

الآلات الحرارية

1.11. مقدمة

تعتمد الآلات الحرارية على مائع تجري عليه تحولات، تتبادل فيها الجملة العمل والحرارة مع الوسط الخارجي، قد تكون الجملة مفتوحة، مثل محرك السيارة حيث يدخل المحرك كمية من الوقود الغازي الممزوج بالهواء، وهو يُطرح إلى الوسط الخارجي بعد احتراقه.

وقد كان تحسين مردود المحرك البخاري هو الهدف الذي دفع لتوسيع الدراسات في مجال الترموديناميك، واستكشاف مبادئه.

وقد درسنا في الفصول السابقة حلقة كارنو التي تصف التحولات في آلة حرارية مثالية. سوف نتعمق في دراستنا في هذا الفصل بدراسة الآلات الحرارية، ونحلل عمل عدد منها.

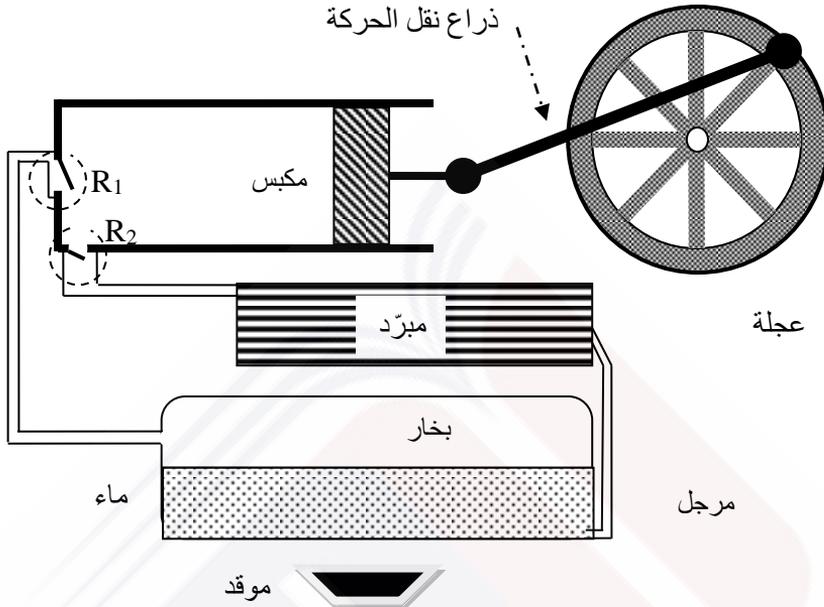
2.11. أنواع الآلات الحرارية

إن الهدف من الآلات الحرارية هو تحويل الطاقة، فقد نستثمر تبادل الحرارة مع منبعين الأول حار والآخر بارد للحصول على الطاقة الميكانيكية، كما هو الحال في المحرك البخاري. عندما تُعطي الجملة عملاً إلى الوسط الخارجي ($W < 0$) نقول لدينا محرك، وقد نُقدّم عملاً إلى الجملة ($W > 0$) بهدف نقل

الحرارة من وسط إلى آخر، كما هو الحال في البراد أو المكثف، ونقول لدينا مضخة حرارية، سوف نبدأ بشرح آلية عمل كل من المحرك البخاري والبراد قبل أن نقدم دراسة أوسع للآلات الحرارية.

1.2.11. المحرك البخاري

يستخدم المحرك البخاري الماء كمائع تجري عليه التحوّلات، وهو يتبادل الحرارة مع منبعين الأوّل ساخن حيث نحصل على الحرارة من خلال حرق الوقود (الفحم أو الفيول أو غيره....)، والمنبع الثاني هو الوسط الخارجي، ويتألف المحرك البخاري (الشكل 1-11) من مرجل، يوضع فيه الماء السائل، ترتفع درجة الحرارة في المرجل إلى أكثر من $100^{\circ}C$ وهذا يسمح بالحصول على ضغط أعلى من الضغط الجوي، مما يسمح بدفع المكبس وتدوير العجلة، وعندما يصل المكبس إلى الطرف الأيمن للأسطوانة، يُغلق الصمام (R_1) ويفتح الصمام (R_2)، ونتيجة الطاقة الحركية الدورانية التي اكتسبتها العجلة فإنها تستمر بالدوران دافعة البخار للخروج من خلال (R_2)، وتقوده الأنايب إلى المبرّد المعرض للهواء الخارجي حيث يتكثّف مما يُخفّض الضغط داخل الأسطوانة، حتى إذا بلغ المكبس أقصى اليسار يُغلق الصمام (R_2) ويفتح الصمام (R_1)، مما يُعيد إدخال البخار ودفع المكبس من جديد، وهكذا نحصل على حركة مستمرة للعجلة. يعاد الماء المتكثّف إلى داخل المرجل.

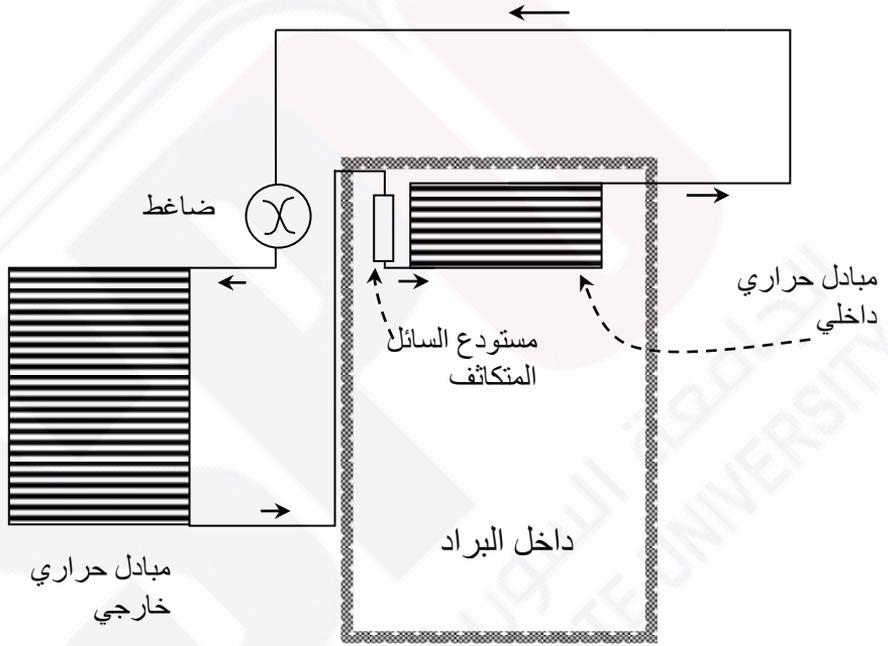


الشكل 1-11: المحرك البخاري.

2.2.11. البراد

يستخدم البراد أحد الغازات السهلة التبخر مثل الفريون كمائع، وتتألف آلة التبريد من ضاغط يُدار كهربائياً أي إنّ البراد يستهلك الطاقة الكهربائية. انظر الشكل 11-2، يتألف الضاغط من أسطوانة مغلقة بمكبس، حيث تقوم بسحب الغاز من الجزء الداخلي لينضغط في الأنابيب الخارجية فترتفع درجة حرارة الغاز إلى درجة أعلى من درجة حرارة المحيط، فتُعطي الجملة كمية من الحرارة إلى الوسط الخارجي وعندما يبلغ الضغط في الأنابيب الخارجية (المبادل الحراري الخارجي) حد الإشباع يتميّع البخار حيث يتراكم السائل في مستودع يحتوي أسفله على صمام، ويؤدي تراكم السائل في المستودع إلى رفع الضغط المطبق على الصمام الذي يفتح لدى وصول مستوى سطح السائل

أعلى المستودع، فيدخل السائل إلى الأنابيب الداخلية (المبادل الحراري الداخلي)، وفي المبادل الداخلي يبلغ الضغط قيمة أصغر من حد الإشباع نتيجة سحب الغاز من قبل الضاغط، فيتبخر السائل ماصاً كمية من الحرارة من المبادل الداخلي الذي يسحب بدوره الحرارة من داخل البراد، ويقوم الضاغط بضخ الغاز المتبخر إلى الأنابيب الخارجية وهكذا يستمر العمل على سحب الحرارة من داخل البراد، وإطلاق الحرارة في الهواء الخارجي.



الشكل 11-2 : يدل السهم على جهة حركة المائع المبرد.

3.11. دراسة الآلات الحرارية

1.3.11. تصنيف الآلات الحرارية

رأينا أنه لا يُمكن لجملة تقوم بتحوّل حلقي متبادلة الحرارة مع منبع وحيد إلا أن تُقدّم الحرارة وتأخذ العمل بعد حلقة عمل (المبدأ الثاني)، لذلك

سنوجّه اهتمامنا إلى الآلات التي تتبادل الحرارة مع منبعين. وهذا يقودنا للتمييز بين نوعين من الآلات:

- أ. المحركات الحرارية: وهي تُقدّم العمل إلى الوسط الخارجي ($W < 0$) وتتلقى الحرارة ($Q > 0$) خلال كل حلقة عمل.
- ب. والمضخات الحرارية (آلات التبريد والمكيفات) وهي تتلقى العمل ($W > 0$) وتعطي الحرارة ($Q < 0$) خلال كل حلقة عمل.

2.3.11. الآلات الثنائية المنبع

وهي تتبادل الحرارة مع منبعين: الأول حار درجة حرارته T_1 والثاني بارد درجة حرارته T_2 ، لتكن Q_1 كمية الحرارة المتبادلة مع المنبع الساخن، و Q_2 كمية الحرارة المتبادلة مع المنبع البارد.

أ. تطبيق المبدأ الأول والثاني

لما كانت الجملة تقوم بتحوّل حلقي فإنه يُمكننا أن نكتب خلال حلقة:

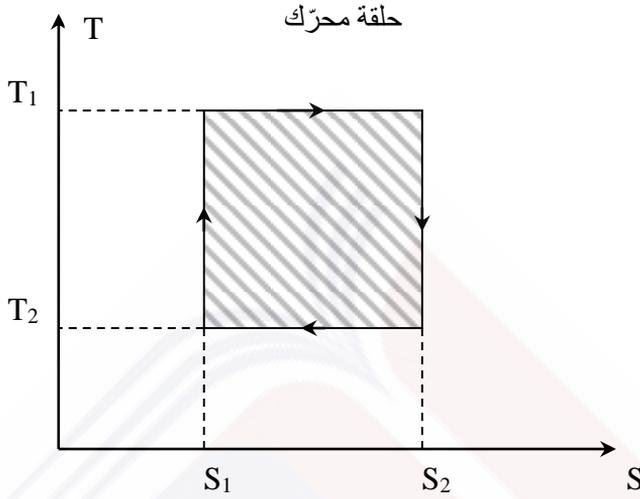
$$\Delta U = 0 \text{ و } \Delta S = 0 \text{ أي:}$$

$$(1) \quad \Delta U = W + Q_1 + Q_2 = 0$$

$$(2) \quad \Delta S = S^r + S^p = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + S^p = 0$$

ب. حلقة كارنو

رأينا في الفصل الثامن أنّ حلقة كارنو هي حلقة غاز كامل يتبادل الحرارة مع منبعين فقط والتحويلات عكوسة. وقد مثلنا حلقة كارنو باستخدام الإحداثيات (P, V) ، يمكن تمثيل حلقة كارنو باستخدام الإحداثيات (T, S) كما في الشكل (3-11).



الشكل 11-3: حلقة كارنو في الإحداثيات (T, S).

يستند هذا التمثيل في الشكل السابق إلى أنّ الحلقة عكوسة، ومن ثمّ لا يوجد إنتاج للأنثروبي ($S^P = 0$) في جميع التحولات، إذن في كل من التحولين الكظومين يكون تغيّر الأنثروبي معدوماً، أما كلّ من التحولين الآخرين فهو متساوي درجة الحرارة.

يتفق توجيه هذه الحلقة مع جهة حركة عقارب الساعة، عندما يكون توجيه الحلقة في الاتجاه المعاكس، نسمي الحلقة عكسية.

ج. مخطط رافو Raveau

$$\text{من العلاقة (1) نجد } Q_1 = -Q_2 - W$$

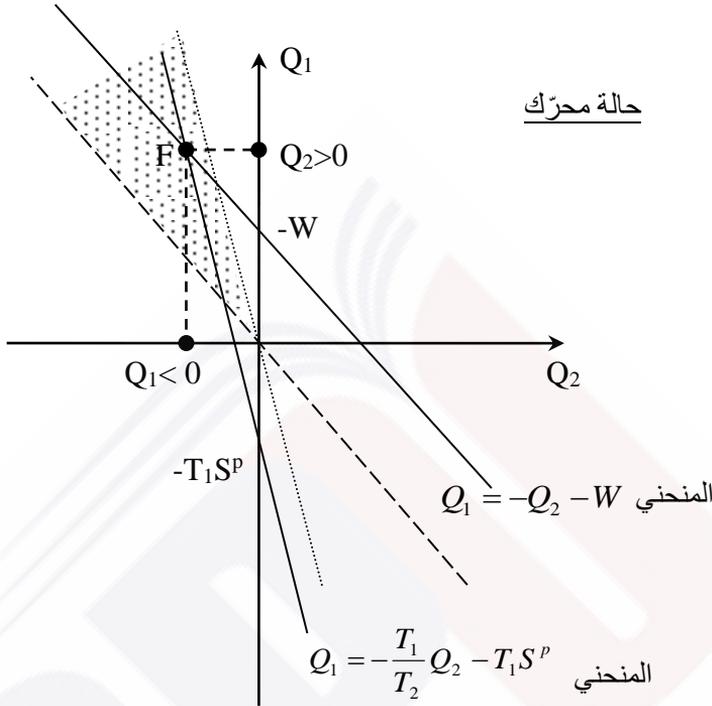
$$\text{من العلاقة (2) نجد } Q_1 = -\frac{T_1}{T_2} Q_2 - T_1 S^P$$

نفترض أنّ S^P مقدار ثابت معلوم ($S^P \geq 0$)، نمثل في الإحداثيات

(Q_1, Q_2) كلاً من المنحنيين المعبرّ عنهما في المعادلتين السابقتين، فنحصل

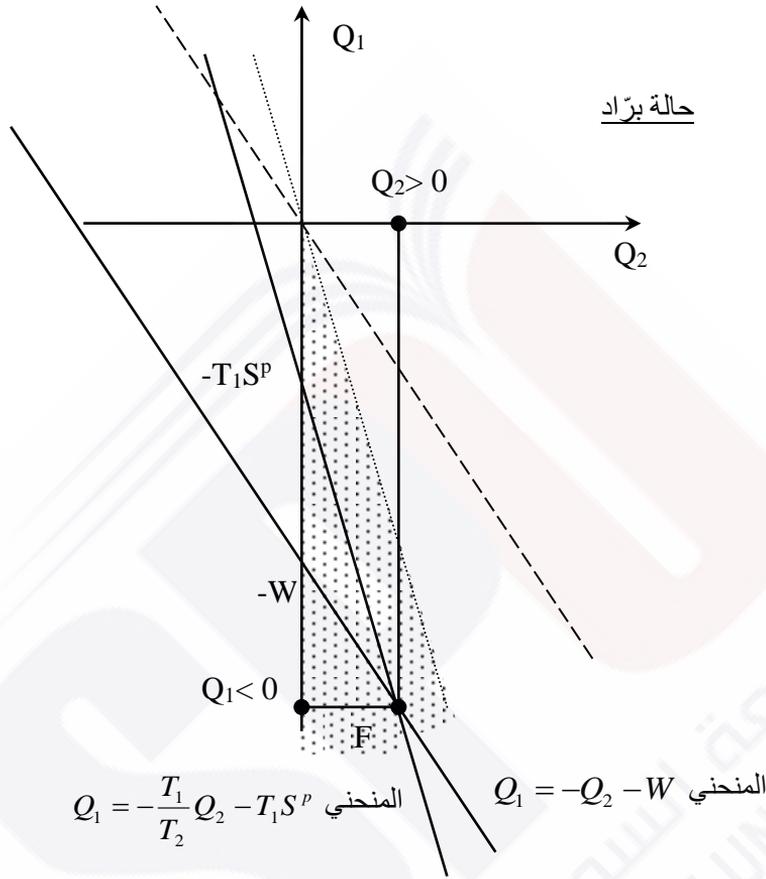
على نقطة عمل الآلة الحرارية F من تقاطع المنحنيين، مع ملاحظة أنّ ميل المنحني الثاني أصغر من ميل المنحني الأول.

في الشكل (11-4-أ) مثلنا كلاً من المنحنيين في حالة المحرك الحراري ($W < 0$) نلاحظ أن التقاطع يحدث في الربع الثاني، ومن ثمّ $Q_1 > 0$ و $Q_2 < 0$ أي إنّ الجملة تأخذ كمية حرارة من المنبع الساخن وتُعطي كمية حرارة إلى المنبع البارد. وقد مثلنا المنحني $Q_1 = -\frac{T_1}{T_2}Q_2 - T_1S^p$ في الحالة التي تعمل فيها الجملة بشكل عكوس أي $S^p = 0$ (الخط المنقط)، وهي الحالة الحدية التي يمكن أن تعمل فيها الجملة، نستنتج أنّ النقطة F تقع دوماً تحت المنحني المنقط. من ناحية ثانية، إنّ العمل الأدنى الذي يقدمه محرك هو أكبر من الصفر، مثلنا المنحني $Q_1 = -Q_2 - W$ في الحالة الحدية التي يكون فيها $W = 0$ (الخط المتقطع)، نعلم أنّه في حالة محرك لا يمكن أن يكون $W < 0$ إذن النقطة F تقع فوق المنحني المتقطع، نستنتج أنّ نقطة عمل محرك تقع في المنطقة المنقطّة في الشكل، بقية النقاط مستحيلة.



الشكل 11-4-أ: مخطط رافو في حالة محرك.

بالطريقة نفسها أعدنا رسم المنحنيات في حالة براد أو مضخة حرارية، الشكل (11-4-ب)، لدينا $W > 0$ ، والتقاطع يحدث في الربع الرابع، ومن ثمّ $Q_2 > 0$ و $Q_1 < 0$ أي إنّ الجملة تُعطي كمية حرارة للمنبع الساخن وتأخذ كمية حرارة من المنبع البارد. بمناقشة مشابهة لتلك المقدّمة في حالة محرك نستنتج منطقة العمل لبراد أو مضخة حرارية وهي المنطقة المنقّطة.



الشكل 4.11-ب: مخطط رافو في حالة براد.

د. أنواع الآلات ثنائية المنبع

يُمكن التفريق بين نوعين من الآلات الحرارية:

أ. الآلات التي تخضع فيها كتلة محددة من مادة وحيدة الطور لتحوّل حلقي.

ب. الآلات التي تخضع فيها كتلة محددة ثنائية الطور الأولى غازية والأخرى سائلة لتحوّل حلقي.

4.11. الحلقات المختلفة للمحركات الحرارية

1.4.11. المحرك الانفجاري

هو المحرك المستخدم في السيارات التي تسير باستخدام الغازولين، حيث يجري احتراق الغازولين داخل المحرك، يتألف المحرك من عدة أسطوانات، وقد نجد محركاً مكوناً من أسطوانة وحيدة. تمّ تصنيع أول محرك انفجاري من قبل المهندس الألماني أوتو Otto عام 1878، في هذا المحرك تتكون غرفة الانفجار من أسطوانة مغلقة بمكبس متحرك كما في الشكل (11-5-أ)، يجري إدخال المزيج المحترق إلى داخل الأسطوانة حيث يُضغط ثمّ تولّد شرارة تؤدي إلى الاحتراق، وتوليد ضغط كبير يدفع بالمكبس الذي بدوره يدفع ذراعاً متمفصلة مع عجلة تدور بتأثير دفع الذراع، وعندما يبلغ المكبس الحد الأدنى، يفتح صمام في أعلى الأسطوانة، ولما كانت العجلة قد اكتسبت طاقة حركية دورانية فإنّها تستمر بالدوران دافعة المكبس إلى الأعلى لي طرح الغاز الناجم عن الاحتراق ليعود المكبس إلى وضعه الابتدائي.

وصف الحلقة

نلاحظ أنّه يُمكننا تقسيم عمل المحرك إلى أربع مراحل:

(1) في البداية المكبس في موقعه الأعلى، والحجم الذي يحصره المكبس داخل الأسطوانة V_2 ، يجري حقن المزيج الغازي في الأسطوانة بضغط ثابت P_1 ، ويتحرك المكبس نحو الأسفل ليُصبح الحجم داخل الأسطوانة مساوياً V_1 ، نمثّل ذلك على الشكل (11-5-ب) بالجزء IA .

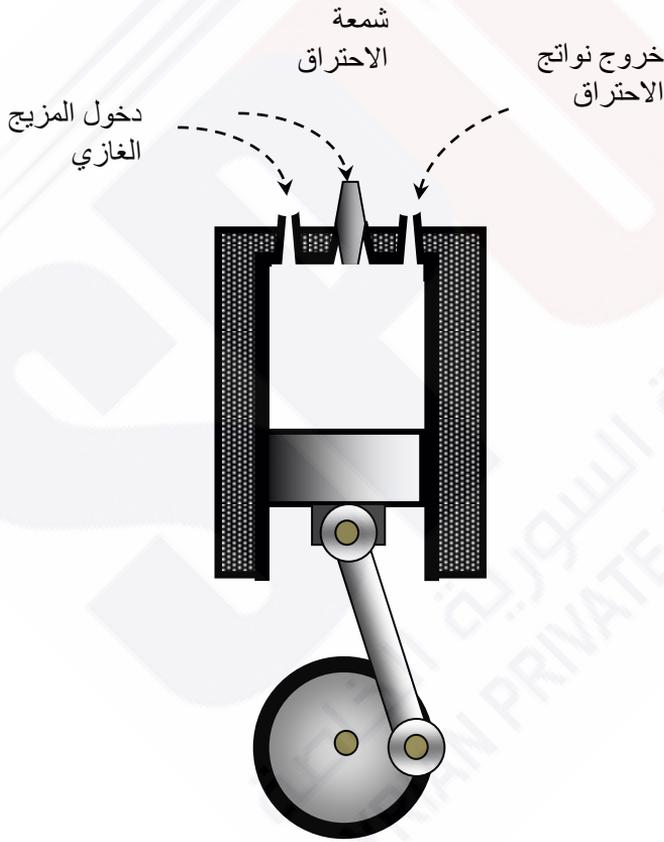
(2) يُغلق الصمام الذي دخل منه الوقود، ويرتفع المكبس ليضغط الغاز بشكل متساوي الأنتروبي إلى النقطة B .

(3) عند النقطة B تُطلق الشرارة، مما يؤدي إلى ارتفاع الضغط بشكل فجائي إلى القيمة P_2 ، نمثّل هذا التحوّل بالجزء BC ، لاحظ أننا اعتبرنا هذا

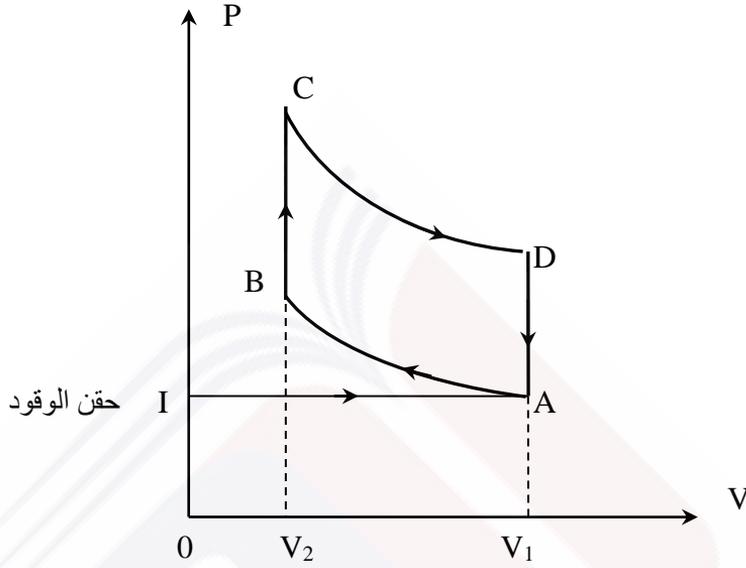
التحوّل متساوي الحجم لأنّ التفاعل سريع جداً مقارنة بالفترة اللازمة لإنجاز دورة كاملة للعجلة أي حلقة كاملة للمحرك.

(4) يؤدي الضغط المتولد إلى دفع المكبس بشكل متساوي الأنتروبي إلى النقطة D حيث يصل المكبس إلى موضعه الأدنى.

(5) عند النقطة D يُفتح صمام تفرغ الغاز، مما يخفض الضغط بشكل فجائي ويسمح بتفريغ الغاز، ثمّثل ذلك بالجزء DA .



الشكل (11-5-أ) مخطط لأسطوانة محرّك انفجاري. نجد في هذا المخطط الأسطوانة والمكبس المتفصل مع ذراع نقل الحركة والمتفصل بدوره من الجهة الأخرى بناقل الحركة الذي مثلناه هنا للتبسيط-على شكل قرص، يسمح هذا التفصل بتحويل حركة المكبس الانسحابية إلى حركة دورانية.



الشكل 11-5-ب: حلقة أوتو.

في أكثر السيارات نجد أربع أسطوانات، بحيث تتناوب الأسطوانات على عملية دفع المكبس مما يسمح بالدوران شبه المنتظم للمحرك. نلاحظ أنه لدينا جملة مفتوحة، غير أنه يُمكننا إجراء الدراسة على كتلة محددة من الغاز تقوم بالتحول الحلقي المشروح أعلاه.

تسمي الحلقة التي حصلنا عليها باسم حلقة *Beau de Rochas* نسبة إلى المهندس الفرنسي الذي اقترحها عام 1862، كما تُسمى بحلقة أوتو *Otto*.

حساب مردود المحرك

يتلقى الغاز كمية من الحرارة Q_1 نتيجة لعملية الاحتراق، في حساباتها نفترض أن لدينا الغاز نفسه خلال الحلقة وهو يتلقى كمية حرارة Q_1 من منبع

ساخن ، وتقدّم الجملة عملاً ميكانيكياً $-W$ ، ومن ثمّ يكون مردود المحرك مساوياً إلى النسبة $\rho = \frac{-W}{Q_1}$.

من أجل حلقة لدينا:

$$W + Q_1 + Q_2 = 0$$

إذن:

$$\rho = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$$

لدينا:

$$Q_2 = mc_v(T_1 - T_4) \text{ و } Q_1 = mc_v(T_3 - T_2)$$

حيث m كتلة الغاز، و $T_1 = T_A$ و $T_2 = T_B$ و $T_3 = T_C$ و

$$T_4 = T_D$$

التحولان AB و CD متساويا الأنتروبي، إذن:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_D}{V_C}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \text{ و } \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$

ليكن $\alpha_v = \frac{V_1}{V_2}$ ، نسمي هذه النسبة معدّل الانضغاط، من العلاقتين

السابقتين نجد:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \frac{T_3 - T_2}{T_4 - T_1} = \alpha_v^{\gamma-1}$$

نستنتج:

$$\rho = 1 + \frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{\alpha_v^{\gamma-1}}$$

أي إنّ المردود لا يتعلق إلا بمعدّل الانضغاط.

في التطبيقات العملية الغاز مكوّن من الهواء حيث $\gamma \approx 1.4$ ويكون

$$\rho \approx 0.58 \text{ نجد } \alpha_v \approx 9$$

ملاحظات:

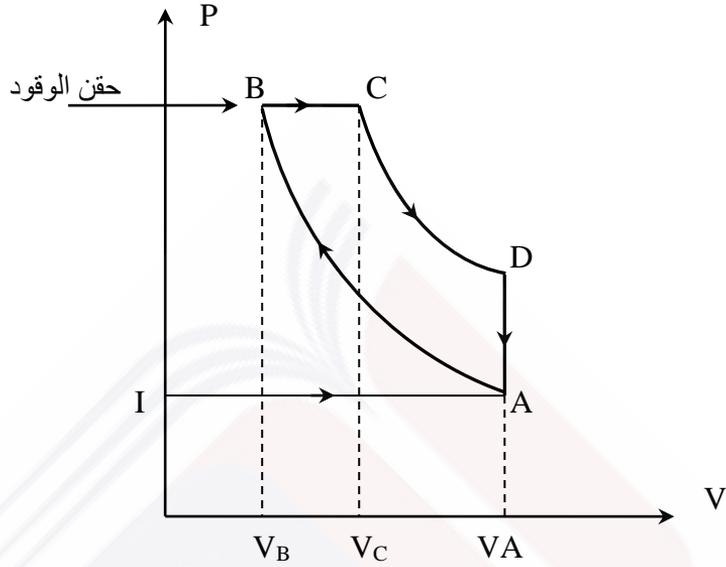
1. الحلقة الحقيقية تشبه الحلقة النظرية الممتلئة أعلاه، ولكنها تختلف بشكل كبير بجوار النقاط A, B, C, D .
2. إنَّ المردود السابق نظري وفي السيارات الشائعة لدينا مردود أقل من نصف القيمة المحسوبة هنا.

2.4.11. محرك ديزل

يتميّز محرك ديزل بعدم حاجته إلى الشرارة الكهربائية لإشعال الغاز، حيث أنّ ضغط مزيج من بخار المازوت والهواء إلى قيمة عالية يؤدي إلى اشتعاله. تمّ تصميم وتصنيع هذا المحرك من قبل الباحث الألماني *Diesel* عام 1893.

وصف الحلقة

- يُمكن تقسيم عمل المحرك إلى أربع مراحل (الشكل (11-6)).
- تُدخل الهواء من خلال صمام الدخول ليملأ الأسطوانة بحجمها الأعظم V_A ، الجزء IA .
- (1) يُغلق الصمام ، ويجري ضغط الهواء بشكل كظوم وعكوس (متساوي الأنتروبي) إلى الحجم V_B . الجزء AB
 - (2) في النقطة B يجري حقن الوقود، يحترق الوقود بتأثير الضغط المرتفع، ويدفع المكبس ليصل الحجم إلى القيمة V_C ، (النقطة C) حيث ينتهي احتراق الوقود. بعد ذلك يتمدد الغاز بشكل متساوي الأنتروبي إلى النقطة D .
 - (3) بعد ذلك يُفتح صمام التفريغ، وهذا يسمح بتخفيض الضغط فجائياً، ويتفرغ الغاز.



الشكل 11-6: حلقة ديزل.

حساب المردود

نفترض أنّ الجملة مغلقة، مكوّنة من كتلة من الغاز m ثابتة خلال الحلقة، ولنحسب المردود عندما تجري تحولات على هذه الكتلة وفق هذه الحلقة. لدينا:

$$\rho = \frac{-W}{Q_1}$$

$$\rho = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$$

حيث Q_1 كمية الحرارة الناجمة عن احتراق الوقود في الحالة العملية وهي هنا كمية الحرارة المأخوذة من المنبع الساخن خلال التحول BC . و Q_2 كمية الحرارة المقدّمة إلى الوسط الخارجي خلال التحول DA ، وفي الحالة العملية تُمثّل Q_2 كمية الحرارة المفقودة مع الغاز الذي يجري طرحه.

ليكن $\alpha_v = \frac{V_A}{V_B}$ معدل الانضغاط. وليكن $\beta_v = \frac{V_A}{V_C}$ معدل التمدد.

التحول BC متساوي الضغط إذن :

$$Q_1 = \Delta H_{BC} = mc_p (T_C - T_B)$$

والتحول DA متساوي الحجم إذن:

$$Q_2 = \Delta H_{DA} = mc_v (T_A - T_D)$$

نستنتج:

$$\rho = 1 + \frac{c_v (T_A - T_D)}{c_p (T_C - T_B)} = 1 - \frac{T_A - T_D}{\gamma (T_C - T_B)} = 1 - \frac{\frac{T_D}{T_C} - \frac{T_A}{T_C}}{\gamma \left(1 - \frac{T_B}{T_C}\right)}$$

التحول AB كظوم وعكوس إذن:

$$\frac{T_B}{T_A} = \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{\gamma-1}$$

التحول CD كظوم وعكوس إذن:

$$\frac{T_D}{T_C} = \left(\frac{V_C}{V_D}\right)^{\gamma-1}$$

نستنتج:

$$\frac{T_D}{T_C} = \left(\frac{V_C}{V_D}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{1}{\beta_v}\right)^{\gamma-1} \quad \text{و} \quad \frac{T_A}{T_B} = \alpha_v^{-\gamma+1}$$

المنحني BC متساوي الضغط، باستخدام معادلة الغاز الكامل نجد:

$$\left. \begin{array}{l} P_B V_B = nRT_B \\ P_B V_C = nRT_C \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{T_B}{T_C} = \frac{V_B}{V_C} = \frac{\beta_v}{\alpha_v}$$

من ناحية ثانية:

$$\frac{T_A}{T_C} = \frac{T_A}{T_B} \times \frac{T_B}{T_C} = \alpha_v^{-\gamma+1} \times \frac{\beta_v}{\alpha_v} = \alpha_v^{-\gamma} \beta_v$$

ومن ثم يُصبح المردود:

$$\rho = 1 - \frac{\beta_v^{-\gamma} - \alpha_v^{-\gamma}}{\gamma(\beta_v^{-1} - \alpha_v^{-1})}$$

تطبيق عددي:

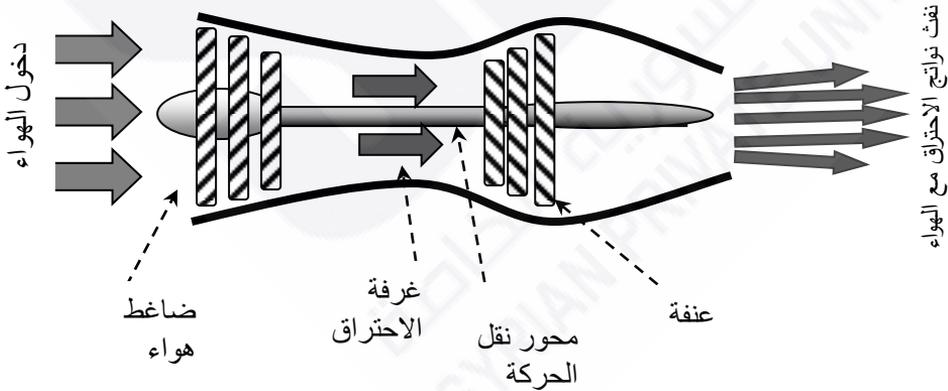
بأخذ $\gamma \approx 1.4$ ، و $\alpha_v \approx 14$ ، و $\beta_v \approx 9$ نجد $\rho = 0.62$

ملاحظات:

1. في التطبيقات العملية يُمكن أن تبلغ استطاعة محرك ديزل 30 MW.
2. تختلف الحلقة الحقيقية لمحرك ديزل قليلاً عن الحلقة النظرية، ومردودها أصغر.

3.4.11 محركات الدفع

وهي محركات تعتمد على نفث الغاز بسرعات عالية، مثل محركات الصواريخ، وعنفات الغاز حيث يُستفاد من العمل المقدم في تدوير آلة، قد تُستخدم لإنتاج الكهرباء مثلاً. انظر الشكل (11-7-أ)



الشكل 11-7-أ: مخطط محرك نفث. جزء من طاقة الغاز المندفع يُستخدم لتدوير

عنفة تدوير بدورها ضاغط الهواء.

وصف الحلقة

يُمكن استخدام كمية محدّدة من الغاز لوصف الحلقة بالمراحل التالية (الشكل 11-7-ب):

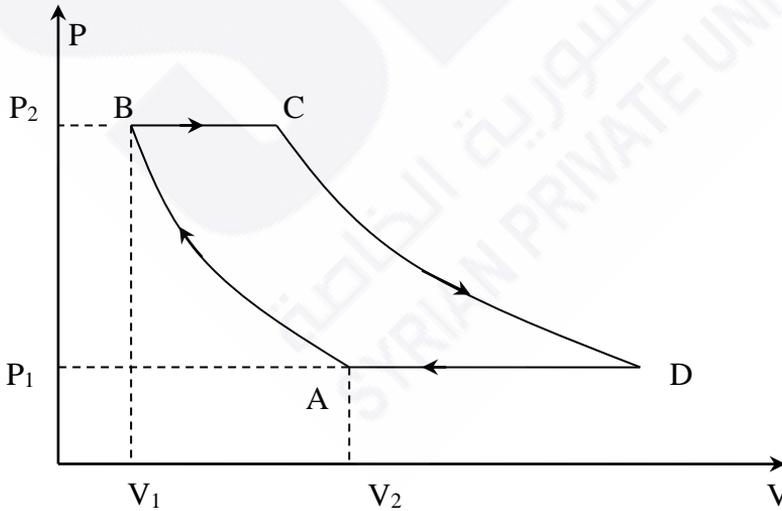
(1) يُؤخذ الغاز بضغط P_1 ، يُضغَط هذا الغاز بشكل كظوم وعكوس إلى القيمة P_2 .

(2) يأخذ الغاز كمية من الحرارة من المنبع الساخن مع بقاء الضغط ثابتاً، في التطبيق العملي يجري حرق الغاز مما يرفع درجة الحرارة، وذلك خلال المرحلة BC .

(3) يخرج الغاز من فوهة الحجرة بشكل فجائي مما يجعل التحوّل كظوماً خلال خروج الغاز وانتقاله إلى الضغط الخارجي P_1 ، تمثّل هذا التحوّل بتمدد كظوم عكوس (التحوّل CD).

(4) يتبرّد الغاز تلقائياً لوجوده في الوسط الخارجي فيتقلّص حجمه، وهكذا نحصل على التحوّل DA .

تُسمّى الحلقة التي حصلنا عليها بحلقة **Brayton** أو حلقة **Joule**.



الشكل 7.11-ب: حلقة جول.

حساب المردود

لدينا:

$$\rho = \frac{-W}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$$

ولكن التحوّل BC متساوي الضغط إذن:

$$Q_1 = (\Delta H)_{B \rightarrow C} = mc_p (T_C - T_B)$$

حيث m كتلة الغاز.

والتحوّل DA متساوي الضغط أيضاً إذن:

$$Q_2 = (\Delta H)_{D \rightarrow A} = mc_p (T_A - T_D)$$

إذن:

$$\rho = 1 + \frac{T_A - T_D}{T_C - T_B}$$

ليكن $\alpha_v = \frac{V_B}{V_A}$ معدّل الانضغاط. ولنحسب المردود بدلالة α_v .

لما كان كل من التحوّلين AB و CD عكوسين كظومين فإنّ:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_A}{V_B} \right)^\gamma = (\alpha_v)^\gamma \quad \text{و} \quad \frac{T_C}{T_D} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \text{و} \quad \frac{T_B}{T_A} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

نستنتج:

$$\frac{T_B}{T_A} = \frac{T_C}{T_D} = \frac{T_C - T_B}{T_D - T_A} = \alpha_v^{\gamma-1}$$

ومن ثمّ:

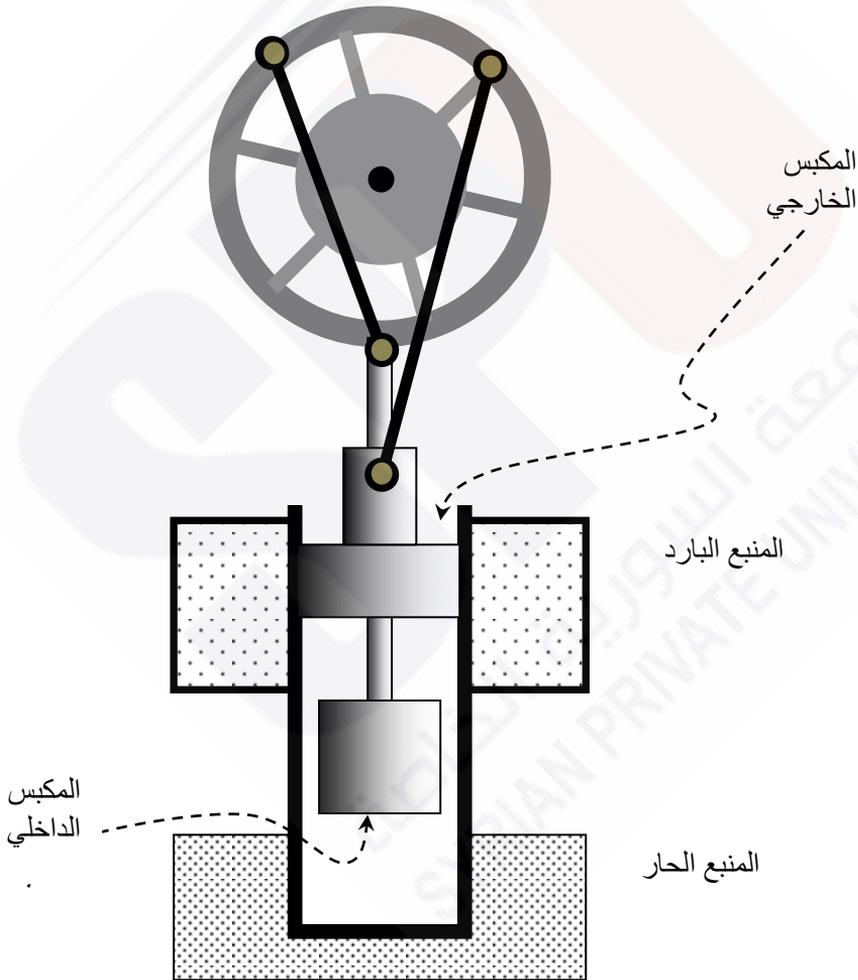
$$\rho = 1 - \frac{T_A}{T_B} = 1 - \frac{1}{\alpha_v^{\gamma-1}}$$

نلاحظ أنّه لدينا صيغة مماثلة لحلقة *Beau de Rochas* ، ولكن يُمكن

الحصول من حلقة جول على استطاعة تصل إلى 60 MW .

4.4.11. محرك ستيرلينغ Stirling

يتميز هذا المحرك عن المحركات التي عرضناها حتى الآن بأن له حلقة مغلقة، يتألف هذا المحرك من أسطوانة مغلقة تحتوي مكبسين، مكبس الانزياح ومكبس العمل، كما في الشكل (8.11)



الشكل 8-11: محرك ستيرلينغ.

لدينا مكبسان متحركان، المكبس الأول يُغلق الأسطوانة بشكل تام، والثاني يسمح بمرور الغاز عبر فتحات صغيرة من جهة إلى أخرى من المكبس، الجزء الأسفل من الأسطوانة يلامس المنبع الحراري الساخن، والجزء العلوي يلامس المنبع الحراري البارد، يسخن الغاز في الأسفل فيدفع المكبس الخارجي نحو الأعلى، وهذا بدوره يدفع العجلة لتدور دافعة المكبس الداخلي إلى الأسفل، وهذا الأخير يشغل مكان الغاز في الأسفل محركاً إياه إلى الأعلى حيث يصبح هذا الغاز في تلامس مع المنبع البارد حيث يتبرّد ويصغر حجمه مما يؤدي إلى جذب المكبس الخارجي نحو الأسفل. نلاحظ من الشكل أنّ المكبس الأعلى متمفصل مع ذراع تقوم بدفع العجلة فتديرها، كما أنّ هذه العجلة متمفصلة مع ذراع آخر يقوم برفع وخفض المكبس الداخلي بشكل يسمح بتلامس أكبر كمية من الغاز مع المنبع البارد عند هبوط المكبس الخارجي، وتلامس أكبر كمية من الغاز مع المنبع الساخن عند ارتفاعه.

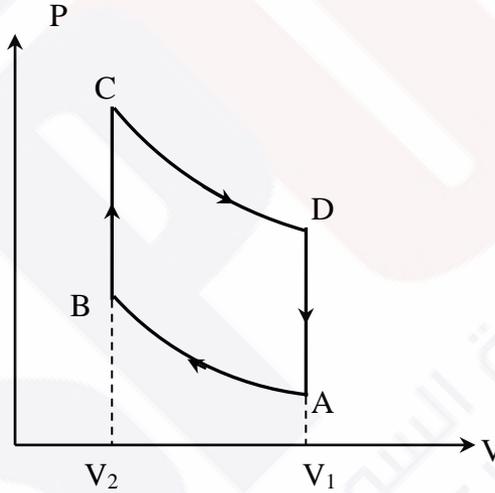
وصف الحلقة

يُمكن تقسيم عمل المحرك إلى أربع مراحل (الشكل 11-9):

- (1) الغاز في الأعلى والمكبس الخارجي في أعلى الأسطوانة والمكبس الداخلي في الأسفل، يتبرّد الغاز نتيجة ملامسته للمنبع البارد، يتجه المكبس الخارجي نحو الأسفل فينضغط الغاز بشكل متساوي الحرارة لاستمرار ملامسته للسطح البارد، ويندفع المكبس الداخلي نحو الأعلى سائحاً المجال للغاز للانتقال إلى الجزء الأسفل من الأسطوانة. نحصل على الجزء AB من الحلقة.
- (2) في النقطة B يُصبح الغاز ملامساً للمنبع الحار، والمكبسان في وسط الأسطوانة تقريباً، يتسخن الغاز بحجم ثابت، فيرتفع الضغط، ونصل إلى النقطة C .

(3) يؤدي ارتفاع الضغط إلى دفع المكبس الخارجي إلى الأعلى ويتمدد الغاز بشكل متساوي الحرارة نتيجة استمرار ملامسته للمنبع الساخن. ونحصل على الجزء CD من الحلقة. في النقطة D يكون المكبس الخارجي في وضعه الأعلى، ويصبح الغاز بلامسة المنبع البارد.

(4) إن ملامسة الغاز للمنبع البارد يؤدي إلى تبريده بشكل متساوي الحجم، فينخفض الضغط ونصل إلى النقطة A .



الشكل 11-9: حلقة ستيرلينغ.

حساب المردود

يُكتب المردود:

$$\rho = \frac{-W}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$$

المنحني CD متساوي الحرارة، إذن:

$$Q_1 = Q_{CD} = -W_{CD} = \int p dV = nRT_C \int \frac{dV}{V} = nRT_C \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

لدينا:

$$W = W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DA}$$

ولكن:

$$W_{DA} = 0 \text{ و } W_{BC} = 0$$

ولدينا:

$$W_{CD} = -nRT_C \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \text{ و } W_{AB} = nRT_B \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

نستنتج:

$$W = -nR(T_C - T_B) \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

ومن ثمَّ:

$$\rho = 1 - \frac{T_B}{T_C}$$

إذن مردود محرك ستيرلينغ يساوي مردود حلقة كارنو.

5.4.11. المحطات الحرارية التقليدية والنووية: حلقة رانكين وحلقة هيرن.

تستخدم المحطات الحرارية التقليدية والنووية الماء لتحويل الطاقة، وفي المحطات التقليدية يُستخدم الفحم أو الغاز الطبيعي أو الفيول كوقود للتسخين في المراجل، بينما يكون الانشطار النووي هو مصدر الحرارة في المفاعلات النووية.

مبدأ العمل

يُسخّن الماء في مراجل مغلقة مما يسمح بارتفاع درجة الحرارة إلى قيم قد تصل إلى 500 K ومن ثمّ يكون ضغط البخار المتشكل عالٍ إذا ما قورن بالضغط الجوي، يُمرر هذا البخار على عنفة تقوم بتدوير مولّد كهربائي. تتكوّن العنفة من سلسلة عنفات متغيّرة القطر، محمولة على المحور نفسه، ومتوضعة في أنبوب مخروطي، بحيث يدخل البخار من الجهة الضيقة ويخرج من الجهة الواسعة، (انظر الشكل 11-10) وهكذا يتمدد البخار تدريجياً لدى عبوره للأنبوب ومروره على العنفات، أثناء الانتقال يتمدد البخار وتنخفض درجة حرارته، وعند وصوله إلى الفتحة الواسعة للأنبوب يكون قد وصل إلى الضغط الأدنى، يُمرر البخار على مكثّف يسمح بتبريد البخار وتكثيفه، وبعدها يُضخ السائل إلى داخل المرجل. إنّ التمدد التدريجي للغاز أثناء مروره على العنفات المتتالية يسمح بالأخذ بتقريب التمدد متساوي الأنثروبي.

وصف الحلقة (الشكل 11-11):

المرحلة الأولى: وتتضمن تسخين السائل لتحويله إلى بخار وتتم بدرجة حرارة ثابتة (الجزء AB)

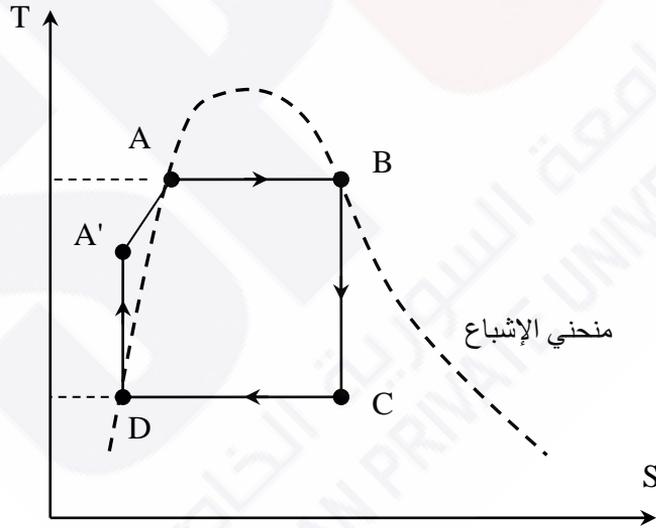
المرحلة الثانية: يمر فيها البخار على سلسلة العنفات فيتمدد بشكل متساوي الأنثروبي (الجزء BC)

المرحلة الثالثة: يتكثف فيها البخار بعد خروجه من العنفة ويجري ذلك بدرجة حرارة ثابتة (الجزء CD).

المرحلة الرابعة: يُضخ الغاز إلى داخل المرجل وهذا يتم بخطوتين: الأولى متساوية الأنثروبي يصل السائل بها إلى النقطة A' حيث الضغط يساوي الضغط داخل المرجل، والثانية متساوية الضغط يصل بها السائل إلى النقطة A ، وفي هذه الخطوة نسخّن السائل بضغط ثابت لنصل إلى درجة حرارة مساوية لدرجة حرارة المرجل. (الجزء $DA'A$).



الشكل 10-11: عنفة مكونة من سلسلة عنفات متمحورة وذات أقطار متزايدة تُستخدم لتوليد كهرباء، توضع هذه العنفة داخل أنبوب مخروطي يدخل البخار من فتحته الضيقة ويتمدد أثناء انطلاقه باتجاه الفتحة الواسعة للأنبوب المخروطي دافعاً أجنحة العنفات المتتالية مسبباً دورانها.



الشكل 11-11: حلقة رانكين.

تُعرف الحلقة الموصوفة أعلاه باسم حلقة Rankine.

حساب مردود الحلقة

لدينا:

$$\rho = \frac{-W}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$$

حيث Q_1 كمية الحرارة المقدّمة من منابع الحرارة في الجزء $A'A$ والجزء AB .
و Q_2 كمية الحرارة المتبادلة مع المنبع البارد في الجزء CD .
لدينا:

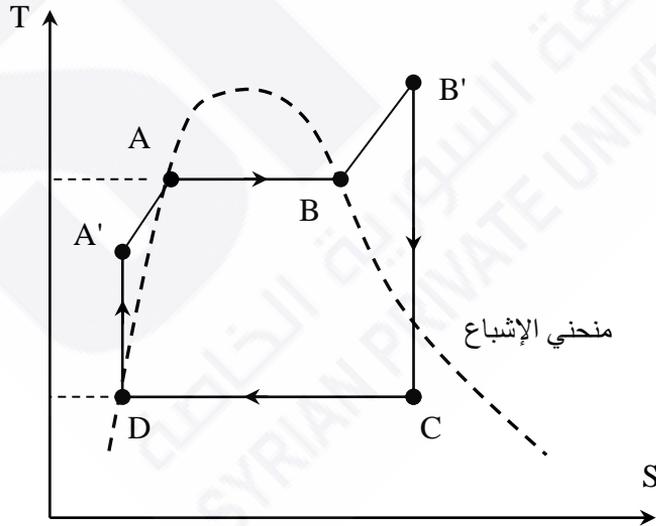
$$Q_2 = H_C - H_D \quad \text{و} \quad Q_1 = H_B - H_{A'}$$

لأنّ التحولات متساوية الضغط.

ومن ثمّ:

$$\rho = 1 - \frac{H_C - H_D}{H_B - H_{A'}}$$

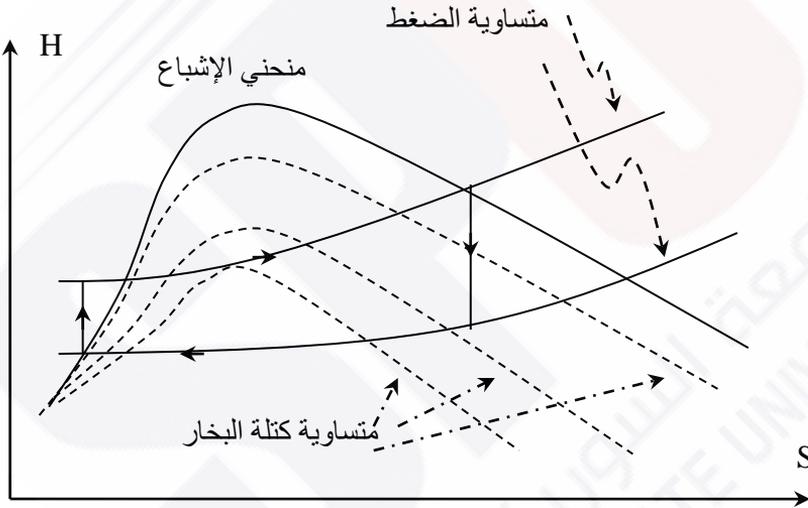
في التطبيقات العملية نقوم بتسخين البخار بعد خروجه من المرجل وذلك لمنع
تكوّن الماء السائل على القطع المعدنية، ونحصل بذلك على حلقة هيرن *Hirn*
الشكل (12-11)



الشكل 12-11: حلقة هيرن.

مخطط مولية Mollier

لما كان المردود مرتبط بقيم الأنتالي فإننا نلجأ إلى مخطط مولية الذي يُمثّل H بدلالة S ، يحوي هذا المخطط على منحنيات متساوية الأنتروبي ومنحنيات متساوية الأنتالي، ومنحنيات متساوية كتلة البخار، (انظر الشكل 11-13) وهذا يسمح باستنتاج قيم الأنتالي في مختلف نقاط الحلقة واستنتاج المردود.



الشكل 11-13: مخطط مولية.

5.11. الآلات ذات الحلقة العكسية (أو المقلوبة)

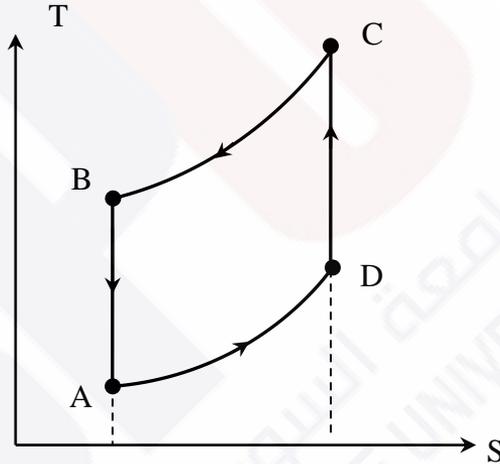
في هذه الآلات يكون اتجاه الحلقة معاكساً لجهة دوران عقرب الساعة، وتُصنّف الآلات من هذا النوع إلى مجموعتين: في المجموعة الأولى تُستخدم مضخة لنقل المائع من المبخّر ذي الضغط المنخفض إلى المكثف ذي الضغط

المرتفع، وفي حالة الموائع وحيدة الطور نجد حلقة برايتون، وفي حالة الموائع ثنائية الطور نجد حلقة هيرن *Hirn*، في المجموعة الثانية الجملة لا تحتاج عملاً ونسُميها آلات بالامتصاص.

1.5.11. الآلات التي تعمل بالهواء

من الأمثلة البراد الذي يعمل على الهواء و المضخة الحرارية، تعمل وفق

حلقة برايتون *Brayton* المعكوسة، الشكل (11-14)



الشكل 11-14: حلقة برايتون المعكوسة.

لنحسب فعالية البراد الذي يعمل بهذه الحلقة:

لدينا:

$$\eta_r = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{-Q_1 - Q_2}$$

ولكن:

$$Q_1 = \Delta H_{C \rightarrow B} = C_p (T_B - T_C)$$

$$Q_2 = \Delta H_{A \rightarrow D} = C_p (T_D - T_A)$$

وباستخدام العلاقات المستنتجة في الحلقة المباشرة نجد:

$$\eta_r = \frac{1}{-1 + \alpha_v^{\gamma-1}}$$

لنحسب فعالية مضخة حرارية حيث يهمننا التدفئة التي نحصل عليها:

$$\eta_p = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{-Q_1 - Q_2}$$

نجد:

$$\eta_p = \frac{1}{1 - \alpha_p^{1-\gamma}}$$

2.5.11 الآلات التي تستخدم تحوّل الطور: حلقة هيرن *Hirn* المعكوسة

يُستخدم هذا النوع من الآلات في درجات الحرارة التي تتراوح ما بين

$-50^\circ C$ و $100^\circ C$. وأكثر الغازات استخداماً هي غاز الفريون CCl_2F_2

والنشادر NH_3 ، وثاني أكسيد الكربون.

3.5.11 آلات الامتصاص

سوف نقوم بشرح أحد أجهزة الامتصاص وهي أجهزة التبريد

بالامتصاص، يُشبه عمل هذه الأجهزة أجهزة التبريد باستخدام ضاغط (يعتمد

على استهلاك الكهرباء)، ولكن يُستبدل الضاغط بمنبع حراري قد يكون من

الطاقة الشمسية، أي يستخدم لواقط شمسية.

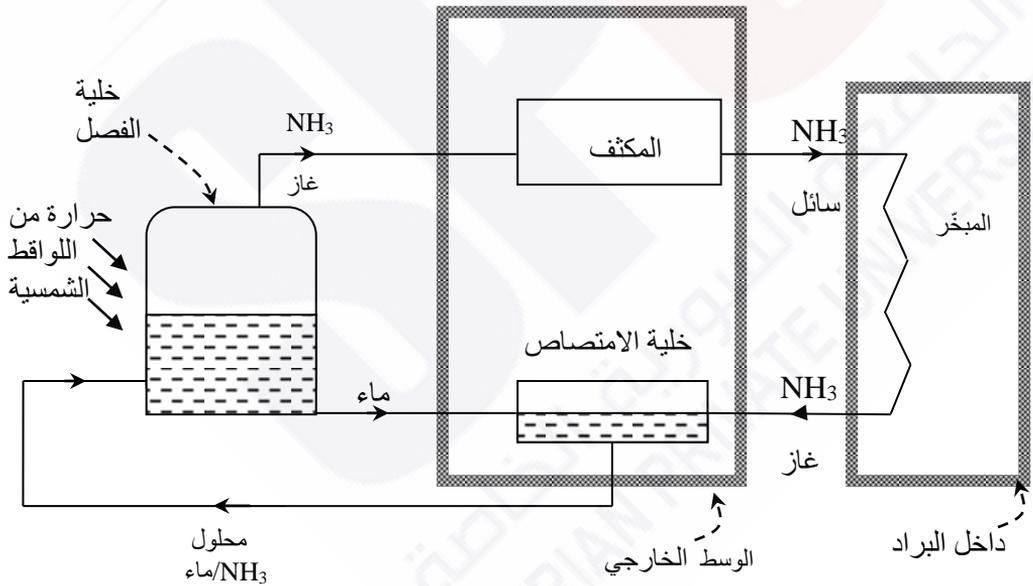
في جهاز التبريد بالامتصاص يُستخدم مائع تبريد ومُحل، وكثيراً ما يُستخدم

الزوج (غاز النشادر والماء)، الماء كمحل وغاز النشادر كمائع تبريد. ويكون

لدينا حلقة مغلقة مثل حالة البراد التقليدي. وتجري عملية التبريد عبر الخطوات

الآتية:

- (1) يجري تسخين المحلول (نشادر/ماء) في خلية الفصل التي تحصل على الحرارة من منبع حراري (اللوافظ الشمسية مثلاً)، مما يُخفّض انحلالية النشادر ويؤدي إلى انفصاله عن الماء السائل.
- (2) يجري بذلك فصل الغاز عن الماء السائل، ويقاد النشادر السائل إلى المكثف الذي يتمتع بدرجة حرارة المحيط الخارجي حيث يتميّع.
- (3) ينتقل النشادر المتميّع إلى المبخر حيث يؤدي تبخّره إلى التبريد.
- (4) بعد ذلك يجري امتصاص غاز النشادر من قبل الماء في خلية الامتصاص، هذا الامتصاص يُغني عن الضاغط الذي يدفع الغاز إلى خارج البراد.
- (5) يقاد المزيج بعد ذلك إلى المقطّر لتبدأ الحلقة من جديد. انظر الشكل (11-15)



الشكل 11-15: مخطط جهاز تبريد يعمل بالطاقة الشمسية.

نعرف فعالية الجهاز بأنها النسبة:

$$e = \frac{Q_f}{Q_g}$$