آخر تحديث: November 1, 2026

🗺️ خريطة طريق لأربع سنوات · السنة 2, الخريف · 🧱 الحاسبة المدمجة

عن هذه الدورة

يتضمن هذا المقرر المجاني 10 وحدات و6 مختبرات. هذه الأعداد الحقيقية وليست منهجًا أطول جرى اختصاره.

التحقق هو رقم أو نتيجة برمجية في صفحة مقرر يعيد سكربت حسابها قبل النشر. يجب أن يطابق الرقم المعروض الرقم المعاد حسابه.

هذا مخطط دورة مجانية للتعلّم الذاتي كتبته Saving Planets. وهو ليس مقررًا جامعيًا، ولا يمنح ساعات معتمدة، ولا تشارك فيه أي مؤسسة تعليمية.

يتبع نطاقه مقررًا فصليًا في الديناميكا الحرارية الهندسية للسنة الثالثة. وهو مبني على موضوعات وعمق MIT 16.050 Thermal Energy وأجزاء الديناميكا الحرارية من MIT Unified Engineering (وكلاهما مجاني على MIT OpenCourseWare)، وعلى مقررات مثل Purdue ME 200 وGeorgia Tech ME 3322، مستخدمًا فصول OpenStax University Physics Volume 2 المجانية عن الحرارة وقوانين الديناميكا الحرارية وبيانات خواص الموائع المجانية من NIST، ونضع روابطها حيث تفيد. لا يؤيد أي من هؤلاء المؤلفين أو الجامعات هذه الصفحة.

ما نضيفه: كل وحدة مرتبطة بعمل حقيقي مع مصدر عام موثق (كفاءة محطات الكهرباء، والمحطات النووية والشمسية المركزة، والمضخات الحرارية، والتوليد المشترك، والطاقة الحرارية الأرضية)، وكل رقم في الصفحة يعاد حسابه ببرنامج تحقق قبل نشره، ولكل مختبر محاكاة مجانية أو نسخة منزلية آمنة.

تابعها بالترتيب. في كل وحدة أهداف وأفكار أساسية ومعادلات وأمثلة خطوة بخطوة وتمارين بإجابات كاملة وأخطاء شائعة وبطاقات تعليمية واختبار قصير. يُحفظ تقدّمك في هذا المتصفح فقط.

كيف تساعد هذه الدورة في إنقاذ الكوكب

تأتي معظم الكهرباء المولدة من الوقود أو اليورانيوم أو ضوء الشمس المركز أو حرارة الأرض من دورة ديناميكية حرارية، ويعمل معظم التدفئة والتبريد بدورة أيضًا. ينص القانون الأول على أن الطاقة محفوظة، وينص الثاني على مقدار ما يمكن أن يصبح منها شغلًا مفيدًا. وبينهما يتحدد مقدار الوقود الذي يحرقه العالم.

الدورات الأفضل واستعادة الحرارة المهدرة والمضخات الحرارية من أسرع الطرق لخفض الانبعاثات. تنتهي كل وحدة بقسم قصير موثق المصادر. القيم التي لا تأتي من مصدر معلّمة على أنها قيم توضيحية.

للمعلمين

يمكنك تدريس هذا المقرر، أو أن يتابعه الطالب وحده. إنه مجاني. Saving Planets لا تمنح درجة ولا ساعات معتمدة.

- هذه الصفحة هي المقرر كاملًا: 10 وحدات و6 مختبرات (ENGR 320).

- خطّط لخمسة عشر أسبوعًا، نحو 6 إلى 9 ساعات في الأسبوع، بما في ذلك أسابيع المختبر.
- اتبع جدول الخمسة عشر أسبوعًا. اقرأ الوحدة، حلّ التمارين على الورق، ثم افتح الإجابة. في أسبوع المختبر، نفّذ المختبر أو نسخته المنزلية.
- التحقق هو رقم أو نتيجة برمجية في الصفحة يعيد سكربت حسابها قبل النشر. يجب أن يطابق الرقم الظاهر الرقم المعاد حسابه.
- استخدم طباعة هذه الصفحة، أو نزّل دليل الدراسة PDF. ورقة القوانين قرب النهاية.
- اسأل: كيف تساعد هذه الوحدة الناس والكوكب؟ في كل وحدة مربع أخضر فيه حقيقة مع مصدرها.
- انسخ نموذج دليل المعلم واكتب اسم صفك والوقت المتاح والأسئلة التي ستطرحها. افتح نموذج دليل المعلم

قبل أن تبدأ

المتطلبات السابقة

- التفاضل والتكامل II وIII: التكاملات والمشتقات الجزئية واللوغاريتمات الطبيعية.
- الفيزياء I والكيمياء العامة I: الطاقة والشغل والغازات المثالية والحرارة.
- المعادلات التفاضلية مفيدة لكنها ليست مطلوبة.
- الارتياح لاستخدام جداول البيانات للجداول والاستيفاء.

كيف تذاكر

- ابدأ كل مسألة برسم النظام أو حجم التحكم وبيان ما إذا كان مغلقًا أم مفتوحًا، مستقرًا أم لا.
- اسرد الحالات المعروفة وابحث عن الخواص قبل كتابة أي موازنة.
- اكتب موازنة الطاقة بالكلمات أولًا (الطاقة الداخلة − الطاقة الخارجة = التغير في الطاقة المخزنة)، ثم احذف الحدود التي يمكنك تبرير حذفها.
- حافظ على اتساق الوحدات: kJ وkPa وm³ وkg والكلفن؛ ولا تستخدم °C أبدًا داخل نسبة بين درجتي حرارة.
- ارسم كل عملية على مخطط T–s أو p–v؛ فتصبح الدورات أسهل كثيرًا في التتبع.
- حل كل تمرين على الورق قبل فتح الإجابة، وأعد الاختبارات القصيرة بعد بضعة أيام.

ماذا تحتاج

- حاسوب أو جهاز لوحي لمحاكاة PhET المجانية Gas Properties وEnergy Forms and Changes وStates of Matter.
- ميزان حرارة للمطبخ (أو مسبار رقمي رخيص)، وكوب قياس، وميزان مطبخ.
- غلاية كهربائية معروفة القدرة، ومكعبات ثلج، وكوب معزول أو كوب من الفوم.
- ساعة إيقاف في الهاتف.
- برنامج جداول بيانات لمختبرات الدورات.

جدول مقترح من 15 أسبوعًا

نحو 6 إلى 9 ساعات أسبوعيًا: قراءة وتمارين، وفي أسابيع المختبر، المختبر.

الأسبوع	الوحدة	الموضوعات	القراءة
1	الأنظمة والخواص والطاقة والكفاءة	الأنظمة، الخواص، درجة الحرارة، وحدات الطاقة، معدل الحرارة	OpenStax UP2 1.1, 3.1; EIA

الأسبوع	الوحدة	الموضوعات	القراءة
2	المواد النقية وتغير الطور وجداول الخواص	الأطوار، التشبع، جودة البخار؛ المختبر A	UP2 1.5, 2.1; NIST WebBook
3	المواد النقية وتغير الطور وجداول الخواص	جداول البخار، الاستيفاء، الغاز المثالي	NIST WebBook
4	انتقال الطاقة بالشغل والحرارة	شغل الحدود وشغل العمود والشغل الكهربائي؛ أنماط انتقال الحرارة؛ المختبر D	UP2 3.2, 1.6
5	القانون الأول للأنظمة المغلقة	القانون الأول للأنظمة المغلقة، الحرارات النوعية، الحرارة الكامنة؛ المختبران B وC	UP2 3.3, 3.5
6	القانون الأول لأحجام التحكم: أجهزة التدفق المستقر	الكتلة والطاقة لأحجام التحكم؛ الفوهات والتوربينات والضواغط	MIT 16.050
7	القانون الأول لأحجام التحكم: أجهزة التدفق المستقر	صمامات الخنق، الخلط، المبادلات الحرارية؛ تدريب لامتحان منتصف الفصل	MIT 16.050
8	القانون الثاني: المحركات الحرارية والثلاجات وحدود كارنو	القانون الثاني، المحركات، المضخات الحرارية، كارنو؛ المختبر E	UP2 4.2–4.5
9	الإنتروبيا والكفاءة الأيزنتروبية	الإنتروبيا، متباينة كلاوزيوس، توليد الإنتروبيا	UP2 4.6–4.7
10	الإنتروبيا والكفاءة الأيزنتروبية	العمليات والكفاءات الأيزنتروبية	UP2 3.6; NASA Glenn
11	الإكسيرجي: كم من الطاقة مفيد	الإكسيرجي، اللاانعكاسية، كفاءة القانون الثاني	MIT 16.050
12	دورات القدرة الغازية: أوتو وديزل وبرايتون	دورتا أوتو وديزل	NASA Glenn
13	دورات القدرة الغازية: أوتو وديزل وبرايتون	دورة برايتون، الاسترجاع، الدورات المركبة	NASA Glenn; MIT Unified
14	دورات القدرة البخارية ودورات التبريد	دورة رانكن وتحسيناتها	NIST WebBook
15	دورات القدرة البخارية ودورات التبريد	التبريد والمضخات الحرارية؛ المختبر F؛ تدريب للامتحان النهائي	UP2 4.3

تقدّمك

ضع علامة على الوحدات والمختبرات عند إنهائها، وخص الاختبارات. يُحفظ التقدم ونتائج الاختبارات في هذا المتصفح فقط، ولا تُرسل إلينا أبدًا.

الوحدات

الأنظمة والخواص والطاقة والكفاءة

الأنظمة المغلقة، وأحجام التحكم والمحيط، والخواص والحالات، وعمليات الاتزان وشبه الاتزان، ومقاييس درجة الحرارة والقانون الصفري، والضغط، وأشكال الطاقة، ووحدات الطاقة، والكفاءة بوصفها الناتج المفيد مقسومًا على المدخل المطلوب.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- اختيار نظام أو حجم تحكم وحدوده.
- التمييز بين الخواص المكثفة والممتدة، وبين دوال الحالة ودوال المسار.
- التحويل بين kJ وkWh وBtu، وبين °C وK.
- حساب الكفاءة، وكفاءة محطة كهرباء من معدل الحرارة الخاص بها.

المفاهيم الأساسية

- النظام هو المنطقة التي ندرسها؛ يتبادل النظام المغلق الطاقة دون الكتلة مع محيطه، بينما يسمح حجم التحكم (النظام المفتوح) للكتلة بعبور حدوده.
- تصف الخواص مثل الضغط p ودرجة الحرارة T والحجم النوعي v = V/m الحالة. لا تعتمد الخواص المكثفة (p, T, v) على الحجم، بينما تعتمد عليه الخواص الممتدة (V, m, E). وتحدد خاصيتان مكثفتان مستقلتان حالة المادة البسيطة القابلة للانضغاط.
- القانون الصفري: الجسمان اللذان يكون كل منهما في اتزان حراري مع جسم ثالث يكونان في اتزان مع بعضهما؛ ولهذا تعمل موازين الحرارة. يجب استخدام درجة الحرارة المطلقة T(K) = T(°C) + 273.15 في كل نسبة وفي كل قانون للغازات.
- تُخزن الطاقة على شكل طاقة داخلية U وطاقة حركية ½mV² وطاقة وضع mgz، ولا تعبر الحدود إلا على شكل حرارة Q أو شغل W.
- الكفاءة = الناتج المفيد ÷ المدخل المطلوب. بالنسبة لمحطات الكهرباء، تستخدم إدارة EIA الأمريكية معدل الحرارة: Btu من الوقود لكل kWh من الكهرباء، حيث 1 kWh = 3412 Btu.

المعادلات الأساسية

$$v = \frac{V}{m}, \quad \rho = \frac{1}{v}$$

v=V/m,\ \ ρ=1v

الحجم النوعي والكثافة

$$T(\mathrm{K}) = T(^\circ\mathrm{C}) + 273.15$$

T(K)=T(^ C)+273.15

درجة الحرارة المطلقة

$$E = U + \tfrac{1}{2}mV^2 + mgz$$

E=U+12mV^2+mgz

الطاقة المخزنة الكلية

$$\eta = \frac{3412\ \text{Btu/kWh}}{\text{heat rate}}$$

```
=3412\ Btu/kWhheat rate
```

كفاءة محطة الكهرباء من معدل الحرارة (EIA)

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 1.1 تعطي EIA معدلي حرارة قدرهما 10500 Btu/kWh و7500 Btu/kWh مثالين. أوجد كل كفاءة.

1. η = 3412/10,500.
2. η = 3412/7500.

الإجابة: 32.5% و45.5% (تقرّبهما EIA إلى 33% و45%).

مثال 1.2 يحتوي خزان على 2 kg من الغاز في 0.5 m³. أوجد v وρ.

1. v = 0.5/2.
2. ρ = 1/v.

الإجابة: v = 0.25 m³/kg, ρ = 4 kg/m³.

مثال 1.3 سيارة كتلتها 1000 kg تسير بسرعة 30 m/s تكبح حتى تتوقف. ما مقدار الطاقة الحركية الذي يتحول إلى طاقة داخلية في المكابح، بوحدتي kJ وkWh؟

1. KE = ½ × 1000 × 30² = 450,000 J.
2. 450 kJ ÷ 3600 kJ/kWh.

الإجابة: 450 kJ = 0.125 kWh.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. حوّل 25 °C إلى الكلفن.

   298.15 K.

2. هل درجة الحرارة خاصية مكثفة أم ممتدة؟

   مكثفة.

3. لمحطة معدل حرارة قدره 9000 Btu/kWh. أوجد كفاءتها.

3412/9000 = 37.9%.

4. حوّل 1 MWh إلى GJ.

3600 MJ = 3.6 GJ.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الحرارة ودرجة الحرارة شيء واحد.
في الحقيقة: درجة الحرارة خاصية؛ أما الحرارة فهي طاقة في حالة انتقال.

خرافة: النظام «يحتوي على حرارة».
في الحقيقة: يحتوي على طاقة داخلية؛ الحرارة لا توجد إلا أثناء عبور الحدود.

خرافة: يمكن استخدام °C في النسب.
في الحقيقة: قوانين الغازات والكفاءات تتطلب الكلفن.

بطاقات تعليمية

النظام

المنطقة قيد الدراسة.

حجم التحكم

يمكن للكتلة عبوره.

الحجم النوعي

v = V/m.

القانون الصفري

أساس موازين الحرارة.

معدل الحرارة

Btu لكل kWh.

1 kWh

3600 kJ = 3412 Btu.

اختبار ذاتي

1. يسمح حجم التحكم...

بعبور الكتلة لحدوده

بعدم انتقال أي طاقة

بالحرارة فقط

لا شيء

بعبور الكتلة لحدوده. نظام مفتوح.

2. أيها خاصية مكثفة؟

الحجم

الكتلة

الضغط

الطاقة

الضغط. لا تعتمد على الحجم.

3. معدل حرارة قدره 6824 Btu/kWh يعني كفاءة قدرها...

25%

50%

68%

100%

.50%. 3412/6824

4. تعبر الطاقة حدود النظام المغلق على شكل...

الكتلة

حرارة وشغل

درجة الحرارة

الضغط

حرارة وشغل. طريقتان فقط.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تقيس إدارة معلومات الطاقة الأمريكية (EIA) كفاءة محطات الكهرباء بمعدل الحرارة: طاقة الوقود التي تستهلكها المحطة لتوصيل كيلوواط ساعة واحد إلى الشبكة، مع احتساب الكهرباء التي تستهلكها المحطة نفسها في تغذية الوقود ومضخات المرجل والتبريد ومكافحة التلوث. وبقسمة 3412 Btu (الطاقة في kWh واحد) على معدل الحرارة نحصل على الكفاءة؛ وأمثلة EIA هي محطة بمعدل 10500 Btu بكفاءة نحو 33% ومحطة بمعدل 7500 Btu بكفاءة نحو 45%.

هذا الفرق هو جوهر هذا المقرر كله. لإنتاج الكهرباء نفسها، تحرق المحطة ذات 7500 Btu ما نسبته 7500/10500 = 71.4% من الوقود، أي أقل بنحو 28.6% من الوقود وCO_2. وتفسر قوانين الديناميكا الحرارية أين تذهب بقية الطاقة وكيف يستعيد المهندسون جزءًا منها.

على Saving Planets: الحلول · الدوائر الكهربائية

المصادر: U.S. EIA: What is the efficiency of different types of power plants? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=107&t=3)

مصادر تعلّم مجانية

- OpenStax UP2, 1.1 Temperature and thermal equilibrium (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-1-temperature-and-thermal-equilibrium): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- OpenStax UP2, 3.1 Thermodynamic systems (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-1-thermodynamic-systems): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): ملاحظات MIT عن الطاقة الحرارية.
- NASA Glenn: First law of thermodynamics (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/thermo1.html): صفحة مجانية من NASA.

أنهيت هذه الوحدة

المواد النقية وتغير الطور وجداول الخواص

الأطوار وتغير الطور، ودرجة حرارة التشبع وضغطه، والسائل المضغوط والخليط المشبع والبخار المحمص، وجودة البخار، ومخططا T–v وp–v، وجداول البخار والاستيفاء، ومعادلة الغاز المثالي ومتى تنطبق، ومعامل الانضغاطية.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- تحديد الطور من p وT باستخدام بيانات التشبع.
- استخدام جودة البخار لإيجاد v وu وh لخليط مشبع.
- الاستيفاء في جداول الخواص.
- استخدام قانون الغاز المثالي ومعرفة متى يفشل.

المفاهيم الأساسية

- للمادة النقية تركيب كيميائي ثابت. عند ضغط معين يغلي الماء عند درجة حرارة تشبع واحدة (99.61 °C عند 100 kPa)؛ وأثناء الغليان يبقى p وT ثابتين وتزداد جودة الخليط x = m_vapor/m_total من 0 إلى 1.
- لخليط مشبع، أي خاصية نوعية هي y = y_f + x(y_g − y_f) = y_f + x·y_fg، باستخدام قيم السائل المشبع (f) والبخار المشبع (g) من الجداول.
- إذا كانت T أقل من درجة حرارة التشبع عند ذلك الضغط فالماء سائل مضغوط (تقريبًا سائل مشبع عند T)؛ وإذا كانت أعلى فهو بخار محمص، وتوجد قيمه في جداول منفصلة.
- الاستيفاء الخطي: $y = y_1 + (x - x_1)(y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)$. ويعطي WebBook المجاني من NIST البيانات نفسها للماء ولكثير من مواد التبريد.
- عند ضغط منخفض ودرجة حرارة مرتفعة مقارنة بالنقطة الحرجة، تخضع الغازات للعلاقة pv = RT حيث R = R_u/M؛ وللهواء R = 0.287 kJ/(kg·K). وقرب التشبع (البخار في مرجل) استخدم الجداول بدلًا من ذلك.

المعادلات الأساسية

$$x = \frac{m_g}{m_f + m_g}$$

```
x=(m_g)/(m_f+m_g)
```

جودة البخار

$$y = y_f + x\, y_{fg}$$

```
y=y_f+x y_fg
```

خاصية الخليط المشبع

$$pv = RT, \quad R = \frac{R_u}{M}$$

$$pv=RT,\ \ R=(R_u)/(M)$$

قانون الغاز المثالي

$$y = y_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}(y_2 - y_1)$$

$$y=y_1+(x-x_1)/(x_2-x_1)(y_2-y_1)$$

الاستيفاء الخطي

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 2.1 عند 100 kPa، h_f = 417.51 وh_fg = 2257.5 kJ/kg، وv_f = 0.001043 وv_g = 1.6941 m³/kg (جداول البخار). أوجد h وv عند جودة 0.6.

1. h = 417.51 + 0.6 × 2257.5.
2. v = 0.001043 + 0.6 × (1.6941 − 0.001043).

الإجابة: h = 1772.0 kJ/kg; v = 1.0169 m³/kg.

مثال 2.2 أوجد كتلة الهواء في خزان حجمه 0.5 m³ عند 100 kPa و300 K.

1. m = pV/(RT) = 100 × 0.5/(0.287 × 300).

الإجابة: m = 0.581 kg.

مثال 2.3 أوجد ضغط 2 kg من الهواء في 0.5 m³ عند 400 K.

1. p = mRT/V = 2 × 0.287 × 400/0.5.

الإجابة: p = 459.2 kPa.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. الماء عند 100 kPa و80 °C هو…

   سائل مضغوط (80 °C < 99.61 °C).

2. الماء عند 100 kPa و150 °C هو…

بخار محمص.

3. استوفِ h عند 25 °C إذا كانت h = 83.9 عند 20 °C و125.7 عند 30 °C (kJ/kg، سائل مشبع).

   83.9 + 0.5 × 41.8 = 104.8 kJ/kg.

4. أوجد R للهيليوم (M = 4.003 kg/kmol).

   8.314/4.003 = 2.077 kJ/(kg·K).

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: ترتفع درجة الحرارة أثناء غليان الماء.
في الحقيقة: عند ضغط ثابت تبقى عند T_sat حتى يتبخر السائل كله.

خرافة: البخار في المرجل غاز مثالي.
في الحقيقة: قرب التشبع ليس كذلك؛ استخدم جداول البخار.

خرافة: تنطبق جودة البخار على البخار المحمص.
في الحقيقة: تنطبق على الخلائط المشبعة فقط، 0 ≤ x ≤ 1.

بطاقات تعليمية

التشبع

يتعايش السائل والبخار عند T_sat(p).

جودة البخار

x = m_g/m.

خاصية الخليط

y_f + x y_fg.

سائل مضغوط

T < T_sat.

محمص

T > T_sat.

الغاز المثالي

pv = RT.

اختبار ذاتي

1. جودة البخار هي...

كتلة البخار مقسومة على الكتلة الكلية

كتلة السائل مقسومة على الكلية

نسبة درجات حرارة

نسبة ضغوط

كتلة البخار مقسومة على الكتلة الكلية. x = m_g/m.

2. الماء عند 100 kPa و120 °C هو...

سائل مضغوط

خليط مشبع

بخار محمص

صلب

بخار محمص. أعلى من T_sat.

3. قيمة R للهواء تقارب...

8.314

0.287

1.005

4.18

0.287. kJ/(kg·K).

4. أثناء الغليان عند p ثابت، فإن T...

ترتفع

تنخفض

تبقى ثابتة

تتذبذب

تبقى ثابتة. التشبع.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

توضح وزارة الطاقة الأمريكية أن المفاعلات النووية تستخدم حرارة الانشطار لإنتاج بخار يدير توربينًا. جميع المفاعلات التجارية الأمريكية مفاعلات ماء خفيف: أكثر من 65% منها مفاعلات ماء مضغوط، تبقي ماء القلب تحت ضغط عالٍ كي لا يغلي وتنتج البخار في مبادل حراري منفصل، ونحو الثلث مفاعلات ماء مغلي تنتج البخار مباشرة في وعاء المفاعل.

كلا التصميمين تمرين على هذه الوحدة: رفع الضغط يرفع درجة حرارة التشبع فيبقى الماء سائلًا، وجودة البخار وإنثالبيته تحددان مقدار الشغل الذي يحصل عليه التوربين. وتحصي وزارة الطاقة أكثر من 400 مفاعل تجاري في العالم، منها 94 في الولايات المتحدة، وكلها مبنية على جداول البخار.

على Saving Planets: الحلول · الكيمياء العامة I

المصادر: U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work) · NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/)

مصادر تعلّم مجانية

- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): جداول بخار مجانية.
- OpenStax UP2, 1.5 Phase changes (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-5-phase-changes): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- OpenStax UP2, 2.1 Molecular model of an ideal gas (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/2-1-molecular-model-of-an-ideal-gas): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- PhET: States of Matter (https://phet.colorado.edu/en/simulations/states-of-matter): تغير الطور بشكل تفاعلي.

أنهيت هذه الوحدة

انتقال الطاقة بالشغل والحرارة

اصطلاحات الإشارة، وشغل الحدود ومساحته على مخطط p–V، والعمليات عند ضغط ثابت والعمليات متساوية الحرارة والبوليتروبية، وشغل العمود والشغل الكهربائي، والأنماط الثلاثة لانتقال الحرارة: التوصيل والحمل والإشعاع.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حساب شغل الحدود للعمليات الشائعة.
- إثبات أن الشغل والحرارة دالتا مسار.
- حساب شغل العمود والشغل الكهربائي والقدرة.
- تقدير معدلات انتقال الحرارة بالتوصيل والحمل.

المفاهيم الأساسية

- اصطلاح الإشارة: الحرارة الداخلة إلى النظام والشغل الذي يبذله النظام موجبان (Q_in, W_out). وكلاهما دالة مسار: يعتمدان على العملية لا على الحالتين الطرفيتين فقط.
- شغل الحدود W_b = ∫p dV هو المساحة تحت منحنى العملية على مخطط p–V. وعند ضغط ثابت W_b = p(V₂ − V₁).
- لغاز مثالي عند درجة حرارة ثابتة W_b = mRT ln(V₂/V₁). ولعملية بوليتروبية pVⁿ = ثابت (n ≠ 1)، W_b = (p₂V₂ − p₁V₁)/(1 − n).
- شغل العمود: القدرة = العزم × السرعة الزاوية، Ẇ = 2πṅT. الشغل الكهربائي: W = VIΔt = PΔt.
- تنتقل الحرارة بالتوصيل Q̇ = kAΔT/L (عبر جدار)، والحمل Q̇ = hAΔT (إلى مائع متحرك)، والإشعاع Q̇ = εσA(T_s⁴ − T_surr⁴). يقلل العزل قيمة k؛ ولهذا تهم أغلفة المباني.

المعادلات الأساسية

$$W_b = \int_1^2 p\,dV$$

```
W_b=_1^2 p dV
```

شغل الحدود

$$W_b = mRT\ln\frac{V_2}{V_1}$$

```
W_b=mRT(V_2)/(V_1)
```

غاز مثالي متساوي الحرارة

$$W_b = \frac{p_2V_2 - p_1V_1}{1-n}$$

```
W_b=(p_2V_2-p_1V_1)/(1-n)
```

عملية بوليتروبية

$$\dot{Q} = \frac{kA\,\Delta T}{L}, \quad \dot{Q} = hA\,\Delta T$$

Q=(kA Δ T)/(L),\ \ Q=hA Δ T

التوصيل والحمل

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 3.1 يتمدد 1 kg من الهواء تمددًا متساوي الحرارة عند 300 K حتى يتضاعف حجمه. أوجد الشغل.

1. $W = 1 \times 0.287 \times 300 \times \ln 2$.

الإجابة: $W = 59.7$ kJ (يبذله الغاز).

مثال 3.2 يُضغط الهواء ضغطًا بوليتروبيًا ($n = 1.3$) من 100 kPa و0.2 m³ إلى 0.1 m³. أوجد p_2 والشغل.

1. $p_2 = 100 \times 2^{1.3} = 246.2$ kPa.
2. $W = (246.2 \times 0.1 - 100 \times 0.2)/(1 - 1.3)$.

الإجابة: $p_2 = 246.2$ kPa؛ $W = -15.4$ kJ (شغل مبذول على الغاز).

مثال 3.3 جدار مساحته 10 m² وسمكه 0.1 m و$k = 0.04$ W/(m·K) (عازل توضيحي) والفرق عبره 20 K. أوجد الفقد الحراري.

1. $\dot{Q} = 0.04 \times 10 \times 20/0.1$.

الإجابة: $\dot{Q} = 80$ W.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. يتمدد غاز عند ضغط ثابت قدره 200 kPa من 0.5 إلى 0.8 m³. ما الشغل؟

   $200 \times 0.3 = 60$ kJ.

2. يعطي عمود 50 N·m عند 3000 rpm. ما القدرة؟

   $2\pi \times 50 \times 50 = 15.7$ kW.

3. يعمل سخان قدرته 1500 W مدة 10 دقائق. ما الشغل الكهربائي؟

   $1500 \times 600 = 900$ kJ.

4. الحمل: $h = 10\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}$، $A = 2\ \mathrm{m^2}$، $\Delta T = 30\ \mathrm{K}$. ما معدل الحرارة؟

600 W.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الشغل خاصية من خواص الحالة.
في الحقيقة: يعتمد على المسار.

خرافة: يمكن لخزان صلب أن يبذل شغل حدود.
في الحقيقة: No; $dV = 0$.

خرافة: مضاعفة سمك العزل تنصّف درجة الحرارة.
في الحقيقة: تنصّف معدل انتقال الحرارة بالتوصيل عند ΔT نفسه.

بطاقات تعليمية

اصطلاح الإشارة

Q الداخلة وW الخارج موجبان.

شغل الحدود

$\int p\,dV$.

متساوي الحرارة

$mRT\ \ln(V_2/V_1)$.

بوليتروبي

$(p_2V_2 - p_1V_1)/(1 - n)$.

قدرة العمود

$2\pi\dot{n}T$.

التوصيل

$kA\Delta T/L$.

اختبار ذاتي

1. شغل الحدود يساوي...

$\int V\,dp$

$\int p\,dV$

pV

mRT

∫p dV. المساحة تحت منحنى p–V.

2. شغل الغاز المثالي متساوي الحرارة هو...

mRT ln(V₂/V₁)

p ΔV

mc_vΔT

0

pV = mRT ln(V₂/V₁). ثابت.

3. الحرارة والشغل...

خواص

دالتا مسار

متساويان دائمًا

مكثفان

دالتا مسار. يعتمدان على العملية.

4. معدل انتقال الحرارة بالتوصيل يتناسب مع...

1/k

L

ΔT/L

T⁴

.ΔT/L. kAΔT/L

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

توضح وزارة الطاقة الأمريكية أن الطاقة الشمسية الحرارية المركزة تستخدم المرايا لتركيز ضوء الشمس على مستقبِل، فتسخن مائعًا عالي الحرارة. تدير تلك الحرارة توربينًا أو تشغّل محركًا لتوليد الكهرباء، ويمكنها أيضًا خدمة الصناعة، من تحلية المياه إلى تصنيع الأغذية والإنتاج الكيميائي.

وتشير الوزارة إلى أن المحطات الكبيرة تستخدم أبراجًا شمسية أو صفوفًا من المرايا الخطية، بينما تنتج أنظمة الطبق/المحرك المفردة من 5 إلى 25 كيلوواط لكل منها. وكل واحد منها مسألة انتقال حرارة وشغل: امتصاص الإشعاع المركز، والحد من فواقد التوصيل والحمل من المستقبِل، وتحويل الحرارة إلى شغل عمود.

على Saving Planets: الحلول · الفيزياء 2

المصادر: U.S. DOE: Concentrating solar-thermal power basics (https://www.energy.gov/eere/solar/concentrating-solar-thermal-power-basics)

مصادر تعلّم مجانية

- OpenStax UP2, 3.2 Work, heat and internal energy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-2-work-heat-and-internal-energy): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- OpenStax UP2, 1.6 Mechanisms of heat transfer (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-6-mechanisms-of-heat-transfer): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): محاضرات عن الشغل والحرارة.
- PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes): انتقال الطاقة بشكل تفاعلي.

شاهد المحاضرة

Lecture 2: Work, heat, first law (https://ocw.mit.edu/courses/5-60-thermodynamics-kinetics-spring-2008/resources/lecture-2-work-heat-first-law/) (باللغة الإنجليزية)

MIT 5.60 Thermodynamics & Kinetics (Spring 2008), MIT OpenCourseWare. الترخيص: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · شروط الاستخدام (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). الرابط للدراسة المجانية فقط؛ Saving Planets غير تابع لهذه الجامعة ولا يحظى بتأييدها.

أنهيت هذه الوحدة

القانون الأول للأنظمة المغلقة

موازنة الطاقة للأنظمة المغلقة، والطاقة الداخلية والإنثالبي، والحرارات النوعية للغازات المثالية والسوائل والمواد الصلبة، والتسخين عند حجم ثابت وعند ضغط ثابت، والحرارة الكامنة، وموازنات الطاقة للدورات.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- كتابة العلاقة Q − W = ΔU + ΔKE + ΔPE وتطبيقها.
- استخدام c_v وc_p للغازات المثالية، وc للسوائل والمواد الصلبة.
- إدراج الحرارة الكامنة في مسائل تغير الطور.
- إثبات أن صافي الحرارة في الدورة يساوي صافي الشغل.

المفاهيم الأساسية

- القانون الأول لنظام مغلق: Q − W = ΔE = ΔU + ΔKE + ΔPE. وعادةً ما يكون ΔKE وΔPE مهملين، فيصبح Q − W = ΔU.
- الإنثالبي h = u + pv. عند ضغط ثابت تساوي الحرارة المضافة التغير في الإنثالبي: Q = m(h₂ − h₁)، لأن شغل الحدود مُضمَّن فيه.
- للغازات المثالية تعتمد u وh على T فقط: Δu = c_vΔT، Δh = c_pΔT، حيث c_p − c_v = R وk = c_p/c_v (1.4 للهواء).
- للسوائل والمواد الصلبة c_p ≈ c_v = c، لذا Q = mcΔT. ويتطلب الانصهار أو الغليان عند T ثابتة حرارة كامنة: Q = m h_if أو m h_fg.
- في دورة كاملة يعود النظام إلى حالته الابتدائية، لذا ΔU = 0 وQ_net = W_net. وهذا أساس كل محرك وكل ثلاجة.

المعادلات الأساسية

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

Q-W=Δ U+Δ KE+Δ PE

القانون الأول، نظام مغلق

$$h = u + pv$$

h=u+pv

الإنثالبي

$$\Delta u = c_v \Delta T,\ \Delta h = c_p \Delta T,\ c_p - c_v = R$$

Δ u=c_vΔ T,\ Δ h=c_pΔ T,\ c_p-c_v=R

الحرارات النوعية للغاز المثالي

$$Q = mc\Delta T,\ \ Q = m\,h_{fg}$$

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 4.1 يُسخَّن 2 kg من الهواء في خزان صلب من 300 K إلى 400 K. أوجد Q.

1. W = 0 (خزان صلب).
2. Q = m c_v ΔT = 2 × 0.718 × 100.

الإجابة: Q = 143.6 kJ.

مثال 4.2 يُسخَّن الهواء نفسه عند ضغط ثابت (100 kPa) من 300 إلى 400 K. أوجد Q وشغل الحدود.

1. Q = m c_p ΔT = 2 × 1.005 × 100.
2. W = mRΔT = 2 × 0.287 × 100.

الإجابة: Q = 201.0 kJ؛ W = 57.4 kJ؛ ΔU = 143.6 kJ في الحالتين.

مثال 4.3 أوجد الحرارة اللازمة لتسخين 1 kg من الماء من 20 °C إلى 100 °C، ثم لتبخير 0.1 kg منه.

1. $Q_1 = 1 \times 4.18 \times 80$.
2. $Q_2 = 0.1 \times 2257$.

الإجابة: $Q_1 = 334.4$ kJ; $Q_2 = 225.7$ kJ.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. صهر 0.2 kg من الجليد عند 0 °C. ما الحرارة؟

   0.2 × 334 = 66.8 kJ.

2. أوجد c_p − c_v للهواء.

   R = 0.287 kJ/(kg·K) = 1.005 − 0.718.

3. تتلقى دورة 500 kJ من الحرارة وتطرد 300 kJ. ما صافي الشغل؟

   200 kJ.

4. أوجد k للهواء.

1.005/0.718 = 1.40.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: إضافة الحرارة ترفع درجة الحرارة دائمًا.
في الحقيقة: لا ترفعها أثناء تغير الطور.

خرافة: العلاقة $Q = mc_p\Delta T$ تصلح لخزان صلب.
في الحقيقة: استخدم c_v عندما يكون الحجم ثابتًا.

خرافة: الإنثالبي شكل من أشكال الحرارة.
في الحقيقة: إنه خاصية، $u + pv$.

بطاقات تعليمية

القانون الأول

$Q - W = \Delta U$.

الإنثالبي

$h = u + pv$.

Δu للغاز المثالي

$c_v\Delta T$.

Δh للغاز المثالي

$c_p\Delta T$.

الحرارة الكامنة

$Q = m\ h_{fg}$.

الدورة

$Q_{net} = W_{net}$.

اختبار ذاتي

1. لخزان مغلق صلب، تساوي Q...

ΔH

ΔU

W

0

ΔU. لا يوجد شغل حدود.

2. قيمة $c_p - c_v$ للغاز المثالي هي...

k

R

1

c_v

R. علاقة ماير.

3. على مدى دورة، ΔU تساوي...

موجبة

سالبة

صفر

Q

صفر. الحالة الابتدائية والنهائية نفسها.

4. عند ضغط ثابت، تساوي Q...

ΔU

ΔH

W

pV

ΔH. $h = u + pv$.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تفيد وزارة الطاقة الأمريكية بأن المضخات الحرارية تنمو بسرعة: ففي 2020 كانت موجودة في أكثر من 17 مليون وحدة سكنية أمريكية، وهي الآن تمثل أكثر من نصف مبيعات معدات التدفئة السكنية في الولايات المتحدة. وتعمل مثل الثلاجة، إذ تستخدم الكهرباء لنقل الحرارة من مكان بارد إلى مكان دافئ بدلًا من توليد الحرارة.

والقانون الأول هو سبب أهمية ذلك: فالسخان الكهربائي ذو المقاومة يحول كل kWh من الكهرباء إلى kWh واحد بالضبط من الحرارة، أما المضخة الحرارية فتوصل الكهرباء مضافًا إليها الحرارة التي تسحبها من الخارج. وتقول الوزارة إن المضخات الحرارية الهوائية الحديثة يمكن أن تخفض استهلاك الكهرباء بنسبة 50% مقارنة بالأفران والسخانات الجدارية، وأن التحول إليها قد يوفر ما يصل إلى 7.6 أطنان من انبعاثات الكربون سنويًا بحسب المعدات المستبدلة.

على Saving Planets: الحلول · التفاضل والتكامل 2

المصادر: U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

مصادر تعلّم مجانية

- OpenStax UP2, 3.3 First law of thermodynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-3-first-law-of-thermodynamics): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- OpenStax UP2, 3.5 Heat capacities of an ideal gas (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-5-heat-capacities-of-an-ideal-gas): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- NASA Glenn: First law of thermodynamics (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/thermo1.html): صفحة مجانية من NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): ملاحظات عن القانون الأول.

شاهد المحاضرة

Lecture 1: State of a system, 0th law, equation of state (https://ocw.mit.edu/courses/5-60-thermodynamics-kinetics-spring-2008/resources/lecture-1-state-of-a-system-0th-law-equation-of-state/) (باللغة الإنجليزية)

MIT 5.60 Thermodynamics & Kinetics (Spring 2008), MIT OpenCourseWare. الترخيص: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · شروط الاستخدام (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). الرابط للدراسة المجانية فقط؛ Saving Planets غير تابع لهذه الجامعة ولا يحظى بتأييدها.

أنهيت هذه الوحدة

القانون الأول لأحجام التحكم: أجهزة التدفق المستقر

موازنات الكتلة والطاقة لأحجام التحكم، وشغل التدفق والإنثالبي، وأجهزة التدفق المستقر (الفوهات والناشرات، والتوربينات والضواغط، والمضخات، وصمامات الخنق، وغرف الخلط، والمبادلات الحرارية)، ومقدمة عن الملء غير المستقر.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- كتابة موازنات الكتلة والطاقة للتدفق المستقر.
- شرح سبب ظهور الإنثالبي في التيارات المتدفقة.
- تحليل الفوهات والتوربينات والضواغط وصمامات الخنق والمبادلات الحرارية.
- اختيار الحدود التي يمكن إهمالها لكل جهاز.

المفاهيم الأساسية

- موازنة الكتلة: في التدفق المستقر Σṁ_in = Σṁ_out، حيث ṁ = ρAV.
- دفع المائع عبر الحدود يتطلب شغل تدفق قدره pv لكل وحدة كتلة؛ وإضافته إلى u تعطي الإنثالبي h، ولهذا تستخدم موازنات الأنظمة المفتوحة h.
- معادلة الطاقة للتدفق المستقر بمدخل واحد ومخرج واحد: Q̇ − Ẇ = ṁ[(h₂ − h₁) + (V₂² − V₁²)/2 + g(z₂ − z₁)].
- اختصارات الأجهزة: الفوهات تبادل الإنثالبي بالسرعة (Q̇ = Ẇ = 0)؛ والتوربينات والضواغط شبه كاظمة مع (Q̇ = 0)؛ Ẇ = ṁ(h₁ − h₂)؛ وصمامات الخنق تحافظ على h₁ = h₂؛ والمبادلات الحرارية لها Ẇ = 0 والحرارة التي يفقدها أحد التيارين تساوي ما يكسبه الآخر.
- تذكّر الوحدات: يجب قسمة الطاقة الحركية بوحدة J/kg على 1000 لإضافتها إلى إنثالبي بوحدة kJ/kg.

المعادلات الأساسية

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out}$$

```
m_in= m_out
```

موازنة الكتلة المستقرة

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}\left[\Delta h + \frac{\Delta V^2}{2} + g\Delta z\right]$$

```
Q- W= m[Δ h+(Δ V^2)/(2)+gΔ z]
```

معادلة الطاقة للتدفق المستقر

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

```
W_turb= m(h_1-h_2)
```

توربين كاظم

$$h_1 = h_2$$

h_1=h_2

صمام الخنق

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 5.1 يدخل الهواء ببطء إلى فوهة كاظمة عند 400 K ويخرج عند 350 K. أوجد سرعة الخروج.

1. $\Delta h = c_p \Delta T = 1.005 \times 50 = 50.25$ kJ/kg = 50,250 J/kg.
2. $V_2 = \sqrt{(2 \times 50{,}250)}$.

الإجابة: $V_2 = 317.0$ m/s.

مثال 5.2 يتدفق البخار بمعدل 5 kg/s عبر توربين كاظم من $h_1 = 3116.1$ إلى $h_2 = 2403.0$ kJ/kg. أوجد القدرة.

1. $\dot{W} = 5 \times (3116.1 - 2403.0)$.

الإجابة: $\dot{W} = 3565.5$ kW ≈ 3.57 MW.

مثال 5.3 يرفع ضاغط كاظم 1.2 kg/s من الهواء من 300 K إلى 450 K. أوجد القدرة الداخلة.

1. $\dot{W}_{in} = \dot{m} c_p \Delta T = 1.2 \times 1.005 \times 150$.

الإجابة: 180.9 kW.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. يُسخَّن ماء بمعدل 0.5 kg/s من 15 إلى 45 °C في مبادل حراري. ما معدل الحرارة؟

   $0.5 \times 4.18 \times 30 = 62.7$ kW.

2. يُخنق بخار من $h = 2800$ kJ/kg. ما h عند المخرج؟

   2800 kJ/kg.

3. حوّل تغير السرعة من 0 إلى 100 m/s إلى kJ/kg.

   $100^2/2 = 5000$ J/kg = 5 kJ/kg.

4. أنبوب فيه $\dot{m} = 2\ \text{kg/s}$ عند المدخل. كم عند المخرج في التدفق المستقر؟

.2 kg/s

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: قدرة التوربين تستخدم u.
في الحقيقة: التيارات المتدفقة تستخدم h الذي يشمل شغل التدفق.

خرافة: صمام الخنق يخفض الإنثالبي.
في الحقيقة: تبقى h ثابتة؛ وينخفض p وعادةً T.

خرافة: الطاقة الحركية مهملة دائمًا.
في الحقيقة: ليست كذلك في الفوهات والناشرات.

بطاقات تعليمية

الكتلة في الحالة المستقرة

$\dot{m}$ الداخل = $\dot{m}$ الخارج.

شغل التدفق

pv لكل kg.

SFEE

$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}\Delta(h + V^2/2 + gz)$.

التوربين

$\dot{m}(h_1 - h_2)$.

صمام الخنق

$h_1 = h_2$.

المبادل الحراري

الحرارة المفقودة = الحرارة المكتسبة.

اختبار ذاتي

1. في صمام الخنق...

$h_1 = h_2$

$T_1 = T_2$

$p_1 = p_2$

$W > 0$

$h_1 = h_2$. لا شغل ولا حرارة، وΔKE صغير.

2. يظهر الإنثالبي في الأنظمة المفتوحة بسبب...

شغل التدفق

الاحتكاك

الجاذبية

الإشعاع

شغل التدفق. $h = u + pv$.

3. تحوّل الفوهة...

السرعة إلى إنثالبي

الإنثالبي إلى سرعة

الشغل إلى حرارة

الكتلة إلى طاقة

الإنثالبي إلى سرعة. تسرّع التدفق.

4. قدرة التوربين الكاظم هي...

$\dot{m}(h_1 - h_2)$

$\dot{m}(h_2 - h_1)$

$\dot{Q}$

0

$\dot{m}(h_1 - h_2)$. انخفاض الإنثالبي.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تصف وزارة الطاقة الأمريكية قلب المحطة النووية بأنه سلسلة من أجهزة التدفق المستقر: يسخّن الانشطار الماء، ويولد مبادل حراري (في مفاعلات الماء المضغوط) البخار في دائرة منفصلة، ويدير البخار توربينًا متصلًا بمولد، ثم يُكثَّف البخار المتبقي إلى ماء ويُضخ ليعاد تسخينه.

كل مربع هو معادلة طاقة واحدة للتدفق المستقر. وتستخدم محطات الطاقة الحرارية الأرضية، التي تقول الوزارة إنها تسحب مائعًا ساخنًا عبر الآبار وتحول حرارته إلى بخار يدير التوربينات، الأجهزة نفسها مع حرارة الأرض مصدرًا. واستخلاص بضعة kJ إضافية لكل kg من كل مرحلة توربين هو الطريقة التي ترتفع بها كفاءة المحطة.

على Saving Planets: الحلول · الديناميكا الهوائية 1

المصادر: U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work) · U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics)

مصادر تعلّم مجانية

- OpenStax UP2, 3.4 Thermodynamic processes (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-4-thermodynamic-processes): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): محاضرات عن أحجام التحكم.
- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): بيانات البخار.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): ملاحظات عن التدفق المستقر.

شاهد المحاضرة

Lecture 2: Work, heat, first law (https://ocw.mit.edu/courses/5-60-thermodynamics-kinetics-spring-2008/resources/lecture-2-work-heat-first-law/) (باللغة الإنجليزية)

MIT 5.60 Thermodynamics & Kinetics (Spring 2008), MIT OpenCourseWare. الترخيص: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · شروط الاستخدام (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). الرابط للدراسة المجانية فقط؛ Saving Planets غير تابع لهذه الجامعة ولا يحظى بتأييدها.

أنهيت هذه الوحدة

القانون الثاني: المحركات الحرارية والثلاجات وحدود كارنو

الخزانات الحرارية، والمحركات الحرارية والكفاءة الحرارية، والثلاجات والمضخات الحرارية ومعامل الأداء COP، وصيغتا كلفن–بلانك وكلاوزيوس، والعمليات العكوسة وغير العكوسة، ودورة كارنو، وحدود كارنو على الكفاءة وCOP.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حساب الكفاءة الحرارية وCOP.
- ذكر صيغتي كلفن–بلانك وكلاوزيوس.
- تحديد مصادر اللاانعكاسية.
- استخدام حدود كارنو للحكم على إمكانية جهاز مُدَّعى.

المفاهيم الأساسية

- يأخذ المحرك الحراري Q_H من خزان ساخن، ويطرد Q_L إلى خزان بارد، وينتج W = Q_H − Q_L. الكفاءة الحرارية η = W/Q_H = 1 − Q_L/Q_H.
- كلفن–بلانك: لا يمكن لأي دورة تحويل كل الحرارة من خزان واحد إلى شغل، لذا η < 100%. كلاوزيوس: لا تنتقل الحرارة من البارد إلى الساخن من تلقاء نفسها؛ فالثلاجة أو المضخة الحرارية تحتاج إلى شغل داخل.
- COP_R = Q_L/W للثلاجة؛ وCOP_HP = Q_H/W = COP_R + 1 للمضخة الحرارية. يمكن أن يكون COP أكبر بكثير من 1، ولهذا تتفوق المضخات الحرارية على سخانات المقاومة.
- تقلل اللاانعكاسيات (الاحتكاك، وانتقال الحرارة عبر ΔT محدود، والتمدد غير المقيد، والخلط) الأداء. والدورة العكوسة بين خزانين، أي دورة كارنو، هي أفضل ما يمكن.
- تستخدم حدود كارنو درجات الحرارة المطلقة: η_Carnot = 1 − T_L/T_H، COP_R,Carnot = T_L/(T_H − T_L)، COP_HP,Carnot = T_H/(T_H − T_L).

المعادلات الأساسية

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

```
=(W)/(Q_H)=1-(Q_L)/(Q_H)
```

الكفاءة الحرارية

$$COP_R = \frac{Q_L}{W},\ COP_{HP} = \frac{Q_H}{W}$$

```
COP_R=(Q_L)/(W),\ COP_HP=(Q_H)/(W)
```

معاملات الأداء

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

_Carnot=1-(T_L)/(T_H)

كفاءة كارنو

$$COP_{HP,Carnot} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

COP_HP,Carnot=(T_H)/(T_H-T_L)

مضخة كارنو الحرارية

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 6.1 يأخذ محرك 1000 kJ من الحرارة وينتج 350 kJ من الشغل. أوجد η وQ_L.

1. η = 350/1000.
2. Q_L = 1000 − 350.

الإجابة: η = 35%; Q_L = 650 kJ.

مثال 6.2 أوجد كفاءة كارنو بين 800 K و300 K، وبين 1073 K و293 K.

1. 1 − 300/800.
2. 1 − 293/1073.

الإجابة: 62.5% و72.7%.

مثال 6.3 تحافظ مضخة حرارية على منزل عند 294 K حين تكون الحرارة في الخارج 273 K. أوجد COP كارنو، والحرارة التي توصلها وحدة حقيقية بمعامل COP = 3 (قيمة توضيحية) باستخدام 3 kWh.

1. COP = 294/(294 − 273).
2. Q_H = 3 × 3.

الإجابة: COP_Carnot = 14.0؛ وتوصل الوحدة الحقيقية 9 kWh من الحرارة.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. ثلاجة لها COP_R = 2.5 وتزيل 500 kJ. ما الشغل؟

200 kJ.

2. أوجد COP_HP إذا كان COP_R = 2.5.

3.5.

3. تعمل ثلاجة بين 275 K و298 K. ما COP_R لكارنو؟

275/23 = 11.96.

4. يدعي مخترع كفاءة 70% بين 600 K و300 K. هل هذا ممكن؟

لا: حد كارنو هو 50%.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: معامل COP أكبر من 1 يخالف حفظ الطاقة.
في الحقيقة: المضخة الحرارية تنقل الحرارة ولا تولدها.

خرافة: يمكن استخدام °C في كفاءة كارنو.
في الحقيقة: يجب استخدام الكلفن.

خرافة: الهندسة الأفضل يمكن أن تبلغ كفاءة 100%.
في الحقيقة: تمنع ذلك صيغة كلفن–بلانك.

بطاقات تعليمية

الكفاءة

W/Q_H.

COP_R

Q_L/W.

COP_HP

Q_H/W.

كلفن–بلانك

لا محرك بكفاءة 100%.

كلاوزيوس

لا انتقال من البارد إلى الساخن دون شغل.

كارنو

1 − T_L/T_H.

اختبار ذاتي

1. كفاءة كارنو بين 600 K و300 K هي...

25%

50%

75%

100%

.50%. 1 − 0.5

2. COP_HP − COP_R يساوي...

0

1

η

T_H

.1. Q_H = Q_L + W

3. أي صيغة تمنع محركًا كفاءته 100%؟

كلاوزيوس

كلفن–بلانك

القانون الصفري

القانون الأول

كلفن–بلانك. صيغة الخزان الواحد.

4. أيها لاانعكاسية؟

الاحتكاك

ضغط شبه متزن

تمدد أيزنتروبي

لا شيء

الاحتكاك. تبديد.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تصف وزارة الطاقة الأمريكية المضخات الحرارية بأنها تنقل الحرارة بدلًا من توليدها، مما يجعلها أكفأ بكثير من التدفئة التقليدية. يمكن للمضخات الحرارية الهوائية الحديثة خفض استهلاك الكهرباء بنسبة 50% مقارنة بالأفران والسخانات الجدارية، ويمكن للمضخات الحرارية الأرضية، التي تستفيد من ثبات درجة حرارة باطن الأرض الضحل، خفض استهلاك الطاقة بنسبة 30% إلى 60%.

يفسر COP كارنو كلا الادعاءين: كلما صغر الفرق في درجة الحرارة $T_H - T_L$ ارتفع COP. تبقى الأرض أكثر اعتدالًا من هواء الشتاء، لذا ترفع المضخة الحرارية الأرضية الحرارة عبر فرق أصغر. ويرى مكتب الطاقة الحرارية الأرضية في الوزارة إمكانية الوصول إلى 28 مليون مضخة حرارية أرضية بحلول 2050.

على Saving Planets: الحلول · المحيطات

المصادر: U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps) · U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics)

مصادر تعلّم مجانية

- OpenStax UP2, 4.2 Heat engines (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-2-heat-engines): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- OpenStax UP2, 4.3 Refrigerators and heat pumps (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-3-refrigerators-and-heat-pumps): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- OpenStax UP2, 4.5 The Carnot cycle (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-5-the-carnot-cycle): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- NASA Glenn: Carnot cycle (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/carnot.html): صفحة مجانية من NASA.

شاهد المحاضرة

The Second Law of Thermodynamics and Carnot's Engine (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-23) (باللغة الإنجليزية)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. الترخيص: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · شروط الاستخدام (https://oyc.yale.edu/terms). الرابط للدراسة المجانية فقط؛ Saving Planets غير تابع لهذه الجامعة ولا يحظى بتأييدها.

أنهيت هذه الوحدة

الإنتروبيا والكفاءة الأيزنتروبية

متباينة كلاوزيوس، والإنتروبيا بوصفها خاصية، ومبدأ تزايد الإنتروبيا وتوليد الإنتروبيا، وعلاقات T ds، وتغير إنتروبيا السوائل والمواد الصلبة والغازات المثالية، والعمليات الأيزنتروبية، ومخططات T–s، والكفاءات الأيزنتروبية للتوربينات والضواغط والفوهات.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حساب تغيرات الإنتروبيا للسوائل والمواد الصلبة والغازات المثالية.
- إيجاد توليد الإنتروبيا والحكم على إمكانية العملية.
- استخدام العلاقات الأيزنتروبية للغازات المثالية.
- تطبيق الكفاءات الأيزنتروبية على الأجهزة الحقيقية.

المفاهيم الأساسية

- الإنتروبيا S خاصية معرفة بالعلاقة dS = δQ_rev/T. لأي عملية S₂ − S₁ ≥ ∫δQ/T؛ والفرق هو الإنتروبيا المتولدة S_gen ≥ 0 (صفر فقط إذا كانت العملية عكوسة).
- مبدأ تزايد الإنتروبيا: إنتروبيا النظام المعزول (النظام مع محيطه) لا تتناقص أبدًا. والعملية التي فيها S_gen < 0 مستحيلة.
- علاقات T ds: T ds = du + p dv = dh − v dp. للسوائل والمواد الصلبة Δs = c ln(T₂/T₁)؛ وللغازات المثالية Δs = c_p ln(T₂/T₁) − R ln(p₂/p₁).
- للعملية الأيزنتروبية (الكاظمة العكوسة) لغاز مثالي بحرارات نوعية ثابتة T₂/T₁ = (p₂/p₁)^((k−1)/k). وهي على مخطط T–s خط رأسي، والمساحة تحت عملية عكوسة هي الحرارة المنتقلة.
- تُقارن الأجهزة الحقيقية بالأيزنتروبية: η_T = (h₁ − h₂a)/(h₁ − h₂s) للتوربينات و η_C = (h₂s − h₁)/(h₂a − h₁) للضواغط.

المعادلات الأساسية

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T}, \;\; S_{gen} \geq 0$$

dS= Q_revT,\ \ S_gen0

الإنتروبيا والقانون الثاني

$$\Delta s = c \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Δ s=c(T_2)/(T_1)

السوائل والمواد الصلبة

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Δ s=c_p(T_2)/(T_1)-R(p_2)/(p_1)

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k}$$

(T_2)/(T_1)=((p_2)/(p_1))^(k-1)/k

الغاز المثالي الأيزنتروبي

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 7.1 أوجد تغير إنتروبيا 2 kg من الماء سُخّنت من 293 K إلى 353 K.

1. ΔS = 2 × 4.18 × ln(353/293).

الإجابة: ΔS = 1.557 kJ/K.

مثال 7.2 ينتقل الهواء من 300 K و100 kPa إلى 500 K و400 kPa. أوجد Δs.

1. Δs = 1.005 ln(500/300) − 0.287 ln(400/100).

الإجابة: Δs = 0.1155 kJ/(kg·K).

مثال 7.3 يُضغط هواء عند 300 K بنسبة ضغط قدرها 8. أوجد درجة حرارة الخروج الأيزنتروبية والفعلية إذا كانت η_C = 0.85.

1. T_2s = 300 × 8^(0.4/1.4) = 543.4 K.
2. T_2a = 300 + (543.4 − 300)/0.85.

الإجابة: T_2s = 543.4 K; T_2a = 586.4 K.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. تنتقل 1000 kJ من الحرارة من خزان عند 800 K إلى خزان عند 300 K. ما S_gen؟

1000/300 − 1000/800 = 2.083 kJ/K.

2. ما T_2 الأيزنتروبية لنسبة ضغط قدرها 10 بدءًا من 300 K؟

579.2 K.

3. هل يمكن أن تكون S_gen سالبة؟

لا؛ فتلك العملية مستحيلة.

4. ماذا تمثل المساحة تحت منحنى T–s عكوس؟

الحرارة المنتقلة.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: لا يمكن للإنتروبيا أن تتناقص أبدًا.
في الحقيقة: يمكن أن تنخفض إنتروبيا نظام إذا طرد حرارة؛ أما الإجمالي لنظام معزول فلا.

خرافة: الكاظم يعني الأيزنتروبي.
في الحقيقة: فقط إذا كان عكوسًا أيضًا.

خرافة: يمكن أن تتجاوز الكفاءة الأيزنتروبية 1.
في الحقيقة: ليس للتوربينات أو الضواغط.

بطاقات تعليمية

الإنتروبيا

.dS = δQ_rev/T

S_gen

.≥ 0

Δs للسائل

.c ln(T₂/T₁)

Δs للغاز المثالي

.c_p ln(T₂/T₁) − R ln(p₂/p₁)

T الأيزنتروبية

.T₂/T₁ = (p₂/p₁)^((k−1)/k)

η_T

.(h₁ − h₂a)/(h₁ − h₂s)

اختبار ذاتي

1. S_gen لعملية عكوسة تساوي...

موجبة

صفر

سالبة

لانهائيًا

صفر. لا لاانعكاسية.

2. العملية الأيزنتروبية على مخطط T–s تكون...

أفقية

رأسية

مائلة

دائرية

رأسية. s ثابتة.

3. Δs لسائل مسخَّن هي...

$c \ln(T_2/T_1)$

$c\Delta T$

$R \ln(p_2/p_1)$

0

$c \ln(T_2/T_1)$. غير قابل للانضغاط.

4. الكفاءة الأيزنتروبية للضاغط هي...

$(h_2s - h_1)/(h_2a - h_1)$

$(h_2a - h_1)/(h_2s - h_1)$

h_2/h_1

1

$(h_2s - h_1)/(h_2a - h_1)$. الشغل المثالي مقسومًا على الفعلي.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تشرح صفحة NASA Glenn عن دورة برايتون توربينًا غازيًا على مخطط T–s: مثاليًا يرفع الضاغط الضغط ودرجة الحرارة أيزنتروبيًا، على خط رأسي، لكن في الواقع يميل خط الضغط إلى اليمين لأن الإنتروبيا تزداد في التدفق. ويحدث الاحتراق عند ضغط ثابت، ويدير التوربين، المركّب على العمود نفسه، الضاغط.

وتشير NASA إلى أن المساحة المحصورة على مخطط T–s تتناسب مع الشغل المفيد. وكل قدر من الإنتروبيا يتولد في ضاغط أو توربين يقلص تلك المساحة، لذا فالكفاءات الأيزنتروبية الأعلى تعني مزيدًا من الكهرباء أو الدفع من الوقود نفسه، وCO_2 أقل.

على Saving Planets: الديناميكا الهوائية 1 · التفاضل والتكامل 3

المصادر: NASA Glenn: Turbine engine thermodynamic cycle (Brayton cycle) (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/brayton.html)

مصادر تعلّم مجانية

- OpenStax UP2, 4.6 Entropy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-6-entropy): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- OpenStax UP2, 4.7 Entropy on a microscopic scale (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-7-entropy-on-a-microscopic-scale): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- NASA Glenn: Entropy (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/entropy.html): صفحة مجانية من NASA.
- OpenStax UP2, 3.6 Adiabatic processes for an ideal gas (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-6-adiabatic-processes-for-an-ideal-gas): قسم من كتاب مدرسي مجاني.

☐ **أنهيت هذه الوحدة**

الإكسيرجي: كم من الطاقة مفيد

الحالة الميتة والمحيط، والإكسيرجي (الإتاحة) للحرارة وللتيارات المتدفقة، والشغل العكوس واللاانعكاسية، وهدم الإكسيرجي I = T₀S_gen، وكفاءة القانون الثاني، وسبب أهمية مواءمة جودة الطاقة مع استخدامها.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حساب إكسيرجي الحرارة من خزان.
- ربط الإكسيرجي المهدومة بالإنتروبيا المتولدة.
- حساب كفاءة القانون الثاني.
- شرح سبب حسن استخدام التوليد المشترك والمضخات الحرارية للإكسيرجي.

المفاهيم الأساسية

- الإكسيرجي هي أقصى شغل مفيد يمكن الحصول عليه بينما يصل النظام إلى الاتزان مع محيطه (الحالة الميتة، T₀ وp₀). الطاقة محفوظة؛ أما الإكسيرجي فتُهدم باللاانعكاسية.
- للحرارة Q من خزان عند T إكسيرجي قدرها X = Q(1 − T₀/T): الحرارة عند درجة حرارة عالية قيّمة، والحرارة قرب درجة حرارة الغرفة تكاد تكون عديمة القيمة لإنتاج الشغل.
- إكسيرجي تيار متدفق لكل وحدة كتلة: ψ = (h − h₀) − T₀(s − s₀) + V²/2 + gz.
- الإكسيرجي المهدومة (اللاانعكاسية) I = T₀S_gen (غوي–ستودولا). كل لاانعكاسية تكلف شغلًا مفيدًا.
- كفاءة القانون الثاني η_II = η_th/η_rev للمحركات، أو COP/COP_rev للمضخات الحرارية. حرق الوقود عند 2000 K لمجرد تسخين الماء إلى 60 °C يهدر معظم الإكسيرجي؛ أما استخدام الحرارة المهدرة من محطة كهرباء لهذه المهمة فلا يهدرها.

المعادلات الأساسية

$$X_Q = Q\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$$

```
X_Q=Q(1-(T_0)/(T))
```

إكسيرجي الحرارة

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$

```
=(h-h_0)-T_0(s-s_0)+(V^2)/(2)+gz
```

إكسيرجي التدفق

$$I = T_0 S_{gen}$$

```
I=T_0S_gen
```

الإكسيرجي المهدومة

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{rev}}$$

_II=_th_rev

كفاءة القانون الثاني

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 8.1 أوجد إكسيرجي 100 kJ من الحرارة من مصدر عند 600 K مع T_0 = 300 K.

1. X = 100 × (1 − 300/600).

الإجابة: 50 kJ.

مثال 8.2 تنتقل 1000 kJ من 800 K إلى 300 K (T_0 = 300 K). أوجد الإكسيرجي المهدومة.

1. S_gen = 1000/300 − 1000/800 = 2.083 kJ/K.
2. I = 300 × 2.083.

الإجابة: I = 625 kJ، أي كل الإكسيرجي التي كانت للحرارة عند 800 K.

مثال 8.3 يعمل محرك بكفاءة η = 35% بين 800 K و300 K. أوجد η_II.

1. η_rev = 62.5%.
2. η_II = 0.35/0.625.

الإجابة: η_II = 56%.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. ما إكسيرجي 100 kJ عند 330 K مع T_0 = 300 K؟

   100 × (1 − 300/330) = 9.09 kJ.

2. لمضخة حرارية COP قدره 3؛ و14 = COP_rev. ما η_II؟

   3/14 = 21.4%.

3. لماذا تكاد حرارة درجة حرارة الغرفة تكون عديمة القيمة لإنتاج الشغل؟

لأن عامل الإكسيرجي $1 - T_0/T$ قريب من الصفر.

4. ما الذي يهدم الإكسيرجي؟

كل لاانعكاسية: الاحتكاك والخلط وانتقال الحرارة عبر ΔT محدود.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الطاقة والإكسيرجي شيء واحد.
في الحقيقة: الطاقة محفوظة؛ والإكسيرجي تُهدم.

خرافة: الكفاءة العالية وفق القانون الأول تعني عملية جيدة.
في الحقيقة: قد تكون لغلاية غاز كفاءتها 95% كفاءة منخفضة وفق القانون الثاني.

خرافة: الإكسيرجي تعتمد على النظام فقط.
في الحقيقة: تعتمد على المحيط أيضًا (T_0, p_0).

بطاقات تعليمية

الإكسيرجي

أقصى شغل مفيد.

إكسيرجي الحرارة

$Q(1 - T_0/T)$.

الحالة الميتة

T_0, p_0.

اللاانعكاسية

$I = T_0 S_{gen}$.

η_{II}

η/η_{rev}.

جودة الطاقة

درجة الحرارة العالية قيّمة.

اختبار ذاتي

1. الإكسيرجي المهدومة تساوي...

$T_0 S_{gen}$

Q

W

ΔU

$T_0 S_{gen}$. غوي–ستودولا.

2. إكسيرجي الحرارة عند $T = T_0$ تساوي...

Q

صفر

لانهائيًا

Q/2

صفر. $1 - T_0/T = 0$.

3. تقارن η_{II} الأداء الفعلي بـ...

الحد العكوس

صفر

100%

القانون الأول

الحد العكوس. كفاءة القانون الثاني.

4. الحالة الميتة هي...

الاتزان مع المحيط

الصفر المطلق

النقطة الحرجة

الفراغ

الاتزان مع المحيط. T_0, p_0.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

توضح وزارة الطاقة الأمريكية أن التوليد المشترك للحرارة والكهرباء ينتج الكهرباء والتدفئة أو التبريد المفيدين من وقود واحد في موقع الاستخدام أو قربه، مستعيدًا حرارة كانت ستضيع لولا ذلك في توليد الكهرباء. وتقول الوزارة إن التوليد المشترك يمكن أن يعمل بكفاءة معقولة من 65% إلى 75%، مقابل متوسط وطني يقارب 50% عندما تُنتج الكهرباء والحرارة كلٌّ على حدة.

تفسر الإكسيرجي هذا المكسب: الجزء العالي الحرارة من إكسيرجي الوقود ينتج الكهرباء، والحرارة منخفضة الجودة التي كانت المحطة ستتخلص منها تلبي احتياجات تدفئة لم تتطلب يومًا سوى طاقة منخفضة الإكسيرجي. والانتقال من 50% إلى 75% يعني الخدمات نفسها بثلثي الوقود.

على Saving Planets: الحلول · الطقس الفضائي

المصادر: U.S. DOE: Combined heat and power basics (https://www.energy.gov/eere/amo/combined-heat-and-power-basics)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): محاضرات عن الإتاحة.
- OpenStax UP2, 4.1 Reversible and irreversible processes (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-1-reversible-and-irreversible-processes): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- OpenStax UP2, 4.4 Statements of the second law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-4-statements-of-the-second-law-of-thermodynamics): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): ملاحظات عن القانون الثاني.

أنهيت هذه الوحدة

دورات القدرة الغازية: أوتو وديزل وبرايتون

افتراضات الهواء القياسي، والضغط المتوسط الفعال، ودورة أوتو (الإشعال بالشرارة)، ودورة ديزل (الإشعال بالضغط)، ودورة برايتون للتوربينات الغازية والمحركات النفاثة، ونسبة الشغل الراجع، والاسترجاع، والتبريد البيني وإعادة التسخين، والدورات المركبة.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- تحليل دورتي أوتو وديزل المثاليتين.
- تحليل دورة برايتون المثالية، بما في ذلك نسبة الشغل الراجع.
- شرح كيف ترفع نسبة الانضغاط ونسبة الضغط الكفاءة.
- وصف الاسترجاع والدورات المركبة.

المفاهيم الأساسية

- افتراضات الهواء القياسي: مائع التشغيل هواء، وهو غاز مثالي، في دورة مغلقة؛ ويُستبدل الاحتراق بإضافة حرارة والعادم بطرد حرارة. ويضيف الهواء القياسي البارد حرارات نوعية ثابتة عند درجة حرارة الغرفة.
- دورة أوتو: ضغط أيزنتروبي، وإضافة حرارة عند حجم ثابت، وتمدد أيزنتروبي، وطرد حرارة عند حجم ثابت. η_Otto = 1 − 1/r^(k−1)، حيث نسبة الانضغاط r = V_max/V_min.
- دورة ديزل: تُضاف الحرارة عند ضغط ثابت؛ ومع نسبة القطع r_c تكون η_Diesel = 1 − (1/r^(k−1))·(r_c^k − 1)/(k(r_c − 1)). تعمل محركات الديزل بقيم r أعلى، لذا فهي أكفأ عمليًا.
- دورة برايتون (التوربينات الغازية): ضغط أيزنتروبي، وإضافة حرارة عند ضغط ثابت، وتمدد أيزنتروبي، وطرد حرارة عند ضغط ثابت. η_Brayton = 1 − 1/r_p^((k−1)/k). وجزء كبير من شغل التوربين يدير الضاغط (نسبة الشغل الراجع).
- يستخدم الاسترجاع العادم الساخن لتسخين الهواء المضغوط مسبقًا؛ ويقرّب التبريد البيني وإعادة التسخين الدورة من دورة كارنو. والدورة المركبة تغذي دورة بخارية (رانكن) بعادم التوربين الغازي.

المعادلات الأساسية

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

_Otto=1-1r^k-1

دورة أوتو

$$\eta_{Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)}$$

_Diesel=1-1r^k-1(r_c^k-1)/(k(r_c-1))

دورة ديزل

$$\eta_{Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$

_Brayton=1-1r_p^(k-1)/k

دورة برايتون

$$r_{bw} = \frac{w_{comp}}{w_{turb}}$$

r_bw=_compw_turb

نسبة الشغل الراجع

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 9.1 أوجد كفاءة الهواء القياسي البارد لدورتي أوتو عند r = 8 وr = 10.

1. 1 − 8^(−0.4).
2. 1 − 10^(−0.4).

الإجابة: 56.5% و60.2%.

مثال 9.2 لدورة ديزل r = 18 وr_c = 2. أوجد η.

1. 1/r^0.4 = 0.3147.
2. (2^1.4 − 1)/(1.4 × 1) = 1.1703.
3. η = 1 − 0.3147 × 1.1703.

الإجابة: η = 63.2%.

مثال 9.3 لدورة برايتون مثالية r_p = 8، ومدخل عند 300 K، ومدخل توربين عند 1300 K. أوجد T_2 وT_4 وشغل الضاغط والتوربين ونسبة الشغل الراجع وصافي الشغل وη.

1. $T_2 = 300 \times 8^{0.2857} = 543.4$ K; $T_4 = 1300/1.8114 = 717.7$ K.
2. w_c = 1.005 × 243.4 = 244.7 kJ/kg; w_t = 1.005 × 582.3 = 585.3 kJ/kg.
3. r_bw = 244.7/585.3؛ w_net = 340.6 kJ/kg؛ η = 1 − 8^(−0.2857).

الإجابة: r_bw = 0.418، w_net = 340.6 kJ/kg، η = 44.8%.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. ما كفاءة برايتون عند $r_p = 12$؟

   $1 - 12^{(-0.2857)} = 50.8\%$.

2. لماذا تكون محركات الديزل أكفأ من محركات البنزين عمليًا؟

   لأنها تعمل بنسب انضغاط أعلى بكثير.

3. رفع r في دورة أوتو من 8 إلى 10 يضيف كم نقطة؟

   $60.2 - 56.5 = 3.7$ نقطة.

4. ماذا يفعل الاسترجاع؟

   يستخدم حرارة العادم لتسخين هواء الضاغط مسبقًا، فيقل الوقود اللازم.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الانضغاط الأعلى يعني دائمًا محركات حقيقية أكفأ.
في الحقيقة: الطَّرق يحد من محركات الإشعال بالشرارة.

خرافة: الشغل الراجع مهمل في التوربينات الغازية.
في الحقيقة: غالبًا 40–80% من شغل التوربين.

خرافة: كفاءة الهواء القياسي هي الكفاءة الحقيقية.
في الحقيقة: المحركات الحقيقية أقل بكثير بسبب الاحتكاك وفقد الحرارة والغازات الحقيقية.

بطاقات تعليمية

الهواء القياسي

هواء، غاز مثالي، دورة مغلقة.

أوتو

$1 - 1/r^{(k-1)}$.

ديزل

إضافة حرارة عند p ثابت.

برايتون

$1 - 1/r_p^{((k-1)/k)}$.

الشغل الراجع

w_c/w_t.

الاسترجاع

العادم يسخّن الهواء مسبقًا.

اختبار ذاتي

1. تعتمد كفاءة أوتو على…

نسبة الانضغاط

نوع الوقود فقط

مقدار السرعة

نسبة القطع

نسبة الانضغاط. $1 - 1/r^{(k-1)}$.

2. تُضاف الحرارة في دورة برايتون عند ثبات…

الحجم

الضغط

درجة الحرارة

الإنتروبيا

الضغط. غرفة الاحتراق.

3. نسبة الشغل الراجع هي…

w_c/w_t

w_t/w_c

η

r_p

w_c/w_t. الضاغط مقسومًا على التوربين.

4. تقرن الدورة المركبة دورة برايتون بـ…

أوتو

رانكن

ديزل

كارنو

رانكن. دورة بخارية سفلية.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تشرح NASA Glenn أن دورة برايتون تُستخدم في جميع محركات التوربينات الغازية، سواء كانت نفاثة توربينية أو مروحية توربينية أو مروحية دافعة، وأنها كلها تشترك في ضاغط وقسم احتراق وتوربين يدير الضاغط. ويستخدم برنامج EngineSim من NASA تحليل دورة برايتون للتنبؤ بدفع المحرك وتدفق الوقود.

تعمل التوربينات الغازية الأرضية بالدورة نفسها. وتُظهر أمثلة معدل الحرارة من EIA لماذا يهم تصميم الدورة: 7500 Btu/kWh تعادل كفاءة نحو 45% مقابل نحو 33% عند 10500 Btu/kWh. ورفع نسبة الضغط ودرجة حرارة مدخل التوربين، واستعادة حرارة العادم، هي الطرق التي تقترب بها المحطات من الرقم الأفضل.

على Saving Planets: الديناميكا الهوائية 1 · مقدمة في هندسة الطيران والفضاء

المصادر: NASA Glenn: Turbine engine thermodynamic cycle (Brayton cycle) (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/brayton.html) · U.S. EIA: What is the efficiency of different types of power plants? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=107&t=3)

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Glenn: Brayton cycle (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/brayton.html): صفحة مجانية من NASA.
- NASA Glenn: Otto cycle (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/otto.html): صفحة مجانية من NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): محاضرات عن الدورات.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): ملاحظات عن دورات الدفع.

أنهيت هذه الوحدة

دورات القدرة البخارية ودورات التبريد

دورة رانكن المثالية وأجهزتها الأربعة، وشغل المضخة، ورفع الكفاءة (ضغط ودرجة حرارة أعلى في المرجل، وضغط أقل في المكثف، وإعادة التسخين، والاسترجاع)، ودورة التبريد بانضغاط البخار والمضخات الحرارية، ومواد التبريد، والتوليد المشترك.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- تحليل دورة رانكن مثالية باستخدام جداول البخار.
- شرح كيف يغير الضغط والتحميص وإعادة التسخين الكفاءة.
- تحليل دورة تبريد مثالية بانضغاط البخار.
- ربط COP الدورة بأداء المضخة الحرارية.

المفاهيم الأساسية

- دورة رانكن المثالية: المضخة (ضغط أيزنتروبي للسائل)، والمرجل (تسخين عند ضغط ثابت حتى البخار المحمص)، والتوربين (تمدد أيزنتروبي)، والمكثف (تكثيف عند ضغط ثابت).
- شغل المضخة صغير لأن v للسائل صغير: w_p ≈ v(p₂ − p₁). صافي الشغل w_net = w_turb − w_pump؛ η = w_net/q_in.
- ترتفع الكفاءة مع ارتفاع متوسط درجة حرارة إضافة الحرارة (ضغط مرجل أعلى، وتحميص أكثر، وإعادة تسخين) وانخفاض ضغط المكثف. ويسخّن الاسترجاع بسخانات ماء التغذية الماء مسبقًا ببخار مستنزف من التوربين.
- التبريد بانضغاط البخار: الضاغط (حتى البخار المحمص)، والمكثف (يطرد Q_H)، وصمام التمدد (خنق، h₃ = h₄)، والمبخر (يمتص Q_L = (h₁ − h₄)/(h₂ − h₁). COP_R.
- المضخة الحرارية هي الدورة نفسها مستخدمة للتدفئة، مع COP_HP = (h₂ − h₃)/(h₂ − h₁). وتُختار مواد التبريد لخواص تشبعها وسلامتها وانخفاض قدرتها على الاحترار العالمي.

المعادلات الأساسية

$$w_p = v(p_2 - p_1)$$

```
w_p=v(p_2-p_1)
```

شغل المضخة

$$\eta = \frac{w_t - w_p}{q_{in}}$$

```
=_t-w_pq_in
```

كفاءة رانكن

$$COP_R = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

```
COP_R=(h_1-h_4)/(h_2-h_1)
```

$$h_3 = h_4$$

h_3=h_4

صمام التمدد

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 10.1 تعمل دورة رانكن مثالية بين 3 MPa/350 °C و75 kPa. جداول البخار: $h_1 = 384.44$، $v_1 = 0.001037\ m^3/kg$، $h_3 = 3116.1$، $h_4 = 2403.0\ kJ/kg$. أوجد w_p وq_{in} وw_{net} وη.

1. $w_p = 0.001037 \times (3000 - 75) = 3.03\ kJ/kg$; $h_2 = 387.47$.
2. $q_{in} = 3116.1 - 387.47 = 2728.6\ kJ/kg$.
3. $w_{net} = (3116.1 - 2403.0) - 3.03 = 710.1\ kJ/kg$؛ $\eta = 710.1/2728.6$.

الإجابة: $w_p = 3.03\ kJ/kg$، $q_{in} = 2728.6\ kJ/kg$، $w_{net} = 710.1\ kJ/kg$، $\eta = 26.0\%$.

مثال 10.2 لدورة انضغاط بخار $h_1 = 244.5$ و$h_2 = 275.4$ و$h_3 = h_4 = 95.5\ kJ/kg$ (قيم توضيحية). أوجد q_L وw_{in} وCOP_R.

1. $q_L = 244.5 - 95.5 = 149.0\ kJ/kg$.
2. $w = 275.4 - 244.5 = 30.9\ kJ/kg$.
3. $COP = 149.0/30.9$.

الإجابة: $q_L = 149.0\ kJ/kg$, $w = 30.9\ kJ/kg$, $COP_R = 4.82$.

مثال 10.3 لتلك الدورة مستخدمة مضخة حرارية، أوجد COP_{HP}.

1. $q_H = 275.4 - 95.5 = 179.9\ kJ/kg$.
2. $COP_{HP} = 179.9/30.9$.

الإجابة: $COP_{HP} = 5.82$ (= $COP_R + 1$).

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. في مثال رانكن، ما الحرارة المطرودة؟

$2403.0 - 384.44 = 2018.6\ kJ/kg$.

2. ما نسبة شغل التوربين التي تستهلكها المضخة؟

.3.03/713.1 = 0.425%

3. أوجد تدفق البخار اللازم لصافي 100 MW في المثال.

.100,000/710.1 = 140.8 kg/s

4. لماذا يفيد خفض ضغط المكثف؟

لأنه يخفض درجة حرارة طرد الحرارة.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: شغل المضخة في دورة رانكن كبير.
في الحقيقة: إنه ضئيل لأن السائل شبه غير قابل للانضغاط.

خرافة: صمام التمدد يبذل شغلًا.
في الحقيقة: إنه خانق: h ثابتة ولا شغل.

خرافة: مزيد من التحميص يفيد دائمًا بلا حد.
في الحقيقة: مواد التوربين تحد من درجة الحرارة.

بطاقات تعليمية

رانكن

مضخة، مرجل، توربين، مكثف.

شغل المضخة

$v(p_2 - p_1)$.

إعادة التسخين

ترفع متوسط T لإضافة الحرارة وتجعل العادم أكثر جفافًا.

انضغاط البخار

ضاغط، مكثف، صمام، مبخر.

COP_R

$(h_1 - h_4)/(h_2 - h_1)$.

صمام الخنق

$h_3 = h_4$.

اختبار ذاتي

1. في دورة رانكن، تُضاف الحرارة في...

المضخة

المرجل

التوربين

المكثف

المرجل. ضغط ثابت.

2. شغل المضخة يقارب...

$v\,\Delta p$

$c_p \Delta T$

h_{fg}

صفرًا بالضبط

$v\,\Delta p$. سائل غير قابل للانضغاط.

3. في التبريد، تُمتص Q_L في...

المكثف

المبخر

الضاغط

الصمام

المبخر. الجانب البارد.

4. COP_{HP} ناقص COP_R يساوي...

0

1

η

2

.1. q_H = q_L + w

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

يوضح مكتب الطاقة الحرارية الأرضية في وزارة الطاقة الأمريكية أن المحطات الحرارية الأرضية ترفع مائعًا ساخنًا عبر الآبار وتحول حرارته إلى بخار يدير التوربينات، وهي دورة من عائلة رانكن تكون الأرض فيها هي المرجل. ويمكن لهذه المحطات العمل فعليًا 24 ساعة يوميًا بغض النظر عن الطقس، ويرى تحليل الوزارة إمكانية 90 غيغاواط من الكهرباء الحرارية الأرضية في الولايات المتحدة بحلول 2050 إذا انخفضت تكاليف الطاقة الحرارية الأرضية المعززة.

تستخدم المحطات النووية دورة رانكن نفسها، ويصف مقال الوزارة عن المضخات الحرارية دورة انضغاط البخار بالعكس: إدخال الحرارة إلى المنازل شتاءً وإخراجها صيفًا. ومن دورات رانكن والتبريد الأفضل سيأتي كثير من الكهرباء النظيفة والتدفئة الكفؤة في العالم.

على Saving Planets: الحلول · رصد الأرض

المصادر: U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work) · U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics) · U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

مصادر تعلّم مجانية

- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): جداول البخار ومواد التبريد.
- OpenStax UP2, 4.3 Refrigerators and heat pumps https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-3-refrigerators-and-heat-pumps): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): محاضرات عن الدورات البخارية.
- NASA Glenn: Second law of thermodynamics (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/thermo2.html): صفحة مجانية من NASA.

أنهيت هذه الوحدة

مجموعات المسائل

هذه التمارين داخل كل وحدة. حلّها على الورق أولًا، ثم افتح الإجابة.

1. الأنظمة والخواص والطاقة والكفاءة
   4 مسائل
2. المواد النقية وتغير الطور وجداول الخواص
   4 مسائل

3. انتقال الطاقة بالشغل والحرارة
   4 مسائل
4. القانون الأول للأنظمة المغلقة
   4 مسائل
5. القانون الأول لأحجام التحكم: أجهزة التدفق المستقر
   4 مسائل
6. القانون الثاني: المحركات الحرارية والثلاجات وحدود كارنو
   4 مسائل
7. الإنتروبيا والكفاءة الأيزنتروبية
   4 مسائل
8. الإكسيرجي: كم من الطاقة مفيد
   4 مسائل
9. دورات القدرة الغازية: أوتو وديزل وبرايتون
   4 مسائل
10. دورات القدرة البخارية ودورات التبريد
    4 مسائل

المختبر (Thermodynamics lab)

المختبر هو الجزء العملي من المقرر. وهو هنا مجاني وللتدريب فقط، دون ساعات معتمدة.

يمكن إجراء كل مختبر في محاكاة مجانية أو بأدوات المطبخ. الماء الساخن والبخار يسببان الحروق: استخدم قفازات الفرن، وضع الغلاية على سطح ثابت، واسكب بعيدًا عن نفسك، وأبعد الأطفال والحيوانات الأليفة. لا تسخّن وعاءً مغلقًا أبدًا.

مرجع السلامة: NFPA: Burn awareness information (https://www.nfpa.org/education-and-research/home-fire-safety/burns)

المختبر A: قانون الغاز المثالي في PhET Gas Properties

الأسبوع 2

الهدف: إثبات أن الضغط يتناسب مع درجة الحرارة المطلقة عند ثبات الحجم والكمية، وأن pV/T يبقى ثابتًا.

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \ (V,\ m \text{ fixed})$$

```
(p_1)/(T_1)=(p_2)/(T_2)\ \ (V,\ m\ fixed)
```

قانون الغاز المثالي عند حجم ثابت

الإجراء

1. افتح PhET Gas Properties، تبويب Ideal؛ أدخل غازًا وثبّت الحجم.
2. سخّن الغاز على مراحل وسجّل T وp.
3. ارسم p مقابل T بالكلفن؛ ومدّ الخط حتى p = 0.
4. كرر عند ضغط ثابت وسجّل الحجم.

جدول البيانات

T (K)	p (kPa)، بدءًا من 100 kPa عند 300 K
300	100
400	133.3
600	200

قيم غاز مثالي؛ تتذبذب أرقام المحاكي قليلًا لأنه يعدّ تصادمات الجسيمات.

مثال حسابي

1. $p_2 = 100 \times 400/300 = 133.3$ kPa.
2. يمر الخط المار بالبيانات بالقيمة p = 0 عند T = 0 K.

> **السلامة**
>
> - حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- يعمل Gas Properties في المتصفح.

PhET: Gas Properties (https://phet.colorado.edu/en/simulations/gas-properties) · PhET: States of Matter (https://phet.colorado.edu/en/simulations/states-of-matter)

الصلة بالكوكب: تقول وزارة الطاقة الأمريكية إن مصممي المفاعلات يضغطون الماء كي لا يغلي؛ والعلاقات نفسها بين خواص الحالة تحدد تصميم كل مرجل وكل خزان. U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work)

☐ **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر B: موازنة الطاقة وكفاءة الغلاية

الأسبوع 5

الهدف: تطبيق القانون الأول على تسخين الماء وإيجاد مقدار ما يصل إلى الماء من الطاقة الكهربائية للغلاية.

$$\eta = \frac{mc\Delta T}{P\,t}$$

=(mcΔ T)/(P t)

كفاءة الغلاية

الإجراء

1. زِن 1.00 kg (1 L) من ماء الصنبور وقِس درجة حرارته.
2. اقرأ قدرة الغلاية من ملصقها.
3. احسب الزمن اللازم للوصول إلى الغليان (تنطفئ الغلاية).
4. احسب الحرارة الممتصة والطاقة الكهربائية المستهلكة.

جدول البيانات

الكمية	القيمة
حرارة الماء، 1 kg من 20→100 °C (kJ)	334.4
الطاقة الكهربائية، 1500 W × 250 s (kJ)	375.0
الكفاءة	89.2%

قيم توضيحية؛ يعتمد زمن غلايتك على قدرتها ودرجة حرارة الماء الابتدائية وارتفاعك عن سطح البحر.

مثال حسابي

1. Q = 1 × 4.18 × 80 = 334.4 kJ.
2. η = 334.4/375 = 89.2%.

السلامة

- البخار والماء المغلي يسببان الحروق: أبقِ الغطاء مغلقًا، واسكب بعيدًا عن نفسك، وأبعد الأطفال والحيوانات الأليفة.
- لا تلمس جسم الغلاية وهو ساخن.

بديل منزلي أو افتراضي

- هذا مختبر منزلي.

PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

الصلة بالكوكب: تشير الوزارة إلى أن التسخين بالمقاومة يحول 1 kWh إلى 1 kWh من الحرارة، بينما تخفض المضخات الحرارية استهلاك الكهرباء بنحو 50%. U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

☐ **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر C: انصهار الجليد والحرارة الكامنة

الأسبوع 5

الهدف: استخدام موازنة حرارية للتنبؤ بدرجة الحرارة النهائية عند انصهار الجليد في ماء دافئ، ومقارنتها بالقياس.

$$m_w c(T_w - T_f) = m_i h_{if} + m_i c T_f$$

```
m_wc(T_w-T_f)=m_i h_if+m_ic T_f
```

الحرارة التي يفقدها الماء = الحرارة التي يكتسبها الجليد

الإجراء

1. ضع 300 g من الماء عند 40 °C في كوب معزول.
2. أضف 50 g من الجليد عند 0 °C (جففه بمنشفة).
3. حرّك برفق حتى ينصهر الجليد كله وسجّل أدنى درجة حرارة.
4. قارن بدرجة الحرارة النهائية المتوقعة.

جدول البيانات

الكمية	القيمة
الماء	0.300 kg عند 40 °C
Ice	0.050 kg عند 0 °C
T النهائية المتوقعة	22.9 °C

قيم توضيحية؛ الحرارة المكتسبة من الكوب والهواء تجعل القيمة المقيسة أعلى قليلًا.

مثال حسابي

1. 0.3 × 4.18 × (40 − T) = 0.05 × 334 + 0.05 × 4.18 × T.
2. T = 33.46/1.463 = 22.9 °C.

السلامة

- استخدم ماء الصنبور الدافئ، لا المغلي.

بديل منزلي أو افتراضي

- هذا مختبر منزلي.

PhET: States of Matter (https://phet.colorado.edu/en/simulations/states-of-matter) · PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

الصلة بالكوكب: الحرارة الكامنة هي أساس عمل التخزين الحراري؛ وتشير الوزارة إلى أن الطاقة الحرارية الأرضية يمكنها أيضًا دعم تخزين الطاقة الحرارية. U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics)

☐ **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر D: العزل ومعدل التبريد

الأسبوع 4

الهدف: مقارنة سرعة تبرد الماء الساخن في كوب عادي وكوب معزول، وإيجاد ثابت التبريد لكل منهما.

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = e^{-kt}$$

(T-T_∞)/(T_0-T_∞)=e^-kt

قانون نيوتن للتبريد

الإجراء

1. املأ كوبين، أحدهما عادي والآخر معزول (أو ملفوف بمنشفة)، بماء عند نحو 80 °C.
2. سجّل درجة الحرارة كل 2 دقيقة مدة 20 دقيقة؛ ودوّن درجة حرارة الغرفة.
3. احسب k = ln[(T₀ − T∞)/(T − T∞)]/t لكل منهما.
4. قارن معدلات الفقد الحراري.

جدول البيانات

Mug	T بعد 20 min (°C)	k (1/min)
عادي	60	0.0203
معزول	70	0.00912

قيم توضيحية مع غرفة عند 20 °C.

مثال حسابي

1. العادي: k = ln(60/40)/20 = 0.0203 لكل دقيقة.
2. المعزول: k = ln(60/50)/20 = 0.00912 لكل دقيقة، أي أقل من النصف.

السلامة

- الماء الساخن يسبب الحروق: استخدم قفازات الفرن وضع الأكواب على سطح ثابت بعيدًا عن الحواف.

بديل منزلي أو افتراضي

- هذا مختبر منزلي.

PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

الصلة بالكوكب: تنصح الوزارة بعزل المنزل قبل تركيب مضخة حرارية، لأن العزل يقلل الحرارة التي يجب على المنزل تعويضها. U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

- [ ] أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)

المختبر E: حدود كارنو لمضخة حرارية

الأسبوع 8

الهدف: إنشاء جدول بيانات لـCOP كارنو لمضخة حرارية مقابل درجة الحرارة الخارجية ومقارنته بـCOP الاسمي لوحدة حقيقية.

$$COP_{HP,Carnot} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

```
COP_HP,Carnot=(T_H)/(T_H-T_L)
```

مضخة كارنو الحرارية

الإجراء

1. اضبط درجة الحرارة الداخلية T_H = 294 K.
2. اسرد درجات الحرارة الخارجية من 253 K إلى 288 K.
3. احسب COP كارنو لكل منها.
4. ابحث عن الكفاءة الاسمية لأي مضخة حرارية على ملصقها أو في قائمة ENERGY STAR وقارن.

جدول البيانات

T_L (K)	COP_Carnot
263	9.48
273	14.0
283	26.7

حدود مثالية؛ تبلغ المضخات الحرارية الحقيقية جزءًا منها.

مثال حسابي

1. COP = 294/(294 − 263) = 9.48.
2. الهواء الخارجي الأبرد يعني حدًا أدنى.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

OpenStax UP2, 4.3 Refrigerators and heat pumps (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-3-refrigerators-and-heat-pumps)

الصلة بالكوكب: تقول وزارة الطاقة الأمريكية إن المضخات الحرارية الأرضية، باستخدامها ثبات درجة حرارة الأرض، يمكن أن تخفض استهلاك الطاقة بنسبة 30% إلى 60%. U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

- [ ] **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر F: جدول بيانات لدورة رانكن

الأسبوع 15

الهدف: حساب دورة رانكن مثالية من قيم جداول البخار ورؤية كيف تحدد حدود التوربين والمضخة والمرجل الكفاءة.

$$\eta = \frac{(h_3 - h_4) - v_1(p_2 - p_1)}{h_3 - h_2}$$

```
=((h_3-h_4)-v_1(p_2-p_1))/(h_3-h_2)
```

كفاءة رانكن المثالية

الإجراء

1. ابحث عن الحالات الأربع في WebBook من NIST (أو استخدم القيم المعطاة).
2. احسب شغل المضخة والحرارة الداخلة وشغل التوربين وصافي الشغل وη.
3. غيّر ضغط المكثف أو درجة حرارة المرجل باستخدام قيم جديدة من الجداول وأعد الحساب.
4. أوجد تدفق البخار لمحطة قدرتها 100 MW.

جدول البيانات

الكمية	القيمة
w_pump (kJ/kg)	3.03
q_in (kJ/kg)	2728.6
w_net (kJ/kg)	710.1
η	26.0%

قيم جداول البخار عند 3 MPa/350 °C و75 kPa.

مثال حسابي

1. η = 710.1/2728.6 = 26.0%.
2. تدفق البخار لقدرة 100 MW = 100000/710.1 = 140.8 kg/s.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/)

الصلة بالكوكب: تقول الوزارة إن المحطات النووية والحرارية الأرضية كلتيهما تحول الحرارة إلى بخار يدير التوربينات، وهي دورة هذا المختبر. U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work) · U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics)

☐ **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

مجموعات تدريب للامتحان

وقّت نفسك: نحو 10 دقائق لكل مسألة. ثم قارن بالحلول الكاملة.

مجموعة تمارين منتصف الفصل (الوحدات 5–1)

1. لمحطة معدل حرارة قدره 8530 Btu/kWh. أوجد كفاءتها.

   .1 3412/8530.

   الإجابة: 40.0%.

2. أوجد كتلة الهواء في خزان حجمه 2 m^3 عند 200 kPa و350 K.

   .1 $m = 200 \times 2/(0.287 \times 350)$.

   الإجابة: 3.98 kg.

3. أوجد h عند 100 kPa وجودة 0.9 ($h_f = 417.51$، $h_{fg} = 2257.5$ kJ/kg).

   .1 $417.51 + 0.9 \times 2257.5$.

   الإجابة: 2449.3 kJ/kg.

4. يُسخَّن 3 kg من الماء من 15 °C إلى 65 °C. أوجد Q.

   .1 $3 \times 4.18 \times 50$.

   الإجابة: 627 kJ.

5. يفقد بخار بمعدل 10 kg/s مقدار 800 kJ/kg في توربين كاظم. أوجد القدرة.

   .1 10×800.

   الإجابة: 8000 kW.

مجموعة التدريب النهائية (كل الوحدات)

1. أوجد كفاءة كارنو بين 900 K و300 K.

   .1 $1 - 300/900$.

الإجابة: 66.7%.

2. توصل مضخة حرارية 12 kW بمعامل COP قدره 4. أوجد القدرة الكهربائية والحرارة المأخوذة من الخارج.

.W = 12/4; Q_L = 12 − 3 .1

الإجابة: 3 kW و9 kW.

3. أوجد Δs لـ 1 kg من الهواء من 300 K و100 kPa إلى 600 K و100 kPa.

.1.005 ln 2 .1

الإجابة: 0.697 kJ/(kg·K).

4. أوجد إكسيرجي 500 kJ من الحرارة عند 1000 K مع T_0 = 300 K.

.500 × 0.7 .1

الإجابة: 350 kJ.

5. أوجد كفاءة أوتو عند r = 9.

.1 − 9^(−0.4) .1

الإجابة: 58.5%.

6. لدورة تبريد q_L = 150 kJ/kg و w = 37.5 kJ/kg. أوجد COP_R وCOP_HP.

.150/37.5 .1

الإجابة: 4.0 و5.0.

ورقة الصيغ

$$\eta = 3412/\text{heat rate},\ v = V/m$$

$$pv = RT,\ y = y_f + x\,y_{fg}$$

$$W_b = \int p\,dV,\ W = mRT\ln(V_2/V_1)$$

$$Q - W = \Delta U,\ h = u + pv$$

$$\Delta u = c_v\Delta T,\ \Delta h = c_p\Delta T,\ Q = mc\Delta T$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(\Delta h + \Delta V^2/2 + g\Delta z)$$

$$\eta = W/Q_H,\ COP_R = Q_L/W,\ COP_{HP} = Q_H/W$$

$$\eta_{Carnot} = 1 - T_L/T_H$$

$$\Delta s = c_p\ln(T_2/T_1) - R\ln(p_2/p_1)$$

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(k-1)/k}$$

$$\eta_{Otto} = 1 - r^{1-k},\ \eta_{Brayton} = 1 - r_p^{(1-k)/k}$$

$$X_Q = Q(1 - T_0/T),\ I = T_0 S_{gen}$$

$$w_p = v\Delta p,\ COP_R = (h_1 - h_4)/(h_2 - h_1)$$

الثوابت

الثابت	القيمة
ثابت الغازات العام	R_u = 8.314 kJ/(kmol·K)
الهواء (غاز مثالي، درجة حرارة الغرفة، قيم الكتب الدراسية)	R = 0.287 kJ/(kg·K), c_p = 1.005, c_v = 0.718 kJ/(kg·K), k = 1.4
الماء السائل (قيمة الكتب الدراسية)	c = 4.18 kJ/(kg·K)
الحرارات الكامنة (قيم الكتب الدراسية)	انصهار الجليد 334 kJ/kg؛ التبخر عند 100 °C 2257 kJ/kg
وحدات الطاقة	1 kWh = 3600 kJ; 1 Btu = 1.055 kJ; 1 kWh = 3412 Btu
درجة الحرارة المطلقة	T(K) = T(°C) + 273.15

المصدر: NIST: CODATA value of the molar gas constant (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?r)

نصوص وبيانات ومحاكاة مجانية

استخدم هذه المحاضرات وبيانات الخواص والمحاكاة المجانية إلى جانب المقرر.

- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): ملاحظات محاضرات ومسائل مجانية من MIT.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): ملاحظات مجانية عن الديناميكا الحرارية من MIT.
- OpenStax University Physics Volume 2, Chapter 3: The first law of thermodynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-introduction): فصل من كتاب مجاني.
- OpenStax University Physics Volume 2, Chapter 4: The second law of thermodynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-introduction): فصل من كتاب مجاني.
- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): جداول مجانية لخواص البخار ومواد التبريد.
- PhET: Gas Properties (https://phet.colorado.edu/en/simulations/gas-properties): الضغط والحجم ودرجة الحرارة بشكل تفاعلي.

مسرد المصطلحات

كاظم
لا انتقال للحرارة.

نسبة الشغل الراجع
شغل الضاغط مقسومًا على شغل التوربين.

COP
معامل أداء الثلاجة أو المضخة الحرارية.

دورة كارنو
دورة عكوسة بين خزانين؛ أفضل ما يمكن.

حجم التحكم
منطقة في الفضاء يمكن للكتلة عبورها.

الحالة الميتة
الاتزان مع المحيط.

الإنثالبي
h = u + pv.

الإنتروبيا
خاصية فيها dS = δQ_rev/T؛ تقيس اللاانعكاسية.

الإكسيرجي
أقصى شغل مفيد يمكن الحصول عليه.

المحرك الحراري
جهاز يحول الحرارة إلى شغل في دورة.

المضخة الحرارية
جهاز ينقل الحرارة من البارد إلى الساخن باستخدام الشغل.

معدل الحرارة
Btu من الوقود لكل kWh مولَّد.

أيزنتروبي
إنتروبيا ثابتة؛ عكوس وكاظم.

الحرارة الكامنة
الطاقة اللازمة لتغير الطور عند درجة حرارة ثابتة.

جودة البخار
الكسر الكتلي للبخار في خليط مشبع.

دورة رانكن
دورة القدرة البخارية: مضخة، مرجل، توربين، مكثف.

العملية العكوسة
عملية مثالية بلا توليد للإنتروبيا.

التشبع
حالة يتعايش فيها السائل والبخار.

الحرارة النوعية
الطاقة اللازمة لرفع 1 kg بمقدار 1 K.

الخنق
انخفاض الضغط عند إنثالبي ثابت.

معايير التقييم الذاتي

لا تُمنح درجة ولا ساعات معتمدة. استخدم هذا لتقيّم بصدق أين أنت في كل وحدة.

المستوى	كيف يبدو
4 · إتقان	يرسم الأنظمة والمخططات، ويجد الحالات بشكل صحيح، ويكتب موازنات كاملة للكتلة والطاقة والإنتروبيا، ويتحقق مقارنة بحدود كارنو، ويجري المختبرات بأمان.
3 · متمكن	يحل مسائل التدريب مع أخطاء عرضية في الجداول أو الوحدات.
2 · قيد التطور	يتبع الأمثلة المحلولة لكنه يخلط بين الأنظمة المفتوحة والمغلقة، أو يستخدم °C في النسب.
1 · مبتدئ	يعوض الأرقام في الصيغ دون رسم للنظام؛ ويحتاج إلى مراجعة الوحدة.

الأوزان المقترحة إذا أردت درجة

الجزء	الوزن
تمارين	20%
المختبرات	25%
مجموعة تدريب منتصف الفصل	25%
مجموعة التدريب النهائية	30%

استهدف المستوى 3 أو أعلى في كل وحدة قبل الانتقال إلى الدورة التالية.

دورات ذات صلة

- الديناميكا الهوائية I AERO 310
- ميكانيكا الموائع ENGR 330
- أداء الطائرات AERO 320
- كل الدورات