

4 الآلات والثلاجات Engines and Refrigerators

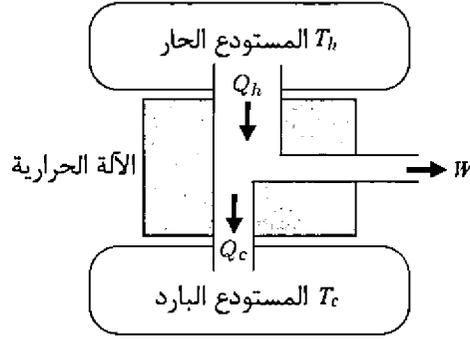
1.4 الآلات الحرارية Heat Engines

تعرف الآلة الحرارية بأنها الأداة التي تمتص الحرارة، وتحول جزءاً منها إلى شغل، ومن أمثلة ذلك المولد البخاري، وألة الاحتراق الداخلي. في المكانن الحرارية لا يتم تحويل الحرارة بصورة كاملة إلى شغل، حيث يرافق تدفق الحرارة إلى الآلة الحرارية زيادة في الإنتروبي التي يجب التخلص منها قبل أن تبدأ الدورة الثانية. وعليه، فإن أي آلة حرارية يجب أن تطرح جزءاً من الحرارة إلى المحيط الخارجي في كل دورة. والشغل الناتج عن الآلة الحرارية هو الفرق بين الحرارة الممتصة والحرارة المتدفقة إلى الخارج.

يهدف هذا الجزء إلى تحديد كمية الحرارة التي تتحول إلي شغل دون معرفة تفصيلية بطريقة عمل الآلة من الناحية الميكانيكية المفصلة. ويعرض الشكل 1.4 مخططاً يبين تدفق الحرارة إلى داخل الآلة وإلى المحيط، حيث تزود الآلة بالحرارة من المستودع الحار (hot reservoir) وتمتص الحرارة الخارجة عن طريق المستودع البارد (cold reservoir)، حيث إن T_h درجة حرارة المستودع الحار، و T_c درجة حرارة المستودع البارد.

(يعني المستودع في الترموديناميكاً، ذلك الشيء الذي لا تتغير درجة حرارته، عندما يكتسب أو يفقد أي كمية من الحرارة. وفي الممكنة البخارية يمثل مكان احتراق الوقود بالمستودع الحار، والمحيط الخارجي بالمستودع البارد).

الشكل 1.4: مخطط لتدفق الحرارة لمكنة حرارية. تدخل الطاقة بوصفها حرارة من المستودع الحار، وتنساب بوصفها شغلاً وحرارة مفقودة، حيث تتسرب الحرارة من خلال المستودع البارد.



إذا كانت كمية الحرارة المضافة إلى المستودع الحار في فترة زمنية معينة، و Q_c كمية الحرارة الخارجة إلى المستودع البارد، و W الشغل الصافي، وافترض أن هذه الكميات موجبة. فغندئذ يُعدّ الشغل المنجز هو الفائدة من الآلة الحرارية، والتكلفة لعمل الآلة هو الحرارة الممتصة، وعليه تعرف كفاءة الآلة الحرارية بأنها الفائدة / التكلفة أي:

$$(1.4) \quad e \equiv \frac{\text{benefit}}{\text{cost}} = \frac{W}{Q_h}$$

ولكن ما أعلى كفاءة لآلة حرارية عند درجات حرارة T_c و T_h ؟
يمكن الإجابة عن هذا السؤال بالرجوع إلى القانون الأول في الترموديناميكا، واعتبار الآلة الحرارية تعمل بدورات مغلقة متتالية.

$$(2.4) \quad Q_h = Q_c + W$$

يحذف W من هذه المعادلة باستخدام المعادلة 1.4 وتصبح كفاءة الآلة الحرارية بالشكل الآتي:

$$(3.4) \quad e = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h}$$

المعادلة (3.4) تعني أن الكفاءة لا يمكن أن تكون أكبر من 1، وتساوي 1 في حالة واحدة، وهي $Q_c = 0$. طبقاً للقانون الثاني في الترموديناميكا الذي يبين أن الإنتروبي الكلية للآلة الحرارية والمحيط يجب أن تزداد، حيث إن حالة الآلة الحرارية لا تتغير، لذلك فإن الإنتروبي يجب أن تساوي على الأقل الإنتروبي الممتصة. الإنتروبي الناتجة عن المستودع الحار هي: Q_h / T_h والإنتروبي المدفوعة إلى المستودع البارد هي Q_c / T_c ، لذلك طبقاً للقانون الثاني، فإن:

$$(4.4) \quad \frac{Q_c}{Q_h} \geq \frac{T_c}{T_h} \quad \text{أو} \quad \frac{Q_c}{T_c} \geq \frac{Q_h}{T_h}$$

بالتعويض في المعادلة 3.4 نجد أن:

$$(5.4) \quad e \leq 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

مثال: إذا كانت $T_h = 500\text{ K}$ و $T_c = 500\text{ K}$ فإن أعلى كفاءة للمكنة الحرارية هي 40% للحصول على أعلى كفاءة يجب أن يكون المستودع الحار، حاراً جداً أو المستودع البارد بارداً جداً أو الحالتين. وكلما قلت النسبة T_c / T_h زادت كفاءة الآلة الحرارية. ويمكن بسهولة عمل الآلة بكفاءة أقل من الحد $1 - T_c / T_h$ ، وذلك بإنتاج إنتروبي إضافية خلال هذه العملية، ولتطرح هذه الإنتروبي خارجاً يجب إضافة حرارة إلى المستودع البارد، ويؤدي ذلك إلى وجود كمية أقل من الحرارة لتتحول إلى شغل. وأوضح طريقة لإنتاج إنتروبي جديدة هي من خلال عمليات الانتقال الحراري نفسها، فعلى سبيل المثال، عند خروج Q_h من المستودع الحار، تكون الإنتروبي المفقودة من هذا المستودع تساوي Q_h / T_h ، وإذا كانت درجة حرارة الآلة في هذه اللحظة أقل من T_h ، تكون الإنتروبي المرافقة للحرارة الداخلة أكبر من Q_h / T_h .

ولمعرفة حدود المعادلة (5.4) لكفاءة الآلة الحرارية، نرجع إلى القانون الأول والقانون الثاني في الترموديناميكاً. فمن القانون الأول نجد أنه لا يمكن أن تكون الكفاءة أكبر من 1. أي لا يمكن أن يكون الشغل الناتج أكبر من الحرارة الممتصة، لذلك يمكن إعادة صياغة القانون الأول على النحو الآتي: "لا يمكن الوصول إلى كفاءة = 1 إلا إذا كانت $T_c = 0$ أو $T_h = \infty$ "، ومن الناحية العملية من المستحيل الوصول إلى أي من الحالتين.

السؤال 1.4: الشكل المرافق للسؤال 34.1 يبين دورة مغلقة في منحنى PV لعمليات أجريت على غاز مثالي ثنائي الذرة. إذا افترض أن هذه الدورة لآلة حرارية.

(أ) احسب كفاءة الآلة الحرارية إذا كانت $V_2 = 3 V_1$ و $P_2 = 2 P_1$.

(ب) احسب كفاءة آلة حرارية "مثالية" تعمل بين أعلى درجتين حرارة في الدورة.

السؤال 2.4: محطة توليد طاقة كهربائية قدرتها (10^9 watts) ، 1GW ، تعمل بين درجتين حرارة بخار 500°C ودرجة حرارة المحيط 20°C .

(أ) ما أعلى كفاءة ممكنة لهذه المحطة؟

(ب) إذا افترض أنه تم اكتشاف مادة تتحمل ضغط البخار عند 600°C . واستبدل بالأنابيب والمستودعات الحرارية لهذه المحطة هذه المادة، وبيعت الكهرباء الإضافية الناتجة بسعر 5 سنت لكل كيلوات - ساعة، ما المبلغ الذي يمكن أن تكسبه المحطة خلال عام (افتراض أن المحطة تستهلك كمية الوقود نفسها التي كانت تستهلكها قبل استبدال المواد الجديدة).

السؤال 3.4: محطة تنتج 1GW من الكهرباء، بكفاءة 40%.

(أ) ما معدل الحرارة التي تتسرب من المحطة إلى المحيط؟

(ب) إذا كان المستودع البارد عبارة عن نهر يتدفق خلاله الماء بسرعة $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ، ما مقدار الزيادة في درجة حرارة النهر؟

(ج) لتجنب التلوث الحراري للنهر، يمكن تبريد المحطة بعمليات تبخر الماء من النهر، ما معدل سرعة التبخر (قد يكون ذلك مكلفاً ولكنه ضروري في بعض الحالات)، ما معدل سرعة التبخر؟ ما مقدار الجزء المتبخر من النهر؟

السؤال 4.4: اقترح بعض العلماء استخدام التدرج الحراري في مياه المحيط لتشغيل آلة حرارية. إذا كانت درجة حرارة سطح المحيط 22°C ودرجة الحرارة عند قاع المحيط 4°C .

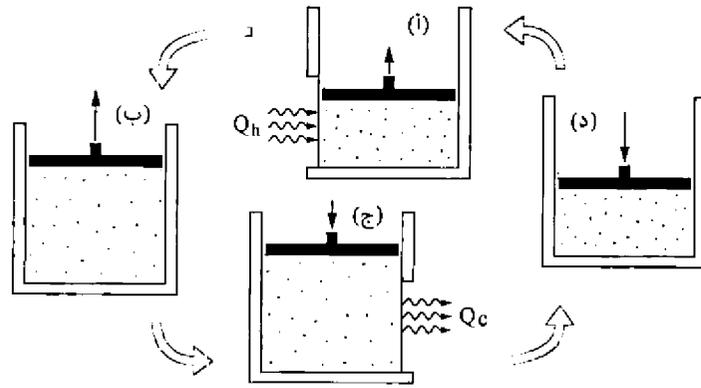
(أ) ما أعلى كفاءة ممكنة لآلة حرارية تعمل بين هاتين الدرجتين؟

(ب) إذا كانت الآلة تنتج 1 GW من الكهرباء، ما أقل كمية ماء يمكن استخدامها (لامتصاص الحرارة منها) في كل ثانية.

دورة كارنو The Carnot Cycle

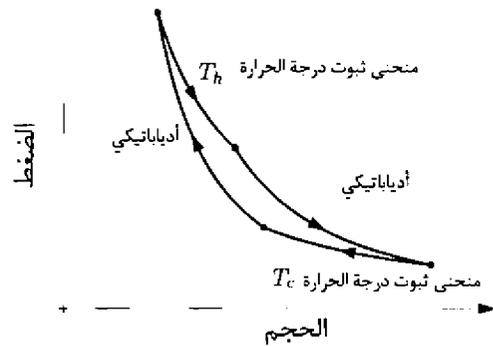
سنوضح الآن كيف يمكن عمل آلة حرارية لنصل إلى القيمة العظمى الممكنة للكفاءة عند درجات حرارة T_h و T_c . تعرف مادة التشغيل التي تعمل عليها الآلة الحرارية، بأنها المادة التي تمتص الحرارة. وتنجز الشغل، وتقذف الحرارة الزائدة إلى المحيط. ولنبدأ لبناء فكرة عن دورة لآلة حرارية، بغاز يمتص كمية حرارة Q_h من المستودع الحار. ففي هذه الحالة تقل إنتروبي المستودع بمقدار Q_h / T_h ، ولتجنب استحداث أي إنتروبي جديدة، فإننا نحتاج إلى أن تكون درجة حرارة الغاز $T_{gm} = T_h$ مساوية لدرجة حرارة المستودع الحار، وهذا غير ممكن؛ لأن الحرارة لا تنتقل بين جسمين لهما درجة الحرارة نفسها. لذلك دعنا نجعل درجة حرارة الغاز أقل قليلاً من درجة حرارة المستودع، ونحافظ على هذه الدرجة للغاز بالسماح له بالتمدد عند امتصاصه لحرارة، ويتطلب ذلك أن ينضغط الغاز في عملية أيزوثرمية. وبالمثل، خلال الخطوة من الدورة التي تطرح بها الحرارة إلى المستودع البارد، ولتجنب استحداث أي إنتروبي جديدة، ينبغي أن تكون درجة حرارة الغاز أكبر بشكل قليل من درجة حرارة المستودع البارد (T_c) ما يتطلب انضغاطه في عملية أيزوثرمية. والسؤال كيف يمكن أن نجعل الغاز يغير درجة حرارته من درجة إلى أخرى والعودة ثانية إلى الدرجة نفسها، دون أن تفقد أي كمية من الحرارة بين هاتين الدرجتين (T_c / T_h) لذلك يجب أن تتم الخطوات بين هاتين الدرجتين في عملية أدياباتيكية. وفي هذه الحالة، فإن الدورة يجب أن تتكوّن من أربع عمليات، كما هو موضح في الشكلين 2.4 و 3.4 ويمكن تلخيص هذه العمليات كما يأتي:

تمدد أيزوثيرمي عند T_h ، تمدد أدياباتيكي من T_h إلى T_c ، تمدد أيزوثيرمي عند T_c وانضغاط أدياباتيكي بين T_c و T_h . وهذه الدورة تعرف بدورة كارنو (Carnot Cycle). واقترحت أول مرة من قبل Sadi Carnot عام 1824.



الشكل 2.4: الخطوات الأربع في دورة كارنو (أ) عملية تمدد أيزوثرمية عند T_h حيث يتم امتصاص الحرارة. (ب) عملية تمدد أدياباتيكية إلى T_c . (ج) عملية انضغاط أيزوثرمية عند T_c حيث تفقد حرارة في هذه العملية. (د) انضغاط أدياباتيكي للعودة إلى T_h حيث يجب وضع النظام على مستودع حار في الخطوة أ، وعلى مستودع بارد في الخطوة ج.

الشكل 3.4: منحنى PV لدورة كارنو تعمل على غاز مثالي أحادي الذرة.



السؤال 5.4: أثبت أن دورة كارنو التي تعمل على غاز مثالي لها كفاءة تساوي $1 - T_c / T_h$.

السؤال 6.4: للحصول على كمية شغل أكبر من كونه متناهياً في الصغر (infinitesimal)، يجب أن نحافظ على درجة حرارة مادة التشغيل أقل من درجة حرارة المستودع الحار، وأعلى من درجة حرارة المستودع البارد بمقدار غير متناه في الصغر. فإذا افترض أن درجة حرارة مادة التشغيل عند امتصاص حرارة من المستودع الحار، T_{cw} عندما تقذف الحرارة إلى المستودع البارد وتحت أي ظروف، فإن معدل انتقال الحرارة يتناسب طردياً مع الفرق بين درجات الحرارة.

$$\frac{Q_h}{\Delta t} = K (T_h - T_{cw}) \quad \text{و} \quad \frac{Q_c}{\Delta t} = K (T_{cw} - T_c)$$

حيث افترض أن الثابت K متساوٍ في العمليتين. ونفترض أيضاً أن الزمن المستغرق للعملياتين متساوٍ، أي

إن Δt لها المقدار نفسه للعملياتين*.

(أ) افترض أنه لا يوجد استحداث في الإنتروبي خلال الدورة ما عدا خلال العمليتين اللتين يحدث عندهما انتقال حراري. اشتق معادلة تربط درجات الحرارة T_h, T_c, T_{hw}, T_{cw} .

(ب) افترض أن الزمن اللازم لإتمام العمليات الأدياباتية مهملة.

اكتب تعبيراً رياضياً للقدرة (الشغل لوحدة الزمن)، تنتج هذه الدورة. استخدم القانون الأول والقانون الثاني في الترموديناميك، لكتابة القدرة بدلالة درجات الحرارة الأربعة والثابت K ثم احذف T_{cw} باستخدام نتيجة الفرع (أ).

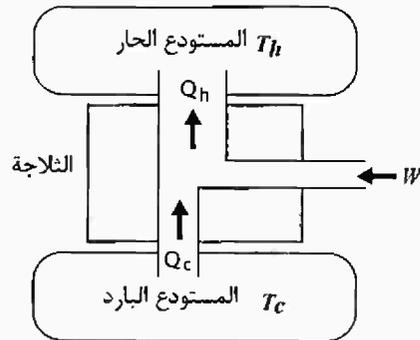
(ج) عندما تكون تكلفة تصنيع الآلة الحرارية أكبر كثيراً من تكلفة الوقود، فإنه يفضل أن يكون الاهتمام للوصول إلى أعلى قدرة ممكنة أكبر من الاهتمام بالوصول إلى أعلى كفاءة. بين أنه عند تثبيت درجتي الحرارة T_h و T_c فإن التعبير الرياضي الذي وجدته في الفرع (ب) تكون قيمته العظمى عند

$$T_{hw} = \frac{1}{2}(T_h + \sqrt{T_h T_c})$$

(د) بين أن كفاءة الآلة هي $1 - \sqrt{T_c/T_h}$. ثم احسب كفاءة الآلة التي تعمل على الفحم الحجري، إذا كانت $T_h = 600^\circ \text{C}$ و $T_c = 25^\circ \text{C}$. وقارن كفاءة هذه الآلة بكفاءة آلة كارنو التي تعمل بين هاتين الدرجتين. أي من الكفاءتين أقرب إلى الكفاءة الواقعية (نحو 40% لمحطة توليد طاقة تعمل على الفحم الحجري)⁽³⁸⁾.

2.4 الثلجات Refrigerators

تعرف الثلجة بأنها الآلة التي تعمل عكس عمل الآلة الحرارية. وللحصول على مخطط عام لعمل الثلجة، نعكس اتجاه الأسهم في الشكل 1.4، لنحصل على شكل عام يبين اتجاه الحرارة والشغل، كما هو موضح في الشكل 4.4، وسيتم اعتبار الكميات للشغل والحرارة موجبة كما تم في الآلة الحرارية. الحرارة الممتصة من داخل الثلجة (المستودع البارد) Q_c ، والطاقة الكهربائية التي تزود بها الثلجة تمثل الشغل W والحرارة الخارجة.



الشكل 4.4: انسياب الطاقة إلى الثلجة أو المكيف، حيث يُعدّ داخل الثلجة هو المستودع البارد، والفضاء المحيط بالثلجة هو المستودع الحار، ويولد الشغل من الطاقة الكهربائية التي تزود بها الثلجة.

(38) ليس من الضروري اعتبار هذين الشرطين لإيجاد نتيجة الفرع د : ارجع الى

وفي حالة المكيف يُعدّ داخل البيت هو المستودع البارد، وخارج البيت هو المستودع الحار⁽³⁹⁾.

والسؤال كيف نحسب كفاءة الثلاجة؟ العدد الذي يهمنا هو (الفائدة/ التكلفة). حيث تمثل الفائدة في هذه الحالة، و W تمثل التكلفة. ولتجنب الالتباس مع المعادلة 1.4 ستسمى هذه النسبة معامل الإنجاز .coefficient of performance (COP).

$$(6.4) \quad \text{COP} = \frac{\text{benefit}}{\text{cost}} = \frac{Q_c}{W}$$

وبالرجوع إلى القانون الأول والثاني في الثرموديناميكيا يمكن اشتقاق معامل الإنجاز بدلالة درجتي الحرارة. T_h, T_c فمن القانون الأول، فإن $Q_h = Q_c + W$ ، أي إن:

$$(7.4) \quad \text{COP} = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} = \frac{1}{Q_h / Q_c - 1}$$

لاحظ أنه لا يوجد حد أعلى لهذه القيمة، حيث يسمح القانون الأول بأن تكون النتيجة أكبر من 1. ومرز القانون الثاني، يجب أن تكون الإنتروبي المضافة إلى المستودع الحار تساوي على الأقل الإنتروبي التي امتصت من المستودع البارد.

$$(8.4) \quad \frac{Q_h}{T_h} \geq \frac{Q_c}{T_c} \quad \text{أو} \quad \frac{Q_h}{Q_c} \geq \frac{T_h}{T_c}$$

(لاحظ أن هذه العلاقة عكس العلاقة في المعادلة 4.4، لأن الإنتروبي تتدفق في اتجاه معاكس). وعند تعويض ذلك في المعادلة 7.4 ينتج:

$$(9.4) \quad \text{COP} \leq \frac{1}{T_h / T_c - 1} = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$

يمكن اعتبار T_h للثلاجة المستخدمة في المنازل 298 K و T_c نحو 255 K (على افتراض وجود جهاز تجميع (Freezer)). يكون معامل الإنجاز في هذه الحالة يساوي 5.9. وهذا يعني أن كل جول من الكهرباء يتسبب في سحب نحو 5.9 J من الحرارة من داخل الثلاجة. وفي هذه الحالة المثالية، فإن كمية الحرارة المناسبة إلى المحيط هي 6.9 J ويكون أعلى إنجاز عندما يكون الفرق بين T_c و T_h أقل ما يمكن. يكون معامل إنجاز المبردات المستخدمة في تبريد الهيليوم للوصول إلى الهيليوم السائل (4 K) أقل من ذلك بكثير.

وإذا ما استخدمت دورة كارنو، ولكن في اتجاه معاكس، يمكن عمل ثلاجة بأعلى عامل إنجاز. ولجعل التدفق الحراري يسير في اتجاه معاكس، فإن درجة حرارة مادة التشغيل يجب أن تكون أعلى من T_h خلال عملية قذف الحرارة إلى الخارج. وأقل قليلاً من T_c خلال عملية امتصاص الحرارة، وهذا غير ممكن من الناحية العملية؛ لأن الانتقال الحراري أبطأ من ذلك بكثير. وسيتم وصف ثلاجة أكثر واقعي للاستخدام العملي في الجزء 4.4. وقد كان للآلات الحرارية والثلاجات أهمية تاريخية في صياغة القانون الثاني في الثرموديناميكيا.

(39) يحتوي مكيف الهواء على مروحة تساعد على عملية تسريع انتقال الحرارة للهواء المحيط بالمكيف من الخارج، ولانسحاب الهواء مطلقاً من المستودع البارد.

وُعطت الإنتروبي هذه الأهمية في الفيزياء الحرارية.

كانت الصياغة الأولى للقانون الثاني من خلال التجربة العملية، حيث كان النص «في جميع الآلات هناك حرارة مفقودة، وجميع الثلجات تحتاج إلى شغل داخل».

ويمكن لقوانين الترموديناميكا أن تنهار إذا تمت صناعة الآلة الحرارية أو الثلجة بكفاءة أو معامل إنجاز يفوق ما تتوقعه دورة كارنو (الأسئلة 16.4 و 17.4). وقد أقر كارنو بأنه يجب أن تكون هناك كمية مرافقة للحرارة تخرج من المستودع الحار، وتدخل إلى المستودع البارد، وتكون قيمتها متساوية. ولم يفرق كارنو في ذلك الوقت بين هذه الكمية، وما يسمى حاليًا الحرارة. حيث كان هناك جدال بين العلماء للتفريق بين الحرارة وأنواع الطاقة الأخرى.

وبقيت الكمية Q/T غامضة حتى عام 1865 إلى أن أطلق كلاوسيوس على هذه الكمية «الإنتروبي» ولم يتم فهم الإنتروبي حتى عام 1877 إلى أن تم توضيحها من قبل بولتزمان.

السؤال 7.4: لماذا يتم تركيب مكيف الهواء بالقرب من النافذة (أو على النافذة) وليس في وسط الغرفة؟

السؤال 8.4: إذا تم فتح باب ثلاجتك، هل يتسبب ذلك في تبريد المطبخ؟ اشرح.

السؤال 9.4: قدر أعلى معامل إنجاز لمكيف مستخدمًا درجات حرارة معقولة للمستودعات الحرارية.

السؤال 10.4: ما مقدار الطاقة الكهربائية اللازمة لتزويد ثلاجة، تتدفق منها حرارة إلى الخارج بمعدل 300 watts، إذا كانت العملية مثالية.

السؤال 11.4: ما أعلى قيمة لمعامل إنجاز في آلة تبريد تعمل بين درجتي الحرارة 1 K و 0.01 K؟

السؤال 12.4: اشرح لماذا لا يمكن استخدام الدورات المبينة في الأشكال 34.1 و 1.4 (بعكس الاتجاه) بوصفها ثلاجة؟

السؤال 13.4: يتناسب معدل انتقال الحرارة إلى بناية مكيفة في يوم حار مع الفرق بين درجتي الحرارة في الداخل والخارج. $(T_h - T_c)$ ، إذا كان انتقال الحرارة من الخارج إلى الداخل يتم بعملية التوصيل الحراري، فإن هذا التناسب يكون صحيحًا. بين أن تكلفة تبريد بناية يتناسب بشكل تقريبي مع مربع الفرق في درجات الحرارة بين الداخل والخارج. ناقش الدلالات وأعط أمثلة عددية.

السؤال 14.4: المضخة الحرارية heat pump هي أداة تقوم بتدفئة البناية بضخ الحرارة إلى الداخل من الجو الخارجي البارد. فتعمل بنفس طريقة عمل الثلجة، ولكنها تقوم بتدفئة المستودع الحار بدلًا من تبريد المستودع البارد، اعتبر أن جميع المتغيرات الآتية موجبة:

$$T_h = \text{درجة الحرارة داخل بناية.}$$

$$T_c = \text{درجة الحرارة الخارجية.}$$

$$Q_h = \text{كمية الحرارة الداخلية إلى البناية خلال يوم واحد.}$$

$$Q_c = \text{كمية الحرارة التي امتصت من الجو خلال يوم واحد.}$$

الطاقة الكهربائية التي زودت بها المضخة الحرارية خلال يوم واحد W

(أ) اشرح لماذا يمكن تعريف معامل الإنجاز للمضخة الحرارية Q_h / W .

(ب) استخدم قانون حفظ الطاقة فقط، ثم أوجد العلاقة بين Q_c ، Q_h و W وهل يسمح قانون حفظ الطاقة بأن تكون قيمة معامل الإنجاز أكبر من 1.

(ج) استخدم القانون الثاني في الترموديناميكا لاستنتاج الحد الأعلى لمعامل الإنجاز بدلالة درجات الحرارة T_c و T_h فقط.

(د) تُعدّ المضخة الحرارية أفضل من الفرن الكهربائي؟ اشرح سبب ذلك. (أدخل بعض التقديرات العددية)

السؤال 15.4: تستخدم بعض الثلاجات اللهب بوصفه مصدرًا للشغل (ثلاجة الامتصاص)⁽⁴⁰⁾ حيث تستخدم هذه الثلاجة وقود البروبان Propane، ويستخدم هذا النوع من الثلاجات في المناطق التي لا تتوافر فيها الكهرباء.

اعتبر القيم الآتية موجبة:

$$Q_f = \text{الحرارة الداخلة إلى الثلاجة من اللهب.}$$

$$Q_c = \text{الحرارة المستخرجة من الثلاجة.}$$

$$Q_r = \text{الحرارة المفقودة إلى الغرفة.}$$

$$T_f = \text{درجة حرارة اللهب.}$$

$$T_c = \text{درجة الحرارة داخل الثلاجة.}$$

$$T_r = \text{درجة حرارة الغرفة.}$$

(أ) يعرف معامل الإنجاز لهذه الثلاجة بالعلاقة Q_c / Q_f ، اشرح ذلك.

(ب) بتطبيق قانون حفظ الطاقة فقط، أوجد العلاقة بين Q_r ، Q_c ، Q_f وهل يسمح قانون حفظ الطاقة بأن تكون قيمة معامل الإنجاز أكبر من 1.

(ج) استخدم القانون الثاني في الترموديناميكا لاستنتاج الحد الأعلى لمعامل الإنجاز بدلالة درجات الحرارة فقط T_f ، T_c ، T_r .

السؤال 16.4: أثبت أنه إذا كانت هناك آلة حرارية ذات كفاءة أفضل من القيمة المثالية في معادلة (5.4)، يمكنك أن تكون منها ثلاجة كارنو لتصنع ثلاجة لا تحتاج إلى شغل داخل إليها.

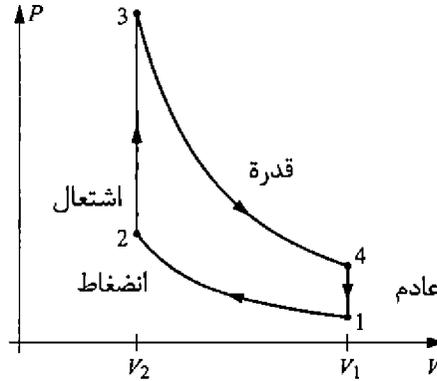
(40) لمعرفة كيف تعمل هذه الثلاجة، ارجع إلى

3.4 الآلات الحرارية الحقيقية Real Heat Engines

تم في الجزء السابق معالجة الآلات الحرارية والثلاجات بطريقة مثالية والوصول إلى الحد النظري للكفاءة أو معامل الإنجاز. والحدود النظرية مفيدة في كيفية اعتماد الآلة الحرارية أو الثلاجة على درجات الحرارة التشغيلية. وتمثل حدًا للمقارنة مع الآلات الحرارية والثلاجات الحقيقية. وعلى سبيل المثال إذا كانت درجات الحرارة التشغيلية لآلة حرارية هي $T_c = 300 \text{ K}$ و $T_h = 600 \text{ K}$ وكفاءتها 4.5%، فإن هناك دافعًا لنا لتحسين كفاءة هذه الآلة، حيث إن الكفاءة النظرية 50%. ولن يتم في هذا الجزء شرح مفصل عن الآلات الحرارية أو الثلاجات من حيث صناعتها، ولكن سيتم مناقشة الدورات الحقيقية لهذه الآلات.

آلات الاحتراق الداخلي Internal Combustion Engines

إن غالبية الآلات تعمل على الجازولين؛ لذلك، فإن المادة التشغيلية هي خليط من الهواء وبخار الجازولين. ويتلخص عمل هذه المكنة كما يأتي: يدفع الغاز في الأسطوانة عن طريق مكبس في عملية أدياباتية، ويتم إشعال الخليط عن طريق شمعة الإشعال spark plug ما يتسبب في ارتفاع في درجة الحرارة والضغط مع ثبوت الحجم. ويتسبب ضغط الخليط المرتفع في دفع المكبس إلى أعلى في عملية تمدد أدياباتية ينتج عنها شغل ميكانيكي. وفي النهاية تندفع الغازات المحترقة إلى الخارج لتبدأ دورة جديدة (الشكل 5.4). لقد تم تمثيل عملية تبديل الغاز، وكأنها عملية تمت بتخفيض ضغطه نتيجة لفقدانه كمية من الحرارة، وما يحدث هنا في الحقيقة هو أن يدفع المكبس بالخليط القديم خلال صمام، ويسحب خليط جديد من الهواء وبخار الجازولين خلال صمام آخر، دافعًا الحرارة إلى الخارج دون أن يكون هناك شغل منجز خلال هذه العملية. وتسمى هذه الدورة دورة أوتو Otto cycle (نسبة إلى المخترع الألماني Nikolous August otto).



الشكل 5.4: دورة أوتو المثالية التي تمثل بشكل تقريبي ما يحدث في آلة الاحتراق الداخلي التي تعمل على الجازولين تكون نسبة الانضغاط V_1/V_2 أكبر مما هو موضح هنا (من 8 إلى 10).

يُعدّ المستودع الحار في هذه الآلة الاحتراق الداخلي لخليط الهواء وبخار الجازولين (غاز في درجة حرارة مرتفعة وضغط مرتفع) وكفاءة هذه الآلة هي مقدار الشغل المنجز مقسومًا على الحرارة الممتصة خلال عملية الاحتراق. إذ افترض أن خليط الهواء وبخار الجازولين غاز مثالي، فإن كفاءة هذه الآلة بدلالة الحجم (السؤال 18.4) هي:

$$(10.4) \quad e = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1}$$

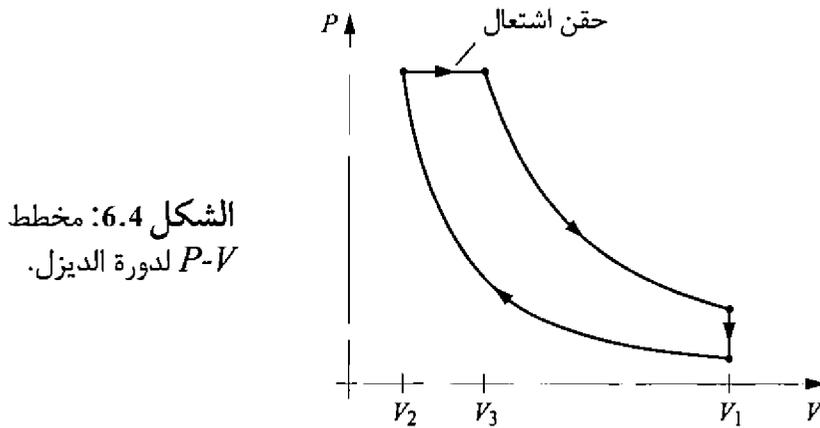
حيث إن V_1/V_2 نسبة الانضغاط و γ هي الأس الأديباتيكي الذي عرف في الجزء 5.1 ويساوي للهواء (غاز مثالي ثنائي الذرة) $\gamma = 7/5$ وإذا كانت نسبة الانضغاط 8، فإن ذلك يؤدي على كفاءة 56%، $[1 - (1/8)^{2.5} = 0.56]$ وهذه كفاءة جيدة، ولكنها أقل من كفاءة كارنو تعمل بين درجات الحرارة نفسها. وللمقارنة يفضل كتابة الكفاءة بدلالة درجات الحرارة، حيث يمكن حذف V من المعادلة 10.4 حيث إن $T \propto V^{\gamma-1}$ للعمليات الأديباتيكية تكون ثابتة،

وتكتب الكفاءة كما يأتي:

$$(11.4) \quad e = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3}$$

ونسبة درجة الحرارة في هذه المعادلة أكبر من نسبة T_1/T_3 في معادلة كفاءة دورة كارنو. (تكون كفاءة المركبات التي تعمل بالاحتراق الداخلي أقل من الكفاءة المحسوبة، وذلك لوجود الاحتكاك، والحرارة المفقودة عن طريق التوصيل الحراري، وعدم الاحتراق التام للوقود، وتتراوح الكفاءة الفعلية بين 20% و30%).

والطريقة الواضحة هنا لزيادة كفاءة آلة الاحتراق الداخلي التي تعمل على الجازولين هي زيادة نسبة الانضغاط، ولسوء الحظ، فإن زيادة هذه النسبة تتسبب في الاشتعال الذاتي لخليط الغازات بسبب ارتفاع درجة حرارتها، حيث يرتفع الضغط قبل الوصول إلى النقطة 2 في الشكل 5.4. ولتجنب ذلك في الآلة الحرارية التي تعمل على الديزل يتم ضغط الهواء أولاً، ثم رش وقود الديزل عند وصول درجة حرارة الهواء إلى الدرجة التي يمكن أن يحدث عندها الاشتعال الذاتي، ويكون ذلك عند بداية حركة المكبس وبمعدل يحافظ تقريباً على ضغط الغاز في الأسطوانة. يبين الشكل 6.4 مخطط $P-V$ لدورة الآلة الديزل.



الشكل 6.4: مخطط $P-V$ لدورة الديزل.

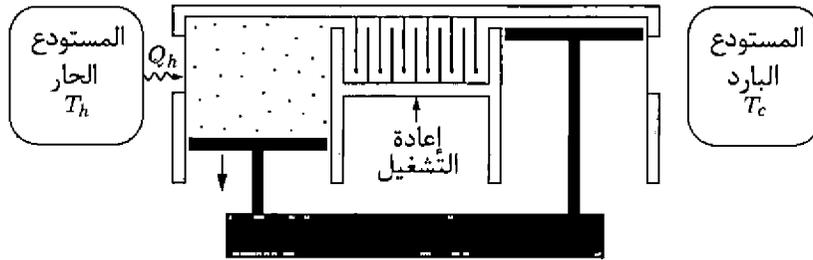
تكون كفاءة دورة الآلة الديزل أقل من كفاءة دورة أوتو لنفس قيم نسبة الانضغاط. ولكن نسبة الانضغاط في الآلة الديزل تصل إلى نحو 30 وهذا يؤدي إلى زيادة كفاءتها (قد تصل إلى 40%). يمكن اشتقاق كفاءة دورة الديزل بدلالة الحجم (نسبة الانضغاط V_1/V_2 ونسبة القطع V_3/V_2). (انظر السؤال 20.4).

السؤال 18.4: اشتق المعادلة 10.4 لكفاءة دورة أوتو.

السؤال 19.4: تتحكم كمية الوقود الداخلة في أسطوانة آلة الاحتراق الداخلي في الشغل المنجز في كل شوط. وكلما زادت كمية الوقود زادت درجة الحرارة، وزاد الضغط عند النقاط 3 و4 في كل دورة. وطبقاً للمعادلة 10.4 فإن الكفاءة تعتمد على نسبة الانضغاط (وهي متساوية في جميع الآلات) وليس على كمية الوقود المستهلكة. هل تعتقد أن هذا الاستنتاج يبقى صحيحاً إذا أخذ الاحتكاك في الحسبان؟ هل تكون كفاءة الآلة الحقيقية أعلى إذا عملت الآلة بقدرة أعلى؟

السؤال 20.4: اشتق علاقة لكفاءة الآلة الديزل بدلالة نسبة الانضغاط V_1/V_2 ونسبة القطع V_3/V_2 . ثم اعتبر أن نسبة الانضغاط متساوية في هذه الدورة ودورة أوتو أثبت أن كفاءة دورة الديزل أقل من كفاءة دورة أوتو، ثم أوجد الكفاءة النظرية لدورة الديزل إذا كانت نسبة الانضغاط = 18 ونسبة القطع = 2.

السؤال 21.4: تُعد الآلة سترلنج Sterling engine آلة حقيقية تمتص الحرارة من مصدر خارجي (الهواء أو أي نوع من الغاز بوصفه مادة تشغيل) وتتكون من أسطوانتين ومكبس. تتصل الأسطوانتان بمستودعات حرارية (الشكل 7.4) وتتصل المكابس بناقل حركة crankshaft. ويمر الغاز بين الأسطوانتين خلال ممر يكون فوق المولد. والمستودع الحراري يتكون من شبكة من الأسلاك تتغير حرارتها من الجانب الحار إلى الجانب البارد. والسعة الحرارية للمولد كبيرة جداً بحيث لا تتأثر درجة حرارته نتيجة لمرور الغاز. والخطوات الأربعة (الأشواط) لهذه الدورة هي كما يأتي:



الشكل 7.4: مخطط الآلة سترلنج، يبين خلال شوط القدرة، عندما يتحرك المكبس المار خارجاً، ويبقى المكبس البارد ثابتاً في مكانه (لم يتم توضيح الربط بين المكبسين).

1. شوط القدرة Power stroke

يتمدد الغاز عند درجة حرارة T_h ، ممتصاً حرارة وبعملية أيزوثرمية، ما يتسبب في تحرك المكبس الحار إلى أعلى، مع بقاء المكبس البارد ثابتاً في مكانه، كما هو موضح في الشكل.

2. يتحرك المكبس الحار بطريقة تتسبب في تحريك المكبس في الأسطوانة الباردة إلى الخارج، ناقلاً الغاز إلى الأسطوانة الباردة عند الحجم الثابت، ويمر الغاز خلال هذه العملية على المولد مسبباً خفض درجة حرارته إلى T_c .

3. شوط الانضغاط Compression Stroke

يتحرك المكبس البارد إلى داخل الأسطوانة في عملية أيزوثرمية متسبباً في عودة حجم الغاز إلى حجمه الأصلي، وتنتقل الحرارة في هذا الشوط إلى المستودع البارد، بينما يبقى المكبس الحار ثابتاً في مكانه.

4. الانتقال إلى الأسطوانة الحارة. يدخل المكبس البارد داخل الأسطوانة، ويبدأ المكبس الحار في حركته إلى الخارج، وبالتالي مرجعاً الغاز إلى الأسطوانة الحارة تحت حجم ثابت. حيث يتدفق الغاز ماراً بالمولد ممتصاً كمية من الحرارة لترتفع حرارته النهائية لتصل إلى T_H .

(أ) ارسم منحنى PV لهذه الدورة.

(ب) أهمل ما يحدث في المولد مؤقتاً، في الخطوة 2، تنتقل الحرارة من الغاز إلى المستودع البارد بدلاً من المولد. وخلال الخطوة 4، يمتص الغاز الحرارة من المستودع الحار. احسب كفاءة الآلة في هذه الحالة مفترضاً أن الغاز يتصرف بوصفه غازاً مثاليًا، وعبر عن نتيجتك بدلالة T_c / T_H ونسبة الانضغاط (النسبة بين أكبر وأصغر حجم) وبيّن أن الكفاءة لهذه الدورة أقل من كفاءة دورة كارنو تعمل بين درجات الحرارة. عوض ببعض الأرقام المفترضة.

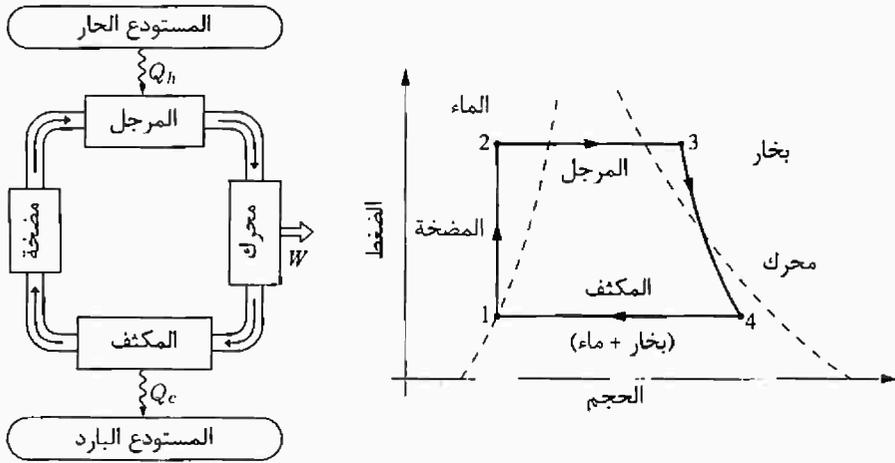
(ج) لا تهمل ما يحدث في المولد، وناقش في هذه الحالة: أن كفاءة الآلة ستلنج تكون هي كفاءة الآلة كارنو نفسها.

(د) ناقش بشيء من التفصيل حسنات الآلة ستلنج وسيئاتها، مقارنة بالآلات الحرارية الأخرى.

The Steam Engine الآلة البخارية

الآلة البخارية من الآلات التي اكتشفت في القرن التاسع عشر، وما زالت مستخدمة في محطات توليد الطاقة حيث ينجز الشغل عن طريق دفع البخار المكبس أو التوربين، ويتم تزويد الحرارة لهذه الآلة بحرق الوقود العضوي، أو استخدام الوقود النووي. يبين الشكل 8.4 مخططاً توضيحياً لهذه الآلة. حيث تدعى الدورة المرسومة في مستوى $P-V$ دورة رانكن Rankin cycle. بدءاً من النقطة (1) يضخ الماء إلى نقطة 2. يضغط مرتفعاً، حيث تضاف إليه الحرارة عند ضغط ثابت. وعند النقطة (3) يصطدم البخار بالتوربين، حيث يتمدد أدبابتيكياً، فيبرد وينخفض ضغطه إلى الضغط الأصلي، وفي النهاية يبرد المائع المتكثف جزئياً عن طريق المكثف (شبكة من الأنابيب متصلة جيداً بالمستودع البارد).

ولا تُعدّ مادة التشغيل في هذه المكنة غازاً مثاليًا، حيث يحدث تكثف للبخار خلال هذه الدورة، لذلك لا توجد طريقة لحساب كفاءة هذه الآلة اعتماداً على مخطط $P-V$ للدورة. ويمكن حساب الكفاءة بمعرفة الضغوط عند جميع النقاط ودرجة الحرارة عند النقطة 3 وبالرجوع إلى جداول البخار steam tables لتقدير الكفاءة لهذه الآلة.



الشكل 8.4: مخطط توضيحي للآلة البخارية، ومنحنى $P-V$ للدورة في هذه الآلة (دورة رانكن)، الخطوط المقطعة تبين أين يكون المائع ماء سائل، بخار، أو ماء وبخار.

بالرجوع إلى الجزء 6.1، الأنثليبي لمادة هي $H = U + PV$ ، لذلك فإن الأنثليبي تساوي الحرارة الممتصة عند ثبوت الضغط (بافتراض لا توجد أشكال أخرى من الشغل). وفي دورة رانكن تمص الحرارة عند ضغط ثابت في المرجل، وتقدف عند ضغط ثابت في المكثف، لذلك يمكن كتابة كفاءة هذه الآلة كما يأتي:

$$(12.4) \quad e = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{H_4 - H_1}{H_3 - H_2} \approx 1 - \frac{H_4 - H_1}{H_3 - H_1}$$

استقريب $H_2 \approx H_1$ تقريب جيد؛ لأن المضخة تضيف كمية حرارة قليلة جداً للماء، وأن القيمة PV قيمة صغيرة جداً للسوائل مقارنة بالغازات.

لإيجاد القيم المطلوبة لـ H يستخدم جدولان: الأول (الجدول 1.4) للماء «المشبع» ماء + بخار يغطي أي نقطة بين الخطوط المقطعة في منحنى PV ، حيث يمكن تحديد درجة الحرارة من الضغط. ويعطي الجدول قيم الأنثليبي والإنتروبي للماء النقي والبخار النقي عند درجة الغليان، ويمكن إيجاد الأنثليبي لخليط البخار والماء بتقدير القيم بين هاتين الحالتين.

والجدول الثاني (الجدول 2.4) للبخار المسخن بشكل فائق "Superheated" في المنطقة اليمنى من المنحنى، حيث تحدد قيم كل من درجة الحرارة والضغط بشكل منفصل والجدول يعطي قائمة للأنثليبي والإنتروبي عند كل نقطة.

ولتحديد كفاءة الآلة البخارية، نحتاج إلى معرفة قيم الأنثليبي عند النقاط 1 و 3 و 4.

يمكن إيجاد الأنثليبي عند النقطة 1 من الجدول 1.4، والأنثليبي عند النقطة 3 من الجدول 2.4. ولإيجادها عند النقطة 4، فإننا نعرف أن تمدد البخار في التوربين يكون تقريباً في عملية أدياباتيكية $Q = 0$ ، وبشكل متالي لا يحدث تغير في الإنتروبي خلال هذه الخطوة. لذلك يمكن معرفة الإنتروبي عند النقطة 3 في جدول 2.4. والرجوع إلى الجدول 1.4 لمعرفة ما نسبة الماء والغاز بوصفها خليطاً، يكون للخليط إنتروبي مساوية للإنتروبي عند ضغط أقل.

T (°C)	P (bar)	H_{water} (kJ)	H_{steam} (kJ)	S_{water} (kJ/K)	S_{steam} (kJ/K)
0	0.006	0	2501	0	9.156
10	0.012	42	2520	0.151	8.901
20	0.023	84	2538	0.297	8.667
30	0.042	126	2556	0.437	8.453
50	0.123	209	2592	0.704	8.076
100	0.013	419	2676	1.307	7.355

الجدول 1.4: خواص الماء/ البخار المشبع (الضغط بوحدة البار $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} \approx 1 \text{ atm}$)، وجميع القيم لكيلوجرام واحد من المائع. تم قياسها بالنسبة إلى الماء السائل عند النقطة الثلاثية $[0.01^\circ \text{C}$ و 0.006 bar] (Keenan et.al (1978)

P (bar)	درجة الحرارة (°C)	درجة الحرارة (°C)				
		200	300	400	500	600
1.0	H (kJ)	2875	3074	3278	3488	3705
	S (kJ/K)	7.834	8.216	8.544	8.834	9.098
3.0	H (kJ)	2866	3069	3275	3486	3703
	S (kJ/K)	7.312	7.702	8.033	8.325	8.589
10	H (kJ)	2828	3051	3264	3479	3698
	S (kJ/K)	6.694	7.123	7.465	7.762	8.029
30	H (kJ)		2994	3231	3457	3682
	S (kJ/K)		6.539	6.921	7.234	7.509
100	H (kJ)			3097	3374	3625
	S (kJ/K)			6.212	6.597	6.903
300	H (kJ)			2151	3081	3444
	S (kJ/K)			4.473	5.791	6.233

الجدول 2.4: خواص البخار فائق التسخين، جميع القيم لواحد كيلوجرام من الماء، وقيست بالنسبة إلى النقطة الثلاثية للماء [Keenan et.al (1978)].

وعلى سبيل المثال: افترض أن الدورة تعمل بين أقل ضغط 0.023 bar (درجة غليان الماء 20°C) وأعلى ضغط 300 bar (درجة حرارة البخار فائق التسخين 600°C). لكل كيلوجرام من الماء، فإن $H_1 = 84 \text{ kJ}$ ، $H_3 = 3444 \text{ kJ}$ الإنتروبي عند النقطة 3 تساوي 6.233 kJ/K . وللحصول على الإنتروبي نفسه عند النقطة 4، تحتاج إلى خليط مكون من 29% ماء، و71% بخار. حيث إن H_4 لهذا الخليط تساوي

1824 kJ. لذلك، فإن كفاءة الآلة البخارية تساوي تقريباً:

$$e \approx 1 - \frac{1824 - 84}{3444 - 84} = 48\% \quad (13.4)$$

وإذا عملت الآلة كارنو المثالية بين درجات الحرارة نفسها تكون كفاءتها تساوي 66%. الأرقام التي أعطيت في المثال هي المستخدمة في محطات الوقود التي تعمل بالوقود العضوي وكفاءتها الفعلية نحو 40%. بينما المحطات التي تعمل بالوقود النووي تكون كفاءتها في حدود 34%.

السؤال 22.4: محطة توليد طاقة صغيرة تعمل بين درجتي حرارة 20°C أو 300°C وضغط بخار 10 bars كحد أعلى. احسب كفاءة دورة رانكن التي تعمل ضمن هذه المعطيات.

السؤال 23.4: استخدم تعريف الأنثليبي لحساب التغير في الأنثليبي بين النقاط 1 و 2 في دورة رانكن. لقيم المتغيرات نفسها التي أعطيت في هذا الكتاب، أعد حساب الكفاءة باستخدام قيمة H_2 المصححة، وعلق على دقة التقريب $H_2 \approx H_1$.

السؤال 24.4: احسب كفاءة دورة كارنو إذا تم تعديل المتغيرات التي أعطيت في هذا الجزئي إلى:

(أ) خفض درجة الحرارة إلى 500°C .

(ب) خفض أعلى ضغط إلى 100 bars.

(ج) خفض أقل درجة حرارة إلى 10°C .

السؤال 25.4: في التوربيد الحقيقي، تزداد الإنتروبي بطريقة ما. كيف يؤثر ذلك في نسبة السائل والغاز عند النقطة 4؟ وما تأثير ذلك في الكفاءة؟

السؤال 26.4: إذا كانت قيم المتغيرات هي ما ذكر سابقاً من حيث درجة الحرارة والضغط لمحطة توليد طاقة تعمل على الفحم، وتنتج 1 GW. قدر كمية البخار بالكيلوجرام التي يجب أن تمر خلال التوربيد في خلال ثانية واحدة.

السؤال 27.4: افترض أن القيم المعطاة للإنتروبي في الجدول 1.4 قد تم حذفها، وبقيت قيم الأنثليبي فقط. هل تستطيع حساب هذه القيم مرة أخرى؟ وما القيم التي يمكن حذفها وإعادة حسابها في الجدول 2.4؟ اشرح؟

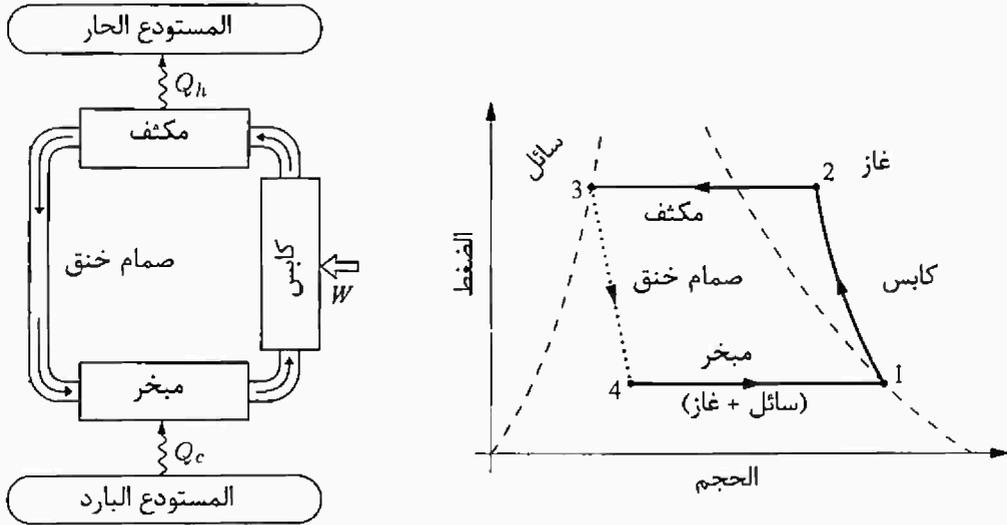
4.4 الثلاجات الحقيقية Real Refrigerators

تعمل الثلاجات ومكيفات الهواء في اتجاه معاكس لدورة كارنو. وخلال عمل الثلاجة تتغير حالة مادة التشغيل ذات درجة الغليان المنخفضة بشكل دوري من السائل إلى الغاز. وقد استخدمت العشرات من مواد التشغيل مثل ثاني أكسيد الكربون (يتطلب ضغطاً مرتفعاً)، الأمونيا (ما زالت مستخدمة في آلات التبريد الصناعية، وذلك على الرغم من سميتها). وعام 1930 أنتجت شركة جنرال موتورز وديوبونت مادة غير سامة عرفت تجارياً باسم (CFC) (فريون) (Chlorofluoro Carbon). والأكثر شيوعاً في الاستعمال هو Freon 12 (CCl_2F_2)

والمستخدم حالياً في الثلاجات المنزلية ومكيفات الهواء، وخصوصاً في المركبات. ولتأثير الفريون في طبقة الأوزون أُستبدل به مادة هايدروفلوروكربون $F_3C_2FH_2$ ، التي تعرف بالاسم $HFC - 134a$ يمثل الشكل 9.4 مخططاً لدورة التبريد.

عند النقطة 1 (يكون المائع غازاً) فيزداد ضغطه ودرجة حرارته في عملية أدياباتية، بحيث عند النقطة 2 يبدأ بفقدان حرارته والتكثف تدريجياً في المكثف (مجموعة من الأنابيب باتصال مع المحيط الخارجي). ومن ثم يمر عبر صمام ذي فتحة صغيرة وغطاء مسامي ماراً إلى الجانب الآخر من الصمام، الذي تكون درجة حرارته وضغطه أقل. وأخيراً يمتص حرارة من المستودع البارد، حيث يتحول إلى غاز في المبخر (مجموعة من الأنابيب متصلة بالمستودع البارد). من السهل التعبير عن معامل الإنجاز للثلاجة بدلالة أنثليبي المائع عند جميع النقاط حول الدورة. ولثبوت الضغط في المبخر، فالحرارة الممتصة هي $Q_c = H_1 - H_4$ ، والحرارة المكتسبة من قبل المكثف هي $Q_h = H_2 - H_3$ ، لذلك فإن معامل إنجاز الثلاجة:

$$(14.4) \quad COP = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} = \frac{H_1 - H_4}{H_2 - H_3 - H_1 + H_4}$$



الشكل 9.4: مخطط توضيحي ومنحني PV لدورة التبريد، الخطوط المتقطعة تبين المناطق التي يكون فيها المبرد، سائلاً، غازاً أو خليطاً من الاثنين.

يمكن إيجاد الأنثليبي عند النقاط 1، 2، 3 قيمها من الجداول، عند النقطة 2 نفترض أن الإنتروبي ثابتة خلال عملية الانضغاط. ولإيجاد الأنثليبي عند النقطة 4 فإن ذلك يتطلب تحليلاً أوسع لصمام الخنق "throttling valve".

عملية التمدد بالخنق (تجربة جول ثومسون) Throttling Process

تعرف هذه العملية، بتجربة جول ثومسون المبينة في الشكل 10.4. ويتألف الجهاز من أسطوانة معزولة بها غرز، ويغلقها من طرفيها مكبسان حرًا الحركة يوجد بينهما حاجز مسامي، عند دفع المائع (الغاز) عن طريق المكبس يحدث ضغطًا مقداره P_i ، ويتحرك المكبس الثاني في الاتجاه المعاكس، حيث يكون ضغط الغاز في الطرف الأيمن من الأسطوانة P_f . إذا افترض أن الحجم الأصلي للغاز في الطرف الأيسر V_i ، بينما الحجم الأصلي في الطرف الآخر V_f ؟ وحيث لا يوجد انسياب في الطاقة، فإن:

$$(15.4) \quad U_f - U_i = Q + W = 0 + W_{\text{left}} + W_{\text{right}}$$

حيث إن W_{left} (قيمة موجبة) الشغل المنجز من المكبس في الطرف الأيسر W_{right} (قيمة سالبة) وهو الشغل المنجز من المكبس على الطرف الأيمن. والشغل المنجز من اليسار لدفع حجم الغاز V_i خلال الحاجز هو $P_i V_i$ بينما الشغل من اليمين هو $-P_f V_f$ (سالبة؛ لأن المكبس يتحرك إلى الخلف). لذلك، فإن التغيير في الطاقة هو:

$$(16.4) \quad U_f - U_i = P_i V_i - P_f V_f$$

ويمكن كتابة هذه المعادلة:

$$(17.4) \quad U_f + P_f V_f = U_i + P_i V_i \quad \text{أو} \quad H_f = H_i$$

وهذا يعني ثبوت الأنثليبي خلال هذه العملية.

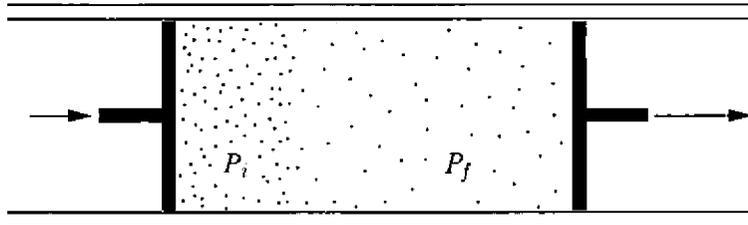
يكون عمل صمام الخنق هو تبريد المائع إلى درجة حرارة أقل من درجة حرارة المستودع البارد، حيث يمكن أن يمتص حرارة من الغاز، كما هو مطلوب. فإذا كان المائع غازًا، فإن ذلك لا يحدث، حيث إن:

$$(18.4) \quad H = U + PV = \frac{f}{2} NkT + NkT = \frac{f+2}{2} NkT$$

(الغاز المثالي)

إن ثبوت الأنثليبي يعني ثبوتًا في درجة الحرارة، ولكن في الغازات ذات الكثافة العالية. أو السوائل، فإن الطاقة U تحتوي على طاقة وضع نتيجة للقوى بين الجزيئات.

$$(19.4) \quad H = U_{\text{potential}} + U_{\text{kinetic}} + PV$$



الشكل 10.4: عملية الخنق، يدفع المائع خلال صمام مسامي ليتمدد في منطقة ذات ضغط منخفض.

تكون القوى بين الجزيئات المتباعدة قوى جذب ضعيفة، وقوى تنافر قوية عند المسافات القصيرة. وفي معظم الحالات، فإن قوى الجذب هي السائدة. لذلك، فإن طاقة الوضع تكون سالبة، وتصبح أكثر سلبية عند انخفاض الضغط، حيث تزداد المسافات بين الجزيئات، وللتعويض عن الزيادة في طاقة الوضع، فإن انخفاضاً في طاقة الحركة يحدث، وعليه يبرد المائع. وإذا استخدمنا حقيقة أن $H_4 = H_3$ في دورة التبريد، فإن معامل الإنجاز (14.4) يبسط إلى:

$$(20.4) \quad \text{COP} = \frac{H_1 - H_3}{H_2 - H_1}$$

ولحساب معامل الإنجاز نحتاج إلى قيم الأنتلبي عند النقاط 1، 2، 3 فقط. الجداول 3.4، 4.4 تعطي قيم الأنتلبي والإنتروبي للمبرد HFC-134a.

السؤال 29.4: إذا كان المبرد السائل HFC-134a عند درجة غليان وتحت ضغط 12 bars، أجريت عملية خنق لينخفض ضغطه إلى 1 bar. ما درجة حرارته النهائية؟ ما نسبة السائل المتبخر؟

<i>P</i> (bar)	<i>T</i> (°C)	<i>H_{liquid}</i> (kJ)	<i>H_{gas}</i> (kJ)	<i>S_{liquid}</i> (kJ/K)	<i>S_{gas}</i> (kJ/K)
1.0	-26.4	16	231	0.068	0.940
1.4	-18.8	26	236	0.106	0.932
2.0	-10.1	37	241	0.148	0.925
4.0	8.9	62	252	0.240	0.915
6.0	21.6	79	259	0.300	0.910
8.0	31.3	93	264	0.346	0.907
10.0	39.4	105	268	0.384	0.904
12.0	46.3	116	271	0.416	0.902

الجدول 3.4: خواص المبرد HFC-134a تحت شروط مشبعة (عند درجة غليان لكل ضغط). جميع القيم لكيلوجرام واحد، وقيست إلى نقطة مرجعية اختيارية، درجة تشبع السائل -40°C (Moran and Shapiro 1995).

<i>P</i> (bar)	درجة الحرارة (°C)	40	50	60
		<i>H</i> (kJ)	274	284
	<i>S</i> (kJ/K)	0.937	0.971	1.003
10.0	<i>H</i> (kJ)	269	280	291
	<i>S</i> (kJ/K)	0.907	0.943	0.977
12.0	<i>H</i> (kJ)		276	287
	<i>S</i> (kJ/K)		0.916	0.953

الجدول 4.4: خواص المبرد HFC-134a في الحالة الغازية فائقة الحرارة، جميع القيم لكيلوجرام واحد، وقيست بالنسبة إلى النقطة المرجعية نفسها في الجدول 4.3 ومن المرجع نفسه.

السؤال 30.4: تلاجة منزلية تعمل على HFC-134a بين ضغط 1.0 bar و 10 bar.

(أ) إذا بدأت عملية الانضغاط ببخار مشبع عند ضغط 1.0 bar، وانتهت عند 10 bar، ما درجة حرارة البخار بعد عملية الانضغاط إذا كانت الإنتروبي ثابتة؟

(ب) قَدِّر قيمة الأنثليبي عند كل نقطة من النقاط 1، 2، 3، 4 ثم احسب معامل الإنجاز - قارن ذلك بمعامل إنجاز تلاجة كارنو تعمل عند نفس درجة حرارة كل من المستودع البارد والحار. هل درجات الحرارة هذه مناسبة لعمل التلاجة المنزلية؟

(ج) ما نسبة الجزء المتبخر من السائل خلال عملية التمدد بالخنق؟

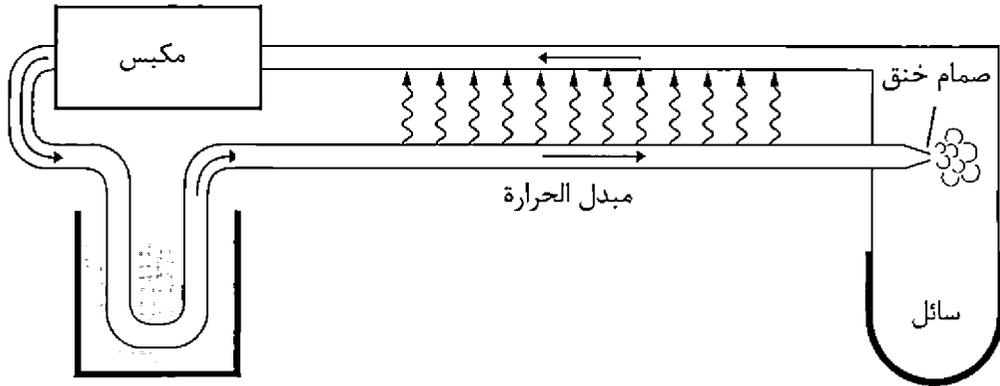
السؤال 31.4: افترض أنه تم استبدال صمام الخنق في التلاجة في السؤال السابق بتوربين صغير، حيث يتمدد المائع أدياباتيكياً، منجزاً شغلاً يسهم في عمل المضخة. هل يؤثر ذلك في معامل إنجاز التلاجة؟ إذا كانت إجابتك بنعم، ما مقدار ذلك؟ اشرح لماذا يجب أن تعمل التلاجة بصمام الخنق بدلاً من التوربين.

تسييل الغازات Liquification of Gases

لتبريد جسم ما نضعه داخل التلاجة، أو في جليد جاف (195 K) أو نغمره في نيتروجين سائل (77 K)، أو حتى في هيليوم سائل (4.2 K). والسؤال كيف لنا أن نسيل الغازات مثل النيتروجين أو الهيليوم أو نصلب ثاني أكسيد الكربون؟ إن أهم الطرق المتبعة في تسييل الغازات هي عملية التمدد بالخنق throttling process. يمكن تسييل ثاني أكسيد الكربون عند درجة حرارة الغرفة بضغطه في عملية أيزوثرمية إلى نحو 60 bars ثم إجراء عملية التمدد بالخنق ليبرد، ويتبخر جزئياً، كما تم شرحه في عملية التبريد، وعند ضغط أقل من 5.1 ضغط جوي، فإن ثاني أكسيد الكربون لا يوجد بوصفه سائلاً، وإنما يتكثف بوصفه حالة صلبة تدعى الجليد الجاف. وكل ما يمكن أن نقوم به هو ربط خزان من ثاني أكسيد الكربون بصمام تمدد الخنق، حيث نلاحظ تكون ثاني أكسيد الكربون حول الخرطوم الذي يندفع منه الغاز.

أما عملية تسييل النيتروجين (أو الهواء) فليست بهذه السهولة، وإذا تم ضغط الغاز في درجة حرارة الغرفة، فإنه لا يتحول إلى حالة السيولة، وإنما تزداد كثافته بشكل متوال (سيتم مناقشة ذلك بالتفصيل في الجزء 3.5). لفترض أنك بدأت بغاز النيتروجين عند درجة حرارة (300 K) و 100 ضغط جوي، ومن ثم تمت عملية التمدد بالخنق ليصل الضغط إلى ضغط جوي واحد، فإن درجة الحرارة تصل إلى (160 K) وهي درجة حرارة أقل بكثير من درجة حرارة الغرفة.

إن أول محاولة لتسييل غاز الأكسجين وغاز النيتروجين تمت عام 1877 من قبل Louis Cailletet، الذي استخدم ضغطاً أولياً مقداره 300 ضغط جوي، حيث أجرى عملية تبريد أولية باستخدام سوائل باردة. وللطريقة المفضلة هي استخدام الغاز نفسه الذي مر في عملية التمدد بالخنق لتبريد الغاز الداخل. وتم اقتراح هذه الطريقة من قبل كل من William Hampson and Carl von في شكل منفصل، والطريقة المقترحة مبينة في الشكل 1.4.

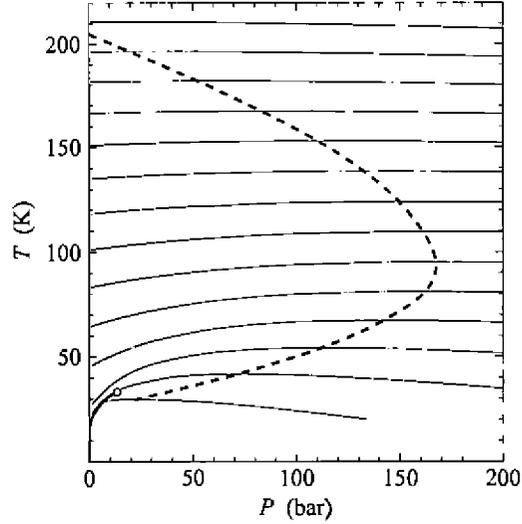


الشكل 11.4: مخطط لدورة هامبسون - ليندي لتسييل الغاز. يبرد الغاز لدرجة حرارة الغرفة (الأكسجين أو النيتروجين) ثم يمرر الغاز على مبدل الحرارة في طريقه إلى صمام الخنق، حيث تنخفض درجة حرارة الغاز خلال عملية التمدد بالخنق، ثم يعود ثانية إلى مبدل الحرارة ليبرد الغاز القادم. وفي النهاية يبرد الغاز بما فيه الكفاية ليتحول جزئيًا إلى سائل. وفي هذه الحالة تضاف كمية من الغاز لتعويض الغاز الذي تحول إلى سائل.

وبدلاً من التخلص من الغاز، يمدد ثانية إلى مبدل الحرارة، حيث يتسبب في تبريد الغاز الجديد والمارة إلى صمام الخنق، حيث تبرد حرارته بعد مروره من الصمام، وتستمر هذه العملية وبشكل تدريجي حتى يتم إسالة الغاز. وتستخدم دورة هامبسون - ليندي لتسييل الغازات ما عدا غازي الهيدروجين والهيليوم؛ لأن هذه الغازات تزداد درجة حرارتها عند مرورها عبر صمام الخنق عند درجة حرارة الغرفة وتحت أي ضغط جوي، وذلك بسبب كون قوة التجاذب بين جزيئات هذه الغازات ضعيفة جداً. وعند درجات الحرارة المرتفعة، فإن جزيئات هذه الغازات تتحرك بسرعة عالية، بحيث تبقى تعاني اصطدامات تكون خلالها طاقة الوضع الموجبة كبيرة، وعند تمدد أي من هذه الغازات تتناقص طاقة الوضع، ويزداد معدل حركة الجزيئات، ما يتسبب في تسخين هذه الغازات «الهيدروجين والهيليوم» وهذا يتطلب أن تخفض درجة حرارتها إلى درجة حرارة ابتدائية تقل كثيراً عن درجة حرارة الغرفة، وذلك لتخفيض سرعة جزيئاتها حتى يكون التجاذب له أهمية «تأثير» أكثر من التنافر.

يبين الشكل 12.4 مدى درجات الحرارة والضغط اللازمين لتسييل غاز الهيدروجين بعملية التمدد والخنق. تدعى درجة الحرارة التي يحدث عندها التبريد درجة حرارة التحول، وتكون هذه الدرجة للهيدروجين 204 K وللهيليوم 43 K وكانت التجربة الأولى لتسييل الهيدروجين الذي تم تبريده عن طريق الهواء من قبل جيمس ديوار James Dewar عام 1898، بينما تم تسييل الهيليوم بعملية تبريد الغاز باستخدام سائل الهيدروجين عام 1908، من قبل هيك أونس Heik Kamerlingh Onnes. وفي الوقت الحالي، فإن عملية تبريد الغاز تتم بجعل الهيليوم يتمدد أدياباتيكيًا عند دفعه بالمكبس (حيث لا يستخدم الهيدروجين كسائل لعملية التبريد الأولى)، وتوفر هذه التقنية سلامة أكبر، ولكنها تتطلب تحديًا ميكانيكيًا أكبر، وخصوصًا في إيجاد مادة لاستخدامها في عملية التشحيم، حيث إنه لا توجد مادة لا تتجمد عند درجة حرارة 8 K، لذلك استخدم الهيليوم نفسه في عملية التشحيم، وذلك بترك فراغ صغير جدًا بين المكبس والأسطوانة لمتع أي تسرب من خلاله.

الشكل 12.4: خطوط الإنثليبية الثابتة (تقريبًا أفقية تفصلها مسافات تعادل 400J/mol)، منحني الانقلاب (خطوط متقطعة) للهيدروجين. في عملية التمدد بالخنق تكون الإنثليبية ثابتة، ويحدث التبريد فقط على يسار منحني الانقلاب، حيث يكون ميل خطوط الإنثليبية موجبًا، الخط الأسود في نهاية الطرف الأيسر من المنحني يمثل حد الطور للسائل - الغاز (Woolley et.), Vargaflik (1974) (al 1948).



درجة الحرارة (K)

	77 (liq)	77 (gas)	100	200	300	400	500	600
1 bar	-3407	2161	2856	5800	8717	11,635	14,573	17,554
100 bar			-1946	4442	8174	11,392	14,492	17,575

الجدول 5.4: الإنثليبية المولية للنيتروجين (جول) عند ضغط 1 bar وضغط 100 bars.

السؤال 33.4: الجدول 5.4 يعطي قيمًا مقيسة للإنثليبية المولية للنيتروجين عند ضغط 1 bar أو 100 bars. استخدم هذه البيانات للإجابة عن الأسئلة الآتية للنيتروجين في عملية التمدد بالخنق بين هذين الضغطين.

- إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية 300 K ، ما درجة الحرارة النهائية؟
- إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية 200 K ، ما درجة الحرارة النهائية؟
- إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية 100 K ، ما درجة الحرارة النهائية؟
- ما أعلى درجة حرارة ابتدائية ليكون هناك تحول لأي نسبة إلى السائل؟
- ماذا يحدث إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية 600 K ؟ اشرح.

السؤال 34.4: افترض دورة مثالية، لدورة هامبسون - ليند، حيث لا تفقد أي كمية من الحرارة خلال هذه الدورة.

(أ) ناقش ما يأتي:

الجمع بين صمام تمدد الخنق ومبدل الحرارة يمكن اعتباره أداة تعمل تحت إنثليبية ثابتة، أي إن مجموع أنثليبية المائع الداخل إلى الجهاز يساوي الأنثليبية للمائع الخارج من الجهاز.

(ب) افترض أن x يمثل الجزء الذي تم تسييله من الغاز في كل دورة، أثبت أن:

$$x = \frac{H_{out} - H_{in}}{H_{out} - H_{liq}}$$

(ج) استخدم البيانات في الجدول 5.4، لتحسب الجزء المسال من الغاز (النيتروجين) المار عبر دورة هامبسون - ليند تعمل بين ضغط 1 bar و 100 bars عند درجة حرارة 300 K. افترض أن المبدل الحراري يعمل بشكل تام، أي إن درجة حرارة الغاز ذي الضغط المنخفض الخارج منه هي نفس درجة حرارة الغاز ذي الضغط المرتفع الداخل إليه. أعد الحسابات إذا كانت درجة الحرارة للغاز الداخل 200 K.

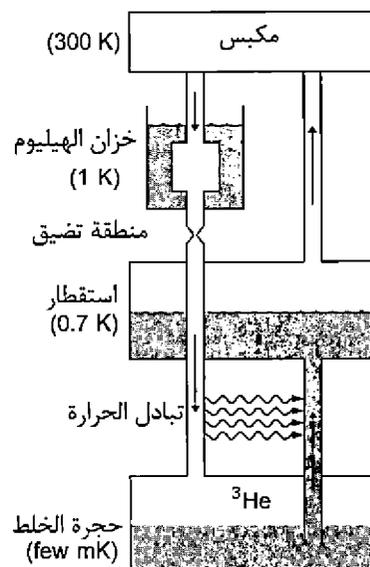
نحو الصفر المطلق Toward Absolute Zero

يفلي الهيليوم السائل تحت الضغط الجوي عند درجة حرارة 4.2 K، وكلما انخفض الضغط الجوي تنخفض درجة غليانه، حيث أمكن بتخفيض الضغط الجوي الوصول إلى درجة غليان 1 K، وتصبح هذه الطريقة غير عملية لتخفيض درجة غليان الهيليوم السائل، إذ إن أي تسرب بسيط للحرارة يرفع درجة حرارته بشكل كبير. بينما أمكن تخفيض درجة غليان نظير الهيليوم ^3He من 3.2 K، بتخفيض الضغط إلى مستويات منخفضة الوصول إلى درجة غليان 0.3 K. هل يكفي أن نصل إلى درجة حرارة 1 K؟ ولماذا هذا الاهتمام للوصول إلى درجات حرارة أقل؟ والسبب في ذلك هو وجود خواص فيزيائية تحدث عند درجات الحرارة في حدود الملي كلفن، أو الميكروكلفن أو حتى عند النانو كلفن، مثل تحولات الهيليوم نفسه، الخواص المغناطيسية للذرات والأنوية، تكثيف بوز أينشتاين للغازات المخففة وغيرها، حيث نحتاج لدراسة هذه الخواص إلى درجات حرارة قريبة من الصفر المطلق⁽⁴¹⁾ وللوصول إلى درجة حرارة بالملي كلفن، تستخدم طريقة تدعى "تلاجة تخفيف الهيليوم helium dilution refrigerator" المبينة في الشكل 13.4. حيث يتم التبريد عن طريق تبخر الهيليوم ^3He ، وبدلاً من تبخيره إلى الفراغ، فإنه يذوب في النظير الأكثر شيوعاً ^4He ، وعند وصول درجة الحرارة إلى الملي كلفن، فإن النظيرين ^3He و ^4He لا يمتزجان ببعضهما (مثل الزيت والماء) وعند درجة حرارة أقل من 0.1 K فلا يذوب ^4He في الهيليوم ^3He النقي، بينما تذوب كمية قليلة نحو 6% من الماء ^3He في ^4He النقي.

وهذا ما يحدث في غرفة الخلط، حيث يستمر ^3He في الذوبان (والتبخر) ممتصاً حرارة من ^4He . ومن ثم ينتشر على أعلى خلال مبدل الحرارة ليصل إلى درجة حرارة 0.7 K، ويكون ^4He خاملاً خلال هذه العملية، ويدعى المائع الفائق «superfluid» في هذا المدى من درجات الحرارة، حيث تكون مقاومته مهملة لانتشار ذرات ^3He ، وأقل قابلية للتبخر من ^3He . وبعد تبخر ذرات ^3He ، يعاد تبريده (باستخدام حوض يحتوي على ^4He) وفي النهاية يعود إلى مبدل الحرارة، ثم إلى غرفة الخلط.

(41) لفهم أعمق لتقنيات درجات الحرارة المنخفضة

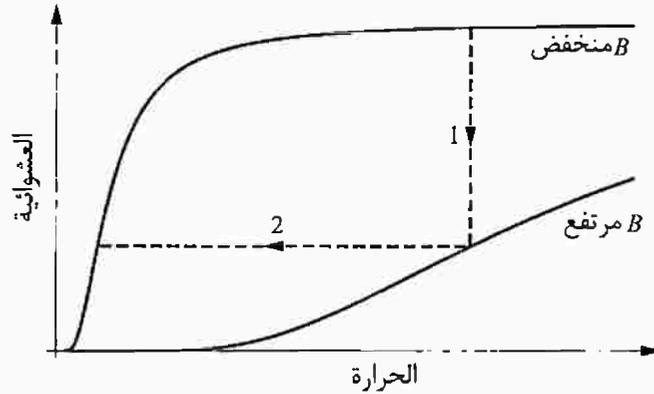
الشكل 13.4: مخطط لثلاجة الهيليوم المخفف. حيث تكون مادة التشغيل هي ^3He حيث يدور اتجاه عقارب الساعة، و ^4He (رمادي غامق في المخطط) يبقى ثابتاً في مكانه.



والطريقة البديلة للوصول إلى درجات حرارة بالملي كلفن هي طريقة التبريد المغناطيسي magnetic cooling بالاعتماد على الخواص البارامغناطيسية للمواد، حيث تبين في الجزء 3.3 أن المغناطية الكلية لباراماجنت ثنائي الحالة دالة في النسبة بين شدة المجال المغناطيسي B ودرجة الحرارة T .

$$(21.4) \quad M = \mu(N_{\uparrow} - N_{\downarrow}) = N\mu \tanh\left(\frac{\mu B}{kT}\right)$$

(إذا كان هناك أكثر من حالتين لجسيم الباراماجنت المثالي، فإن المعادلة 21.4 تكون أكثر تعقيداً، ولكنها تشابه مع هذه المعادلة من الناحية الوصفية). وإذا كانت ثنائيات القطب إلكترونات (الباراماجنت الإلكتروني)، وكانت قيمة المجال المغناطيسي 1 T، ودرجة الحرارة 1 K، فإن $M / N\mu = 0.59$ وتعني هذه القيم أن غالبية ثنائيات القطب تكون متجهة إلى أعلى، ولنفترض أننا بدأنا تجربة التبريد ضمن هذه الظروف وخفض المجال المغناطيسي دون السماح للنظام بالتبادل الحراري مع محيطه. إن نتيجة ذلك عدم حدوث تغير في المغناطيسية ما يؤدي إلى انخفاض درجة الحرارة لتتناسب مع شدة المجال المغناطيسي. فمثلاً إذا انخفضت B ألف مرة عن قيمتها الأصلية، فإن انخفاض T يكون بنفس النسبة. وبين الشكل 14.4 إلكتروبي النظام كدالة في درجة الحرارة لنظام باراماجنت ثنائي الحالة، لقيمتين مختلفتين من شدة المجال. تقترب الإنتروبي من الصفر عند $T \rightarrow 0$ لأي قيمة مجال مغناطيسي ليس صفراً، (في هذه الحالة تكون جميع ثنائيات القطب متجهة للأعلى)، ثم تكون أكبر من الصفر عند درجات حرارة أعلى (حيث يصبح ترتيب ثنائيات القطب عشوائياً). وتزداد قيمة الإنتروبي تدريجياً مع زيادة قيمة المجال المغناطيسي (لقابلية ثنائيات القطب للترتيب في اتجاه المجال المغناطيسي) كدالة في درجة الحرارة. وفي عملية التبريد المغناطيسي، توضع العينة بتماس جيد مع مستودع ثابت درجة الحرارة كحوض يحتوي على الهيليوم السائل، ويتم زيادة المجال المغناطيسي مسبباً انخفاضاً في الإنتروبي مع بقاء درجة الحرارة ثابتة. ثم تعزل العينة عن المستودع، ويتم تخفيض شدة المجال المغناطيسي، ما يؤدي إلى انخفاض درجة الحرارة مع بقاء الإنتروبي ثابتة، وهذه العملية مشابهة لتبريد الغاز المثالي عن طريق التمدد الأديباتيكي متبوعاً بالانضغاط الأيزوثيرمي.

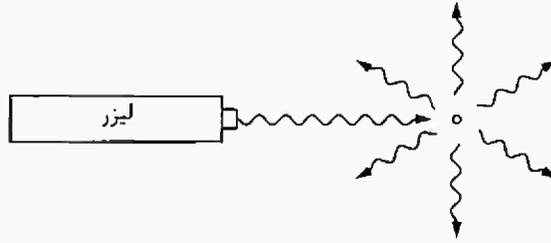


الشكل 14.4: الإنتروبي دالة في درجة الحرارة لباراماجنت مثالي ثنائي الحالة، عند قيمتين من شدة المجال المغناطيسي (تم رسم المنحنيات بناءً على المعادلة 23.3)، تتم عملية التبريد المغناطيسي بخطوتين: الخطوة الأولى زيادة شدة المجال المغناطيسي عند ثبوت درجة الحرارة، والخطوة الثانية عملية أدياباتية.

لماذا لا نقوم بإلغاء المجال المغناطيسي كلياً بدلاً من تخفيضه؟ طبقاً للمعادلة 21.4 ستصل درجة حرارة الباراماجنت إلى الصفر المطلق ليتم المحافظة على ثبوت M . إن الوصول إلى الصفر المطلق ليس سهلاً، ويحتاج ذلك إلى وجود باراماجنت مثالي عند درجات الحرارة المنخفضة جداً، وإن هناك تفاعلاً بين ثنائيات القطب ينتج مجالاً مغناطيسياً، حتى إذا كانت شدة المجال الخارجي تساوي صفراً، واعتماداً على طبيعة هذه التفاعلات يمكن لثنائيات القطب أن ترتب نفسها موازية أو معاكسة لاتجاه أقرب جيران لها من ثنائيات القطب، بحيث تنخفض الإنتروبي لها إلى الصفر، كما هو في حالة وجود مجال مغناطيسي. وللوصول إلى أقل درجة حرارة يجب أن تكون التفاعلات بين ثنائيات القطب ضعيفة جداً، حيث أمكن الوصول إلى درجة حرارة أقل بكثير من الباراماجنت الإلكتروني. وقد أمكن الوصول إلى درجة حرارة 1 mK (السؤال 35.4) للموك البارامغناطيسية الإلكترونية، وفي حالة الباراماجنت النووي تكون هذه التفاعلات ضعيفة جداً ما يؤدي إلى الوصول إلى درجة حرارة أقل بكثير من الباراماجنت الإلكتروني. وهذا يتطلب أن تكون درجة الحرارة الابتدائية أقل منها في الباراماجنت الإلكتروني للحصول على ترتيب برم متناسق.

لقد تم الوصول إلى درجة حرارة 1 mK باستخدام التبريد المغناطيسي النووي، وكانت أول تجربة أجريت باستخدام هذه التقنية عام 1993 حيث استطاع فريق من جامعة هلسنكي استخدام التبريد المغناطيسي النووي للروديوم rhodium والوصول إلى درجة حرارة 280 PK أي $2.8 \times 10^{-10} \text{ K}$. وقد استخدمت حديثاً تقنية جديدة للوصول إلى درجات حرارة منخفضة جداً باستخدام تقنية تبريد الليزر Laser Cooling . والنظام المستخدم في هذه التقنية ليس سائلاً أو صلباً، وإنما غاز مخفف جداً. (غيمة صغيرة من الذرات، تمنع من التكثف إلى مادة صلبة بسبب كثافتها المنخفضة جداً). تصور أنك استطعت أن تقذف ذرة بحزمة من أشعة الليزر من الطيف المطابق تماماً للوضع الذي يجعل الذرة تنتقل إلى مستوى الطاقة الأعلى، وكأنها اكتسبت طاقة، حيث تصدر فوتوناً له تردد أشعة الليزر نفسه. يحمل الفوتون الصادر زخماً، إضافة إلى الطاقة محدثاً نوعاً من الارتداد للذرة كلما امتصت طاقة أو انبعث منها فوتون. ويكون امتصاص الفوتونات من اتجاه أشعة الليزر نفسه، بينما تنبعث الفوتونات في جميع الاتجاهات (الشكل 15.4). وارتداد الذرة نتيجة للقرعة التي أثرت بها أشعة الليزر في الذرة.

ولنتصور الآن أننا خفضنا من قيمة تردد أشعة الليزر (زيادة طول موجتها) في هذه الحالة، فإن الذرات التي تكون في حالة مستقرة أي عديمة الحركة، ولا تمتص هذه الأشعة، أما الذرات المتحركة في اتجاه الأشعة، ونتيجة لظاهرة دوبلر، فإن الموجة تعود إلى طولها الأصلي، لذلك تمتص هذه الذرات الفوتونات، وتتولد على الذرات المتحركة قوة معاكسة لاتجاه حركتها. وإذا كانت أشعة الليزر تصدر من جميع الاتجاهات، فإن هناك قوة معاكسة لحركة الذرات في أي اتجاه تتحرك فيه. وإذا أمكن وضع ملايين من الذرات، فإن أشعة الليزر تسبب في إنقاص حركة هذه الذرات ما يؤدي إلى تبريدها إلى درجات حرارة منخفضة جداً. وعند السرعات البطيئة، فإن الذرات قد تصطدم بجدار الوعاء الساخن (أو تسقط إلى القعر) دون وجود قوة إضافية لدفع هذه الذرات إلى المركز. ومثل هذه القوة يمكن استحداثها باستخدام مجال مغناطيسي غير منتظم ينتج عنه قوة تدعى «قوة الحصر trapping force» حيث تحدث انحرافاً في مستويات الطاقة، وتغير من قابلية الذرات لامتصاص الفوتونات أينما وجدت. إن تقنية الجمع بين التبريد بالليزر وتقنية قوة الحصر يمكن أن تخفض درجة حرارة محابة الذرات إلى نحو 1 mK. وفي الوقت الحاضر تستخدم تقنيات مختلفة في التبريد للوصول إلى درجات حرارة في مدى الميكروكلفن والبيكوكلفن⁽⁴²⁾.



الشكل 15.4: عندما تقذف ذرة بأشعة الليزر، فإن الذرة تتعرض لقوة من اتجاه الأشعة، حيث إن جميع الفوتونات تأتي من الاتجاه نفسه، بينما تنتشر الفوتونات المنبعثة في جميع الاتجاهات.

السؤال 35.4: المجال المغناطيسي المستحدث من ثنائي القطب تكون شدته $(\mu_0/4\pi)(\mu/r^3)$ حيث إن r هي المسافة من ثنائي القطب، μ_0 سماحية الفراغ الحر، وتساوي $4\pi \times 10^{-7}$ (مع إهمال تغير المجال مع الزاوية، وهي تعادل العامل 2). إذا كان العزم المغناطيسي لملاح باراماجنت (iron ammo-nium elum) يساوي تقريباً 1 بور-ماجنتون (1 Bohr magniton)، والمسافة التي تفصل بين كل ثنائي قطب وآخر هي 1 nm، افترض أن ثنائيات القطب تتفاعل من خلال القوى المغناطيسية العادية، وأن $(1 \text{ Bohr magniton} = 9 \times 10^{-24} \text{ J/T})$.

(أ) قدر شدة المجال المغناطيسي عند موقع ثنائي القطب نتيجة لثنائيات القطب المجاورة. شدة المجال المغناطيسي المؤثر إذا لم يكن هناك مجال مغناطيسي خارجي.

(42) لمعرفة تطبيقات التبريد بالليزر ارجع إلى

(ب) إذا بدئ بمجال مغناطيسي خارجي شدته 1 T ، في تجربة التبريد المغناطيسي واستخدام هذه المادة، ما مقدار العامل الذي تنخفض به درجة الحرارة عند إزالة المجال المغناطيسي الخارجي؟

(ج) قدر درجة الحرارة التي يكون عندها زيادة الإنتروبي حادة لهذه المادة كدالة في درجة الحرارة في غياب أي مجال مغناطيسي خارجي.

(د) إذا كانت درجة حرارة التبريد النهائية أقل بشكل ملحوظ من درجة الحرارة المقدره في الفرع ج، تنتهي المادة في حالة تكون فيها $\partial S / \partial T$ صغيرة جدًا، وكذلك سعتها الحرارية. اشرح لماذا من الناحية العلمية أنه من الصعب الوصول إلى درجات حرارة منخفضة لهذه المادة.

السؤال 36.4: الحد الظاهر لدرجة الحرارة التي يمكن الوصول إليها باستخدام تبريد الليزر، عندما يكون ارتداد الطاقة عن الذرة من الامتصاص أو الانبعاث لفوتون واحد مقارنةً بطاقتها الحركية. قدر بشكل تقريبي هذه الدرجة لذرات الروبيديوم، إذا كان طول موجة الليزر المستخدمة لعملية التبريد هو 780 nm .

السؤال 37.4: يمكن التعبير عن القانون الثاني بصيغة غير دقيقة. "لا يمكنك الوصول إلى الصفر المطلق" من الجزء 2.3. ضع حدودًا لأقل درجة حرارة يمكن الوصول إليها باستخدام تقنيات التبريد المختلفة.

بناءً على هذا المبدأ، فإن إنتاج الحرارة وحده غير كافٍ، ولا يعطي دفعًا لتوليد الطاقة، فمن الضروري أن يكون هناك برودة، ومن دونها لا فائدة من الحرارة.

Sadi Carnot, Reflections on the Motive Power of Fire, Trans R.H. Thurston
(Macmillan, New York, 1980).