\cdot\text{K}^4)(5 \times 10^{-2}\,\text{m}^2)\left[(368\,\text{K})^4 - (293\,\text{K})^4\right]\\ &\approx e(30)\ \text{W}\end{aligned}$$

أو 20 W تقريباً للإبريق الخزفي ($e = 0.70$) و 3 W للإبريق المتلألئ ($e = 0.10$).

(أ)ولتقدير الانخفاض في درجة الحرارة؛ نستخدم الحرارة النوعية للماء، ونهمل مساهمة الإبريقين. وكتلة 0.75 L ماء هي 0.75 kg. (تذكر أنّ $1.0\ \text{L} = 1000\ \text{cm}^3 = 1 \times 10^{-3}\,\text{m}^3$ و $\rho = 1000\ \text{k/m}^3$).

وباستخدام (المعادلة 14 – 2) و (الجدول 14 – 1) نحصل على

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = mc\frac{\Delta T}{\Delta t}$$

وعليه:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\Delta Q/\Delta t}{mc} \approx \frac{e(30)\ \text{J/s}}{(0.75\,\text{kg})(4.186 \times 10^3\,\text{J/kg}\cdot\text{C°})} = e(0.01)\ \text{C°/s}$$

وبعد 30 دقيقة (1800 s)، $\Delta T = e(0.01\ \text{C°/s})\Delta t = e(0.01\ \text{C°/s})(1800\,\text{s}) = 18e\ \text{C°}$ أو حوالي 12C° للإبريق الخزفي ($e = 0.70$) وحوالي 2C° للإبريق الفلزي اللامع ($e = 0.10$). وعليه، فإنّ الإبريق الفلزي اللامع يتميز عن الآخر من وجهة نظر الإشعاع على الأقل.

ملحوظة: يمكن للحمل الحراري والتوصيل الحراري أن يقوما هنا بدور أكبر من الإشعاع.

لا يمكن حساب تسخين جسم بوساطة الشمس باستخدام (المعادلة 14 – 6) حيث تفترض المعادلة درجة حرارة منتظمة T_2 لمحيط الجسم. أمّا الشمس فهي مصدر نقطي أساسًا. وعليه، فإنّ الشمس يجب أن تعامل كمصدر منفرد للطاقة. وبحسب التسخين بوساطة الشمس علمًا بأنّ 1350 J من الطاقة القادمة من الشمس تصطدم بالغلاف الجوي للأرض خلال كل ثانية لكلّ $m2$ من المساحة التي تصنع زاوية قائمة مع أشعة الشمس. ويسمى الرقم $1350\ \text{W/m}^2$ **الثابت الشّمسيّ**. ويمتص الغلاف الجوي ما يقارب 70% من هذه الطاقة قبل أن تصل سطح الأرض حسب غلاف الغيوم. وعندما تكون السماء صافية، فإنّ حوالي $1000\ \text{W/m}^2$ سيصل سطح الأرض. ويمتصّ جسمٌ انبعاثيته e ومساحته A وهو مواجه للشمس طاقةً (بالواط) معدلها:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = (1000\ \text{W/m}^2)eA\cos\theta \qquad \textbf{(7-14)}$$

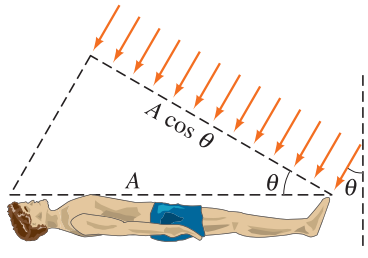
وتمثل θ الزاوية بين أشعة الشمس والعمود على المساحة A (الشكل 14 – 12). أي أنّ: ($A\cos\theta$) تمثل المساحة "الفاعلة" عند زاوية قائمة من أشعة الشمس.

تطبيق الفيزياء

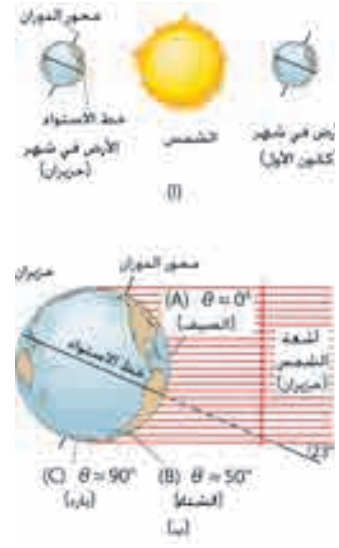
اشعاعات من الشّمس

الثابت الشّمسيّ

الشكل 14 – 12 اصطدام الطاقة المشعّة بالجسم بزاوية θ.



يعتمد تفسير الفصول والغطاء الثلجي القطبي (انظر الشكل 14 – 13) على معامل $\cos\theta$ هذا في (المعادلة 14 – 7). ولا تُعدّ الفصول ناجمة عن قرب الأرض من الشمس؛ وفي الحقيقة فإنّ الصيف يحدث في نصف الكرة الشمالي عندما تكون الأرض في أبعد مسار لها عن الشمس. والزاوية (أي $\cos\theta$) هو ما يهمّنا فعلًا. وبالإضافة إلى ذلك، فإنّ السبب في تسخين الشمس للأرض عند منتصف النهار أكثر منها عند الشروق أو الغروب يعزى إلى معامل الزاوية $\cos\theta$ هذا.



الشكل 14 – 13 (أ) تنشأ الفصول الأربعة بسبب الزاوية $23\frac{1}{2}°$ التي يصنعها محور الأرض مع مداره حول الشمس. و(ب) يصنع ضوء الشهر السادس الميلادي "يونيو" زاوية 23° تقريباً مع خط الاستواء. وعليه، فإن الزاوية θ في جنوب الولايات المتحدة (A) هي تقريباً 0° (ضوء نهار الصيف المباشر)، أمّا الزاوية في جنوب الكرة الأرضية $\theta = 50°$ (B) أو 60° عندها، يصبح مقدار الطاقة الممكن امتصاصها أقل، وبذلك يحلُّ الشتاء. وأما قرب القطبين (C) فلا يوجد أي ضوء نهار قوي مباشر أبداً. وتتغير $\cos\theta$ من حوالي $\frac{1}{2}$ خلال الصيف إلى 0 في وقت الشتاء لتعطي كمية الحرارة القليلة هذه المجال لتشكل الثلج.

المثال 14-13 قدّر **تسمير البشرة – امتصاص الطاقة.**

ما معدل امتصاص الطاقة من الشمس بوساطة شخص مستلقٍ أفقيًّا على الشاطئ في يوم ذي سماءٍ صافية إذا كانت الشمس تصنع زاوية 30° مع الرأسي؟ افترض أن $e = 0.70$، وأن $1000\ \text{W/m}^2$ تصل سطح الأرض.

النهج: نستخدم (المعادلة 14 – 7)، ونأخذ طول شخص ماعلى أنّه 2 m تقريبًا وعرضه 0.4 m لتصبح مساحة سطحه (تقريباً): $A \approx (2\ \text{m})(0.4\ \text{m}) = 0.8\ \text{m}^2$.

الحـــلّ: بما أنّ $\cos 30° = 0.866$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = (1000\ \text{W/m}^2)eA\cos\theta$$

$$= (1000\ \text{W/m}^2)(0.70)(0.8\ \text{m}^2)(0.866) = 500\ \text{W}$$

ملحوظة: إذا كان الشخص يرتدي ملابس ملوّنةً فاتحة، فإنّ e ستكون أقلّ بكثير. وعليه، فسيمتص قدراً أقل من الطاقة.

ومن التطبيقات المثيرة للإشعاع الحراري في الطب التشخيصي هو المصور الحراري. وتمسح الآلة الخاصة "المصور الحراري" الجسد من نقاط كثيرة، فتقيس شدة الإشعاعات خلاله، وتبني صورة تمثل أشعة إكس (الشكل 14 – 14).

ويمكن الكشف بسهولة باستخدام هذه الطريقة عن طريق تسجيل الأماكن ذات النشاط الأيضي المرتفع عن الأورام نتيجة ارتفاع درجة حرارة هذه المناطق، وزيادة الاشعاع المترتب على ذلك.

(أ)

(ب)

الشكل 14 – 14 صور حرارية لذراعي ويدي شخص سليم (أ) قبل و(ب) بعد تدخين سيجارة تظهرالانخفاض في درجة الحرارة الناتجة من ضعف الدورة الدموية المصاحب للتدخين. وقد لوّنت الصور الحرارية بدلالة درجة الحرارة. ويتغير اللون على اليمين من اللون الأزرق (بارد) إلى اللون الأبيض (ساخن).

تطبيق الفيزياء

علم الفلك - حجم النجم

المثال 14-14 قدّر **تسمير البشرة – امتصاص الطاقة.**

يبعث النجم الهائل بيتيلجيوس طاقة إشعاعية بمعدل 10^4 ضعف تلك المنبعثة من شمسنا، على الرغم من أنّ درجة حرارة سطحه تعادل نصف درجة حرارة سطح شمسنا (أي 2900 K). قدّر نصف قطر بيتيلجيوس، وافترض أن $e = 1$ علماً بأنّ نصف قطر الشمس $r_S = 7 \times 10^8\ \text{m}$.

النهج: نفرض أنّ كلًّا من بيتيلجيوس والشمس كرويان، ومساحة سطح كلّ منهما $4\pi r^2$.

الحـلّ: نحل (المعادلة 14 – 5) لإيجاد A :

$$4\pi r^2 = A = \frac{(\Delta Q/\Delta t)}{e\sigma T^4}$$

إذن

$$\frac{r_B^2}{r_S^2} = \frac{(\Delta Q/\Delta t)_B}{(\Delta Q/\Delta t)_S}\cdot\frac{T_S^4}{T_B^4} = (10^4)(2^4) = 16 \times 10^4$$

وعليه $r_B = \sqrt{16 \times 10^4}\, r_S = (400)(7 \times 10^8\ \text{m}) \approx 3 \times 10^{11}\ \text{m}$

ولو كان هذا النجم هو شمسنا، لوقعت الأرض في داخله (حيث تبعد الأرض عن الشمس $1.5 \times 10^{11}\ \text{m}$).

ملخص

تشير **الطاقة الداخلية** U إلى الطاقة الكلية لجزيئات الجسم جميعها . وهي لغاز مثالي أحادي الذرة :

$$U = \frac{3}{2}NkT = \frac{3}{2}nRT \qquad \textbf{(1 –14)}$$

حيث تمثّل N عدد الجزيئات، أمّا n فتمثّل عدد المولات.

وتشير **الحرارة** إلى انتقال الطاقة من جسمٍ إلى آخر بسبب الاختلاف في درجة الحرارة بينهما. وعليه، فإنّ الحرارة تقاس بوحدات الطاقة مثل الجول.

تُعرف الحرارة والطاقة الداخلية في بعض الأوقات بدلالة السعر (الكالوري) أو (kcal) حيث:

$$1\ \text{kcal} = 4.186\ \text{kJ}$$

وهو مقدار الحرارة الضرورية لرفع درجة حرارة 1 kg من الماء درجة مئوية واحدة.

وتعرف **الحرارة النوعية** c لمادة ما على أنها مقدار الطاقة (أو الحرارة) الضرورية لتغيير درجة حرارة وحدة كتلة واحدة من المادة درجة واحدة. وتعطى بالمعادلة:

$$Q = mc\,\Delta T \qquad \textbf{(2 – 14)}$$

حيث تمثل Q مقدار الحرارة المتصة أو المحررة، أما $T\Delta$ فهي مقدار الزيادة أو النقصان في درجة الحرارة، في حين تمثّل m كتلة المادة.

وعندما تنساب الحرارة بين أجزاء النظام المعزول، فإنّ حفظ الطاقة يخبرنا بأنّ الحرارة المكتسبة إلى جزء من النظام ستعادل الحرارة المفقودة من جزء آخر من النظام. وهذا هو جوهر المسعرية (قياس الحرارة) وهو القياس الكمي للحرارة المتبادلة .

وغالبًا ما يحدث تبادل للطاقة دون حدوث أي تغيّر في درجات الحرارة عندما تغير المادة طورها. إنّ حرارة الانصهار هي الحرارة الضرورية لصهر 1 kg من المادة الصلبة وتحويلها إلى سائلة. وهي مكافئة أيضاً للحرارة المحررة نتيجة انتقال المادة من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة. وتعرف **حرارة التبخر** على أنها الطاقة الضرورية لتحويل 1 kg من المادة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية. وهي أيضاً الطاقة المحررة عن تحوّل المادة من غاز الى سائل.

وتنتقل الحرارة من موضع (أو جسم) إلى آخر بثلاث طرائق مختلفة وهي: التوصيل الحراري، والحمل الحراري، والإشعاع.

ففي **التوصيل الحراري** تنتقل الطاقة من الجزيئات أو الإلكترونات ذات الطاقة الحركية المرتفعة إلى الجزيئات أو الإلكترونات المجاورة ذات الطاقة الحركية المنخفضة في أثناء تصادم بعضها ببعض.

أمّا **الحمل الحراري** فهو انتقال الطاقة بوساطة حركة الجزيئات جميعها إلى مسافات طويلة نسبياً.

في حين أنّ **الاشعاع** الذي لا يتطلّب وجود أيّ وسط ماديٍّ لحدوثه فهو انتقال الطاقة كتلك الطاقة الناتجة من الشمس بوساطة الأمواج الكهرومغناطيسية. كما وتشع الأجسام جميعها طاقة بكميات تتناسب طردياً مع كلّ من الأسّ الرابع لدرجة حرارتها بالكلفن (T^4) ومساحة سطحها. وتعتمد الطاقة المشعة (أو المتصة) أيضاً على طبيعة السطح الذي يصنف بدلالة الانبعاثية e. (علماً بأنّ السطوح الدكناء تمتصّ وتشعّ أكثر من تلك السطوح اللامعة).

وتصل الإشعاعات المنطلقة من الشمس إلى سطح الأرض في يوم صافٍ بمعدل $1000\ \text{W/m}^2$.

أسئلة

1. ماذا يحدث للشغل المبذول عند هزّ إبريق عصير برتقال بشدة؟
2. هل تنساب الحرارة بين جسمين عندما يدفيء الساخن منهما البارد؟ وهل يتساوى التغيّر في درجات الحرارة بينهما؟
3. (أ) هل ستنساب الحرارة بصورةٍ طبيعيّةٍ من جسمٍ يملك طاقة داخلية أعلى إلى جسمٍ يملك طاقة داخلية أقلّ عندما يتلامس جسمان مختلفان في درجة الحرارة؟ (ب) هل يمكن للحرارة أن تنساب بين جسمين لهما الطاقة الداخلية نفسها. اشرح.
4. من الممكن لدرجات الحرارة أن تنخفض لأقلّ من درجة التجمد عدة مرّات خلال فصل الشتاء في المناطق الدافئة حيث تنمو النباتات الاستوائية. ويمكن التقليل من حجم التلف للنباتات الحساسة الناجم عن التجمد عن طريق ريّها خلال فترة المساء في تلك المناطق. وضح إجابتك.
5. من المعروف أنّ الحرارة النوعية للماء هي كمية كبيرة جداً. فسّر لماذا تجعل هذه الحقيقة استخدام الماء لأنظمة التدفئة (أي مشعات الماء الحار) أمراً حتمياً؟
6. لماذا يظلّ الماء في حافظة الماء الفلزية بارداً لفترة أطول عندما تبقى السترة المحيطة بالحافظة مبللة؟
7. فسّر لماذا تكون الحروق الناجمة عن البخار أكثر خطورةً على الجلد من حروق الماء الساخن عند درجة حرارة 100°C؟
8. فسّر لماذا يبرد الماء عندما يتبخّر (تنخفض درجة حرارته). استخدم كلا من مبدأ الحرارة الكامنة والطاقة الداخلية.
9. هل تطبخ البطاطا بسرعة أكبر عند غليان الماء؟
10. هل تبرد مروحة كهربائية اعتيادية الهواء؟ برّر إجابتك إن كانت نفيًا أو إيجابًا. وإذا كانت الإجابة بالنفي، فلماذا تستخدم؟
11. يمكن لدرجة الحرارة أن تصل إلى 700°C عند طبقات الجوّ العليا للأرض. ومع هذا، فيمكن لأيّ حيوان عند ذلك الارتفاع أن يموت متجمّدًا لا محترقاً. وضّحْ إجابتك.
12. نجا مستكشفون في حملةٍ فاشلةٍ للقطب الشمالي من الموت المحقّق بعد أن غطُّوا أجسادهم بالثلج. لماذا قاموا بذلك؟
13. لماذا نشعر ببرودة أكثر عند السير على رمل الشاطىء المبلل مقارنة مع سيرنا على رمل شاطىء جاف؟
14. إذا سمعت أنّ جسمًا ما يمتلك "محتوًى حراريًّا مرتفعًا"، فهل يعني ذلك أنّ درجة حرارته مرتفعة؟ فسّر.
15. عندما تستخدم مواقد الهواء الساخن لتدفئة المنازل، لماذا يعدّ وجود مسرب للهواء يسمح له بالعودة إلى الموقد ضروريًّا؟ ماذا يحدث إذا أغلق المسرب بخزانة كتبٍ مثلًا؟
16. تكون مراوح السقف في بعض الأحيان قابلةً للحركة في الاتجاهين؛ فتقوم بدفع الهواء نحو الأسفل في موسم ما، وتسحبه إلى الأعلى في موسم آخر. بأي طريقة يجب أن تثبت المروحة في فصلي الصيف والشتاء؟
17. تصنف أكياس النوم الخفيفة والسترات الواقية من الرصاص بدلالة سمكها بالإنشات أو السنتيمترات عند حزمها ووضعها فوق رفوف خزانة. فسر.
18. يوضع أعلى شريحة المعالج "مصرِّف الحرارة" الذي يتكون من مجموعة كبيرة من الصفائح المتوازية. فلماذا صُنع بهذه الطريقة؟
19. تهبُّ أنسام البحر غالباً في الأيام المشمسة على الشواطئ المجاورة للكتل المائية الكبيرة. فسّر لماذا يحدث ذلك في ضوء معرفتك بأنّ درجة حرارة الأرض ترتفع بسرعة أكبر من درجة حرارة الكتل المائية المجاورة.
20. تكون أرضيّة المنزل أبرد عند السماح للهواء بالانسياب أسفل أساساته مقارنة بالمنزل المبني مباشرةً فوق الأرض ولا يسمح بمرور الهواء أسفله كما لو أنّ أساسه قد صنع من قطعة خرسانة مسلحةهائلة فسّر.
21. ربّما يشعر شخص بدفء الجو عندما تكون درجة الحرارة 22°C، ولكنّه حتمًا يشعر بالبرودة وهو في بركة ماء درجة حرارتها 22°C. لماذا؟
22. فسّر لماذا تقرأ درجة الحرارة دائمًا والمقياس في الظلّ.
23. قد يبرد جسم طفل خداج موضوع في حاضنة بصورة كبيرة عندما تكون درجة حرارة الهواء في الحاضنة دافئة. فسّر.

24. لماذا طليت بطانة قارورة حافظة لدرجة الحرارة بالفضّة (شكل 14 – 15) ولماذا تمّ تفريغ الهواء بين جداريها؟

الشكل 14 - 15
(مسألة 24).

25. تخيَّلْ وجود حائطٍ معزولٍ عزلاً جيّدًا – أي أنّ مقاومته الحرارية مرتفعة R_1. ماذا سيحدث للمقاومة الحرارية الكلية عندما تضع نافذة ذات مقاومة حرارية منخفضة R_2 في منتصف الحائط؟ أعط إجابتك بالمقارنة مع R_1 و R_2. (تلميح: لا يزال الاختلاف في درجة الحرارة عبرالحائط متساوياً عند النقاط جميعها).

26. تفقّد الحرارة من النوافذ بعدَّةِ طرقٍ منها : 1- التهوية عند الحواف. 2- من خلال الإطارات. 3- من خلال الزجاج. 4- عن طريقة الإشعاع. (أ) ما آلية فقدان الحرارة لأول ثلاث حالات: التوصيل الحراري، والحمل الحراري، والإشعاع. (ب) أيٌّ من حالات فقدان الحرارة السابقة تعمل الستائر السميكة على التقليل من قيمتها ؟ وَضِّحْ إجابتك بالتفصيل.

27. ستمتصّ قطعة من الخشب معرضة للشمس حرارة أكثر من قطعة فلزية لامعة بعدة أضعاف. ومع هذا، فإنّ قطعة الخشب تكون أقلّ سخونة عند لمسها مقارنة بالقطعة الأخرى. فسّر.

28. تبرد الأرض ليلاً بسرعة أكبر عندما يكون الجوُّ صافيًا مقارنةً مع الأيام الغائمة. لماذا؟

29. "غطاء الطوارئ" هو ملاءة بلاستيكية لامعة (مطلية بفلز ما) ورقيقة . فسّر كيف يمكن لهذا الغطاء أن يُحافظ على دفء شخص ثابت لا يتحرك؟

30. فسّر لماذا لا تخضع المدن الساحلية لدرجات حرارة قصوى مقارنةً مع المدن الداخلية عند الارتفاع نفسه عن سطح البحر.

مسائل

14 – 1 الحرارة كانتقال للطاقة

1. (I) ما كميّة الحرارة الضرورية (بالجول) لرفع درجة حرارة 30.0 kg من الماء من 15°C إلى 95°C؟
2. (I) كم ستصبح درجة حرارة 3.0 kg من الماء هي أساساً عند 10.0°C إذا زُوّدت بحرارة مقدارها 7700 J؟
3. (II) يستهلك شخصٌ متوسِّطُ النشاط نحو 2500 سعر غذائي في اليوم الواحد. (أ) ما المقدار المكافئ بالجول؟ (ب) ما المقدار المكافئ بدلالة الكيلو واط ساعة؟ (جـ) ما مقدار فاتورتك إذا كانت تسعيرة شركة الطاقة هي عشرة قروش لكل كيلو واط. ساعة؟ هل تستطيع أن تغذّي نفسك بهذا المقدار من المال؟
4. (II) تمثّل الوحدة الحراريّة البريطانية (Btu) وحدة الحرارة في نظام الوحدات البريطاني. وتعرف 1 Btu على أنّها مقدار الحرارة الضرورية لرفع درجة حرارة 1 lb من الماء 1 F° . أثبت ذلك 1 Btu = 0.252 kcal = 1055 J.
5. (II) يستطيع سخّان ماء توليد 32,000 kJ/h. ما كمية الماء القادرة على تسخينه من 15°C إلى 50°C خلال ساعة؟
6. (II) صنف سخّان غمس صغير عند 350 W. قدر الزمن الذي سيستغرقه لتسخين كوب من الخساء (افترض أنّ سعته 250 mL ماء) من 20°C إلى 60°C.
7. (II) ما مقدار الكيلو سعرات المتولدة من الكوابح خلال إيقاف سيارة كتلتها 1200-kg من سرعة 95kg/h إيقافًا كاملًا؟

14 – 3 و 14 – 4 الحرارة النوعية والمسعرية

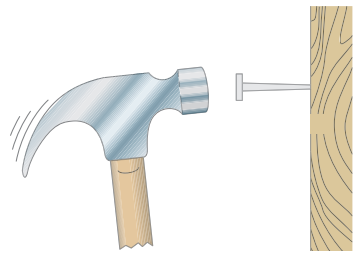
8. (I) يحتوي نظام تبريد سيارة على 16 L من الماء. ما مقدار الحرارة الممتصة عند ارتفاع درجة حرارته من 20°C إلى 90°C؟
9. (I) ما الحرارة النوعية لقطعة من مادة فلزية كتلتها 5.1 kg تحتاج إلى 135 kJ من الحرارة لرفع درجة حرارتها من 18.0°C إلى 31.5°C؟
10. (II) تمتصُّ عيّنات من النحاس والألمنيوم والماء مقدار الحرارة نفسه، فترتفع درجة حرارة كل منها بالمقدار نفسه. ما نسب كتلها؟ [تلميح: انظر إلى الجدول 14 – 1].
11. (II) يقرأ ميزان حرارة زجاجي كتلته 35-g درجة حرارة 21.6°C قبل أن يُوضع في 135 mL ماء. ثم يقرأ درجة حرارة 39.2°C بعد أن يصل إلى وضع الاتزان مع الماء. فما درجة حرارة الماء الابتدائية؟
12. (II) ما درجة حرارة الاتزان الناتجة من وضع مكعب نحاسي كتلته 245-g، ودرجة حرارته 285°C في كوب مسعر حراري من الألمنيوم كتلته 145g يحتوي على ماءٍ كتلته 825 g عند درجة حرارة 12.0°C؟
13. (II) أسقطت حذوة حصان حديدية (كتلتها 0.40 kg) بعد طرقها مباشرة (شكل 14 – 16) في وعاء حديدي كتلته 0.30-kg ودرجة حرارته 20.0°C، ويحتوي على 1.35L ماء. قدر درجة حرارة الحذوة الابتدائية إذا علمت أن درجة حرارة الاتزان هي 25.0°C؟

الشكل 14 - 16
(مسألة 13).

14. (II) سُخِّنَتْ عَيِّنَةٌ كتلتها 215-g إلى درجة حرارة 330°C، ثمّ غُطِّست في كوب مسعر حراري من الألمنيوم كتلته 105-g يحتوي على 165 g من الماء، وميزان حرارة زجاجي كتلته 17-g عند درجة حرارة 12.5°C. فإذا كانت درجة الحرارة النهائية 35.0°C، فما الحرارة النوعية للعَيّنة؟ (افترض عدم فقدان أيّ كمية من الماء عن طريق التبخير)؟
15. (II) ما الزمن الذي يستغرقه وعاء تسخين مصنف عند 750-W لإيصال 0.75L ماء إلى درجة الغليان بدءاً من 8.0°C؟ افرض أنّ كتلة وعاء التسخين المصنوع من مادة الألمنيوم هي 360 g، وأنّ لا فقدان لأيّ كميّة من الماء عن طريق التبخير؟
16. (II) قدّر بدلالة القراءات التالية محتوى قطعة حلوى من السعرات الحرارية إذا كانت كتلتها 15-g: إذا تركت قطعة الحلوى لتجف تمامًا قبل وضعها في المسعر الحراري القنبلة. كتلة القنبلة المصنوعة من الألمنيوم هي 0.725 kg ومغمورة في 2.00 kg من الماء الموجود داخل مسعر حراري كتلته 0.624 kg. ودرجة حرارة الخليط الابتدائية هي 15.0°C ودرجة الحرارة النهائية هي 53.5°C.

17. (II) عند وضع قطعة حديد كتلتها 290-g، و درجة حرارتها 180°C داخل كوب مسعر حراري من الألمنيوم كتلته 95-g ويحتوي على 250 g من الجليسرين درجة حرارته 10°C، أصبحت درجة الحرارة النهائية للخليط 38°C. قدّر قيمة الحرارة النوعية للجليسرين.

18. (II) يدق رأس مطرقة كتلته 1.20-kg مسمارًا بسرعة ابتدائية مقدارها 6.5 m/s (شكل 14 – 17) فيسكن تمامًا. قدر الارتفاع في درجة حرارة مسمار (كتلته 14-g) الناتج من دقه 10 مرّاتٍ متتاليةٍ بالمطرقة. افرض أنّ المسمار سيمتصّ الطاقة المتولّدة جميعها.



الشكل **14 - 17** (مسألة 18).

19. (II) أُسقطت كرةٌ فلزيّةٌ كتلتها 0.095-kg من سطح مبنى ارتفاعه 45-m. ما الارتفاع في درجة حرارة الكرة إذا امتصّت 65% من الطاقة الحرارية الناتجة من تصادمها مع الأرض؟

20. (II) تمّ تعريف السعة الحرارية C لجسم ما على أنّها كمية الحرارة الضرورية لرفع درجة حرارة الجسم بمقدار 1°C. وعليه، فإن كمية حرارة مقدارها Q ضرورية لرفع درجة الحرارة بمقدار ΔT: $Q = C\Delta T$. (أ) اكتب السعة الحرارية C بدلالة الحرارة النوعية c للمادة. (ب) ما السعة الحرارية لـ 1.0 kg من الماء؟ (جـ) ما السعة الحرارية لـ 25 kg من الماء؟

14 – 15 الحرارة الكامنة

21. (I) ما مقدار الحرارة الضرورية لصهر 16.50 kg من الفضّة إذا علمت أنّ درجة حرارتها الابتدائية 20°C؟

22. (II) يمكن لشخصٍ ما أن يخسر 180 kcal من الحرارة خلال التمرين في 30 دقيقة عن طريق تبخّر الماء من الجلد. فما مقدار الماء المفقود؟

23. (I) إذا زوّد وعاء للأكسجين السائل عند درجة حرارة 183°C– بمقدار 2.80×10^5 J، فما مقدار الأكسجين المتبخّر؟

24. (II) أسقط مكعب ثلج كتلته 30-g، وقريب من درجة انصهاره في وعاء معزول يحتوي على نيتروجين سائل. فما مقدار النيتروجين المتبخر إذا كان عند درجة حرارة تبخره (77 K) وكانت حرارة تبخره الكامنة هي 200 kJ/h؟ افترض للسهولة أنّ الحرارة النوعية للثلج ثابتة وأنّها تعادل قيمتها قرب درجة انصهارها؟

25. (II) أُخرج مكعب ثلج من براد درجة حرارته 8.5°C–، ووُضِعَ مسعرٌ حراريٌّ من الألمنيوم كتلته 95-g يحتوي على 310 g ماء عند درجة حرارة الغرفة 20.0°C. فما كتلة مكعب الثلج الأولية إذا علمت أنّ درجة حرارته 17.0°C؟

26. (II) سخان من الحديد كتلته 230 kg، يحتوي على 83 kg من الماء عند درجة حرارة 18°C. ويزود السخان طاقة بمعدل 52,000 kJ/h. ما الزمن اللازم للماء لكي : (أ) يصل إلى درجة التبخر؟ و(ب) يتحول كلياً إلى بخار؟

27. (II) يستهلك درّاج في يوم سباق حار 8.0 L من الماء خلال فترة أربع ساعات. ما مقدار الطاقة التي يستهلكها الدراج (بالكيلوسعر) خلال ركوبه مفترضًا أنّ طاقة الدراج الكلية استهلكت في تحويل الماء إلى عرق؟ (علمًا بأن فعالية الدراج هي فقط 200% حيث معظم الطاقة المستنفذة تتحول إلى طاقة).

28. (II) ما كتلة بخار ماء درجة حرارته 100°C الواجب إضافتها إلى 1.00 kg من الثلج عند درجة حرارة 0°C ليتحوَّل إلى سائل عند 20°C؟

29. (II) إذا كانت الحرارة النوعية للزئبق 138 J/kg·°C فحدّد الحرارة الكامنة لانصهار الزئبق باستخدام بيانات المسعر الحراري التالية: عند وضع 1.00 kg من الزئبق الصلب (ودرجة حرارته 39.0°C-) في مسعر حراري من الألمنيوم كتلته 0.620 kg، ويحتوي على 0.400 kg ماء عند 12.80°C أصبحت درجة حرارة الاتزان النهائية 5.06°C.

30. (II)تخترق رصاصة كتلتها 70-g مكعب ثلج درجة حرارته 0°C بسرعة ابتدائية مقدارها 250 m/s وتستقر في داخله. افترض أن درجة حرارة الرصاصة لا تتغير بمقدار ملحوظ. حدّد كمية الثلج المنصهرة نتيجة التصادم.

31. (II) تنزلق متزلجة كتلتها 54.0-kg من سرعة 6.4 m/s إلى السكون. افترض أنّ الثلج عند 0°C، وأنّ الثلج امتص 50% من الحرارة المتولّد بالاحتكاك. احسب مقدار الثلج المنصهر.

32. (II) لاحظ محقّقُ الجنايات في موقع جريمة أنَّ طلقة رصاصيّة كتلتها 8.2-g قد توقفت داخل إطار الباب وانصهرت تماماً عند التصادم. على افتراض أن الطلقة قد انطلقت عند درجة حرارة الغرفة (20°C) فما سرعة خروج الطلقة من فوهة السلاح كما حسبها المحققون؟

14 – 16 إلى 14 – 8 التوصيل، والحمل الحراري، والإشعاع.

33. (II)وُضع أحد طرفي عمود من الألمنيوم قطره 33-cm عند درجة حرارة 460°C، وغمس طرفه الآخر في ماء عند 22°C. احسب معدل التوصيل الحراري على امتداد العمود.

34. (I) احسب معدل الانسياب الحراري بوساطة التوصيل الحراري في (المثال 14 – 10) مفترضاً رياحاً قوية فجائية، ودرجة حرارة خارجية مقدارها 5°C-.

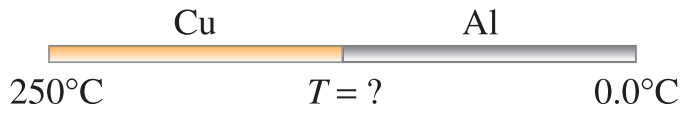
35. (أ)ما مقدار القدرة المشعّة بوساطة كرة من التنجستن (إشعاعيتها $e = 0.35$) ونصف قطرها 22 cm عند درجة حرارة 25°C؟ (ب) ما محصلة انسياب الطاقة نحو الخارج من الكرة إذا علمت أنّ الكرة أُبقيت داخل غرفة درجة حرارة جدرانها ثابتة عند 5°C–؟

36. (II) توصيل الجلد الحراري. افترض أن 200 W من الحرارة ينساب عن طريق التوصيل الحراري من الأوعية الدموية أسفل الجلد إلى سطح جسم مساحته السطحية $1.5\ m^2$. قدّر متوسط طول الأوعية الدموية أسفل سطح الجلد إذا علمت أن الاختلاف في درجات الحرارة بين طرفيها هو 0.50°C.

37. (II) تشترك غرفتان مكعبتا الشكل طول ضلع كلٍّ منهما 4.0 m في حائط حجري سمكه 12-cm. إذا كانت درجة حرارة إحدى الغرفتين 10°C، في حين كانت درجة حرارة الغرفة الأخرى 30°C بسبب إنارتها بالمصابيح. فما عدد المصابيح المنارة والكافية لإبقاء درجة حرارة الغرفة 30°C إذا علمت أن قدرة كل مصباح هي 100-W؟

38. (II) ما الفترة التي تستغرقها الشمس لصهر مكعب من الثلج عند 0°C مساحة سطحه الأفقية $1.0\ m^2$، وسمكه 1.0 cm؟ افترض أن أشعة الشمس تصنع زاوية 30° مع الرأسي، وأن إشعاعية الشمس 0.050.

39. (II) وصلت نهايتا عمودين لهما الطول نفسه ومساحة المقطع العرضية نفسها كذلك، أحدهما من النحاس، والآخر من الألمنيوم ببعضهما بعضا (شكل 14 – 18). وضع الطرف الآخر لعمود النحاس في فرن أبقيت درجة حرارته عند 250°C. في حين وضع طرف عمود الألمنيوم الآخر في حمام من الثلج عند درجة حرارة 0°C. احسب درجة الحرارة عند نقطة التقاء العمودين مع بعضهما بعضًا.

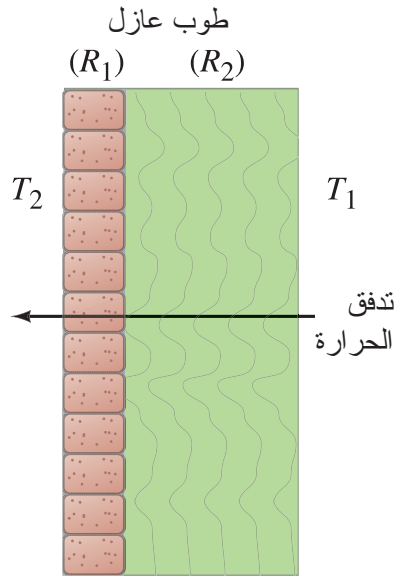


الشكل **14 - 18** (مسألة 39).

40. (II) (أ) قدّر باستخدام الثابت الشمسي معدَّل وصول الطاقة إلى الأرض ككل من الشمس. (ب) قدّر متوسط درجة الحرارة السطحية مفترضاً أن الأرض مشع مثالي ($e = 1.0$) لأنّها ستشع مقدار الطاقة الساقطة نفسها عليها إلى الفضاء (أي أن الأرض في وضع الاتزان).

41. (II) يولّد مصباح ضوئي مصنف عند 100-W مقداراً من الحرارة يعادل 95 W يبددها من خلال زجاجة. إذا علمت أنّ نصف قطره 3.0 cm وسمكه 1.0 mm. ما الفرق في درجة الحرارة على جانبي سطح الزجاج الداخلي والخارجي؟

42. (III) افترض أنّ عزل حائط ما في منزل ينتج من طبقة من الطوب سمكها 4.0-in. وطبقة أخرى عازلة مصنفة عند R-19 كما هو مبين في (الشكل 14 – 19). فما معدل فقدان الحرارة الكلي خلال هذا الحائط إذا علمت أنّ المساحة السطحية الكلية للحائط هي 240 ft^2. وأنّ الفرق في درجات الحرارة خلاله هي 12 F°؟

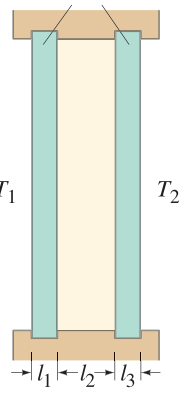


الشكل 14 - 19 طبقتان تعزلان حائط. (مسألة 42).

43. (III) تتركب النافذة ثنائية اللمعان من لوحين زجاجيين يفصل بينهما حيز من الهواء (الشكل 14 – 20). (أ) أثبت أنّ معدَّل انسياب الحرارة عن طريق التوصيل الحراري خلال هذه النافذة يعطى بالمعادلة التالية :

$$\frac{Q}{t} = \frac{A(T_2 - T_1)}{l_1/k_1 + l_2/k_2 + l_3/k_3}$$

حيث إنّ k_1 و k_2 و k_3 هي التوصيل الحراري لكلّ من لوح الزجاج الأول، والهواء، ولوح الزجاج الثاني على الترتيب. (ب) عمّمْ هذه العبارة لأيّ عدد من المواد المرتبة بجانب بعضها بعضًا.



الشكل 14 - 20 (مسألة 43).

44. (III) ما الزمن المستغرق بالتقريب لمكعب من الثلج كتلته 11.0 kg عند 0°C لكي ينصهر تماماً داخل صندوق مصنوع من الفلين الأبيض مغلق تماماً. إذا كانت أبعاد الصندوق 55 cm × 35 cm × 25 cm، وسمك جدرانه 1.5 cm؟ افترض أن موصلية مادة الصندوق هي خفض موصلية الهواء وأنّ درجة حرارة الهواء خارج الصندوق هي 32°C.

مسائل عامة

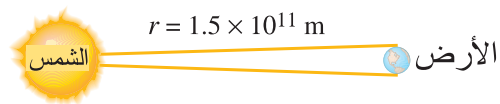
45. يحتوي مشروبٌ غازيٌّ على 0.20 kg تقريبًا من السائل على درجة 5°C . شرب هذا السائل سيعمل على استهلاك كمية من دهون الجسم بسبب الحاجة إلى كمية من الطاقة لرفع درجة حرارة السائل إلى حرارة الجسم (37°C). ما مقدار سعرات الغذاء الواجب توافرها في الشراب كي يكون في وضع إتزان تام مع كمية الحرارة الضرورية لتدفئة السائل؟

46. إذا كان الفحم الحجري يوفر 30 MJ/kg عند حرقه، فما مقدار الفحم الضروري لتدفئة منزل يحتاج إلى 2.0×10^5 MJ طوال فترة الشتاء؟ افترض أن 30% من الحرارة يفقد نحو الأعلى خلال المدخنة.

47. لتحصل على فكرة عن كمية الطاقة الحرارية الموجودة في محيطات العالم، قدّر كمية الحرارة المحررة عند تبريد مكعب من مياه المحيط، طول ضلعه 1 k. درجة كلفن واحدة. (تعامل مع مياه المحيط على أنّها مياه نقية لهذا التقدير).

48. تمّ اختبار طلقة من الرصاص كتلتها 15-g بإطلاقها على قطعة خشبية ثابتة كتلتها 1.05 kg. وتمتص الطلقة والقطعة الخشبية الحرارة المتولّدة جميعها. وعند الوصول إلى الاتزان الحراري، ارتفعت درجة الحرارة بمقدار 0.020 C°. قدّر سرعة دخول الطلقة.

49. (أ) أوجد القدرة الكلية التي تشعها الشمس في الفضاء مفترضاً أنّ الشمس مشع مثالي عند $T = 5500$ K. ونصف قطر الشمس 7.0×10^8 m. (ب) بناءً على ذلك، حدّد القدرة لكلّ وحدة مساحةٍ والتي تصل الأرض على بعد 1.5×10^{11} m.



الشكل 14 - 21 (مسألة **49**).

50. يولّد شخص كتلته 70-kg خلال حركته اليومية 200 kcal. افترض أنّ 20% فقط من المقدار السابق يُستغلّ في شغلٍ مفيد، في حين يتحول 80% منه إلى حرارة. احسب الارتفاع في درجة حرارة الجسم بعد 1.00 h إذا لم يُفقد أيٌّ من هذه الحرارة إلى المحيط الخارجي.

51. تتدحرج صخرة كتلتها 340-kg من حافة مرتفع لتسقط رأسيًّا نحو الأسفل مسافة 140 m قبل اصطدامها بالأرض. قدر الارتفاع في درجة حرارتها إذا بقي 50% من الحرارة المتولدة في الصخرة.

52. أُلقيت كرة رصاصية كتلتها 2.3-kg في دلو معزول حجمه 2.5-L يحتوي على ماء عند درجة حرارة ابتدائية 20.0°C. إذا كانت درجة الحرارة النهائية للثنائي المكون من الماء– الرصاص 28.0°C. فما درجة الحرارة الابتدائية لكرة الرصاص؟

53. يرتدي متسلق جبال سترة مبطنة بريش إوزة سمكها 3.5 cm ومساحة سطحها الكلية 1.2 m^2. ودرجة الحرارة قرب سطح السترة هي 20°C–، وقرب الجلد 34°C. حدّد معدل انسياب الحرارة عن طريق التوصيل الحراري خلال السترة: (أ) مفترضًا أنّ السترة جافة، وأن الموصلية الحرارية k هي موصلية الريش. (ب) مفترضًا أنّ السترة مبللة، وأنّ k هي موصلية الماء، وأنّ سمك السترة قد تقلص إلى 0.50 cm.

54. إنّ معدّل متوسط أيض عدّاءة ماراثون خلال السباق 950 km/h. فإذا كانت كتلة العداءة 55 kg، فقدر كمية الماء التي ستفقدها العداءة نتيجة التبخّر من الجلد إذا استمر السباق لمدة 2.5 h.

55. قدّر معدل توصيل الحرارة من داخل الجسم إلى سطحه. افترض أنّ سمكَ النسيج 4.0 cm، وأنّ درجة حرارة الجلد 34°C، وأنّ درجة حرارة الجسم من الداخل 37°C، وأن مساحته السطحية 1.5 m^2. قارن هذه القيم المقيسة القريبة من 230 W والضروري أن يتخلّص منها شخص يقوم بجهد بسيط. وهذا يظهر بوضوح الحاجة الماسة إلى التبريد الحملي بواسطة الدورة الدموية.

56. يمتاز منزلٌ بجدرانٍ ذات جودة عزل عالية سمكها 17.5 cm (على افتراض إيصال حراري للهواء) ومساحتها $410\ m^2$، وسقف سمكه 6.5 cm، ومساحة $280\ m^2$، ونوافذ غير مغطاة ذات سمك 0.65 cm، ومساحة كلية $33\ m^2$. (أ) افترض أنّ الطريقة الوحيدة لفقدان الحرارة هي من خلال التوصيل الحراري. احسب المعدل الضروري لتزويد المنزل بالحرارة كي يحافظ على درجة حرارته الداخلية عند 23°C إذا كانت درجة الحرارة في الخارج 10°C– ؟ (ب) إذا كانت درجة حرارة المنزل الابتدائية 10°C، فقدّر كمية الحرارة اللازمة لتزويد المنزل بها لرفع درجة حرارته إلى 23°C خلال 30 دقيقة. افترض أنّ ما يجب تدفئته هو هواء المنزل فقط، وأنّ حجم الهواء $750\ m^3$. (جـ) إذا كانت تكلفة الغاز الطبيعي $0.080 لكل كغم، وأن الحرارة الناتجة من احتراقه هي $5.4 \times 10^7\ J/kg$، فما مقدار التكلفة الشهرية للمحافظة على المنزل كما في الفرع (أ) لمدة 24 h في اليوم مفترضاً أنّ 90 % من الحرارة الناتجة ستستخدم في تدفئة المنزل؟ افترض الحرارة النوعية للهواء 0.24 kcal/kg

57. تخترق طلقةٌ من الرصاص كتلتها 15-g تتحرك بسرعة ابتدائية 220 m/s حائطًا رقيقًا وتخرج من الجهة المقابلة بسرعة 160 m/s. إذا كانت الطلقة ستمتص 50% من الحرارة المتولدة : (أ) فكم الزيادة في درجة حرارة الطلقة؟ (ب) إذا كانت درجة حرارة الطلقة الابتدائية 20°C، فهل سينصهر أيُّ جزءٍ من الطلقة؟ وإذا كان الجواب نعم، فكم الكمية؟

58. تواجه ورقة شجر الشمس في يومٍ صافٍ، وتبلغ مساحتها السطحية 40 cm^2 وكتلتها $4.5 \times 10^{-4}\ kg$. وتبلغ إشعاعيتها 0.85. أما حرارتها النوعية فهي 0.80 kcal/kg·K. (أ) قدر معدل الارتفاع في درجة حرارة الورقة. (ب) احسب درجة الحرارة النهائية للورقة إذا فقدت حرارتها الكلية عن طريق الإشعاع للوسط المحيط بها عند 20°C. (جـ) ما الطرق الأخرى التي تفقد ورقة الشجر خلالها حرارتها؟

59. استخدم النتيجة من الفرع (أ) في (سؤال 58) وخذ بالحسبان إشعاع الورقة لحساب كمية الماء الضروري تبخيره من الورقة خلال ساعة للمحافظة على درجة حرارة 35°C.

60. ينصهر نيزك من الحديد عند دخوله غلاف الأرض الجوي. إذا كانت درجة حرارته خارج الغلاف 125°C–، فاحسب السرعة الدنيا التي وصل إليها النيزك قبل دخوله الغلاف الجوي الأرضي مباشرةً.

61. تزداد درجة الحرارة داخل قشرة الأرض بمعدل 1.0°C لكل 30 m عمق . فإذا كان التوصيل الحراري للقشرة 0.80 W/°C·m. (أ) حدد الحرارة المنتقلة من داخل الأرض إلى سطحها الأرضي ككل خلال يوم واحد. (ب) قارن هذه الحرارة بمقدار الطاقة الساقطة على الأرض في يوم واحد بسبب الإشعاع القادم من الشمس.

62. خلال مباراة اعتيادية في لعبة السكواتش (الشكل 14 – 22)، يضرب لاعبان كرة مطاطية خفيفة باتجاه حائط، ويستمران كذلك إلى اللحظة التي يكاد يسقط فيها اللاعبان نتيجة الجفاف والإرهاق الشديد. افترض أن الكرة تصطدم في الحائط بسرعة 22 m/s، وترتد إلى الخلف بسرعة 12 m/s، وأن الطاقة الحركية المفقودة خلال العملية ستعمل على تسخين الكرة. احسب الارتفاع في درجة حرارة الكرة بعد أول تصادم؟ (الحرارة النوعية للمطاط 1200 J/kg·C° تقريباً).

الشكل **14** - **22** (مسألة 62).

63. ما النتيجة النهائية لمزج كتلتين متساويتين من الثلج عند 0°C وبخار الماء عند 100°C مع بعضهما بعضا؟

64. يستطيع شخصٌ ما أن يخسر حرارة في وسط بارد بوساطة التوصيل الحراري والإشعاع بمعدل يقترب من 200 W. قدر الفترة الزمنية الضرورية للجسم كي تهبط درجة حرارته من 36.6°C إلى 35.6°C عندما تقترب العمليات الأيضية من التوقف التام. افترض كتلة مقدارها 70 kg (انظر الجدول 14 – 1).

65. نفدت المياه الساخنة من سخّان ماء سعته 50-gal (185-L) بعد استخدامها في الاستحمام وغسل الصحون. وهذا يؤدي إلى الاقتراح القائل بأنّ المياه قد نفدت من الخزان لتعاد تعبئته عند درجة حرارة 10°C تقريباً. (أ) ما مقدار الطاقة الضرورية لإعادة تسخين الماء إلى 50°C؟ (ب) ما الفترة الزمينة اللازمة إذا كانت قدرة السخان الناتجة 9500 W؟

66. ستكون درجة حرارة سطح زجاج مصباح كهربائي مصنف عند 60-W نحو 65°C عندما تكون درجة حرارة الغرفة 18°C. قدر درجة حرارة مصباح كهربائي مصنف عند 150-W له حجم المصباح السابق نفسه. اعتبر فقط الإشعاع، وافترض أنّ 90% من الطاقة تشعُّ على شكل حرارة.

إجابات التمارين

أ: 0.21 kg.

ب: تحصر الستائر طبقة من الهواء بين الحائط الخارجي للغرفة والغرفة نفسها لتعمل عازلا ممتازا.