الباب العاشر

بعض التطبيقات الهندسية للديناميكا الحرارية

١ – خواص البخار في الديناميكا الحرارية :

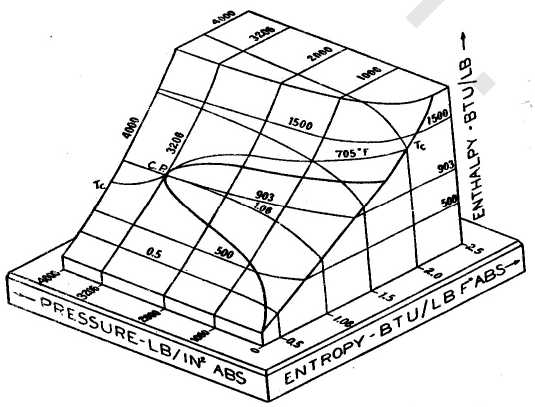
هنا سنتناول بالتفصيل كيفية تطبيق أسس الديناميكا الحرارية لتشغيل الآت؛ بخارية وتربينات وثلاجات . حيث تجرى الحسابات العددية باستخدام الجداول والرسومات التخطيطية لتعطينا الإنتروبي والطاقة الداخلية والإنثالبي والخواص الأخرى لمادة التشغيل في مدى الضغوط ودرجات الحرارة .

ومثل هذه الجداول متوفرة للماء والأمونيا وثاني أكسيد الكبريت وبعض المواد الأخرى الشائعة الاستخدام في الآلات والثلاجات . وسنشرح فقط جداول الماء والتي تعرف بجداول البخار، والجداول المستخدمة تعبر عن الضغوط بالوحدات باوند/ بوصة^{٢} . ودرجة الحرارة، إما بالدرجات الفهرنهيتية، أو المطلقة ، والحجوم النوعية قدم^{٣} /باوند .

والطاقة النوعية والإنثالبي بالوحدات الحرارية البريطانية / باوند (Btu/1b) والإنتروبي النوعي بالوحدات الحرارية البريطانية / باوند – درجة فهرنهيتية مطلقة.

وتحتوي هذه الجداول على قوائم للحجم النوعي، والإنثالبي ، والإنتروبي للبخار فوق المسخن كدوال للضغط ودرجة الحرارة ، وكذا تشتمل قوائم الحجم النوعي والإنثالبي والإنتروبي لسائل مضغوط .

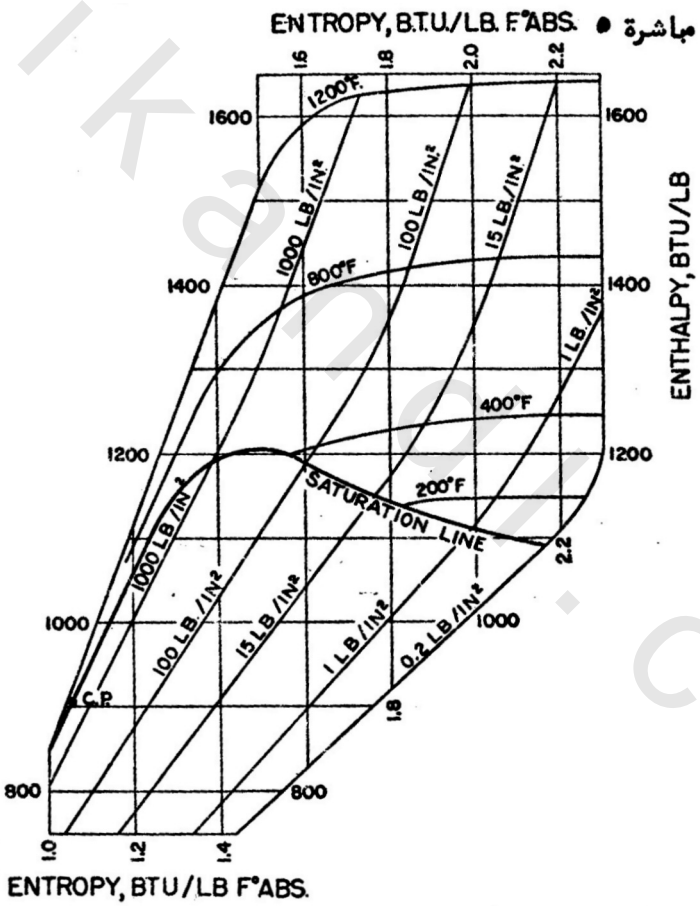
على



رسم تخطيطي للسطح h-s-p للماء

والشكل السابق رسم تخطيطي لسطح ديناميكي حراري حـصل عليـه برسـم الإنثالبي النوعي للماء عموديا على المستوى الأفقي للضغط والإنتروبي النـوعي . والخط الثقيل على السطح هو الذي يحدد منطقة سائل وبخار ، والخطوط الخفيفـة هي خطوط للثوابت p, s, h ، والشكل مرسوم بمقياس رسم معين .

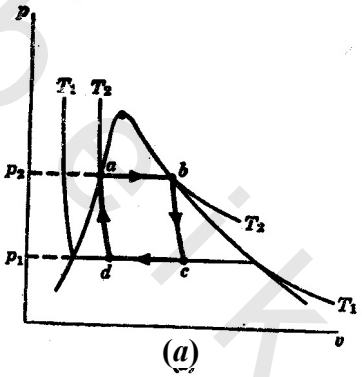
وهذا الشكل مسقط لجزء من السطح h-s-p ، على المستوى h-s ويسمى رسم موليز التخطيطي . وهذا الرسم يشتمل على المتغيرات التي تـستخدم فـي معظـم الحسابات الهندسية . والرسم التخطيطي المكبر لموليز يشتمل على مجموعـة مـن جداول البخار . والكميات اللازمة للحسابات العددية للشغل والكفاءة يمكن قراءتهـا بكل دقة من الرسم التخطيطي مباشرة .



٢ – دورة كارنوت البخارية:

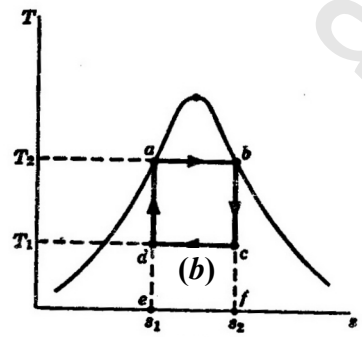
دورة كارنوت هي أي دورة عكسية محدودة بمنحنيين حراريين ومنحنيين أديباتيكاليين وطبيعة مادة التشغيل فيها غير مهمة . والشكل التالي (a) : هو رسم تخطيطي في المستوى p-v لدورة كارنوت العامة في منطقة سائل وبخار.

وعندما تبدأ عند النقطة a بسائل مشبع في أسطوانة آلة كارنوت، وتجرى عملية تمدد حراري عكسي عند درجة الحرارة T_2 إلى أن يتبخر السائل كلية عند النقطة b . خلال هذا الجزء من الدورة يفقد المستقبل ذو درجة الحرارة T_2 كمية حرارة ...



(a)

ثم تجرى عملية تمدد أديباتيكي والتي تخفض درجة الحرارة إلى T_1 عند النقطة C . وإذا كانت مادة التشغيل بخار فعملية التمدد الأديباتيكي هذه تعود بناء إلى منطقة السائل والبخار . بمعنى آخر يتكاثف بعض من البخار المشبع .



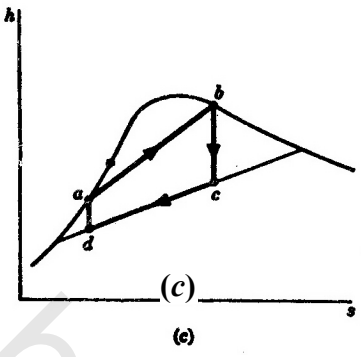
(b)

دورة كارنوت في
(a) المستوى P-v
(b) المستوى T-s

وليست جميع المواد لها نفس السلوك، فبعض منها يكون الميل فيه للمنحنى الأديباتكي أقل من ميل خط التشبع، وجميع النقط المناظرة لـ C تقع في منطقة البخار .

والآن نجري عملية ضغط حراري عند درجة الحرارة T_1 إلى أن نصل للحالة الممثلة بالنقطة d ، ويكتسب المستقبل كمية حرارة q_1 . والدورة تكمل بعملية ضغط أديباتيكي والتي خلالها يتكاثف باقي البخار وتعود حالة المجموعة إلى الحالة الممثلة بالنقطة a .

ونفس الدورة موضحة بالرسم التخطيطي T-s في الشكل التالي (b)، وكذلك برسم موليز التخطيطي h-s في الشكل التالي (c)، وحيث إن المساحات في الرسم T-s تمثل الحرارة المكتسبة أو المفقودة .



لذلك فالمساحة a b e f في الشكل (b) تمثل الحرارة المكتسبة q_2 في عملية التمدد الحراري العكسي عند درجة الحرارة T_2 . والمساحة f ، e ، d، c تمثل الحرارة المفقودة q_1 عند درجة الحرارة T_1 .

ولكن من القانون الأول ، المساحة a b c d تمثل الشغل الكلي w المبذول في الدورة . (باعتبار الكميات q_1، q_2، w جميعها كميات موجبة) وبذلك تكون كفاءة الدورة هي كما يلي :

$$\eta = \frac{w}{q_2} = \frac{\text{المساحة عند } ed}{\text{المساحة عند } ef}$$

$$= \frac{(T_2 - T_1)(s_2 - s_1)}{T_2(s_2 - s_1)}$$

$$= \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

ثم نعتبر نفس الدورة الممثلة في رسم موليير التخطيطي في الشكل السابق(c) . والعمليات الأديباتيكية العكسية عند ثبوت الإنتروبي ممثلة بخطوط رأسية . والعمليتان الحرارية والانضغاطية (يكونان في المنطقة سائل وبخار) ممثلتان بخطوط مستقيمة تميل لأعلى يمينًا .

بما أن الحرارة المنسابة q_2 أثناء عملية التمدد الحراري الانضغاطي من a إلى b تساوي $(h_b - h_a)$ والحرارة المفقودة q_1 في عملية الضغط الحراري من c إلى d تساوي $(h_e - h_d)$.

والشغل الكلي المبذول في الدورة يساوي الفرق بين قيمتي q_1،q_2. لذلك تكون الكفاءة كما يلي :

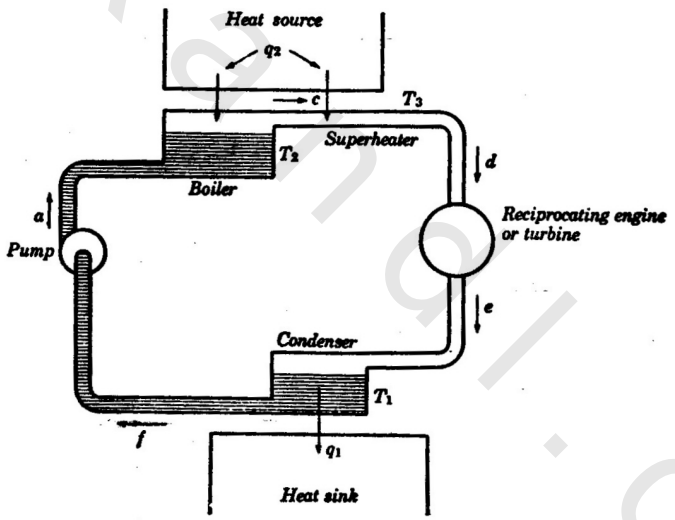
$$\eta = \frac{w}{q_2}$$

$$= \frac{h_b - h_a - h_c + h_d}{h_b - h_a}$$

ويتميز رسم موليير التخطيطي بإمكانية تعيين الحرارة والشغل والكفاءة من إحداثيات النقط في الدورة ، وواضح أن هذا أبسط من قياس المساحات في الرسم T-s . بالطبع يمكن إيجاد قيم h عند النقط a، b، c، d من جداول البخار بدلا من قراءتها من الرسم البياني .

٣ – الآلة البخارية والتربين:

تمر مادة التشغيل (الماء) في كل من الآلة البخارية والتربين بنفس الحالات المتسلسلة (ماء – بخار– ماء وبخار– ماء). والمرجل في الشكل التالي يكتسب حرارة من مصدر حراري والسائل المشبع بداخله يتحول إلى بخار مشبع عند درجة حرارة تتعين بواسطة الضغط في هذا الجزء من المجموعة.



ودرجة الحرارة هذه تكون أقل بكثير من درجة حرارة المصدر الحراري . فمثلا إذا كان الضغط داخل المرجل ١٠٠٠ باوند/بوصة^2 ، تكون الحرارة 544°F، بينما درجة حرارة المصدر الحراري الذي يحترق فيه الوقود تكون حوالي 3500°F . ينتقل البخار المشبع من المرجل إلى المحماة ليكتسب حرارة أكثر من المصدر لتزداد درجة حرارته .

والمحماة تتصل مباشرة بالمرجل ، لكي لا يرتفع ضغـ ـط البخـ ـار الفـوق المسخن عن ضغط المرجل . وفي الواقع يمكن دفع درجة حرارة البخـار الفـوق المسخن إلى درجة حرارة المصـدر، ولكن هناك حد يعرف بحـد المعـادن عنـد درجة 1000°F لا تتعداه درجة حرارة البخار الفوق المسخن ؛ لأن المعـادن التي تصنع منها الأنابيب لا تتحمل ضغوطًا مرتفعة جدا .

ثم يتدفق البخار الفوق المسخن إلى الآلة البخارية أو التربين ، حيـث ينطلـق شغل ميكانيكي، وفي نفس الوقت تنخفض درجة الحرارة والـضغط . ويمكـن أن يتكاثف جزء من البخار في هذه المرحلة من الدورة .

ثم يتدفق خليط السائل المشبع وبخاره إلى المكثف ، حيث يتكاثف بقية البخـار وحرارة التكاثف تعطى إلى الخافض الحراري ويتعين الضغط في هـذه المرحلـة بدرجة حرارة الخافض الحراري ، بمعنى أن الضغط يكون مساويا لضغط بخـار الماء عند درجة حرارة الخافض الحراري . ثم يدفع السائل المتكاثف إلى المرجـل بواسطة مضخة وبذلك تكمل الدورة .

والآلة البخارية والتربين يختلفان فقط في طريقة أخذ الطاقة الداخلية من البخار المتدفق وتحويلها إلى شغل ميكانيكية ، ففي الآلة البخاريـة يتمـدد البخـار فـي الأسطوانة ضد المكبس بينما في التربين يتدفق البخار خلال فتحات ضيقة .

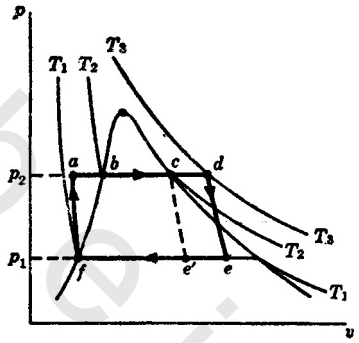
وهذا التدفق يجعله مكتسبا طاقة حركة في العملية ، ثم يصطدم البخار سـريع الحركة أثناء اندفاعه بعوارض التربينة معطـيا طاقة حـ ـركة . العمليـة تقريبـا أديباتيكية في كلتا الآلتين، ولكنها ليست عكسية تماما لذا تحدث بإنتروبي متغير .

٤ – دورة رانكـ ـن:

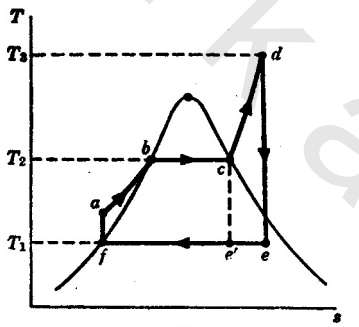
دورة رانكن هي دورة عكسية أقرب إلى الحالات المتتالية التي تمر بها مـادة التشغيل في الآلة البخارية، أو التربين من دورة كارنوت، وسنعتبر أولا دورة يكون فيها البخار في درجة الحرارة أقل من درجة حرارة البخار فوق التسخين .

وكما هو موضح بالرسومات الثلاثة في الشكل التالي إذا بدأنا عنـد النقطـة a التي تناظـر الغلاية في الشكل السابق يتحول السائل المشـبع عكسـيا إلى بخـار مشـبع عند درجـة حـرارة T_2 وضغـط P_2 (عند النقطة b)

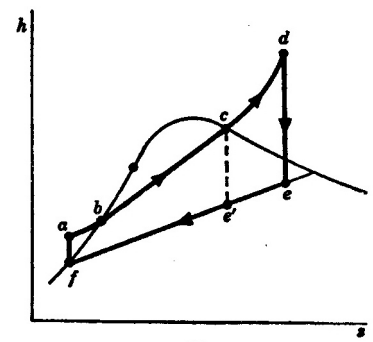
ثم يتمدد البخار عكسيا أديباتيكي إلى ضغط p_1 ودرجة حرارة T_1 (عند النقطة c) . هذه المرحلة تناظر مرور البخار خلال الآلة أو التربين . ثم يتحـول خلـيط البخار والسائل إلى سائل عند درجة حرارة T_1 ، وهذه المرحلة تناظر العملية فـي المكثف في الشكل السابق (عند النقطة d) .



(a)



(b)



(c)

دورة رانكن
(a) في المستوى p-v
(b) في المستوى T-s
(c) في المستوى h-s

ثم يضغط السائل أديباتيكيا عكـسيا إلـى الغلاية بضغط p_2 (عنـد النقطـة e) وهـذه العملية تؤدى بواسطة مضخة كما في الـشكل السابق، كما أوضحنا تزداد درجـة حـرارة السائل ببطء أثناء الضغط الأديباتيكي .

لذلك يجب أن يعطى السائل المـضغوط على طول الخط ea فـي الأشـكال الثلاثـة حرارة ترفع درجة حرارته إلـىT_2 . وفـي الشكل السابق يحدث التسخين بعد دفع السائل للغلاية .

وإذا أردنا أن تكون الدورة عكسية يجـب أن تحدث عملية التسخين بواسطة مجموعـة من المستقبلات الحرارية في مـدى درجـات الحرارة عند النقطة e (أكبر بقليل مـن T_1) إلىT_2 .

ومتوسط درجة الحـرارة التـي تحـدث عندها عملية التسخين تكون أقل من T_2 ، لذا تكون كفاءة دورة رانكن أقل من كفـاءة دورة كارنوت التي تحدث فيها عملية التسخين عنـد درجة حرارة T_2 وتقذفها عند درجة حـرارة T_1 .

ويمكن تعين كفاءة دورة رانكن مباشـرة من رسم موليز التخطيطي المبين في الـشكل

السابق ، بنفس الطريقة المستخدمة في دورة كارنوت حيث تكتسب حرارة q_2 على طول المسار eab ، وتقذف حرارة q_1 على طول المسار cd.

ومع أن eab ليست علمية حرارة إلا أنها عملية انضغاطية وتكون الحرارة المكتسبة q_2 مساوية للفروق في الإنثالبي $(h_b - h_e)$ والحرارة المقذوفة q_1 تساوي $(h_c - h_d)$ والشغل الكلي w يساوي الفرق بين q_1،q_2، لذلك تكون الكفاءة :

$$\eta = \frac{w}{q_2} = \frac{h_b - h_e - h_e + h_d}{h_b - h_e} \qquad (1)$$

ومع ملاحظة أن الكفاءة هي نفسها لكل من دورة رانكن وكارنوت المعبر عنها بالفرق في الإنثالبي (والفرق فقط في الحروف الموضوعة على الأشكال) والمعادلة (١) لا يمكن وضعها في الصورة :

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2},$$

وكما سبق القول : إن كفاءة دورة رانكن تكون أقل من كفاءة دورة كارنوت العاملة بين نفس درجتي الحرارة T_1, T_2 . وسبق أن أشرنا إلى أن العمليات اللا عكسية في الآلة البخارية تخفض كفاءة الآلة . يمكننا الآن أن نرى كيفية تأثير اللا عكسية على كفاءة دورة رانكن .

والخطوط المستمرة في رسومات الشكل رسمت بفرض أن تمدد البخار في الآلة البخارية أو التربين يكون عكسيا وكذلك أديباتيكيا؛ لأن الإنتروبي يكون ثابتًا فقط في العمليات الأديباتيكية العكسية .

لذلك يكون الخط bc رأسي في الشكل السابق (b), (c) . يكون التمدد الفعلي في الآلة لا عكسيا بمعنى أن الإنتروبي ليس ثابتًا، ولكنه يزداد وهذا موضح في الشكل السابق بالخطوط المتقطعة 'bc .

وتتوقف عملية التمدد سواء أكانت عكسية أو لا عكسية عند نفس الضغط ودرجة حرارة المكثف ، ولكن الانخفاض في الإنثالبي يكون أقل من التمدد اللا عكسي عنه في التمدد العكسي .

ولكي نستخدم معادلة الطاقة للتدفق الثابت للتربين يمكن اعتبار المسقطين الرأسيين للطاقة التي تتزود بها الآلة والطاقة الخارجة متساويين ، والسرعات عند الدخول والخروج تكون صغير ويمكن اعتبارها متساوية .

وتكون العملية تقريبا أديباتيكية ، لذلك يكون الشغل الناتج مساويا للفـرق فـي الإنثالبي بين الطاقة الداخلة والخارجة . لذلك تكون الكفاءة لدورة لا عكـسية أقـل منها لدورة عكسية؛ لأن $(h_b - h_c')$ أصغر من $(h_b - h_e)$ والآلـة تعطـي شـغلاً ميكانيكيا أقل لنفس كمية الحرارة المكتسبة .

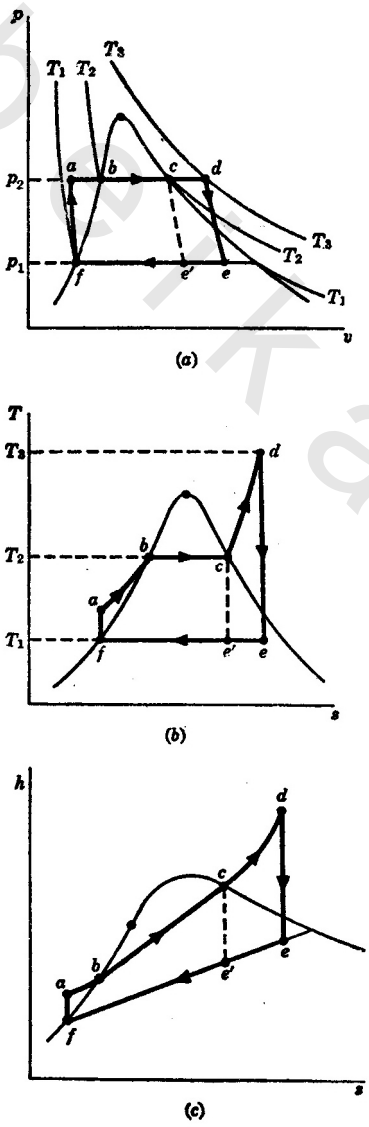
5 – دورة رانكـ ـن باستخدام التسخين الشديد :

وجد عمليا أنه في جميع الدورات البخارية يسخن البخار إلى درجات حرارة أكبـر مـن درجة حرارة البخار المـشبع قبـل أن يتمـدد أديباتيكيا . ومرحلة التسخين هذه متمثلة بالرمز cd ، حيث T_3 درجة حـرارة البخـار فـوق المسخن. يوجد سببان للتسخين الشديد ؛ **الأول**: هو أن متوسط درجة الحـرارة التـي عنـدها تمتص الحرارة تزداد عن درجة حرارة البخر وينتج عن ذلك زيادة الكفاءة .

والسبب الثاني: وهو الأكثر أهمية ويمكن رؤيته من فحص الـشكل التـالي . إذا بـدأت عملية التمدد الأديباتيكي من حالة البخار المشبع عند النقطة c فحالة البخار عند نهايـة التمـدد تتمثل بالنقطة 'e. وتكون الرطوبة عند النقطـة 'e أكبر منها عند النقطة e نقطة النهاية لعملية التمدد الأديباتيكي للبخار فوق المسخن .

إذا كانت رطوبة البخار كبيرة جدا (البخار يحتوي على نسبة عالية من الرطوبة) يـزداد الاحتكاك الميكانيكي على جيوب التربينة ، لذا يجب إجراء التسخين الشديد لكي نـصل إلـى درجة حرارة عالية تكفي لخفض نسبة الرطوبة في البخار حتى يكون هناك أمان .

وفي الـشكل الـسابق تكـون الحـرارة الممتصة على طول المـسار abcd هـي q_2



دورة رانكن
باستخدام التسخين الشديد

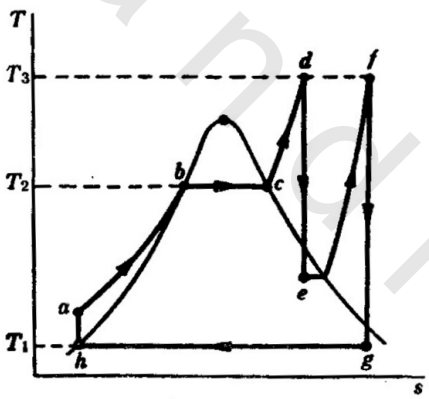
وحيث إن العملية انـضغاطية فـإن: $q_2 = h_d - h_a$ وأن $q_1 = h_e - h_f$ ، وتكـون الكفاءة:

$$\eta = \frac{w}{h_e} = \frac{h_d - h_a - h_e + h_f}{h_d - h_a}$$

٦ – طرق زيادة الكفاءة :

استخدمت طرق عديدة لزيادة كفاءة التربين البخاري عن الكفاءة التـي سـبق الحصول عليها لدورة رانكن البسيطة . ومن هذه الطرق:

(١) دورة إعادة التسخين المبينة في الرسم T-s في الشكل التالي، وفيها يسخن البخار تسخينًا شديدا إلى النقطة d سامحين له بالتمدد أديباتيكيا إلى النقطة e ، ثـم يعود إلى المصدر الحراري ويسخن تسخينًا شديدا مرة أخرى لنفس درجة الحرارة المرتفعة ويتمدد أديباتيكيا مرة أخرى إلى النقطة g ؛ وذلك لزيادة درجة الحـرارة المتوسطة التي عندها تمتص الحرارة .



دورة إعادة التسخين

(٢) الدورة المجددة، والتي فيها يسحب جزء من البخار المتدفق خلال التربين عند مرحلة متوسطة أثناء التمدد الأديباتيكي ويستخدم لرفع درجة حـرارة الـسائل المكثف الذي مر خلال جميع المراحل التربين وذلك بواسطة التبـادل الحـراري ، وهذا يزيل - إلى حد ما - الانسياب اللا عكسي للحرارة الـذي يحـدث إذا ضـخ السائل المكثف مباشرة إلى الغلاية .

وفي الحالة الأخيرة يكون الانسياب الكلي للحرارة إلى الـسائل المكثـف مـن مجموعة ذات درجة حرارة مرتفعة جدا (المصدر الحراري) ، بينمـا إذا أضـيف جزء من الحرارة إلى السائل المكثف بواسطة البخار المسحوب من مرحلة متوسطة في التربينة حيث تكون درجة حرارته متوسطة بين درجة حرارة السائل المكثـف ودرجة حرارة المرجل، وهذا تقريب لعملية تسخين عكسية .

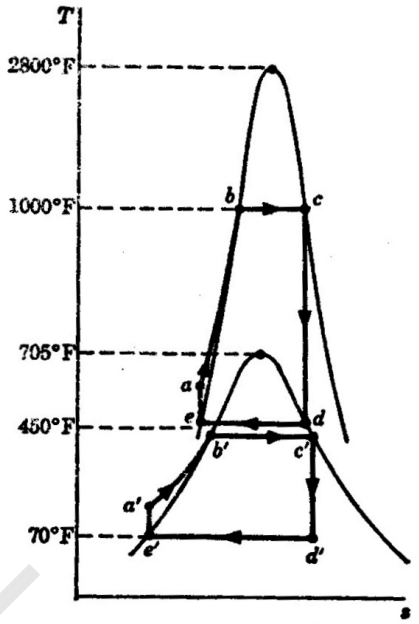
والدرجة الحرجة للماء هي 705°F ، وهي أقل من درجة حرارة حد المعـادن المسموح وهو 1000°F . للتطوير تجرى دورة رانكن التي تتبخـر فيهـا مـادة التشغيل عند درجة حرارة حد المعادن ، حيث تمتص الحرارة عند أقصى درجـة حرارة مسموح بها .

وهذا لا يمكن إجراءه في دورة بخارية . درجة الحرارة الحرجة للزئبق أعلـى من 2800°F وضغط بخاره عند 1000°F هو ١٨٠ باوند/بوصة^{٢} . فمن الملائـم تصميم دورة فيها يتبخر الزئبق عند درجة حرارة حد المعادن .

ومع ذلك عند درجة حرارة التكثيف 70°F يكون ضغط البخار الزئبق صغيرا جدا وحجمه النوعي كبيرا جدا لدرجة أن حجم الآلة اللازمـة لاسـتقبال البخـار الخارج يجعل التكاليف باهظة . ولكن هذه الصعوبة خادعة وقد اسـتخدمت ميـزة التبخر عند درجة حرارة مرتفعة في الآلة المزدوجة للزئبق والبخار .

حيث يتبخر الزئبق عند درجة حرارة قريبة من درجة حرارة حـد المعـادن ، ويتمدد إلى أن تنخفض درجة حرارته إلى حوالي 450°F ، والحرارة المنسابة من تكثيف الزئبق تستخدم لتوليد بخار عند ضغط حوالي ٤٥٠ باوند/بوصة^{٢} .

ثم يتمدد البخار إلى درجة حرارة المكثف عند حوالي 70°F الشكل التالي هـو رسم تخطيطي في المستوى T-s لدورة زئبقية موضوعة فوق دورة بخارية . وأول من صمم آلة البخار المزدوجة هي شركة جنرال إلكترك ، والآن يوجد الكثير مـن هذه المصانع العاملة بهذه الفكرة .



الدورة المزدوجة للزئبق والبخار

٧ – دورة التبريد :

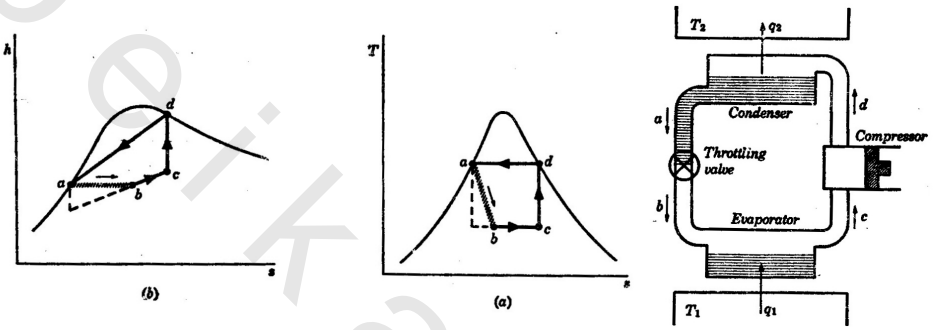
إذا سارت دورة كارنوت في اتجاه عكس عقارب الساعة فإنها تصبح ثلاجة كارنوت . إذا تخيلنا أن الأسهم في الشكل تغير اتجاهها ونعتبر أن الدورة تبدأ عند النقطة a . فالمرحلة الأولى من العملية ad هي: عملية تمدد أديباتيكي عكسي .

والمرحلة الثانية dc هي: عملية تبخر حراري التي فيها تمتص حرارة من المستقبل ذي الحرارة المنخفضة T_1 ، والمرحلة الثالثة cb هي: عملية ضغط أديباتكي عكسي. والمرحلة الأخيرة ba هي: عملية تكثيف حراري، وفيها تقذف حرارة إلى المستقبل ذي درجة الحرارة المرتفعة T_2، وبالتالي تنساب كمية حرارة q_1 من المستقبل ذي درجة الحرارة المنخفضة إلى مادة التشغيل وتنساب كمية حرارة q_2 إلى المستقبل ذي درجة الحرارة المرتفعة .

ولكي نجري عملية التمدد الأديباتيكي العكسي au ، يجب أن تتمدد مادة التشغيل ضد مكبس، ويمكن تصميم ثلاجة تحدث فيها العملية المذكورة في الخطوة السابقة . والشغل الميكانيكي الناتج يمكن الاستفادة منه في عمل جزء من الشغل للضغط في المرحلة cb .

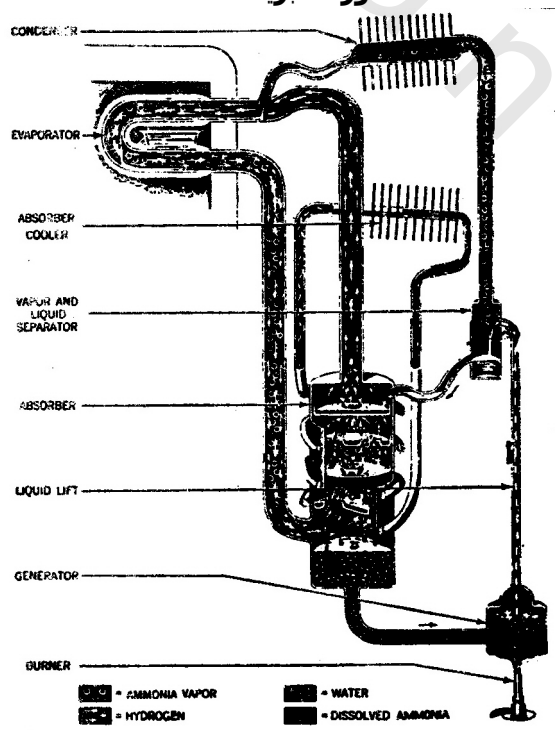
وذلك التوفير الذي نحصل عليه من استخدام الشغل الناتج أثناء عملية التمدد لا يعادل التعقيد الميكانيكي المضـاف والزيادة في الإرهاق لكي نحدث التغير ؛ لذلك يستبدل التمدد العكسي بتمـدد لا عكسي خلال صمام خانق . في هذه العملية يكون الإنثالبي في الحـالة الابتدائية هو نفسه في الحالة النهائية .

ودورة التبريد موضحة بالرسمين T-s و h-s في الشكل التالي (a) حيـث ab عملية لا عكسـية خلال صمام خانق ، ولا يمكن تمثيـل العمـ ـلية بخـط لأنهـا ليسـت حالات متتالية الاتـزان ، وآلة التبريد ممثلة في الشـكل التالي ، الحروف c،d،a،b تناظر نفس الحرف في الدورة الممثلة في الشكل .



سلوك آلة التبريد

دورة التبريد



٨ – ثلاجـة الغاز:

يسخن المولد المحتـوي علـى محلول الأمونيا في الماء بواسـطة لهب صغير ، تسحب الأمونيا مـن المحلول ويرتفع بخارها في أنبوبـة رفع السائل، حاملة معهـا بعـض الماء .

هذا الماء يتجمع في الفاصل ثم يتدفق عائدا خلال الماص ، بينمـا يتصاعد بخار الأمونيا إلى المكثـف حيث يتكاثف وتزال حرارة التكاثف بواسطة الهواء الدائر حول ريـش مراوح التبريد .

ثم يتدفق سائل الأمونيا إلى المبخر متركزا في وحدة التبريد للثلاجة ، حيث يتبخر ويمتص حرارة التبخير مما يحيد به . يستمر تدفق بخار الأمونيا إلى الماص حيث يذوب في الماء العائد من الفاصل، ثم يتدفق محلول الأمونيا في الماء إلى المولد مكملاً الدورة .

والماص والمبخر يحتويان أيضا على غاز الهيدروجين ، الذي يظل يتحرك دائريا بواسطة تيارات الحمل ، وذلك يرجع إلى أن الخليط المكون من غازي الأمونيا والهيدروجين في الأنبوبة التي في أقصى الشمال يكون أكبر كثافة من الهيدروجين النقي الموجود في الأنبوبة الواصلة من القمة إلى الماص .

وهذا التيار من الهيدروجين الداخل عند قمة المبخر يدفع بخار الأمونيا بقوة خارج المبخر صاعدا في سرعة البخر . وحيث إن غاز الأمونيا أسرع ذوبانا في الماء من الهيدروجين، لذا تذوب الأمونيا في الماء مندفعة لأسفل بينما يرتفع الهيدروجين إلى أعلى خلال الماص .

ومن الضروري إزالة الحرارة الناتجة من ذوبان غاز الأمونيا في الماء من الماص مثلما تزال من المكثف . وذلك يتم بواسطة دائرة مساعدة مكونة من أنابيب تبريد حول الماص ومبرد الماص .

ومادة التشغيل في ثلاجة الغاز موجودة في وعاء صلب ولا يبذل عليها شغل بما يحيد بها . ويتم تبادل الطاقة بانسياب الحرارة فقط . تمتص الحرارة بواسطة مادة التشغيل عند جزئين مختلفين من الدورة وهما المولد والمبخر .

وتفقد حرارة من مادة التشغيل في كل من المكثف والماص . فإذا كانت T_3 تمثل درجة حرارة المولد ، و T_2 درجة حرارة كل من المكثف والماص (وذلك للسهولة) و T_1 درجة حرارة المبخر .

ونجد أن $T_1 < T_2 < T_3$. إذا كانت جميع العمليات عكسية فدرجة حرارة اللهب وما يحيط بالمبخر يكونا أكبر بقليل عن T_3, T_1 ، ودرجة حرارة الهواء المحيط بالمكثف والماص أصغر قليلا من T_2 .

ويمكن أن نعتبر دورة عكسية مثالية حيث فيها تمتص المجموعة كمية حرارة Q_2 من المستقبل الحراري ذي درجة الحرارة T_3 ، وتمتص Q_1 كمية حرارة Q_1

من المستقبل ذي درجة الحرارة T_1 ، وتعطى كمية حرارة Q_2 إلى المستقبل ذي درجة الحرارة T_2 وباعتبار جميع كميات الحرارة Q's موجبة، ومن القانون الأول:

$$Q_1 + Q_3 = Q_2 \qquad (2)$$

ومن القانون الثاني ، حيث إن الدورة عكسية ، يكون التغير العام في الإنتروبي مساويا صفرا . يزداد الإنتروبي للمستقبل ذي درجة الحرارة T_2 بالكمية Q_2/T_2 ويقل الإنتروبي للمستقبلين الآخرين بمقدار:

$$Q_1/T_1 + Q_3/T_3$$

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_3}{T_3} = \frac{Q_2}{T_2} \qquad (3)$$

وتعرف كفاءة الأداء لهذه الثلاجة كما يلي :

$$E = Q_1 / Q_3$$

حيث Q_1 هي كمية الحرارة الممتصة من المستقبل ذي درجة الحرارة المنخفضة (ما يحيط بالمبخر) ، وهو ما نحصل عليه بينما كمية الحرارة Q_3 الممتصة من المستقبل ذي درجة الحرارة المرتفعة (لهب غاز) .

وباستخدام المعادلتين (٢) و (٣) نحصل على المعادلة التالية :

$$E = \frac{T_1(T_3 - T_2)}{T_3(T_2 - T_1)} \qquad (4)$$

ولأي دورة تبريد نجد أن الضخ الحراري يتكون من انسياب كمية حرارة Q_1 من مستقبل ذي درجة حرارة منخفضة T_1 إلى آخر أي درجة حرارة مرتفعة T_2 ، وهذا الانسياب الحراري يخفض قيمة الإنتروبي .

وفي الثلاجة الميكانيكية نجد هذا النقص في الإنتروبي يعادل الزيادة في الإنتروبي عندما تتحول الطاقة الميكانيكية إلى حرارة . ولكن في الثلاجة الغازية يتعادل هذا النقص في الإنتروبي بزيادة الإنتروبي الناتج من انسياب الحرارة Q_3 من المستقبل ذي درجة الحرارة المرتفعة T_3 إلى المستقبل ذي درجة الحرارة المنخفضة T_2 .

والشرط الوحيد الذي يفرض بواسطة القانون الثاني على أي من الثلاجتين: هو أن الزيادة في الإنتروبي يجب أن تكون على الأقل مساوية للفقد، ويوجد اختلاف في مصدر زيادة الإنتروبي . هل تنتج من تحويل الشغل إلى حرارة أم من انسياب الحرارة من درجة الحرارة المرتفعة إلى درجة الحرارة المنخفضة ؟

الأســـــــــــئلة

1 – عند رسم العلاقة بين p و v بحيث توضح دورة كارنوت في منطقة سـائل – بخار ومادة التشغيل عبارة عن واحد كيلو جرام ماء ، ودرجة الحرارة $T_1 =$ $313°K$, $T_2 = 453°K$ وفي جداول البخار تعطى قيم T ، p ، u، s، h عند نقط على خطوط التشبع وهذه مدونة أسفله بوحدات mks للـنقط a ، c، b، f ونرغب في عمل تحليل كامل للدورة .

Point	t(°C)	T(°K)	p(n/m^2)	U(j/kgm-deg)	S(j kgm-deg	H(j/kgm-dge)
a	180	453	10×10^5	7.00×10^5	2140	7.82×10^5
b	180	453	10×10^5	25.8×10^5	6590	27.7×10^5
c	40	313	0.074×10^5	1.67×10^5	572	1.67×10^5
f	40	313	0.074×10^5	24.3×10^5	8220	25.6×10^5

(a) وضح أن في العملية ab تكون :

$$q_{ab} = h_b - h_a \,, \qquad w_{ab} = h_b - h_a - u_b + u_a$$

(b) وضح أن في العملية bc تكون :

$$q_{be} = 0, \qquad w_{ab} = u_b - u_a$$

(c) وضح أن في العملية cd تكون :

$$q_{eb} = h_d - h_c \,, \qquad w_{ed} = h_d - h_c - u_d + u_e$$

(d) وضح أن في العملية da تكون :

$$Q_{da} = 0, \qquad w_{de} = u_d - u_a$$

(e) اعتبر أن x_1،x_2 تمثل نسبة كتلة المجموعة الموجودة في حالـة البخـار عنـد النقطة c ، d على الترتيب، ثم وضح أن :

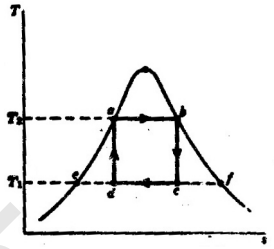
$$x_2 = \frac{S_b - S_e}{S_f - S_e} \quad , \quad x_1 = \frac{S_a - S_e}{S_f - S_e}$$

(f) برهن على أن :

$$u_c = u_e + x_2 \,(u_f - u_e) \,, \; h_c = h_e + x_2 \,(h_f - h_e)$$
$$u_d = u_e + x_1 \,(u_f - u_e) \,, \; h_d = h_e + x_1 \,(h_f - h_e)$$

(g) احسب بالجول الشغل أثناء التمدد في الدورة على طول المسار abc .

(h) احسب بالجول الشغل أثناء الانضغاط على طول المسار cda . ثم أوجد نسبة الشغل أثناء التمدد إلى الشغل أثناء الانضغاط .



(i) احسب من (h), (g) الشغل النهائي في الدورة .

(j) احسب من (a), (i) كفاءة الدورة، وبرهن على أنها تساوي $(T_2 - T_1)/ T_2$.

٢ - في أي آلة على الحقيقة يوجد نسبة فقد ، ولحساب التأثير هذا ، اعتبر أن 0% من الـشغل المبـذول بواسطة المجموعة يفقد أثناء التمدد ، و 0% شغل زائد يجب عمله عن الشغل المحسوب في الجزء (h) . احسب الشغل النهائي المبذول في الدورة والكفاءة.

الآن نعتبر دورة كارنوت باستعمال غاز مثالي، وتعمل أيضا بين مستقبلين عند 313°K , 453°K . اعتبر أن أكبر ضغط يكون 10×10^5 n/m^2 وأن $\frac{7}{8}$ R $c_p =$ ، و R $c_v = \frac{5}{2}$ و $\gamma = 1.40$ ، وكذلك اعتبر المجموعة تمتص نفـس كمية حرارة من المستقبل ذات الدرجة المرتفعة مثل آلة البخـار أثنـاء دورة الغاز المثالي، ثم أوجد النسبة بينهما.

(m) احسب الشغل النهائي المبذول في الدورة .

(n) احسب كفاءة الدورة .

(o) احسب كفاءة التي تسمح لـ 0% فقط فـي التمـدد والانـضغاط كمـا فـي الجزء(k).

(p) ما الخلاصة التي يمكن استنتاجها من ميزة استعمال مادة عـن أخـرى فـي الدورتين ؟

٣ – توربين بخار يعمل في دورة راكن العكسية ، وأن البخار فوق المسخن يدخل التوربين تحت ضغط 100 1b/in^2 ودرجـة حـرارة 800°F ، وأن ضـغط البخار الخارج 1 1b/in^2 .

(a) أوجد الشغل المبذول لكل باوند من البخار .

(b) إذا كان الإنتروبي النوعي للبخار الخارج كنتيجة للعملية اللا عكسية هو: 2 Btu/1b-deg F عندما يكون الضغط الخارج 1 1b/in^2 . احسب الشغل المبذول لكل باوند من البخار ؟

٣ – أوجد نسبة كفاءة آلتين لكارنوت، إحداهما تعمل بين درجتي حرارة 450°F و70°F ، والأخرى تعمل بين درجتي حرارة 1000°F ، و 70°F .

٤ – من خلال رسم آلة كارنوت أوجد :

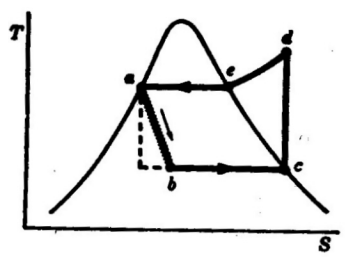
(a) ماذا تكون كفاءة الأداء لدورة تبريد عكسية ممثلة بمستطيل إذا كانت:

$$T_b = T_c = 260°K \quad , \quad T_a = T_d = 330°K$$

(b) ماذا تكون كفاءة الأداء للدورة اللاعكسية abcd إذا كانت الزيادة في الإنتروبي النوعي في عملية الاختناق ab يساوي ثلث الفرق في الإنتروبي النوعي $(s_d - s_a)$ ؟

٥ – في أحد الأشكال اعتبر أن $T_3 = 200°K, T_2 = 300°K, T_1 = 400°K$، واعتبر أن جميع العمليات عكسية . إذا كان المستقبل عند درجة حرارة 400°K يعطي جول 1200 . حدد كميات الحرارة المتبادلة مع المستقبلات الأخرى ، ثم اذكر أيهما يعطي وأيهما يمتص حرارة ؟

٦ – الشكل التالي يمثل دورة تبريد التي يكون فيها الضغط الأديباتيكي في المرحلة cd يحدث في منطقة البخار . ومرحلة التمدد من d إلى a تكون عند ضغط ثابت ومرحلة التمدد اللا عكسي من a إلى b تحدث خلال الصمام الخانق.



(a) ارسم الدورة في المستوى h-s .

(b) برهن على أن كفاءة أداء الدورة تعطى بالمعادلة :

$$E = \frac{h_d - h_a}{h_d - h_e}$$

(c) في دورة كالسابقة استخدم غاز ١٢-فريون كمادة تشغيل وكان الإنثالبي النوعي عند النقط a ، c، d هو 36.2, 85, 90.6 وحدات حرارية ، باوند على الترتيب . وكانت كفاءة الأداء المقاسة للآلة ٢,٤ قارنها بالقيمة المحسوبة من المعادلة أعلاه ، والتي اعتبرت أن جميع العمليات عكسية ما عدا ab .