المحاضرة الرابعة
تحليل الأنظمة المغلقة بالقانون الأول للديناميكا الحرارية
مخرجات التعلم: اختيار كتلة ثابتة للتحليل؛ وحساب شغل الحدود؛ وتقدير تغير الطاقة الداخلية؛ وحل موازنة طاقة لنظام مغلق مع تفسير إشارات الحرارة والشغل.

المحاضرة 4، الفقرة 1
تحديد النظام المغلق ووصف العملية

نربط في هذه المحاضرة بين قانون حفظ الطاقة الذي دُرس سابقاً وخواص المادة عند حالتي البداية والنهاية. نختار كمية محددة من المادة ثم نتتبع ما يدخل إليها من طاقة وما يخرج منها أثناء عملية معينة. النظام المغلق لا تعبر الكتلة حدوده، ولكن قد تنتقل عبرها الحرارة أو الشغل؛ لذلك لا يعني وصف النظام بأنه مغلق أنه معزول حرارياً أو ثابت الحجم.

اختيار الكتلة والحدود: عند تسخين هواء محبوس في أسطوانة ذات مكبس نختار الهواء نفسه نظاماً، ويكون سطح المكبس جزءاً متحركاً من حدوده. أما في خزان محكم وصلب فتبقى الحدود الخارجية ثابتة. في الحالتين تبقى الكتلة ثابتة ما لم يوجد تسرب. يحدد الاختيار الصحيح أي انتقال للطاقة يظهر في الموازنة، وما الأجزاء التي تُحسب طاقتها المخزونة.

الحالتان الابتدائية والنهائية: نسجل الضغط المطلق ودرجة الحرارة والحجم أو ما يكفي لتحديد كل حالة. لا تكفي معرفة الحالتين لحساب الشغل؛ إذ نحتاج أيضاً إلى وصف مسار العملية، مثل ثبات الضغط أو ثبات الحجم. أما تغير الطاقة الداخلية فيُحدد من خواص الحالتين، بصرف النظر عن المسار الذي ربط بينهما.

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

نعتمد Q موجباً للحرارة الصافية الداخلة، وW موجباً للشغل الصافي الذي ينجزه النظام على محيطه. وكل تغير يساوي القيمة النهائية ناقص الابتدائية. لا تُحذف حدود الطاقة الحركية وطاقة الوضع بمجرد أن النظام مغلق؛ بل تُقدّر أهميتها بالنسبة إلى بقية الحدود.

$$\Delta KE = \frac{m({C_2}^2 - {C_1}^2)}{2} \quad ; \quad \Delta PE = mg(z_2 - z_1)$$

يرمز C هنا إلى سرعة الحركة الكلية، وz إلى ارتفاع مركز الكتلة. في جهاز مختبري ثابت تكون تغيراتهما غالباً مهملة، فتقتصر الطاقة المتغيرة على U. حركة الجزيئات العشوائية داخلة أصلاً في الطاقة الداخلية. وعند استخدام الكيلوغرام والمتر والثانية تعطي الحدود الميكانيكية الجول؛ فتُقسم على 1000 قبل جمعها مع طاقة بوحدة kJ.

صلة بالمكائن الزراعية: يمكن تقريب الهواء المحبوس خلال جزء من شوط الانضغاط في أسطوانة محرك زراعي بنظام مغلق عندما تكون الصمامات مغلقة ويُهمل التسرب. أما أثناء دخول الهواء أو خروج الغازات، أو عند تتبع الهواء المتدفق باستمرار في مجفف، فلا يكون اختيار الجهاز كله نظاماً مغلقاً مناسباً.

المحاضرة 4، الفقرة 2
شغل الحدود المتحركة

شغل الحدود هو الطاقة المنتقلة عندما يتحرك حدّ النظام تحت تأثير قوة. في الأسطوانة يدفع الغاز المكبس أثناء التمدد، بينما يبذل المحيط شغلاً على الغاز أثناء الانضغاط. لفهم العلاقة الرياضية نفترض عملية شبه اتزانية، يكون فيها ضغط الغاز معرفاً تقريباً عند كل لحظة، ومكبساً يتحرك مسافة صغيرة تحت تأثير القوة الناتجة عن هذا الضغط.

$$\delta W_{\mathrm{b}} = F\,ds = PA\,ds = P\,dV$$

تمثل A مساحة وجه المكبس، وds إزاحته الصغيرة، ولذلك يساوي تغير الحجم A ds. يظهر هذا الترتيب في الشكل 1. يُستخدم الضغط المطلق المؤثر عند الحد المتحرك؛ وفي التقريب شبه الاتزاني يساوي ضغط الغاز تقريباً. إذا كانت العملية سريعة وغير متزنة فلا يصح افتراض مسار لضغط الغاز الداخلي دون معلومات إضافية عن الضغط عند الحد.

$$W_{\mathrm{b}} = \int_1^2 P\,dV$$

معنى المساحة والإشارة: تمثل المساحة تحت المسار على مخطط الضغط–الحجم مقدار شغل الحدود، كما يوضح الشكل 2. يكون الشغل موجباً في التمدد لأن الحجم يزداد، وسالباً في الانضغاط لأن الحجم ينقص. على مخطط الضغط–الحجم النوعي تعطي المساحة الشغل لكل وحدة كتلة. وتختلف المساحة عندما يتغير المسار، حتى لو كانت حالتا البداية والنهاية متماثلتين.

الحجم الثابت: في وعاء صلب لا يتحرك الحد الخارجي، ولذلك ينعدم تغير الحجم وينعدم شغل الحدود. يظهر مسار العملية خطاً رأسياً على مخطط الضغط–الحجم. قد يرتفع الضغط ودرجة الحرارة مع التسخين، ومع ذلك يبقى شغل الحدود صفراً.

$$V = constant \quad \Longrightarrow \quad dV = 0 \quad \Longrightarrow \quad W_{\mathrm{b}} = 0$$

الضغط الثابت: عندما يتحرك مكبس عديم الاحتكاك تقريباً تحت حمل ثابت، يمكن تقريب ضغط الغاز بأنه ثابت أثناء العملية. يُخرج الضغط من التكامل، فتكون المساحة مستطيلاً ارتفاعه الضغط وعرضه تغير الحجم:

$$W_{\mathrm{b}} = P(V_2 - V_1)$$

إذا كان الغاز مثالياً وكانت كتلته ثابتة، فإن معادلة الحالة تربط فرق الحجم بفرق درجة الحرارة عند ثبات الضغط، فنحصل على صيغة مكافئة مفيدة للحساب:

$$PV = mRT \quad \Longrightarrow \quad W_{\mathrm{b}} = mR(T_2 - T_1)$$

تمييز ضروري: الشغل الكلي قد يجمع شغل الحدود وشغل عمود أو شغلاً كهربائياً. لذا فإن انعدام شغل الحدود في خزان صلب لا يعني انعدام جميع أشكال الشغل. كذلك لا يجوز حساب الشغل باستعمال الضغط النهائي مضروباً بفرق الحجم عندما يكون الضغط متغيراً؛ إذ يلزم تكامل المسار أو حساب مساحته.

$$1\ kPa \cdot m^3 = 1\ kJ \quad ; \quad 1\ kPa = 1000\ N/m^2$$

المحاضرة 4، الفقرة 3
الحرارة النوعية والسعة الحرارية

الحرارة النوعية خاصية تبين مقدار تغير الطاقة المصاحب لتغير درجة حرارة وحدة الكتلة وفق شرط محدد. وهي تساعد على مقارنة استجابة المواد للتسخين؛ فرفع حرارة كتلتين متساويتين من الماء ومعدن لا يتطلب المقدار نفسه من الطاقة. لكن قيمة الحرارة النوعية لا تعني وجود حرارة مخزونة داخل المادة؛ المخزون هو طاقة داخلية.

الحرارة النوعية عند ثبوت الحجم: يرمز لها بالرمز c_v، وتُعرَّف بمعدل تغير الطاقة الداخلية النوعية مع درجة الحرارة عند تثبيت الحجم النوعي. أما الحرارة النوعية عند ثبوت الضغط، ويرمز لها بالرمز c_p، فتُعرَّف بمعدل تغير الإنثالبي النوعي مع درجة الحرارة عند تثبيت الضغط:

$$c_v = (\frac{\partial u}{\partial T})_v \quad ; \quad c_p = (\frac{\partial h}{\partial T})_P$$

رمز المشتقة الجزئية يعني أننا ندرس تغير خاصية مع درجة الحرارة مع إبقاء الخاصية المشار إليها أسفل القوس ثابتة. التعريفان يخصان خواص المادة، وليس وصفاً إلزامياً لكل عملية نستخدم فيها هذه الخواص. يساوي حاصل ضرب الكتلة بالحرارة النوعية السعة الحرارية للكمية المعينة؛ وبذلك تكون الحرارة النوعية مكثفة، بينما تتناسب السعة الحرارية مع الكتلة.

$$C_V = mc_v \quad ; \quad C_P = mc_p$$

وحدة الحرارة النوعية هي kJ/(kg·K)، ووحدة السعة الحرارية kJ/K. استُخدم الحرف الكبير C في هاتين العلاقتين للسعة الحرارية، وليس لسرعة الحركة التي وردت في الفقرة السابقة؛ ويحدد السياق المعنى. مضاعفة الكتلة تضاعف السعة الحرارية، لكنها لا تغير الحرارة النوعية للمادة عند الحالة نفسها.

تفسير الفرق في الغاز المثالي: عند تسخين الغاز في وعاء ثابت الحجم، ومع انعدام أشكال الشغل الأخرى، تتحول الحرارة الداخلة إلى زيادة في الطاقة الداخلية. أما عند تسخينه تحت ضغط ثابت فإنه يتمدد وينجز شغلاً أيضاً؛ لذلك تكون الطاقة المطلوبة لرفع حرارة الكتلة نفسها بالمقدار نفسه أكبر في الحالة الثانية.

$$c_p - c_v = R$$

هذه العلاقة تخص الغاز المثالي، وتُستخدم القيم الثلاث على الأساس الكتلي نفسه وبالوحدات نفسها. بما أن ثابت الغاز موجب، فإن c_p أكبر من c_v. لا تُطبق هذه العلاقة على الماء السائل أو المعدن، ولا على غاز حقيقي دون تحقق من ملاءمة التقريب المثالي.

درجة الحرارة ووحداتها: فرق مقداره درجة مئوية واحدة يساوي فرقاً مقداره كلفن واحد، ولذلك يمكن استعمال فرق درجات الحرارة المئوية في حساب تغير الطاقة. أما درجة الحرارة التي تدخل معادلة الغاز المثالي فيجب أن تكون مطلقة بالكلفن.

$$\Delta T(K) = \Delta T(°C) \quad ; \quad T(K) = T(°C) + 273.15$$

قد تتغير الحرارة النوعية مع درجة الحرارة، فلا تُعامل قيمة مأخوذة عند درجة واحدة على أنها ثابتة في جميع الظروف. وعندما يكون المجال الحراري محدوداً يمكن استعمال قيمة ممثلة أو متوسطة مع التصريح بهذا التقريب؛ أما المجالات الواسعة فتحتاج إلى بيانات متغيرة مع الحرارة.

المحاضرة 4، الفقرة 4
حساب تغير خواص الغازات والسوائل والمواد الصلبة

الغاز المثالي: عند ثبات تركيب الغاز تعتمد طاقته الداخلية النوعية على درجة الحرارة فقط. وباستخدام تعريف الإنثالبي ومعادلة الحالة يتبين أن الإنثالبي النوعي يعتمد هو الآخر على درجة الحرارة فقط. لذلك لا نحتاج إلى مسار العملية لحساب تغير هاتين الخاصيتين.

$$u = u(T) \quad ; \quad h = u + Pv = u + RT = h(T)$$

$$\Delta u = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T)\, dT \quad ; \quad \Delta h = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T)\, dT$$

تُحسب هذه التكاملات من علاقة الحرارة النوعية بدرجة الحرارة، أو تُقرأ قيم الطاقة الداخلية والإنثالبي من جداول الغاز عند درجتي البداية والنهاية ثم تُطرح. في جداول الغاز المثالي تجمع قيم الخواص أثر تغير الحرارة النوعية؛ لذا فهي أنسب من قيمة ثابتة عند دراسة تغير حراري كبير.

تقريب الحرارة النوعية الثابتة: إذا مثّلت قيمة ثابتة المجال الحراري تمثيلاً مناسباً، نخرجها من التكامل. تُختار قيمة متوسطة، وغالباً تُقيَّم قرب متوسط درجتي الحرارة. ولتحويل التغير النوعي إلى تغير كلي نضرب بالكتلة الثابتة:

$$\Delta u \approx c_v\, \Delta T \quad ; \quad \Delta U \approx m c_v\, \Delta T$$

$$\Delta h \approx c_p\, \Delta T \quad ; \quad \Delta H \approx m c_p\, \Delta T$$

هاتان العلاقتان للغاز المثالي صالحتان لحساب تغير الخواص في عملية ثابتة الضغط أو الحجم أو غيرهما؛ فلا يفرض ظهور c_v أن الحجم ثابت، ولا يفرض ظهور c_p أن الضغط ثابت. الذي يتغير مع المسار هو الحرارة والشغل، أما تغير الخاصية بين الحالتين فيبقى نفسه. ولا يصح استبدال ΔU بالحرارة قبل كتابة موازنة الطاقة.

السوائل والمواد الصلبة: يمكن تقريب كثير منها بأنها غير قابلة للانضغاط، أي إن تغير الحجم النوعي صغير إلى حد يمكن إهماله في تحليل الطاقة. هذا تقريب للمادة ضمن ظروف محددة؛ ولا يعني أن التمدد الحراري معدوم تماماً في جميع التطبيقات. في النموذج المثالي غير القابل للانضغاط تتساوى الحرارتان النوعيتان، ويُستخدم الرمز c.

$$c_p = c_v = c \quad ; \quad \Delta U \approx mc(T_2 - T_1)$$

تُستخدم العلاقة للتسخين أو التبريد المحسوس ما دام الطور لا يتغير وكانت c ممثلة للمجال الحراري. لا يجوز استخدامها وحدها لوصف تبخر الماء أو انصهار مادة؛ ففي تغير الطور نحتاج إلى خواص الحالتين أو بيانات الطاقة الكامنة. وفي المنتجات الزراعية تتأثر الحرارة النوعية بالتركيب والرطوبة، فلا تُستبدل بها قيمة الماء النقي دون مسوغ.

الإنثالبي للمادة غير القابلة للانضغاط: يبقى أثر الضغط في تعريف الإنثالبي، حتى عندما يكون الحجم النوعي ثابتاً تقريباً. لذلك يكتب تغير الإنثالبي، مع تقريب الحرارة النوعية الثابتة، كما يأتي:

$$\Delta h = \Delta u + v\Delta P \approx c\Delta T + v\Delta P$$

إذا كان تغير الضغط مهملاً يصبح تغير الإنثالبي قريباً من تغير الطاقة الداخلية. وإذا تغير الضغط كثيراً فلا يُحذف حد الضغط تلقائياً. عند استعمال v بوحدة m^3/kg والضغط بوحدة kPa يكون حاصل ضربهما بوحدة kJ/kg.

المحاضرة 4، الفقرة 5
صياغة موازنة الطاقة وتفسير النتائج

يبدأ الحل باختيار النظام ثم حصر التفاعلات عبر حدوده. نكتب القانون العام قبل التعويض، ونحذف فقط الحدود التي تبررها المعطيات أو الافتراضات. عند إهمال تغيري الطاقة الحركية وطاقة الوضع تصبح الموازنة بين صافي الحرارة وصافي الشغل وتغير الطاقة الداخلية.

$$Q - W = \Delta U \quad ; \quad W = W_{\mathrm{b}} + W_{\mathrm{other}}$$

يمثل W_{other} مجموع أشكال الشغل الأخرى بإشارتها الجبرية. فإذا دخل شغل كهربائي أو شغل تحريك إلى النظام كانت مساهمته في الشغل الصافي الخارج سالبة. يمكن بدلاً من ذلك استعمال مقادير موجبة مع تحديد اتجاه كل انتقال صراحة، فتكتب الصيغة المكافئة:

$$Q_{\mathrm{in}} - Q_{\mathrm{out}} + W_{\mathrm{in}} - W_{\mathrm{out}} = \Delta U$$

وعاء صلب مغلق: شغل الحدود صفر. إذا لم يوجد أي شغل آخر، تساوي الحرارة الصافية تغير الطاقة الداخلية. أما إذا شُغّلت مقاومة كهربائية أو ريشة تحريك داخل النظام فلا يجوز حذف شغلها. وعندما تُضم المقاومة أو الوعاء إلى النظام يجب حساب تغير طاقتهما، أو التصريح بأن سعتهما الحرارية مهملة.

$$Q = \Delta U \quad (\mathrm{W} = 0)$$

تمدد أو انضغاط شبه اتزاني عند ضغط ثابت: نضع شغل الحدود في الموازنة ثم نجمعه مع تغير الطاقة الداخلية. وبما أن الضغط نفسه ينطبق على الحالتين، فإن حاصل الجمع يساوي تغير الإنثالبي:

$$\Delta U + W_{\mathrm{b}} = (U_2 - U_1) + P(V_2 - V_1) = \Delta H$$

$$Q - W_{\mathrm{other}} = \Delta H$$

عند انعدام الشغل الآخر فقط تصبح الحرارة مساوية لتغير الإنثالبي. وإذا كان المائع غازاً مثالياً ذا حرارة نوعية ثابتة نحسب الحرارة من حاصل ضرب الكتلة بالحرارة النوعية عند ثبوت الضغط وبفرق درجة الحرارة. لا نضيف شغل الحدود مرة ثانية بعد استعمال تغير الإنثالبي؛ فهو محسوب ضمن هذا التجميع.

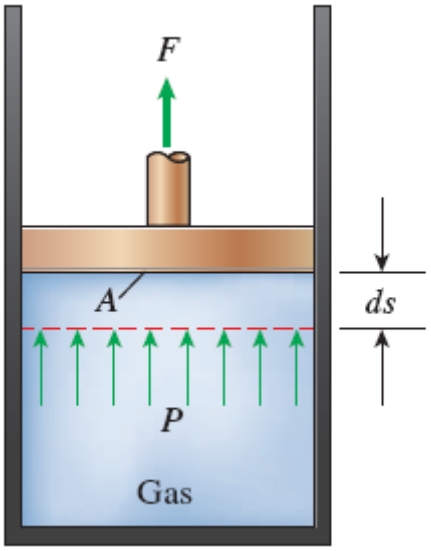
$$Q = \Delta H \approx m c_{\mathrm{p}} \Delta T \quad (\mathrm{P} = \text{constant};\ W_{\mathrm{other}} = 0)$$

خطوات الحل العملية: حدد المعطيات والمطلوب، ثم بيّن حدود النظام والافتراضات. احسب الخواص الناقصة بوحدات متسقة، وحدد مسار العملية لحساب شغل الحدود. رتب موازنة الطاقة للمجهول قبل إدخال الأرقام، ثم افحص الإشارة والوحدات وتوازن المدخلات مع المخرجات وتغير المخزون.

قراءة الإشارة: نتيجة موجبة للحرارة تعني أن النظام استقبل حرارة صافية، والسالبة تعني أنه فقدها. الشغل الموجب يدل على انتقال طاقة بالشغل إلى المحيط، والسالب يدل على بذل شغل على النظام. قد ترتفع حرارة نظام مع أنه يفقد حرارة إذا تجاوز الشغل الداخل مقدار هذا الفقد؛ المثال الإضافي يوضح ذلك.

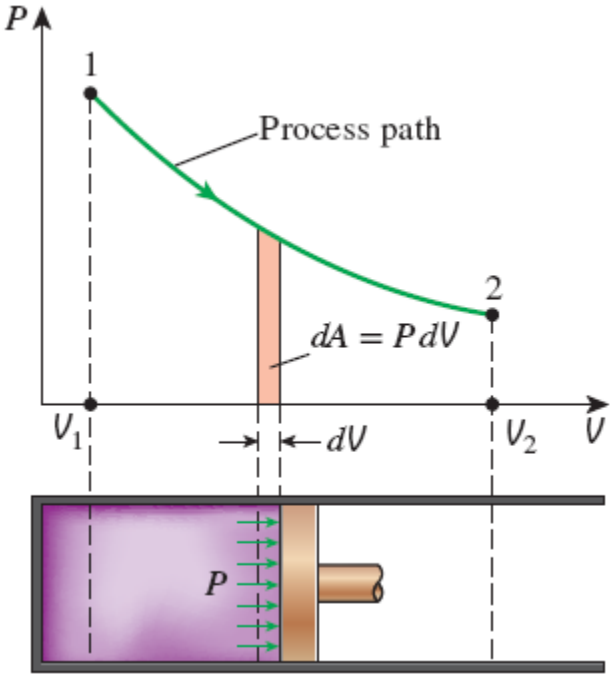
العملية الأديباتية: عند انعدام انتقال الحرارة تصبح زيادة الطاقة الداخلية مساوية لسالب الشغل الصافي الخارج. لذلك قد يسخن الغاز بالانضغاط دون تسخين حراري. وعلى دورة كاملة تعود الطاقة إلى قيمتها الابتدائية، فيساوي صافي الحرارة صافي الشغل؛ لكن ذلك لا ينطبق على كل شوط منفرد.

مواد مساندة للأشكال وتعليقاتها



الشكل 1. ينجز الغاز مقداراً تفاضلياً من الشغل δW_b عندما يدفع المكبس ليتحرك إزاحة تفاضلية مقدارها ds.

دليل القراءة: القوة المؤثرة عند وجه المكبس تساوي PA، والزيادة في الحجم تساوي A ds. اتبع اتجاه حركة المكبس لتحديد ما إذا كانت العملية تمدداً أم انضغاطاً.



الشكل 2. تمثل المساحة تحت منحنى العملية على مخطط الضغط–الحجم P–V شغل الحدود.

دليل القراءة: تكون المساحة صفراً عند ثبات الحجم، ومستطيلاً عند ثبات الضغط. تتحدد الإشارة باتجاه العملية، ويحتاج المسار المنحني إلى تكامل علاقة الضغط بالحجم. عند التمدد من الحالة الأولى إلى الثانية تزداد قيمة الحجم.

مثال زراعي محلول لتسخين هواء في أسطوانة ومكبس

تحتوي أسطوانة محكمة ذات مكبس حر الحركة على 0.50 kg من الهواء الجاف عند ضغط مطلق ثابت مقداره 200 kPa ودرجة حرارة 300 K. تُزوّد بالحرارة من مصدر خارجي حتى تبلغ درجة حرارة الهواء 400 K. احسب الحجمين الابتدائي والنهائي، وشغل الحدود، وتغير الطاقة الداخلية، والحرارة الصافية الداخلة.

المعطيات: الكتلة 0.50 kg؛ الضغط المطلق 200 kPa؛ درجة البداية 300 K؛ درجة النهاية 400 K. لا توجد مقاومة كهربائية أو ريشة تحريك داخل النظام.

النظام والافتراضات: الهواء المحبوس هو النظام، وكتلته ثابتة. يُعامل كغاز مثالي، والمكبس عديم الاحتكاك تقريباً، والعملية شبه اتزانية عند ضغط ثابت. تُهمل تغيرات الطاقة الحركية وطاقة الوضع. نستخدم القيم الآتية ثابتة على مجال الحساب لتوضيح الطريقة؛ وليست خواص دقيقة ثابتة لكل درجات الحرارة.

(جدول الخواص معطى)

الخاصية	القيمة	الوحدة
ثابت الغاز للهواء	0.287	kJ/(kg·K)
الحرارة النوعية عند ثبوت الحجم	0.718	kJ/(kg·K)
الحرارة النوعية عند ثبوت الضغط	1.005	kJ/(kg·K)

الخطوة الأولى تحديد القوانين النظرية

$$PV = mRT \quad \Longrightarrow \quad V = \frac{mRT}{P}$$

$$W_{\mathrm{b}} = \int_1^2 P\, dV = P(V_2 - V_1)$$

$$\Delta U = m(u_2 - u_1) \approx mc_{\mathrm{v}}(T_2 - T_1)$$

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad \Longrightarrow \quad Q = \Delta U + W_{\mathrm{b}}$$

حُذفت حدود الحركة والوضع وفق الافتراضات، وأصبح الشغل الكلي مساوياً لشغل الحدود لعدم وجود أشكال شغل أخرى. سنحسب كل حد بصورة مستقلة، ثم نتحقق من الحرارة باستخدام تغير الإنثالبي عند الضغط الثابت.

الخطوة الثانية توحيد الوحدات وحساب فرق الحرارة

$$R = 0.287\ kPa \cdot m^3/(kg \cdot K) \quad ; \quad \Delta T = 400 - 300 = 100\ K$$

الحرارتان معطاتان بالكلفن، والضغط مطلق؛ لذلك يمكن التعويض مباشرة في معادلة الغاز المثالي. تكافؤ kPa·m³ وkJ يجعل وحدات ثابت الغاز مناسبة لحساب الحجم والشغل معاً.

متابعة المثال الرئيس التعويض والتحقق

الخطوة الثالثة حساب الحجمين وشغل الحدود

$$V_1 = \frac{0.50 \times 0.287 \times 300}{200} = 0.21525\ m^3$$

$$V_2 = \frac{0.50 \times 0.287 \times 400}{200} = 0.28700\ m^3$$

$$\Delta V = 0.28700 - 0.21525 = 0.07175\ m^3$$

$$W_b = 200 \times 0.07175 = 14.35\ kJ$$

ازداد الحجم، ولذلك يكون الشغل موجباً: ينجز الهواء شغلاً على المكبس ومحيطه. وحدات العملية هي kPa مضروبة في m^3، فتنتج kJ. ويمكن التحقق من النتيجة دون حساب الحجمين باستعمال علاقة الضغط الثابت للغاز المثالي:

$$W_b = mR\Delta T = 0.50 \times 0.287 \times 100 = 14.35\ kJ$$

الخطوة الرابعة حساب تغير الطاقة الداخلية والحرارة

$$\Delta U \approx mc_v\Delta T = 0.50 \times 0.718 \times 100 = 35.90\ kJ$$

$$Q = \Delta U + W_b = 35.90 + 14.35 = 50.25\ kJ$$

تشير الإشارة الموجبة إلى أن الحرارة الصافية تنتقل إلى الهواء. جزء منها يزيد الطاقة الداخلية، والجزء الآخر ينتقل إلى المحيط على صورة شغل حدود. لا تساوي الحرارة زيادة الطاقة الداخلية وحدها لأن الهواء يتمدد أثناء التسخين.

الخطوة الخامسة التحقق بعلاقة الإنثالبي

$$Q = \Delta H \approx mc_p\Delta T = 0.50 \times 1.005 \times 100 = 50.25\ kJ$$

$$c_p - c_v = 1.005 - 0.718 = 0.287 = R$$

$$Q - W_b = 50.25 - 14.35 = 35.90\ kJ = \Delta U$$

أعطت الطريقتان النتيجة نفسها، كما تطابقت موازنة الطاقة. والنتائج النهائية تقريبية بسبب افتراض ثبات الحرارة النوعية، رغم كتابة خطوات الحساب بعدة منازل عشرية. تقريب النتائج مبكراً قد يولد فرقاً عددياً غير حقيقي بين طريقتي التحقق.

التفسير الزراعي: يبين النموذج كيف يمكن للغاز الساخن أن ينجز شغلاً على مكبس في منظومة ميكانيكية. ولا يجوز وصف نسبة شغل هذا التسخين المفرد إلى حرارته بأنها الكفاءة الحرارية لمحرك زراعي؛ فالكفاءة الحرارية تتطلب تحليل الدورة كاملة، بما فيها الحرارة المطروحة والأشواط الأخرى.

مثال إضافي خزان هواء ومقاومة كهربائية

يحتوي خزان صلب على 1.00 kg من الهواء عند 300 K. تمد مقاومة داخلية الخزان بشغل كهربائي مقداره 40.00 kJ حتى تبلغ حرارة الهواء 350 K، بينما يفقد الخزان حرارة إلى المحيط. احسب الحرارة الصافية Q ومقدار الحرارة المفقودة. استخدم $c_v = 0.718\ \text{kJ/(kg·K)}$ ثابتة.

النظام والافتراضات: النظام هو الهواء والمقاومة داخل الخزان. لا تعبره كتلة، والهواء غاز مثالي، والخزان ثابت، وتُهمل تغيرات الطاقة الحركية وطاقة الوضع والطاقة المخزونة في المقاومة وجدار الخزان. لذلك تُنسب زيادة الطاقة المخزونة إلى الهواء وحده.

الخطوة الأولى القوانين والإشارات قبل الحساب

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

$$W_b = 0 \quad ; \quad W = -W_{e,in}$$

$$Q + W_{e,in} = \Delta U \quad \Longrightarrow \quad Q = \Delta U - W_{e,in}$$

$$\Delta U \approx mc_v(T_2 - T_1)$$

الشغل الكهربائي داخل إلى النظام؛ لذا تكون مساهمته سالبة في رمز الشغل الصافي الخارج W. أما المقدار $W_{e,in}$ فيكتب موجباً عند وصفه بأنه مدخل. ثبات حجم الخزان يحذف شغل الحدود فقط، ولا يحذف الشغل الكهربائي.

الخطوة الثانية التعويض العددي

$$\Delta T = 350 - 300 = 50\ K$$

$$\Delta U = 1.00 \times 0.718 \times 50 = 35.90\ kJ$$

$$Q = 35.90 - 40.00 = -4.10\ kJ$$

$$Q_{out} = 4.10\ kJ$$

القيمة السالبة لـ Q تعني فقد حرارة. مقدار الحرارة المفقودة هو 4.10 kJ، ويكتب موجباً عند استعمال الرمز Q_{out}. لا يوجد تعارض بين فقد الحرارة وارتفاع درجة حرارة الهواء؛ فقد دخل شغل كهربائي يفوق مقدار الفقد.

الخطوة الثالثة التحقق من موازنة الطاقة

$$W_{e,in} - Q_{out} = 40.00 - 4.10 = 35.90\ kJ = \Delta U$$

لو أُهمل الشغل الكهربائي خطأً لتوصلنا إلى أن الحرارة دخلت الخزان، وهو استنتاج معاكس للمعطيات. توضح المسألة أن اتجاه تغير درجة الحرارة لا يكفي وحده لتحديد اتجاه انتقال الحرارة؛ بل يجب حصر جميع تفاعلات الطاقة.

للمراجعة: إذا عُزل الخزان حرارياً مع بقاء مقدار الشغل الكهربائي نفسه، فستكون زيادة درجة الحرارة أكبر. جرّب حساب درجة النهاية من الموازنة مع وضع Q = 0، ثم افحص سبب اختلافها عن الحالة السابقة.

مثال إضافي تسخين ماء لاستخدام زراعي

تُسخن دفعة مقدارها 20.0 kg من الماء من 20°C إلى 50°C داخل وعاء محكم ذي غطاء متحرك خفيف، مع بقاء الماء سائلاً وعدم حدوث تسرب. احسب زيادة الطاقة الداخلية والحرارة الواصلة إلى الماء إذا أُهمل شغل التمدد. تُعطى الحرارة النوعية ثابتة $c = 4.18\ \text{kJ/(kg·K)}$.

الافتراضات: نختار الماء وحده نظاماً مغلقاً. نقرب الماء بمادة غير قابلة للانضغاط وخواص موحدة، ونُهمل تغير طاقتي الحركة والوضع وشغل التمدد وأي شغل آخر. تأتي الطاقة بالتسخين من خارج حد الماء. لا يشمل المطلوب الطاقة اللازمة لتسخين الوعاء أو تعويض فواقد السخان.

الخطوة الأولى القوانين النظرية

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad \Longrightarrow \quad Q \approx \Delta U$$

$$\Delta U = m\Delta u \approx mc(T_2 - T_1)$$

$$\Delta T(K) = \Delta T(°C)$$

حُذف الشغل بوصفه تقريباً معلناً لأن تغير حجم الماء صغير، وليس لمجرد أن النظام مغلق. ويمكن استعمال فرق درجات الحرارة المئوية في هذه العلاقة؛ فهي تحسب تغير الطاقة المحسوسة، ولا تستخدم درجة الحرارة في معادلة الغاز المثالي.

الخطوة الثانية التعويض مع الوحدات

$$\Delta T = 50 - 20 = 30°C = 30\,K$$

$$\Delta U \approx (20.0\,kg)(4.18\,kJ/(kg \cdot K))(30\,K)$$

$$\Delta U \approx 2508\,kJ \quad ; \quad Q \approx +2508\,kJ$$

تلغى وحدتا الكيلوغرام والكلفن بين البسط والمقام، فتبقى وحدة الطاقة kJ. الإشارة الموجبة تعني أن الماء استقبل حرارة، وهو متسق مع ارتفاع درجة حرارته. ولا تعني النتيجة أن السخان يستهلك هذا المقدار بالضبط، لأن طاقته قد تتوزع أيضاً على الوعاء والمحيط.

الخطوة الثالثة فحص معقولية النتيجة

$$\Delta u = 4.18 \times 30 = 125.4\,kJ/kg$$

$$m\Delta u = 20.0 \times 125.4 = 2508\,kJ$$

تحتاج كل وحدة كتلة إلى الزيادة النوعية نفسها وفق نموذج المادة الثابت، وتزداد الطاقة الكلية بتناسب مباشر مع الكتلة. إذا بدأ الماء بالغليان فلا يستمر استعمال العلاقة وحدها؛ إذ يلزم احتساب تغير الطور ببيانات مناسبة.

أسئلة قصيرة: لماذا تُحسب ΔU للغاز المثالي باستخدام c_v حتى عند ثبات الضغط؟ متى يصح اعتبار Q مساوياً لتغير الإنثالبي؟ ولماذا لا يعني العزل الحراري ثبات درجة الحرارة؟ اربط كل إجابة بشرط واضح في موازنة الطاقة.