الباب العاشر

بعض التطبيقات الهندسية للديناميكا الحرارية

١ – خواص البخار في الديناميكا الحرارية :

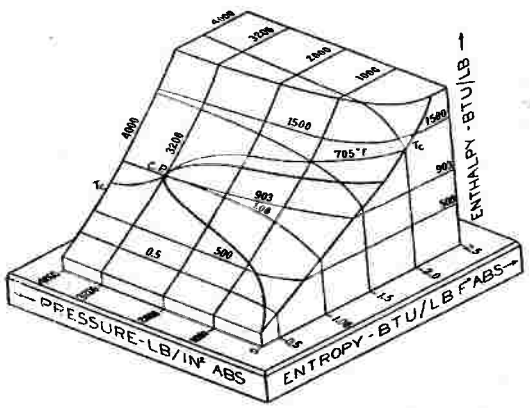
هنا سنتناول بالتفصيل كيفية تطبيق أسس الديناميكا الحراري.ة لتـ.شغيل الآت؛ بخارية وتربينات وثلاجات . حيث تجرى الحسابات العدديـ.ة باسـ.تخدام الجـ.داول والرسومات التخطيطية لتعطينا الإنتروبي والطاقة الداخلية والإنثـ.البي والخـ.واص الأخرى لمادة التشغيل في مدى الضغوط ودرجات الحرارة .

ومثل هذه الجداول متوفرة للماء والأمونيا وثاني أكسيد الكبريت وبعض المواد الأخرى الشائعة الاستخدام في الآلات والثلاجات . وسنشرح فقـ.ط جـ.داول المـ.اء والتي تعرف بجداول البخار، والجداول المستخدمة تعبر عن الـ.ضغوط بالوحـ.دات باوند/ بوصة^{٢} . ودرجة الحرارة، إما بالدرجات الفهرنهيتية، أو المطلقة ، والحجوم النوعية قدم^{٣} /باوند .

والطاقة النوعية والإنثالبي بالوحدات الحرارية البريطانية / باونـ.د (Btu/1b) والإنتروبي النوعي بالوحدات الحرارية البريطانية / باونـ.د – درجـ.ة فهرنهيتيـ.ة مطلقة.

وتحتوي هذه الجداول على قوائم للحجم النـ.وعي، والإنثـ.البي ، والإنتروبـ.ي للبخار فوق المسخن كدوال للضغط ودرجة الحرارة ، وكذا تشتمل قـ.وائم الحجـ.م النوعي والإنثالبي والإنتروبي لسائل مضغوط .

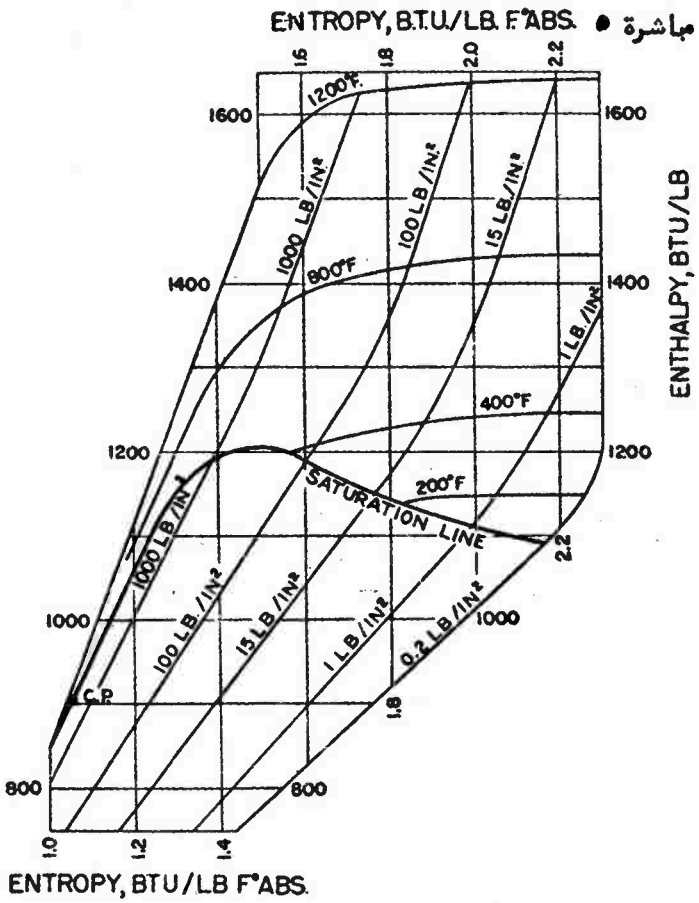
على



رسم تخطيطي للسطح h-s-p للماء

والشكل السابق رسم تخطيطي لسطح ديناميكي حراري حـ.صل عليـ.ه برسـ.م الإنثالبي النوعي للماء عموديا على المستوى الأفقي للضغط والإنتروبي الذ.وعي . والخط الثقيل على السطح هو الذي يحدد منطقة سائل وبخار ، والخطوط الخفيفـ.ة هي خطوط للثوابت p, s, h ، والشكل مرسوم بمقياس رسم معين .

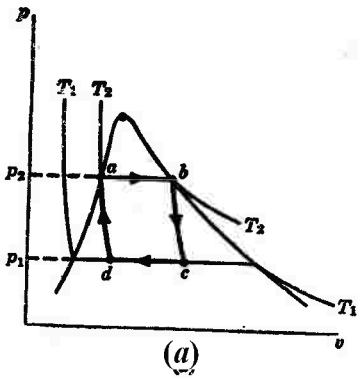
وهذا الشكل مسقط لجزء من السطح h-s-p ، على المستوى h-s ويسمى رسم موليـر التخطيطي . وهذا الرسم يشتمل على المتغيرات التي تـ.ستخدم فـ.ي معظـ.م الحسابات الهندسية . والرسم التخطيطي المكبر لموليـر يشتمل على مجموعـ.ة مـ.ن جداول البخار . والكميات اللازمة للحسابات العددية للشغل والكفاءة يمكن قراءتهـ.ا بكل دقة من الرسم التخطيطي مباشرة .



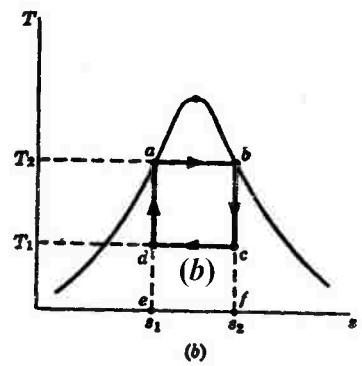
٢ – دورة كارنوت البخارية:

دورة كارنوت هي أي دورة عكسية محدودة بمنحنيـ.ين حـ.راريين ومنحنيـ.ين أديباتيكاليين وطبيعة مادة التشغيل فيها غير مهمة . والشكل التالي (a) : هو رسـ.م تخطيطي في المستوى p-v لدورة كارنوت العامة في منطقة سائل وبخار.

وعندما تبدأ عند النقطة a بسائل مشبع في أسطوانة آلـ.ة كـ.ارنوت، وتجـ.رى عملية تمدد حراري عكسي عند درجة الحـ.رارة T_2 إلى أن يتبخر السائل كلية عند النقطـ.ة b . خلال هذا الجزء من الدورة يفقد المـ.ستقبل ذو درجة الحرارة T_2 كمية حرارة ...



ثم تجرى عملية تمـ.دد أديبـ.اتيكي والتـ.ي تخفض درجة الحرارة إلى T_1 عند النقطة C . وإذا كانت مادة التشغيل بخار فعمليـ.ة التمـ.دد الأديباتيكي هذه تعود بناء إلى منطقة الـ.سـ.ائل والبخار . بمعنى آخر يتكاثف بعض من البخـ.ار المشبع .

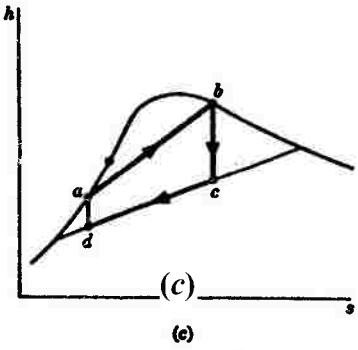


دورة كارنوت في
(a) المستوى P-v
(b) المستوى T-s

وليست جميع المواد لهـ.ا نفـ.س الـ.سلوك، فبعض منها يكون الميل فيه للمنحنى الأديبـ.اتكي أقل من ميل خط التشبع، وجميع النقط المناظرة لـ. C تقع في منطقة البخار .

والآن نجري عملية ضغط حـ.راري عنـ.د درجة الحرارة T_1 إلى أن نصل للحالة الممثلـ.ة بالنقطة d ، ويكتسب المستقبل كمية حرارة q_1 . والدورة تكمل بعملية ضغط أديبـ.اتيكي والتـ.ي خلالها يتكاثف باقي البخار وتعود حالة المجموعة إلى الحالة الممثلة بالنقطة a .

ونفس الدورة موضحة بالرسم التخطيطي T-s في الشكل التالي (b)، وكـ.ذلك برسم موليـر التخطيطي h-s في الشكل التالي (c)، وحيث إن المساحات في الرسـ.م T-s تمثل الحرارة المكتسبة أو المفقودة .



(c)

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 يميناً .

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 :

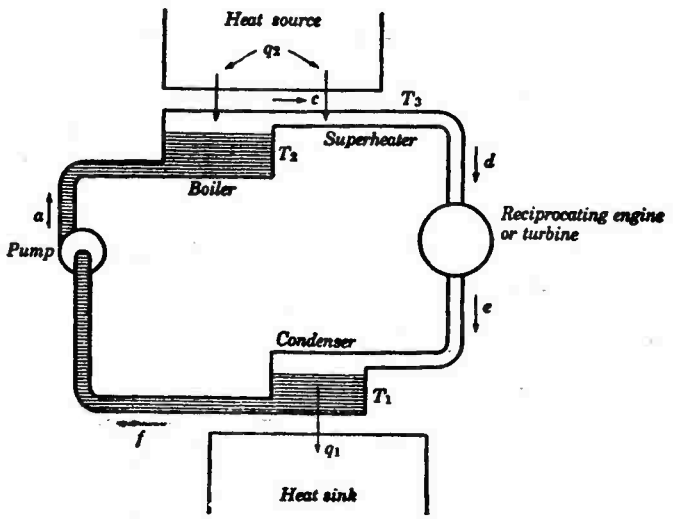
$$\eta = \frac{w}{q_2}$$

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

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 ضغ. .ط البخ. .ار الف.وق المسخن عن ضغط المرجل . وفي الواقع يمكن دفع درجة حرارة البخ.ار الف.وق المسخن إلى درجة حرارة المصـ.در، ولكن هناك حد يعرف بحـ.د المعـ.ادن عند درجة 1000°F لا تتعداه درجة حرارة البخار الفوق المسخن ؛ لأن المعـ.ادن التي تصنع منها الأنابيب لا تتحمل ضغوطاً مرتفعة جدا .

ثم يتدفق البخار الفوق المسخن إلى الآلة البخارية أو التربين ، حيـ.ث ينطلـ.ق شغل ميكانيكي، وفي نفس الوقت تنخفض درجة الحرارة والـ.ضغط . ويمكـ.ن أن يتكاثف جزء من البخار في هذه المرحلة من الدورة .

ثم يتدفق خليط السائل المشبع وبخاره إلى المكثف ، حيث يتكاثف بقية البخ.ار وحرارة التكاثف تعطى إلى الخافض الحراري ويتعين الضغط في هـ.ذه المرحلـ.ة بدرجة حرارة الخافض الحراري ، بمعنى أن الضغط يكون مساويا لضغط بخـ.ار الماء عند درجة حرارة الخافض الحراري . ثم يدفع السائل المتكاثف إلى المرجـ.ل بواسطة مضخة وبذلك تكمل الدورة .

والآلة البخارية والتربين يختلفان فقط في طريقة أخذ الطاقة الداخلية من البخار المتدفق وتحويلها إلى شغل ميكانيكية ، ففي الآلة البخاريـ.ة يتمـ.دد البخـ.ار فـ.ي الأسطوانة ضد المكبس بينما في التربين يتدفق البخار خلال فتحات ضيقة .

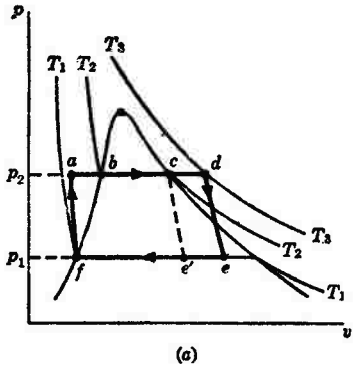
وهذا التدفق يجعله مكتسبا طاقة حركة في العملية ، ثم يصطدم البخار سـ.ريع الحركة أثناء اندفاعه بعوارض التربينة معطـ.يا طاقة حـ. .ركة . العمليـ.ة تقريبـ.ا أديباتيكية في كلتا الآلتين، ولكنها ليست عكسية تماما لذا تحدث بإنتروبي متغير .

٤ – دورة رانكـ. .ن:

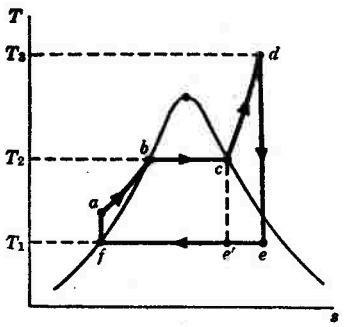
دورة رانكن هي دورة عكسية أقرب إلى الحالات المتتالية التي تمر بها مـ.ادة التشغيل في الآلة البخارية، أو التربين من دورة كارنوت، وسنعتبر أولا دورة يكون فيها البخار في درجة الحرارة أقل من درجة حرارة البخار فوق التسخين .

وكما هو موضح بالرسومات الثلاثة في الشكل التالي إذا بدأنا عنـ.د النقطـ.ة a التي تناظـ.ر الغلاية في الشكل السابق يتحول السائل المشـ.بع عكسـ.يا إلى بخـ.ار مشـ.بع عند درجـ.ة حـ.رارة T_2 وضغـ.ط P_2 (عند النقطة b)

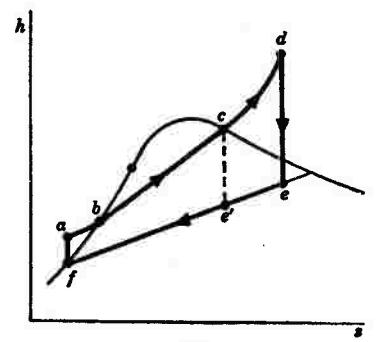
ثم يتمدد البخار عكسيا أديباتيكي إلى ضغط p_1 ودرجة حرارة T_1 (عند النقطة c) . هذه المرحلة تناظر مرور البخار خلال الآلة أو التربين . ثم يتحـول خلـيط البخار والسائل إلى سائل عند درجة حرارة T_1 ، وهذه المرحلة تناظر العملية فـي المكثف في الشكل السابق (عند النقطة d) .



(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 إلـى T_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) إلى T_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 موليـر 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_2،q_1، 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 ثابتاً 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 ثابتاً، 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 .

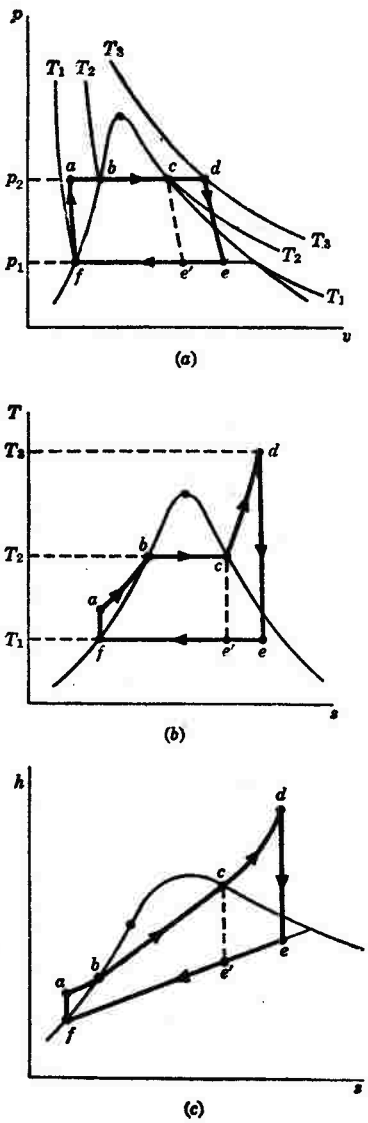
٥ – دورة رانكـ ـن باستخدام التسخين الشديد :

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

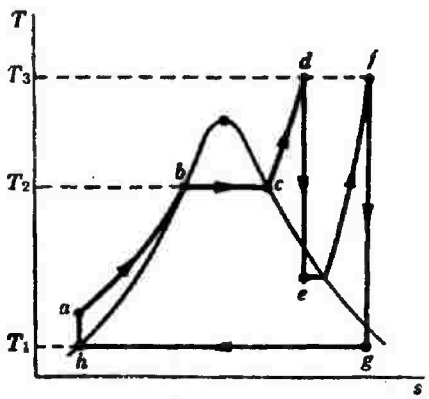
وحيث إن العملية اد.ضغاطية ف.إن: $q_2 = h_d - h_a$ وأن $q_1 = h_e - h_f$ ، وتك.ون الكفاءة:

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

٦ – طرق زيادة الكفاءة :

استخدمت طرق عديدة لزيادة كفاءة التربين البخاري عن الكفاءة الت.ي س.بق الحصول عليها لدورة رانكن البسيطة . ومن هذه الطرق:

(١) دورة إعادة التسخين المبينة في الرسم T-s في الشكل التالي، وفيها يسخن البخار تسخيناً شديدا إلى النقطة d سامحين له بالتمدد أديباتيكيا إلى النقطة e ، ث.م يعود إلى المصدر الحراري ويسخن تسخيناً شديدا مرة أخرى لنفس درجة الحرارة المرتفعة ويتمدد أديباتيكيا مرة أخرى إلى النقطة g ؛ وذلك لزيادة درجة الح.رارة 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 ح.رارة ال.سائل المكثف الذي مر خلال جميع المراحل التربين وذلك بواسطة التب.ادل الح.راري ، وهذا يزيل – إلى حد ما – الانسياب اللا عكسي للحرارة ال.ذي يح.دث إذا ض.خ السائل المكثف مباشرة إلى الغلاية .

وفي الحالة الأخيرة يكون الانسياب الكلي للحرارة إلى الـ.سائل المكثـ.ف مـ.ن مجموعة ذات درجة حرارة مرتفعة جدا (المصدر الحراري) ، بينمـ.ا إذا أضـ.يف جزء من الحرارة إلى السائل المكثف بواسطة البخار المسحوب من مرحلة متوسطة في التربينة حيث تكون درجة حرارته متوسطة بين درجة حرارة السائل المكثـ.ف ودرجة حرارة المرجل، وهذا تقريب لعملية تسخين عكسية .

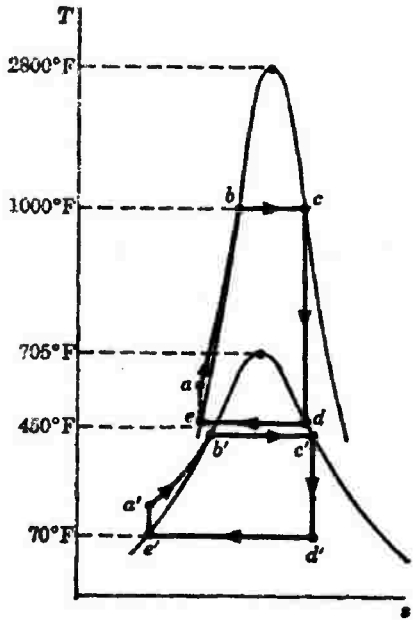
والدرجة الحرجة للماء هي 705°F ، وهي أقل من درجة حرارة حد المعـ.ادن المسموح وهو 1000°F . للتطوير تجرى دورة رانكن التي تتبخـ.ر فيهـ.ا مـ.ادة التشغيل عند درجة حرارة حد المعادن ، حيث تمتص الحرارة عند أقصى درجـ.ة حرارة مسموح بها .

وهذا لا يمكن إجراءه في دورة بخارية . درجة الحرارة الحرجة للزئبق أعلـ.ى من 2800°F وضغط بخاره عند 1000°F هو ١٨٠ باوند/بوصة^{2} . فمن الملائـ.م 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 اللازمـ.ة لاسـ.تقبال البخـ.ار الخارج يجعل التكاليف باهظة . ولكن هذه الصعوبة خادعة وقد اسـ.تخدمت ميـ.زة التبخر عند درجة حرارة مرتفعة في الآلة المزدوجة للزئبق والبخار .

حيث يتبخر الزئبق عند درجة حرارة قريبة من درجة حرارة حـ.د المعـ.ادن ، ويتمدد إلى أن تنخفض درجة حرارته إلى حوالي 450°F ، والحرارة المنسابة من تكثيف الزئبق تستخدم لتوليد بخار عند ضغط حوالي ٤٥٠ باوند/بوصة^{2} .

ثم يتمدد البخار إلى درجة حرارة المكثف عند حوالي 70°F الشكل التالي هـ.و 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 مـ.ن هذه المصانع العاملة بهذه الفكرة .



الدورة المزدوجة للزئبق والبخار

٧ – دورة التبريد :

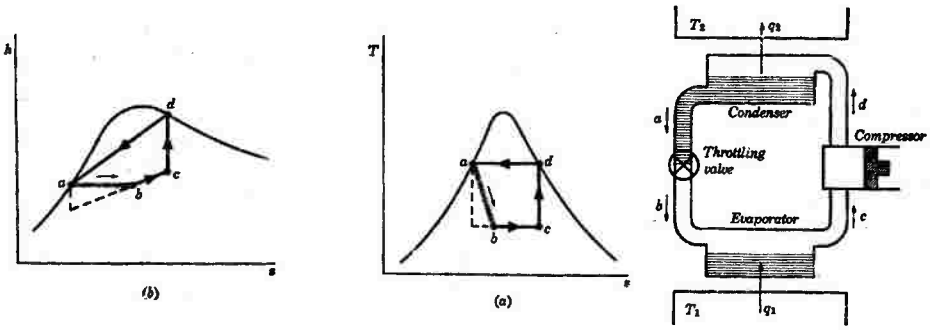
إذا سارت دورة كارنوت في اتجاه عكس عقارب الساعة فإنها تصبح ثلاجة كارنوت . إذا تخيلنا أن الأسهم في الشكل تغير اتجاهها ونعتبر أن الدورة تبدأ عند النقطة a . فالمرحلة الأولى من العملية ad هي: عملية تمدد أديباتيكي عكسي .

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 .

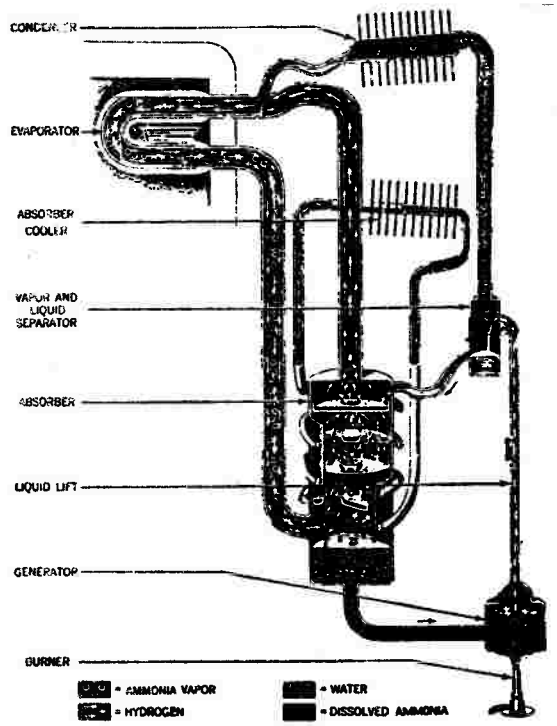
وذلك التوفير الذي نحصل عليه من استخدام الشغل الناتج أثناء عملية التمدد لا يعادل التعقيد الميكانيكي المضـ.اف والزيادة في الإرهاق لكي نحدث التغير ؛ لذلك يستبدل التمدد العكسي بتمـ.دد لا عكسي خلال صمام خانق . في هذه العملية يكون الإنثالبي في الحـ.الة الابتدائية هو نفسه في الحالة النهائية .

ودورة التبريد موضحة بالرسمين T-s و h-s في الشكل التالي (a) حيـ.ث ab عملية لا عكسـ.ية خلال صمام خانق ، ولا يمكن تمثيـ.ل العمـ. .لية بخـ.ط لأنهـ.ا ليسـ.ت حالات متتالية الاتـ.زان ، وآلة التبريد ممثلة في الشـ.كل التالي ، الحروف c،d،a،b تناظر نفس الحرف في الدورة الممثلة في الشكل .



سلوك آلة التبريد

دورة التبريد



٨ – ثلاجـ. .ة الغاز:

يسخن المولد المحتـ.وي علـ.ى محلول الأمونيا في الماء بواسـ.طة لهب صغير ، تسحب الأمونيا مـ.ن المحلول ويرتفع بخارها في أنبوبـ.ة رفع السائل، حاملة معهـ.ا بعـ.ض الماء .

هذا الماء يتجمع في الفاصل ثم يتدفق عائدا خلال الماص ، بينمـ.ا يتصاعد بخار الأمونيا إلى المكثـ.ف حيث يتكاثف وتزال حرارة التكاثف بواسطة الهواء الدائر حول ريـ.ش 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 سـ.ائل – بخار ومادة التشغيل عبارة عن واحد كيلو جرام ماء ، ودرجة الحرارة $T_1 =$ $313°K$, $T_2 = 453°K$ وفي جداول البخار تعطى قيم h، s، u ، p ، T عند نقط على خطوط التشبع وهذه مدونة أسفله بوحدات mks للـ.نقط 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 حالـ.ة البخـ.ار عنـ.د النقطة c ، d على الترتيب، ثم وضح أن :

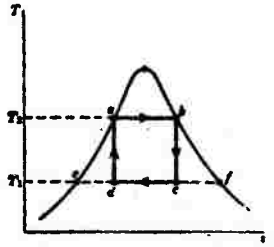
$$x_2 = \frac{S_b - S_e}{S_f - S_e} \quad , \quad x_1 = \frac{S_a - S_e}{S_f - S_e}$$

(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 ٥% من الـ.شغل المب.ذول بواسطة المجموعة يفقد أثناء التمدد ، و ٥% 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 $10 \times 10^5\ n/m^2$ وأن $\frac{7}{8} R$ = c_p ، و $c_v = \frac{5}{2} R$ و $\gamma = 1.40$ ، وكذلك اعتبر المجموعة تمتص نف.س كمية حرارة من المستقبل ذات الدرجة المرتفعة مثل آلة البخ.ار أثن.اء دورة الغاز المثالي، ثم أوجد النسبة بينهما.

(m) احسب الشغل النهائي المبذول في الدورة .

(n) احسب كفاءة الدورة .

(o) احسب كفاءة التي تسمح لـ. ٥% فقط فـ.ي التم.دد والاند.ضغاط كم.ا فـ.ي الجزء(k).

(p) ما الخلاصة التي يمكن استنتاجها من ميزة استعمال مادة عـ.ن أخ.رى فـ.ي الدورتين ؟

٣ – توربين بخار يعمل في دورة راكن العكسية ، وأن البخار فوق المسخن يدخل التوربين تحت ضغط $100\ 1b/in^2$ ودرجـ.ة حـ.رارة 800°F ، وأن ضـ.غط 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/lb-deg F عندما يكون الضغط الخارج 1 lb/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 :

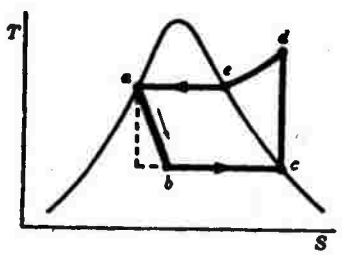
(a) ماذا تكون كفاءة الأداء لدورة تبريد عكسية ممثلة بمستطيل إذا كانت:

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

(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 .