أسامة محمد المرضي سليمان

جامعة وادى النيل

كلية الهندسة والتقنية

قسم الهندسة الميكانيكية

برنامج بكلاريوس الشرف فى الهندسة الميكانيكية

حرارية 1

الوحـــــدة الاولـــــى فى مقرر

الديناميكا الحرارية

اعداد الاستاذ:

أسامه محمد المرضى

الفصل الأول

1.0 - القانون الأول للديناميكا الحرارية
(The First Law of Thermodynamics)

1.1 بقاء الطاقة : (Conservation of Energy)

مفهوم الطاقة و الفرضية التى تقول أنها لا تستحدث و لا تفنى قد تم تطويرها بواسطة العلماء فى الجزء المبكر للقرن التاسع عشر ، و أصبحت تعرف بمبدأ بقاء الطاقة.

القانون الأول للديناميكا الحرارية هو ليس إلا و احداً من التعبيرات لهذا المبدأ العام بمرجعية خاصة لطاقة الحرارة و الطاقة الميكانيكية (i.e. الشغل)

لقد تم التوضيح فى المقطع 1.4 أنه عندما يتم عمل نظام ليؤدى دورة كاملة فإن صافى الشغل يُبذل على أو بالنظام . إعتبر دورة يكون فيها صافى الشغل مبذولاً بالنظام . بما أن الطاقةلا يمكن خلقها (إستحداثها) ، فإن هذه الطاقة الميكانيكية يجب أن يتم إمدادها من بعض مصادر الطاقة . لقد تم الآن إعادة النظام لحالته الإبتدائية ، و هكذا فإن طاقته الحقيقية لا تتغير ، و بالتالى فإن الطاقة الميكانيكية لم يتم توفيرها بالنظام نفسه.

الطاقة الوحيدة الأخرى المشتركة فى الدورة هى الحرارة التى يتم إكتسابها و فقدها فى الإجرءات المختلفة . بالتالى ، بمبدأ بقاء الطاقة ، فإن صافى الشغل المبذول بواسطة النظام يساوى صافى الحرارة المكتسبة الى النظام . القانون الأول للديناميكا الحرارية يمكن بالتالى بيانه كما يلى:

عندما يؤدى نظاماً دورة حرارية فإن صافى الحرارة المكتسبة الى النظام من بيئته المحيطة تعادل صافى الشغل المبذول بواسطة النظام على بيئته المحيطه.

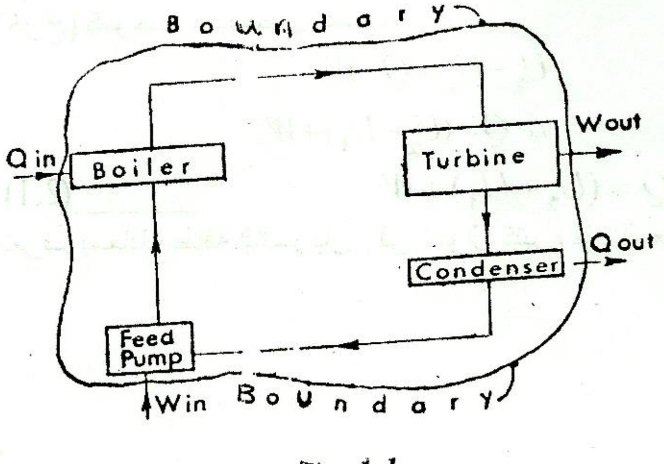
بالرموز،

$$\sum dQ = \sum dW \qquad ------------(1.1)$$

حيث $\sum$ تمثل المجموع لدورة كاملة.

مثال (1) : فى محطة بخار معينة ينتج التوربين 1000 kW . و الحرارة التى يتم إمدادها الى البخار فى الغلاية تعادل 2800 kj/kg ، و الحرارة التى يفقدها (يطردها) النظام الى ماء التبريد فى المكثف تساوى 2100 kj/kg و شغل مضخة التغذية المطلوب لضخ البخار المكثف الى الغلاية يساوى 5 kW . أحسب معدل إنسياب البخار خلال الدورة بال kg/s . يتم توضيح الدورة تخطيطياً فى الشكل رقم (1) . يتم توضيح حد النظام الذى يطوق المحطة بأكملها . بصرامة ، فإن حد النظام هذا يجب التفكير في أنه يطوق فقط مائع التشغيل .

$$\sum dQ = 2800 - 2100 = \underline{\underline{700}} \ kj/kg$$



الشكل (1.1)

Fig. 1.1

إجعل إنسياب البخار يكون $\dot{m}$ بال kg/s

$$\therefore \sum dQ = \underline{700} \quad \dot{m}\ kj/kg$$

$$\sum dW = 1000 - 5 = 955\, kW = \underline{955} kj/kg$$

بالتالى فى المعادلة (1.1)

$$\therefore \sum dQ = \sum dW$$

$$i.e. \quad 700 \times \dot{m} = 995 \qquad \therefore \dot{m} = \frac{995}{700} = \underline{1.421}\ kg/s$$

i.e. إنسياب البخار المطلوب = $\underline{1.421}\ kj/s$

1.2- معادلة اللاإنسياب (اللاسريان) (The non-flow equation)

لقد تم التوضيح فى المقطع السابق أنه عندما يؤدى نظاماً يمتلك طاقة حقيقية معينة دورة بتحويل الحرارة و الشغل ، فإن صافى الحرارة المكتسبة يكون مساوياً لصافى شغل الخرج.
هذا يكون صحيحا لدورة كاملة عندما تكون الطاقة الحقيقية للنظام مساوية لقيمته الإبتدائية . إعتبر الآن إجراءاً تكون فيه الطاقة الحقيقية للنظام أخيراً أكبر من الطاقة الحقيقية الإبتدائية.
الفرق بين صافى الحرارة المكتسبة و صافى شغل الخرج سيزيد الطاقة الحقيقية للنظام ،
الكسب فى الطاقة الحقيقية = صافى الحرارة المكتسبة – صافى شغل الخرج
عندما يكون صافى التأثير هو إنتقال طاقة من النظام ، بالتالى سيكون هنالك فقداً فى الطاقة الحقيقية للنظام .
عندما يكون هنالك مائعاً ليس فى حركة فإن طاقته الحقيقية لكل وحدة كتلة تعرف بالطاقة الداخلية النوعية للمائع و تعطى بالرمز u . تعتمد الطاقة الداخلية لمائع على ضغطه و درجة حرارته ، و هى فى حد ذاتها خاصية . الطاقة الداخلية للكتلة، m ، يتم كتابتها ك U ، i.e. $mu = U$. وحدات الطاقة الداخلية ، U تكتب عادة ك kj .
بما أن الطاقة الداخلية خاصية فإن الكسب فى الطاقة الداخلية فى التغير من الحالة 1 الى الحالة 2 يمكن أن كتابته ك $U_1 - U_2$.
أيضاً ، الكسب فى الطاقة الداخلية = صافى الحرارة المكتسبة – صافى شغل الخرج

$$U_2 - U_1 = \sum_1^2 dQ - \sum_1^2 dW$$

هذه المعادلة تكون صحيحة لإجراء أو سلسلة من الإجراءات بين الحالة 1 و الحالة 2 بإعطاء أنه ليس هنالك سريان للمائع الى أو من النظام . فى أى إجراء لا سريانى سيكون هنالك إما حرارة مكتسبة أو حرارة مفقودة ، لكن ليس الإثنان ، نفس الشئ سيكون هنالك إما شغل خرج أو شغل دخل ، لكن ليس الإثنان . بالتالى، بإعتبار الحرارة المكتسبة الى النظام كموجبة و الشغل المبذول (i.e. شغل الخرج) كموجب ، سنحصل على ،

$$U_2 - U_1 = Q - W$$

$$i.e\ Q = (U_2 - U_1) + W$$

1 kg و أو $Q = (U_2 - U_1) + W$ ________(2.1)

هذه المعادلة تعرف بمعادلة طاقة اللاسريان . فى أحوال كثيرة فإن المعادلة 2.1 تكتب فى صورة تفاضلية .

لمقدار صغير للحرارة المكتسبة dQ ، مقدار صغير للشغل المبذول بالمائع dW ، و لكسب صغير فى الطاقة الداخلية النوعية ، فإن ،

$$dQ = du + dW \qquad \_\_\_\_\_\_ (1.3)$$

مثال (2) : فى شوط الإنضغاط لمحرك إحتراق داخلى ، تكون الحرارة المفقودة لماء التبريد مساوية ل 45 kj/kg و شغل الدخل مساوياً ل 90 kj/kg . أحسب التغير فى الطاقة الداخلية النوعية لمائع التشغيل ذاكراً ما إذا كان كسباً أم فقداً .

$Q = -45 \ kj/kg$ (أشارة ve- بما أن الحرارة مفقودة)

$W = -90 \ kj/kg$ (إشارة ve– بما أن الشغل هو شغل دخل للنظام)

مستخدماً المعادلة 1.2 ،

$$Q = (u_2 - u_1) + W$$
$$\therefore -45 = (u_2 - u_1) - 90$$
$$\therefore u_2 - u_1 = +90 - 45 = \underline{45} \ kj/kg$$

$\therefore$ الكسب فى الطاقة الداخلية $= \underline{45} \ kj/kg$

مثال (3) : فى أسطوانة محرك هواء فإن الهواء المنضغط له طاقة داخلية نوعية مقدارها 240 kj/kg عند بداية التمدد و طاقة داخلية نوعية مقدارها 200 kj/kg بعد التمدد . أحسب سريان الحرارة الى او من الأسطوانة عندما يكون الشغل المبذول بواسطة الهواء أثناء التمدد مساوياً ل 100 kj/kg .

من المعادلة 1.2

$$Q = (u_2 - u_1) + W$$
$$\therefore Q = (200 - 240) + 100 = -220 + 100 = -\underline{120} \ kj/kg$$

i.e. الحرارة المفقودة بالهواء $= \underline{120} \ kj/kg$

من المهم ملاحظة أن المعادلات 1.1 ، 1.2 ، و 1.3 تكون صحيحة ما إذا كان الإجراء إنعكاسياً أم غير ذلك . هذه هى معادلات طاقة.

لإجراء سريان إنعكاسى سنمتلك من المعادلة 1.1 ،

$$W = \int_1^2 p\,dv$$

أو لكميات صغيرة ، $dW = p\,dv$

بالتالى لاى إجراء لا سريانى إنعكاسى ، معوضاً فى المعادلة 1.3

$$dQ = du + p\,dv \qquad \_\_\_\_\_\_ (1.4)$$

أو بالتعويض فى المعادلة 1.2 ،

$$Q = (u_2 - u_1) + \int_1^2 p\,dv \qquad \_\_\_\_\_\_ (1.5)$$

المعادلات 1.4 و 1.5 يمكن إستخدامهما فقط لإجراءات لا سريانية إنعكاسية مثالية.

1.3 معادلة السريان المستقر (The Steady Flow Equation)

فى المقطع 1.2 ، قيل أن الطاقة الداخلية لمائع تكون هى الطاقة الحقيقية للمائع نتيجة لخواصه الديناميكية الحرارية . عندما يكون هنالك مائع كتلته 1 kg بطاقة داخلية نوعية ، u ، يتحرك بسرعة C و يكون عند إرتفاع z فوق مستوى المرجعية ، بالتالى فإنه يمتلك طاقة كلية مقدارها $u + (C^2/2) + z\,g$ ، حيث $C^2/2$ هى طاقة الحركة ل 1 kg من مائع و z g هى طاقة الوضع ل 1 kg من المائع .

فى معظم المسائل العملية فإن معدل سريان المائع خلال ماكينة أو جزء (قطعة) من جهاز يكون ثابتاً . هذا النوع من السريان يسمى بالسريان المستقر.

إعتبر 1 kg من مائع ينساب بسريان مستقر خلال قطعة من الجهاز شكل (2) . هذا يشكل نظام مفتوح كما تم تعريفه فى المقطع 1.2 . يتم توضيح الحد قاطعاً ماسورة المدخل عند 1 و المخرج عند المقطع 2 . يسمى هذا الحد فى بعض الأحيان بسطح التحكم ، و النظام المطوق بحجم التحكم.

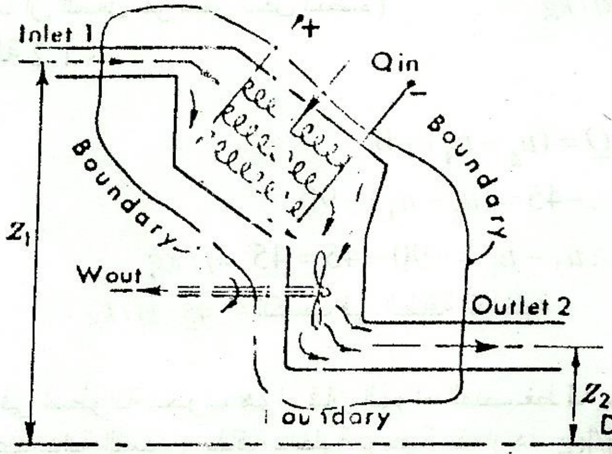


Fig. 1.2

الشكل(1.2)

إفرض أنه يتم إمداد سريان مستقر لحرارة بمقدار Q و حدة لكل kg من المائع ، و أن كل kg من المائع يؤدى W وحدة من الشغل كلما يمر خلال الجهاز . و الآن لكى يتم إدخال 1 kg من المائع عبر الحد يتطلب إنفاقاً للطاقة ؛ نفس الشئ لكى يتم دفع 1 kg من المائع عبر الحد عند المخرج ، فإنه يتطلب إنفاقاً للطاقة.

لقد تم توضيح مقطع المدخل مكبراً فى الشكل رقم(3)

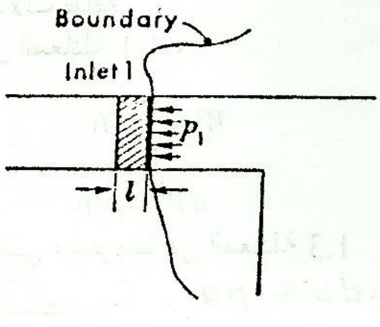


Fig. 1.3

الشكل (1.3)

إعتبر عنصراً من مائع بطول l ، و إجعل مساحة المقطع العرضى لماسورة المدخل A_1 . بالتالى سنحصل على ،

$(p_1 A_1) \times l$ = الطاقة المطلوبة لدفع العنصر عبر الحد

$= p_1 \times$(حجم عنصر المائع)

$\therefore$ الطاقة المطلوبة ل 1 kg من المائع $= p_1 v_1$

(حيث v_1 هو الحجم النوعى للمائع عند المقطع 1)

نفس الشئ ، يمكن توضيح أن ،

الطاقة المطلوبة عند المخرج لدفع 1 kg من المائع عبر الحد $= p_2 v_2$

إعتبر الآن الطاقة الداخلة و المغادرة للنظام . الطاقة الداخلة للنظام تتكون من طاقة المائع المنساب عند المدخل $\left(u_1 + \dfrac{C_2^2}{2} + z_2 g\right)$

مصطلح الطاقة $p_2 v_2$ ، و الشغل المبذول بواسطة المائع W . بما أن هنالك سريان مستقر للمائع الى أو من النظام ، ستكون هنالك سريانات مستقرة للحرارة و الشغل ، بالتالى فإن الطاقة المدخلة يجب أن تساوى بالضبط الطاقة المغادرة.

$$u_1 + \frac{C_1^2}{2} + z_1 g + p_1 v_1 + Q = u_1 + \frac{C_1^2}{2} + z_2 g + p_2 v_2 + W \qquad \_\_\_\_\_\_(1.6)$$

تقريباً فى جميع المسائل فى الديناميكا الحرارية التطبيقية و يتم تجاهل التغييرات فى الإرتفاع و عليه يمكن حذف عناصر طاقة الوضع من المعادلة . العناصر u و pv تقع على كلا جانبى المعادلة و هى دائماً ستكون كذلك فى الإجراء السريانى ، بما أن المائع يمتلك يمتلك دائماً طاقة داخلية معينة ، و العنصر pv يعطى الرمز h ، الذى يعرف بالمحتوى الحرارى النوعى (specific Enthalpy)

i.e. المحتوى الحرارى النوعى $h = u + pv$ و $\_\_\_\_\_\_(1.7)$

المحتوى الحرارى لمائع هو خاصية لذلك المائع ، بما أن المحتوى الحرارى هو خاصية مثل الطاقة الداخلية ، الضغط ، الحجم النوعى ، و درجة الحرارة ، يمكن إدخاله فى أى مسألة بغض النظر عن أن الإجراء سريانى أم لا سريانى . المحتوى الحرارى لكتلة m ، من مائع يمكن كتابته ك H ($mh = H$) . وحدات h هى نفسها كتلك للطاقة الداخلية .

معوضاً المعادلة 1.7 فى المعادلة 1.6

$$h_1 + \frac{C_1^2}{2} + Q = h_2 + \frac{C_2^2}{2_2} + W \qquad \_\_\_\_\_\_(1.8)$$

المعادلة 1.8 تعرف بمعادلة طاقة السريان المستقر . فى السريان المستقر فإن معدل إنسياب الكتلة للمائع عند أى مقطع هى نفسها عند أى مقطع آخر. إعتبر أى مقطع بمساحة مقطع عرضى A ، حيث تكون سرعة المائع C ، بالتالى فإن معدل سريان الحجم الماربالمقطع يكون CA.

أيضاً بما أن سريان الكتلة هو عبارة ن سريان حجم مقسوماً الحجم النوعى،

$$\text{و معدل سريان الكتلة } \dot{m} = \frac{CA}{v} = \rho CA \qquad \_\_\_\_\_(1.9)$$

(حيث v = الحجم النوعى عند المقطع ؛ ρ الكثافة عند المقطع)

هذه المعادلة تعرف بمعادلة الإستمرارية للكتلة .

بالرجوع للشكل رقم (2)،

$$\dot{m} = \frac{C_1 A_1}{v_1} = \frac{C_2 A_2}{v_2}$$

مثال (4) : فى توربينة وحدة توربينية غازية فإن الغازات تنساب خلال التوربين عند 17 kg/s و تكـون القـدرة المتولـدة بواسطة التوربينـة مسـاوية ل kW 14,000 . و تكـون المحتويـات الحرارية للغازات عند المدخل و المخرج هى 1200 kj/kg و 360 kj/kg على الترتيب ، و السرعات للغازات عند المدخل و المخرج هى 60 m/s و 150 m/s على الترتيب . أحسب المعدل الذى تفقده بـه الحرارة من التوربينـة . أوجد أيضـاً مساحة ماسورة المدخل بمعلومية أن الحجم النوعى للغازات عند المدخل $0.5\ m^3/kg$

يتم توضيح تمثيل تخطيطى للتوربينة فى الشكل رقم (4) .
من المعادلة 1.8

$$h_1 + \frac{C_1^2}{2} + Q = h_2 + \frac{C_2^2}{2} + W$$

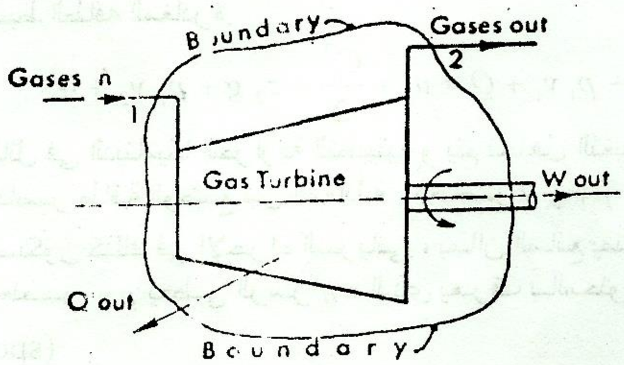


Fig. 1.4

الشكل(1.4)

$$\text{طاقة الحركة عند المدخل} = \frac{C_1^2}{2} = \frac{60^2}{2}\ m^2/s^2 = \frac{60^2}{2}\frac{kg\,m^2}{s^2\,kg}$$

$$= 1800\ N\ m/kg = \underline{1.8}\ kj/kg$$

$$\text{طاقة الحركة عند المخرج} = \frac{C_2^2}{2} = 2.5^2 \times (\text{طاقة الحركة عند المدخل})$$

$$= \underline{11.25}\ kj/kg \quad (\text{بمأن } C_2 = 2.5 C_2)$$

$$W = \frac{14.000}{17}\ kj/kg = \underline{823.5}\ kj/kg$$

بالتعويض فى المعدالة 1.8

$$1200+1.8+Q=360 \quad +11.25+823.5$$

$$\therefore Q=-7.02 \ kj/kg$$

i.e. الحرارة المفقودة $= +7.02 \ kj/kg = 7.02\times 17 \ kg/s \ = \underline{119.3} \ kW$

لإيجاد مساحة المدخل ، إستخدم المعادلة 1.9

$$\text{i.e.} \quad \dot{m}=\frac{CA}{v} \qquad \therefore A=\frac{v\dot{m}}{C}$$

$\therefore$ مساحة المدخل ، $A_1=\dfrac{17\times 0.5}{60}=\underline{0.142} \ m^3$

مثال (5) : ينساب هواء بإستقرار بمعدل 0.4 kg/s خلال ضاغط هواء ، حيث يدخل بسرعة 6 m/s ، بضغط 1 bar و بحجم نوعى $0.85 \ m^3/kg$ ، و يغادر بسرعة 4.5 m/s ، و بضغط 6.9 bar و حجم نوعى $0.16 \ m^3/kg$. و تكون الطاقة الداخلية النوعية للهواء المغادر أكبر من تلك للهواء الداخل بمقدار 88 kj/kg . ماء التبريد الموجود فى تجاويف محيطة بالأسطوانة يمتص الحرارة من الهواء بمعدل 59 kj/s . أحسب القدرة المطلوبة لإدارة الضاغط و مساحتا المقطع العرضى لمدخل و مخرج الماسورة.

فى هذه المسألة من الملائم أكثر كتابة معادلة السريان كما فى المعادلة 1.6 ، بحذف العناصر z.

$$\text{i.e.} \ u_1+\frac{C_1^2}{2}+p_1v_1+Q=u_2+\frac{C_2^2}{2}+p_2v_2+W$$

هنالك تمثيل تخطيطى للضاغط يتم توضيحه فى الشكل (5) .

ملحوظة: الحرارة المفقودة عبر الحد تكون مكافئة للحرارة المزالة بماء التبريد من الضاغط.

$$\frac{C_1^2}{2}=\frac{6\times 6}{2} J/kg \quad = \underline{18} \ J/kg$$

$$\frac{C_2^2}{2}=\frac{4.5\times 4.5}{2} J/kg \ = \underline{10.1} J/kg$$

$$p_1v_1=1\times 10^5\times 0.85=85{,}000 \ J/kg$$

$$p_2v_2=6.9\times 10^5\times 0.16=110{,}000 \ J/kg$$

$$u_2-u_1=88 \ kj/kg$$

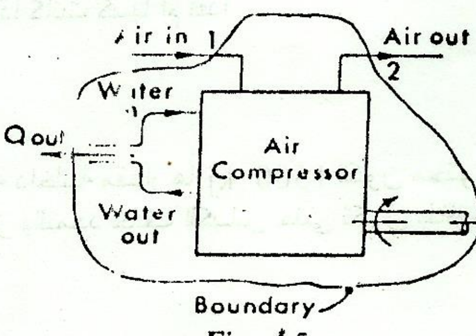


Fig. 1.5

الشكل(1.5)

$$\text{الحرارة المفقودة} = 59\ kj/s = \frac{59}{0.4} = \underline{147.5}\ \ kj/kg$$

$$W = (u_1 - u_2) + (p_1 v_1 - p_2 v_2) + \left(\frac{C_1^2}{2} - \frac{C_2^2}{2}\right) + Q$$

$$\text{i.e.}\, W = -88 + 85 - 110.4 + 0.018 - 0.0101 - 147.5 = \underline{-260.9}\ \ kj/kg$$

(ملحوظة : يكون التغير فى طاقة الحركة صغير جداً بحيث يمكن تجاهله بالمقارنة مع العناصر الأخرى)

i.e. $\quad$ شغل الدخل المطلوب $= \underline{260.9}\ \ kj/kg$

$$= 260.9 \times 0.4\ kj/s = \underline{104.4}\ kW$$

من المعادلة 1.9،

$$\dot{m} = \frac{CA}{v}$$

$$i.e.\ A_1 = \frac{0.4 \times 0.85}{6}\ m^2 = \underline{0.057}\ m^2$$

i.e. $\quad$ مساح المقطع العرضى لماسورة المدخل $= \underline{0.057}\ \ m^2$

نفس الشئ ، $A_2 = \dfrac{0.4 \times 0.16}{4.5} = \underline{0.014}\ \ m^2$

i.e. $\quad$ مساحة المقطع العرضى لماسورة المخرج $= \underline{0.014}\ \ m^2$

فى المثال (5) لقد تم إستخدام معادلة طاقة السريان المستقر ، بالرغم من الحقيقية التى تقول أن الإنضغاط يتكون من : سحب هواء ؛ إنضغاط فى أسطوانة مغلقة ؛ و تصريف هواء. يمكن إستخدام معادلة السريان المستقر لأن دورة الإجراءات تحدث مرات عديدة فى الدقيقة ، بالتالى فإن التأثير المتوسط يكون سريان مستقر لهواء خلال الماكينة.

مسائل :

1- فى ضاغط هواء يحدث الإنضغاط بطاقة داخلية ثابتة و هنالك 50 kj من الحرارة يتم فقدها لماء التبريد لكل kg من الهواء . أوجد الشغل المطلوب لشوط الإنضغاط لكل kg من الهواء.

Ans. (50 kj/kg)

2- فى شوط الإنضغاط لتوربينة غاز فإن الشغل المبذول على الغاز بواسطة الكباس يساوى 70 kj/kg و الحرارة المفقودة لماء التبريد تعادل 42 kj/kg . أوجد التغير فى الطاقة الداخلية ، ذاكراً ما إذا كانت كسباً أم فقداً .

Ans. (28 kj/kg كسب)

3- كتلة غاز بطاقة داخلية مقدارها 1500 kj تكون محتواة فى أسطوانة ذات عزل حرارى مثالى . يُسمح للغاز بالتمدد خلف الكباس حتى تكون طاقته الداخلية مساوية ل 1400 kj .

أحسب الشغل المبذول بالغاز . إذا كان التمدد يتبع القانون pv^2 = constant ، الضغط و الحجم الإبتدائيان للغاز هما 28 bar و 0.06 m^3 على الترتيب، أحسب الضغط و الحجم النهائيان.

Ans.(100 kj ; 4.59 bar , 0.148 m^3)

4- للغازات في أسطوانة محرك إحتراق داخلى طاقه داخلية مقدارها 800 kj/kg و حجم نوعى مقداره 0.06 m^3/kg عند بداية التمدد ، تمدد الغازات يمكن إفتراض حدوثه طبقاً للقانون الإنعكاسى $pv^{1.5}$ = constant ، من 55 bar الى 1.4 bar . و تكون الطاقة الداخلية بعد التمدد مساوية ل 230 kj/kg . أحسب الحرارة المفقودة الى أسطوانة ماء التبريد لكل kg من الغازات أثناء شوط التمدد .

Ans. (104 kj/kg)

5- توربينة بخار تستقبل سريان بخار بمقدار 1.35 kg/s . و تقوم بتوليد 500 kW . فقدان الحرارة من الغلاف يمكن تجاهله .
أ- أوجد التغير فى المحتوى الحرارى النوعى عبر التوربينة عندما يتم تجاهل السرعات عند المدخل و المخرج و الفرق فى الإرتفاع عند المدخل و المخرج .
ب- أوجد التغير فى المحتوى الحرارى النوعى عبر التوربينة عندما تكون السرعة عند المدخل مساوية ل 60 m/s ، السرعة عند المخرج 360 m/s، و تبعد ماسورة المدخل مسافة 3 m فوق ماسورة العادم .

Ans.(370 kj/kg , 433 kj/kg)

6- بخار ذو سريان مستقر يدخل مكثفاً بمحتوى حرارى مقداره 2300 kj/kg و بسرعة 350m/s . يغادر البخار المتكاثف المكثف بمحتوى حرارى مقداره 160 kj/kg وبسرعة مقدارها 70 m/s . أوجد الحرارة المنتقلة لمائع التبريد لكل kg من البخار المكثف .

Ans.(-2199 kj/kg)

7- توربينة تشتغل تحت شروط سريان مستقر بخاراً عند الحالة التالية : 13.8 bar ؛ حجم نوعى 0.143 m^3/kg ؛ طاقة داخلية 2590 kj/kg ؛ سرعة 30 m/s . و حالة البخار المغادر للتوربينة هى ضغط 0.35 bar ؛ حجم نوعى 4.37 m^3/kg : طاقة داخلية 2360 kj/kg و سرعة 90 m/s .تُفقد الحرارة الى البيئة المحيطة بمعدل 0.25 kj/s . إذا كان معدل سريان البخار يساوى 0.38 kj/s ، ماهى القدرة المتولدة بواسطة التوربينة.

Ans.(102.8 kW)

8- الفوهة هى عبارة عن جهاز لزيادة السرعة لجدول مائع ذو سريان مستقر . عند المدخل لفوهة معينة فإن المحتوى الحرارى للمائع يكون 3025 kj/kg و السرعة 60 m/s . عند المخرج من الفوهة يكون المحتوى الحرارى 2790 kj/kg . إذا كانت الفوهة أفقية و الفقد الحرارى منها يتم تجاهله.
أ- أحسب السرعة عند مخرج الفوهة .

ب- إذا كانت مساحة المدخل تساوى $0.1\ m^2$ و الحجم النوعى عند المدخل يساوى $0.19\ m^3/kg$ ، أوجد معدل سريان المائع .
ج- إذا كان الحجم النوعى عند مخرج الفوهة يساوى $0.5\ m^3/kg$ ، أوجد مساحة المخرج للفوهة.

Ans.(688 m/s , 31.6 kg/s . 0.0229 m^2)

الفصل الثاني

2.0 الإجرءات الإنعكاسية و الاإنعكاسية
Reversible and Irreversible Processes

فى الفصول السابقة تم إشتقاق معادلات الطاقة لإجرءات اللاسريان و للسريان ، وتم تقديم مفاهيم الإنعكاسية و الإنعكاسية ، و مناقشة خواص البخار و الغازات المثالية . الغرض من هذا الفصل هو إعتبار إجرءات يتم تقريبها الى عملية و توحيد هذا بالعمل الموجود فى الفصول السابقة.

2.1 إجراءات لا سريانية إنعكاسية : reversible non-flow process

إجراء الحجم الثابت: Constant volume process

فى إجراء ثابت الحجم تكون مادة التشغيل محتواة فى وعاء صلد (rigid vessel) ، بالتالى فإن حدود النظام تكون غير قابلة للحركة و لايمكن أن تكون هنالك شغلاً مبذولاً على أو بالنظام ، غير شغل دخل عجلة التحريك . سيتم إفتراض أن الحجم الثابت يتضمن شغلاً صغيراً مالم يُذكر ذلك .

من معادلة طاقة اللاسريان 1.2

$$Q=(u_2-u_1)+W$$

بماأنه ليس هنالك شغلاً مبذولاً ، عليه نحصل على ،

$$Q=u_2-u_1 \qquad \_\_\_\_\_\_\_\_\_(2.1)$$

أو الكتلة ، m ، مَن مادة التشغيل ،

$$Q=U_2-U_1 \qquad \_\_\_\_\_\_\_\_\_(2.2)$$

تستخدم جميع الحرارة المكتسبة فى إجراء الحجم الثابت فى زيادة الطاقة الداخلية.
يتم توضيح إجراء حجم ثابت لبخار على مخطط $p-v$ فى الشكل رقم 1 a . و لقد تم إختيار الحالات الأولية و النهائية لتكونا فى المنطقة الرطبة و المنطقة المحمصة على الترتيب .
فى الشكل رقم 1 b يتم توضيح إجراء ثابت الحجم على مخطط $p-v$ لغاز مثالى. لغاز مثال نحصل على ،

$$Q=mc_v(T_2-T_1)$$

إجراء الضغط الثابت : Constant pressure process

يمكن الملاحظة من الأشكال 1 a و 1b عندما تكون حدود النظام غير مرنة كما فى إجراء الحجم الثابت، بالتالى فإن الضغط يرتفع عندما يتم إمداد الحرارة . بالتالى لإجراء ثابت الضغط فإن الحد يجب أن يتحرك ضد مقاومة خارجية كلما يتم إمداد الحرارة ؛ كمثال فإن مائعاً فى أسطوانة خلف كباس يمكن ترتيبه لأداء إجراء ثابت الضغط . بماأنه يتم دفع الكباس خلال مسافة معينة بالقوة الى يؤديها المائع ، بالتالى فإن الشغل يكون مبذولاً على بيئته المحيطة.
من المعادلة
لأى إجراء أ إنعكاسياً

$$W=\int_{v_1}^{v_2} p\,dv$$

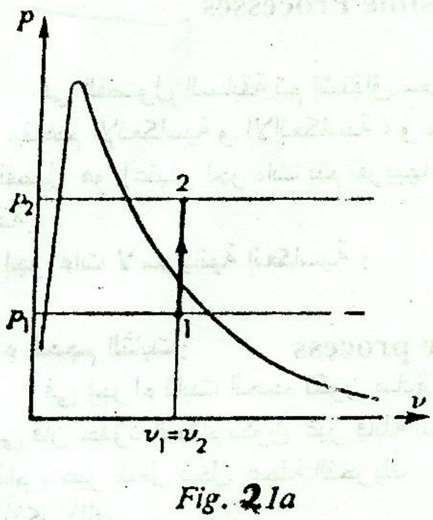


Fig. 2.1a

الشكل(2.1a)

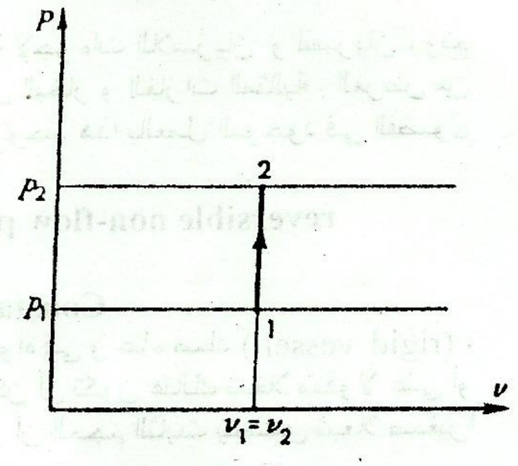


Fig. 2.1b

الشكل(2.1b)

عليه بما أن p تكون ثابتة ،

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p\,dv = p(v_2 - v_1)$$

من معادلة طاقة اللاسريان 1.2

$$Q = (u_2 - u_1) + W$$

بالتالى لإجراء ثابت الضغط إنعكاسى،

$$Q = (u_2 - u_1) + p(v_2 - v_1) = (u_2 + pv_2) - (u_1 + pv_1)$$

الآن من المعادلة 1.7 ، المحتوى الحرارى ؛ $h = u + pv$ بالتالى،

$$Q = h_2 - h_1 \quad \_\_\_\_\_\_(2.3)$$

أو لكتلة ، m ، لمانع ،

$$Q = H_2 - H_1 \quad \_\_\_\_\_\_(2.4)$$

إجراء الضغط الثابت لبخار يكون موضحاً على مخطط p – v فى الشكل 2a .
لقد تم إختبار الحالات الأولية و النهائية لتكونا فى المنطقة الرطبة و المنطقة المحمصة على الترتيب . فى الشكل 2b يتم توضيح إجراء ثابت الضغط لغاز مثالى على مخطط p – v .
لغاز مثالى سنحصل من المعادلة 3.12 على ،

$$Q = m\,c_p(T_2 - T_1)$$

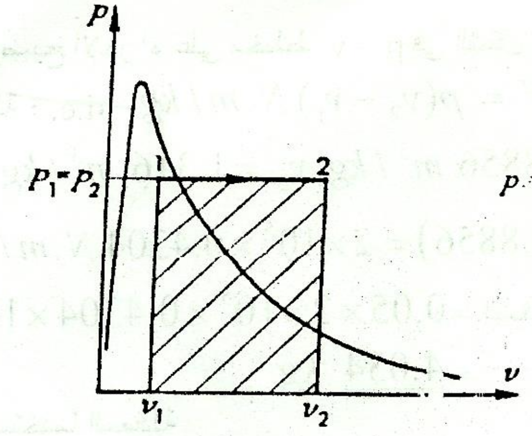


Fig. 2.2a

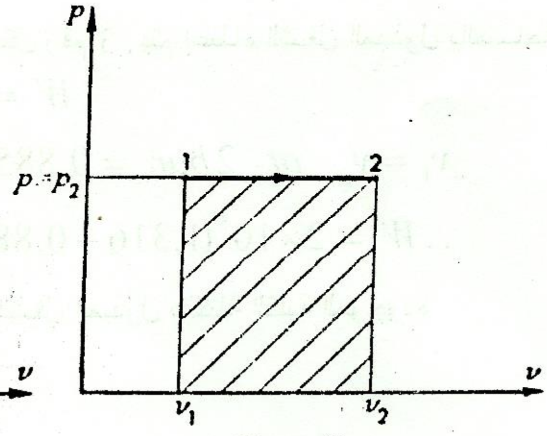


Fig. 2.2b

الشكل(2.2a) الشكل(2.2b)

لاحظ أنه فى الأشكال 2a و 2b أن المساحات المظللة تمثل الشغل المعمول بواسطة المائع $p(v_2 - v_1)$

مثال (1) : كتلة مقدارها 0.05 kg من مائع يتم تسخينها بضغط ثابت مقداره 2 bar حتى يكون الحجم المحتل مساويا ل $0.0658\ m^3$. أحسب الحرارة المكتسبة و الشغل المبذول :

a/ عندما يكون المائع بخاراً ، إبتدائياً جافاً مشبعاً .

b/ عندما يكون المائع هواء ، إبتدائياً عند 130^0 C .

a/ إبتدائياً يكون المائع جافاً مشبعاً عند الضغط 2 bar، بالتالى ،

$$h_1 = h_g \ at \ 2bar = \underline{2707} \ kj/kg$$

نهائياً يكون المائع عند 2 bar و يعطى الحجم النوعى ب

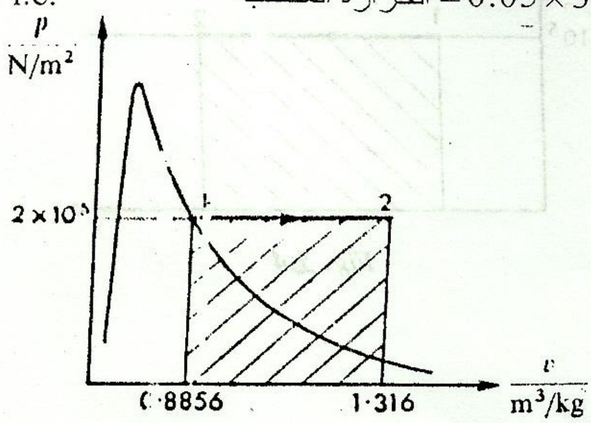
$$v_2 = \frac{0.0658}{0.05} = \underline{1.316} \ m^3/kg$$

بالتالى فإن المائع يكون محمصاً أخيراً . من جداول البخار المحمص عند ضغط 2 bar و حجم نوعى $1.316\ m^3/kg$ فإن درجة حرارة البخار تكون 300^0 C ، و المحتوى الحرارى $h_2 = 3072\ kj/kg$.

بالتالى من المعادلة 2.4

$$Q = H_2 - H_1 = m(h_2 - h_1) = 0.05(3072 - 2707)$$

i.e. الحرارة المكتسبة $= 0.05 \times 365 = 18.25\ kj$



الشكل(2.3)

Fig. 2.3

يتم توضيح الإجراء على مخطط p – v فى الشكل رقم 3 . يتم إعطاء الشغل المبذول بالمساحة المظللة ؛ i.e.، $W = p(v_2 - v_1)\,N.m/kg$

$$v_1 = v_g \quad at \quad 2\,bar = 0.8856\ m^3/kg, v_2 = 1.316\ m^3/kg$$

$$\therefore W = 2\times10^5(1.316 - 0.8856) = 2\times10^5 \times 0.4304\ N.m/kg$$

الشغل المبذول بالكتلة الكلية الموجودة $= 0.05\times2\times10^5\times0.4304\times10^{-3}$

$$= \underline{4.034}\ \ kg$$

b/ مستخدماً المعادلة

$$T_2 = \frac{p_1 v_2}{mR} = \frac{2\times10^5\times0.0658}{0.05\times0.287\times10^3} = \underline{917}\,K$$

لغاز ا مثالياً يؤدى إجراءاً ثابت الحجم

$$Q = m c_p (T_2 - T_1)$$

i.e. الحرارة المكتسبة $= \quad 0.05\times1.005(917-403)$

حيث) $T_1 = 130 + 273 = 403\ K$

$$0.05\times1.005\times514 = \underline{25.83}\ kj$$

يتم توضيح الإجراء على مخطط p – v فى الشكل رقم 4 . يتم إعطاء الشغل المبذول بالمساحة المظللة ، i.e.، $W = p(v_2 - v_1)\,N.m/kg$ من المعادلة $pv = RT$

$\therefore$ الشغل المبذول $= R(T_2 - T_2) = 0.287(917-403)\,kj/kg$

i.e. الطاقة المبذولة بكتلة الغاز الموجودة $= \quad 0.05\times0.287\times514$

$$= \underline{7.38}\quad kj$$

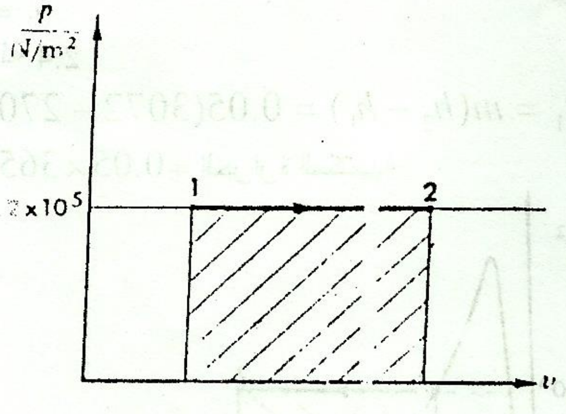


Fig. 2.4

الشكل(2.4)

الإجراء ثابت الحرارة :- Constant temperature Process or Isothermal Process

الإجراء عند درجة حرارة ثابتة يسمى بإجراء ثابت الحرارة . عندما يتمدد مائع في أسطوانة خلف كباس من ضغط عالٍ الى ضغط منخفض يكون هنالك ميلاً لهبوط درجة الحرارة . في التمدد ثابت درجة الحرارة فإن الحرارة يجب أن تضاف بإستمرار لكي تحافظ على درجة الحرارة عند القيمة الإبتدائية . نفس الشئ في انضغاط ثابت درجة الحرارة فإن الحرارة يجب إزالتها من المائع بإستمرار خلال الإجراء . يتم توضيح إجراء ثابت درجة الحرارة على مخطط p – v في الشكل(5) . لقد تم إختبار الحالات الإبتدائية و النهائية في المنطقة الرطبة و المنطقة المحمصة على الترتيب.

من الحالة 1 الى الحالة A يبقى الضغط عند p_1 ، بماأنه في المنطقة الرطبة فإن الضغط و درجة الحرارة هما قيمتا التشبع المناظرة . عليه يمكن الملاحظة أن الإجراء ثابت درجة الحرارة لبخار رطب يكون أيضاً عند ضغط ثابت و يمكن أستخدام المعادلات 2.3 و 2.4(.e.g الحرارة المكتسبة من الحالة 1 الى الحالة A لكل kg من البخار تساوي $h_A - h_1$) . في المنطقة المحمصة يهبط الضغط الى p_2 كما موضح في الشكل 5 . و لا يكون الإجراء بسيطاً . عندما يتم تثبيت الحالات 1 و 2 فإنه يمكن الحصول على الطاقات الداخلية u_1 و u_2 من الجدول . يُعطى الشغل المبذول بالمساحة المظللة في الشكل 5 . هذا يمكن تقييمه فقط برسم الإجراء و قياس المساحة مخططياً . على أي حال ، عندما يتم تقديم خاصية القصور الحراري ، s ، في الفصل 5 ، فسوف يتم توضيح طريقة ملائمة لحساب الحرارة المكتسبة . عندما يتم حساب سريان الحرارة فإنه يمكن الحصول على الشغل المبذول بواسطة معادلة طاقة اللاسريان 1.2

$$Q = (u_2 - u_1) + W$$

مثال (2) : بخار عند ضغط 7 bar و كسر جفاف 0.9 يتمدد في أسطوانة خلف كباس بثبوت درجة الحرارة و بإنعكاسية الى ضغط مقداره 1.5 bar . أحسب التغير للطاقة الداخلية و التغير للمحتوى الحراري لكل kg من البخار . قد وُجد أن الحرارة المكتسبة أثناء الإجراء تكون مساوية ل 574 kj/kg ، أحسب الشغل المبذول لكل kg من البخار .

يتم توضيح الإجراء في الشكل 6 . تكون درجة حرارة التشبع المناظرة ل 7 bar هي 165° C. عليه فإن البخار يكون محمصاً عند الحالة 2 . الطاقة الداخلية عند الحالة 1 يتم إيجادها من المعادلة

$$u_1 = (1-x)u_f + x\,u_g = (1-0.9)\times 696 + (0.9\times 2573)$$

$$\therefore u_1 = 69.6 + 2315.7 = \underline{2385.3} \quad kj/kg$$

بالإستكمال من جداول التحميص عند 1.5 bar و 165° C ، نحصل على ،

$$u_2 = 2580 + \frac{15}{50}(2656 - 2580) = 2580 + 22.8$$

$$i.e \quad u_2 = \underline{2602.8} \quad kj/kg$$

عليه ، الكسب في الطاقة الداخلية = $u_2 - u_1 = 2602.8 - 2385.3$

$$= \underline{217.5} \quad kj/kg$$

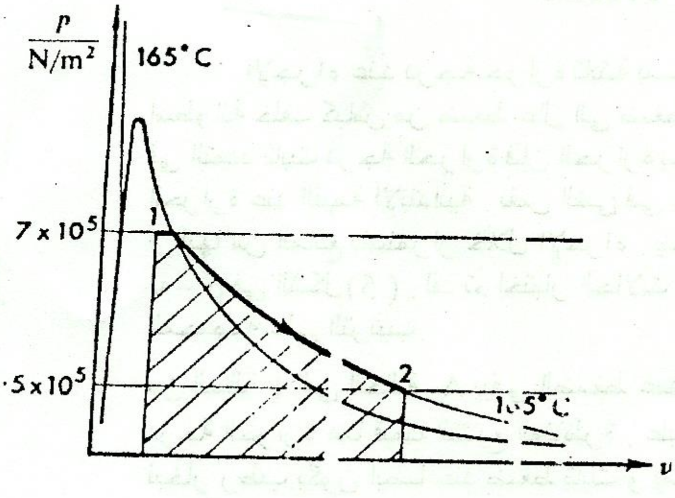


Fig. 2.6

الشكل(2.6)

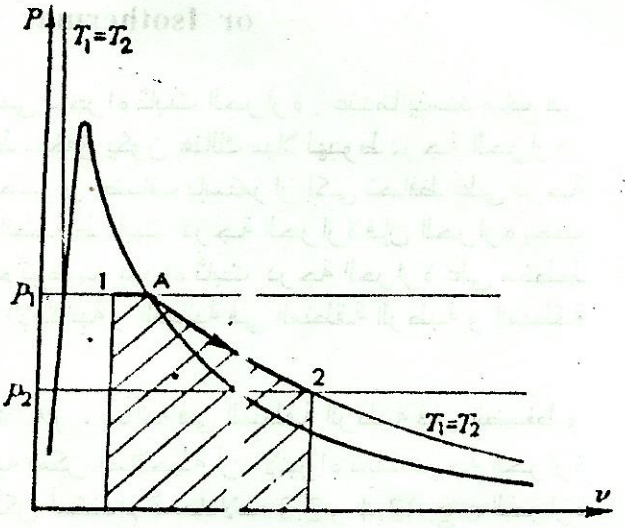


Fig. 2.5

الشكل(2.5)

$$h_1 = h_f + x\,h_{fg} = 697 + 0.9 \times 2067$$

$$\therefore h_1 = 697 + 1860.3 = \underline{2557.3} \quad kj/kg$$

بالإستكمال من جداول التحميص عند 1.5 bar و 165° C ، نحصل على ،

$$h_2 = 2773 + \frac{15}{50}(2873 - 2773) = 2773 + 30$$

$$i.e \quad h_2 = \underline{2803} \quad kj/kg$$

$$\text{i.e.} \quad h_2 - h_1 = 2803 - 2557.3 = \underline{245.7} \; kj/kg$$

من معادلة اللاسريان 1.2

$$Q = (u_2 - u_1) + W$$

$$\therefore W = Q - (u_2 - u_1) = 547 - 217.5 = \underline{329.5} \quad kj/kg$$

i.e. الشغل المبذول بواسطة البخار $= \underline{329.5} \quad kj/kg$

(الشغل المبذول يعطى أيضاً بالمعادلة على الشكل 6 $W = \int_{v_1}^{v_2} p\,dv$ ؛ هذا يمكن تقييمه فقط مخططياً).

الإجراء ثابت الحرارة لغاز مثالي يمكن التعامل معه بسهولة أكبر من الإجراء ثابت درجة الحرارة لبخار، بما أن هنالك قوانين محددة للغاز المثالي تربط بعلاقات p ، v و T ، و الطاقة الداخلية u سنحصل على

$$pv = RT$$

الآن عندما تكون درجة الحرارة ثابتة كما في إجراء ثابت درجة الحرارة بالتالي نحصل على

$$pv = RT = \text{constant}$$

عليه لإجراء ثابت درجة الحرارة لغاز مثالي ،

$$p\,v = \text{Constant}$$

$$\text{i.e. } p_1 v_1 = p_2 v_2 = p_3 v_3 \quad etc.$$

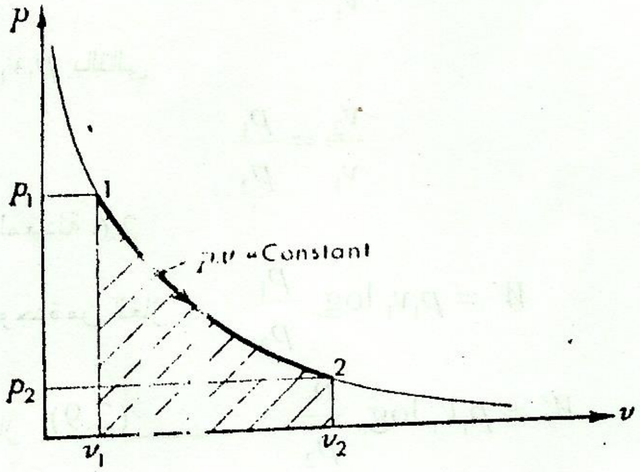


Fig. 2.7

الشكل(2.7)

فى الشكل 7 يتم توضيح إجراء ثابت درجة الحرارة لغاز مثالى على مخطط p – v . تكون المعادلة للإجراء هى $p\,v$ =constant والتى هى معادلة قطع زائد .

يجب التأكيد بأن الإجراء ثابت درجة الحرارة يكون فقط فى الصورة $p\,v$ =constant لغاز مثالى ، لأنه فقط لغاز مثالى يمكن تطبيق معادلة الحالة $p\,v = RT$. يتمدد الشغل المبذول بغاز مثالى من الحالة 1 الى الحالة 2 بثبوت درجة الحرارة و بإنعكاسية و يُعطى بالمساحة المظللة علي شكل 7.

$$W = \int_{v1}^{v_2} p\,dv$$

فى هذه الحالة $p\,v$ =constant أو $p = c\,/\,v$ (حيث مقدار ثابت =C)

$$W = \int_{v1}^{v_2} C\,\frac{dv}{v} = C\left[\log_e v\right]_{v_1}^{v_2} = C\log_e \frac{v_2}{v_2}$$

للثابت C يمكن كتابتة إما ك $p_1 v_1$ أو ك $p_2 v_2$ بما ان $p_1 v_1 = p_2 v_2$ =constant

$$\text{i.e. } W = p_1 v_1 \log_e \frac{v_2}{v_1}$$ لكل وحدة من كتلة الغاز

أو $$W = p_2 v_2 \log_e \frac{v_2}{v_1}$$ لكل وحدة من كتلة الغاز

لكتلة ، m ، للغاز ،

$$W = p_1 v_1 \log_e \frac{v_2}{v_1} \qquad \_\_\_\_\_\_\_(2.7)$$

أيضاً بما أن $p_1 v_1 = p_2 v_2$ بالتالى

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1}{p_2}$$

بالتالى بالتعويض فى المعادلة 2.6

$$W = p_1 v_1 \log_e \frac{p_1}{p_2} \qquad \text{لكل وحدة من الغاز}\_\_\_\_\_\_\_(2.8)$$

أو لكتلة ، m ، من الغاز

$$W = p_1 V_1 \log_e \frac{p_1}{p_2} \qquad \_\_\_\_\_\_\_(2.9)$$

مستخدما المعادلة

$$p_1 v_1 = RT$$

بالتالى بالتعويض فى المعادلة 2.8

$$W = RT \log_e \frac{p_1}{p_2} \qquad \text{لكل وحدة كتلة من الغاز}\_\_\_\_\_\_\_(4.10)$$

أو لكتلة ، m ، الغاز

$$W = RT \log_e \frac{p_1}{p_2} \qquad \_\_\_\_\_\_\_(2.11)$$

من الواضح أنه هنالك عدد كبير من المعادلات للشغل المبذول ، و لا يجب بذل أى محاولة لتذكرها بما أنها جميعاً يمكن إشتقاقها ببساطة شديدة من المبادئ الأولية.

لغاز مثالى من قانون جول

$$U_2 - U_1 = m\,cv\left(T_2 - T_1\right)$$

بالتالى لإجراء ثابت درجة الحرارة لغاز مثالى ، بما أن $T_2 = T_1$ ، فإن

$$U_2 - U_1 = 0$$

i.e. تبقى الطاقة الداخلية ثابتة المقدار فى إجراء ثابت درجة الحرارة لغاز مثالى .

من معادلة اللاسريان 1.2

$$Q = (u_2 - u_1) + W$$

بماأن $u_2 = u_1$ ، فإن

$$Q = W \qquad \_\_\_\_\_\_\_(2.12)$$

لإجراء ثابت درجة الحرارة لغاز مثالى .

لاحظ أن سريان الحرارة يكون مكافئاً للشغل المبذول فى إجراء ثابت درجة الحرارة لغاز مثالى فقط . من المثال (2) لبخار يُلاحظ أنه ، بالرغم من أن الإجراء يكون ثابت درجة الحرارة ، فإن التغير فى الطاقة الداخلية يكون مساوياً ل 217.5 kj/kg ، و لا تكون الحرارة المكتسبة مكافئة للشغل المبذول .

مثال (3) : كتلة مقدارها 1 kg من النايتروجين (كتلته الجزيئية 28 kg/kmol) يتم إنضغاطها بإنعكاسية وبثبوت درجة الحرارة من 1.01 bar ، 20^o C الى 4.2 bar . أحسب الشغل المبذول و سريان الحرارة أثناء الإجراء . إفترض أن النايتروجين يكون غازاً مثالياً .

للنايتروجين ،

$$R = \frac{R_o}{M} = \frac{8.314}{28} = \underline{0.297} \quad kj / kgK$$

يكون الإجراء موضحاً على مخطط p – v في الشكل 8 . لقد تمت الإشارة الى أن الإجراء يحدث من اليمين الى اليسار على مخطط p – v بالتالى فإن الشغل المبذول بواسطة المائع يكون سالباً . أ ى أن الشغل يكون مبذولاً على المائع .

من المعادلة 2.10

$$W = RT \ \log_e \frac{p_1}{p_2} = 0.297 \times 293 \times \log_e \frac{1.01}{4.2}$$

$$i.e \ W = -0.297 \times 293 \times \log_e \frac{4.2}{1.01} = -0.297 \times 293 \times 1.425$$

(حيث $T = 20 + 273 = 293 \ k$)

i.e. شغل الدخل $= + \ 0.297 \times 293 \times 1.425 = \underline{124} \ kj / kg$

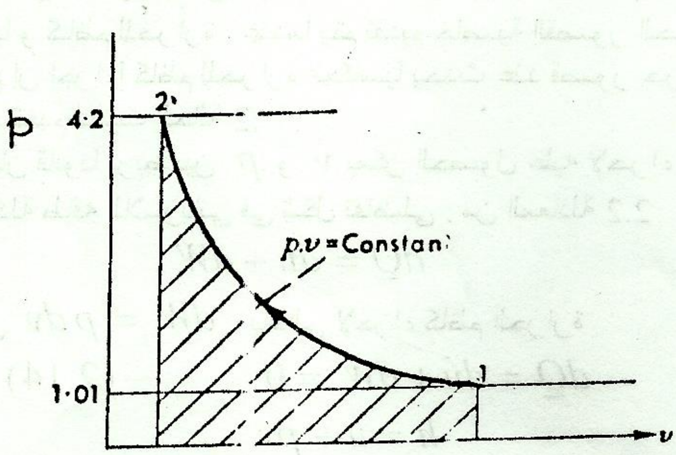


Fig. 2.8

الشكل(2.8)

من المعادلة 2.12 ، لإجراء ثابت الحرارة لغاز مثالى،

$$Q = W = \underline{-124} \ kj / kg$$

i.e. الحرارة المفقودة $= + \underline{124} \ kj / kg$

الإجراء اللاسريانى كاظم الحرارة الإنعكاسى:
Reversible adiabatic non-flow process

الإجراء كاظم الحرارة هو ذلك الإجراء الذى لاتنتقل فيه الحرارة الى أو من المائع أثناء الإجراء . مثل هذا الإجراء يمكن أن يكون إنعكاسياً او لاإنعكاسياً . سيتم إعتبار الإجراء اللاسريانى كاظم الحرارة الإنعكاسى فى هذا المقطع

من معادلة اللاسريان 1.2

$$Q = (u_2 - u_1) + W$$

و لإجراء كاظم الحرارة، $Q = 0$

عليه نحصل على ،

$$Q = u_2 - u_1$$ لأى إجراء كاظم الحرارة ____ (2.13)

تكون المعادلة 2.13 صحيحة لإجراء كاظم الحرارة إذا ما كان الإجراء إنعكاسياً ام غير ذلك . فى التمدد كاظم الحرارة ، فإن الشغل المبذول بواسطة المائع يكون على حساب الإنخفاض فى الطاقة الداخلية للمائع . نفس الشئ ، فى إجراء إنضغاط كاظم الحرارة فإن جميع الشغل المبذول على المائع يؤدى لزيادة الطاقة الداخلية للمائع . لكى يحدث إجراء كاظم الحرارة ، يجب أن يكون هنالك عزل حرارى مثالى متاحاً للنظام.

لبخار يؤدى إجراءاً كاظم الحرارة إنعكاسياً فإن الشغل المبذول يمكن إيجاده من المعادلة 2.13 بتقييم u_1 وu_2 من الجداول . لكى يتم تثبيت الحالة 2 ، يجب إستخدام الحقيقة القائلة أن الإجراء يكون إنعكاسياً و كاظم للحرارة . عندما يتم تقديم خاصية القصور الحرارى s، فى الفصل 5 سيتم توضيح أن إجراءاً كاظم للحرارة إنعكاسياً يحدث عند قصور حرارى ثابت ، و هذه الحقيقة يمكن أن تستخدم لتثبيت الحالة 2.

لغاز مثالى ، فإن قانوناً يربط بين p و v يمكن الحصول عليه لإجراء كاظم الحرارة إنعكاسى ، بإعتبار معادلة طاقة اللاسريانى فى شكل تفاضلى . من المعادلة 2.2

$$dQ = du + dW$$

أيضاً لإجراء إنعكاسى $dW = p\,dv$ ، بالتالى لإجراء كاظم الحرارة

$$dQ = du + dW = 0 \qquad -(2.14)$$

بما أن

$$h = u + pv$$

فإن ،

$$dh = du + p\,dv + v\,dp$$

i.e. $dQ = du + dW du + p\,dv = dh - v\,dp$

و بالتالى ،

$$dQ = dh - v\,dp = 0 \qquad -(1.15)$$

بالتالى،

$$du + \frac{R\,T\,dv}{v} = 0$$

$$u = c_v\,T \quad \text{او} \quad du = c_v\,dT$$

$$\therefore c_v\,dT + \frac{R\,T\,dv}{v} = 0$$

بقسمة المعادلة % T لإعطاء شكلاً يمكن تكامله ،

$$c_v \frac{dT}{T} + \frac{R\,T\,dv}{v} = 0$$

بالتكامل ،

$$c_v \log_e T + R \log_e v = \text{Constant}$$

$T = (p\,v)/R$ ، عليه بالتعويض ،

$$c_v \log_e \frac{p\,v}{R} + R \log_e v = \text{Constant}$$

بقسمة المعادلة % c_v

$$\log_e \frac{p\,v}{R} + \frac{R}{c_v} \log_e v = \text{Constant}$$

أيضاً

$$c_v = \frac{R}{(\gamma - 1)} \text{ أو } \frac{R}{c_v} = \gamma - 1$$

بالتالى بالتعويض ،

$$\log_e \frac{p\,v}{R} + (\gamma - 1) \log_e v = \text{Constant}$$

$$\text{أو } \log_e \frac{p\,v}{R} + \log_e v^{\gamma - 1} = \text{Constant}$$

$$\therefore \log_e \frac{p\,v\,v^{\gamma-1}}{R} = \text{Constant}$$

$$\text{i.e. } \log_e \frac{p\,v^{\gamma}}{R} = \text{Constant}$$

$$\text{i.e. } \log_e \frac{p\,v^{\gamma}}{R} = e^{(consant)} = \text{Constant}$$

$$\text{أو } p\,v^{\gamma} = \text{Constant} \_\_\_\_\_\_ (2.16)$$

عليه سنملك علاقة بسيطة بين p و v لأى غاز مثالى يؤدى إجراء كاظم الحرارة إنعكاسى ، كل غاز مثال يكون لديه قيمته الخاصة ل γ.

$p\,v = R\,T$ ، العلاقات بين T ، v و T ، و p يمكن إشتقاقها ،

$$\text{i.e. } p\,v = R\,T$$

$$\therefore p = \frac{R\,T}{v}$$

معوضاً فى المعادلة 2.16،

$$=\text{Constant}\,\frac{RT}{v}\,v^{\gamma}$$

i.e. $T v^{\gamma-1}=\text{Constant}$ ______(2.17)

ايضا $v=(RT)/p$ ؛ بالتالي بالتعويض فى المعادلة 2.16

$$=\text{Constant}\,p\left(\frac{RT}{p}\right)^{\gamma}$$

$$=\text{Constant}\therefore \frac{T^{\gamma}}{p^{\gamma-1}}$$

أو $=\text{Constant}\therefore \frac{T^{\gamma}}{p^{\gamma-1}}$ ______(2.18)

عليه لإجراء كاظم الحرارة إنعكاسى لغاز مثالى بين الحالات 1 و 2 يمكننا كتابة الآتى: من المعادلة 2.16

$$p_1 v_1^{\gamma}=p_2 v_2^{\gamma} \quad \text{أو} \quad \frac{p_1}{p_2}=\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma} \qquad \text{\_\_\_\_\_(2.19)}$$

من المعادلة 2.17

$$T_1 v_1^{\gamma-1}=T_2 v_2^{\gamma-1} \quad \text{أو} \quad \frac{T_1}{T_2}=\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma-1} \qquad \text{\_\_\_\_\_(2.20)}$$

من المعادلة 2.18،

$$\frac{T_1}{p_1^{(\gamma-1)/\gamma}}=\frac{T_2}{p_2^{(\gamma-1)/\gamma}} \quad \text{أو} \quad \frac{T_1}{T_2}=\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \qquad \text{\_\_\_\_\_(2.21)}$$

من المعادلة 2.13 فإن الشغل المبذول فى إجراء كاظم الحرارة لكل kg من الغاز يعطى ب $W=u_2-u_1$. و يعطى الكسب فى الطاقة الداخلية لغاز مثالى بالمعادلة

i.e. لكل 1 kg $\quad u_2-u_1=c_v(T_2-T_1)$

$$\therefore W=c_v(T_2-T_1)$$

أيضاً

$$c_p=\frac{R}{(\gamma-1)}$$

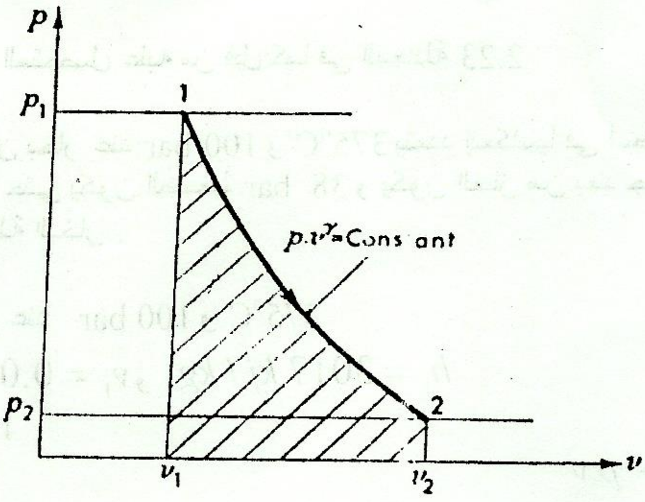


Fig. 2.9

الشكل(4.9)

بالتالى بالتعويض

$$W = \frac{R(T_1 - T_2)}{(\gamma - 1)} \qquad \_\_\_\_\_\_(2.22)$$

مستخدماً المعادلة $p\,v = RT$ ،

$$W = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{\gamma - 1} \qquad \_\_\_\_\_\_(2.23)$$

يتم توضيح إجراء كاظم للحرارة لغاز مثالى على مخطط p – v فى الشكل 9 ، يُعطى الشغل المبذول بالمساحة المظللة ، و هذه المساحة يمكن تقييمها بالتكامل،

$$W = \int_{v1}^{v_2} p\,dv \text{ i.e.}$$

عليه بما أن $p\,v^{\gamma}$ =constant ، بالتالى

$$W = \int_{v1}^{v_2} \frac{c\,dv}{v^{\gamma}}$$

$$i.e.\ W = c\int_{v1}^{v_2} \frac{dv}{v^{\gamma}} = c\left[\frac{v^{-\gamma+1}}{-\gamma+1}\right]_{v_1}^{v_2}$$

$$= c\left(\frac{v_2^{-\gamma+1} - v_1^{-\gamma+1}}{1-\gamma}\right) = c\left(\frac{v_1^{-\gamma+1} - v_2^{-\gamma+1}}{\gamma - 1}\right)$$

بالتالى يمكن كتابة الثابت فى هذه المعادلة ك $p_1\,v_1^{\gamma}$ أو ك $p_2\,v_2^{\gamma}$.

بالتالى

$$W = \frac{p_1 v_1^{\gamma} v_1^{1-\gamma} - p_2 v^{\gamma}{}_2 v_2^{1-\gamma}}{\gamma - 1} = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{\gamma - 1}$$

$$W = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{\gamma - 1}$$

هذا هو نفس التعبير المتحصل عليه من قبل كما فى المعادلة 2.23

مثال (4) : 1 kg من بخار عند 100 bar و $375^{o}C$ يتمدد إنعكاسياً فى أسطوانة معزولة جيداً حرارياً خلف كباس حتى يكون الضغط 38 bar و يكون الغاز من بعد جافاً مشبعاً . أحسب الشغل المبذول بواسطة البخار .

من جداول التحميص عند 100 bar و $375^{o}C$

$$h_1 = 3017\ kj/kg \quad \text{و} \quad v_1 = 0.02453\ m^3/kg$$

مستخدماً المعادلة 1.7

$$u = h - pv$$

$$\therefore u_1 = 3017 - \frac{100 \times 10^5 \times 0.0253}{10^3} = \underline{2771.7}\ \ kj/kg$$

أيضاً

$$u_2 = u_g \quad at \quad 38\ bar = \underline{2602}\ kj/kg$$

بما أن الأسطوانة معزولة جيداً حرارياً بالتالى يكون لا يكون هنالك سريان حرارة الى أو من البجار أثناء التمدد؛ بالتالى يكون الإجراء كاظم الحرارة . مستخدماً المعادلة 2.13

$$W = u_1 - u_2 = 2771.7 - 2602$$

$$\therefore W = \underline{169.7}\ kj/kg$$

يتم توضيح الإجراء على مخطط p – v فى الشكل 10 ، المساحة المظللة تمثل الشغل المبذول.

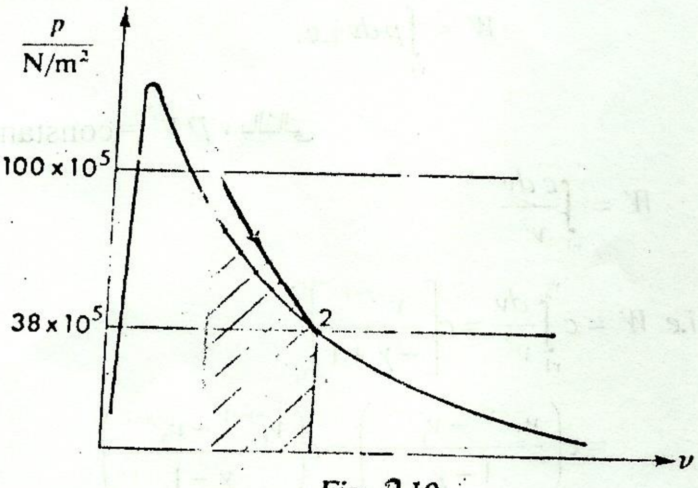


Fig. 2.10

الشكل(2.10)

مثال (5) : هواء عند 1.02 bar ، 22^{o} C ، يكون إبتدائياً محتلاً حجماً لأسطوانة مقداره $0.015\ m^3$ ، يتم إنضغاطه إنعكاسياً و بأجراء كاظم للحرارة بكباس الى ضغط مقداره 6.8 bar أحسب درجة الحرارة النهائية ، الحجم النهائى ، و الشغل المبذول على كتلة الهواء فى الأسطوانة.

من المعادلة 2.21

$$\frac{T_1}{T_2}=\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad \text{أو} \quad T_2=T_1\times\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$\text{i.e. } T_2=295\times\left(\frac{6.8}{1.02}\right)^{(1.4-1)/1.4}=295\times 6.67^{0.286}=295\times 1.72=\underline{507.5}\ K$$

(حيث $T_1 = 22 + 273 = 295\ k$ ؛ γ للهواء = 1.4)،

i.e. درجة الحرارة النهائية $=507.5-273=\underline{234.5^{o}C}$

من المعادلة 2.19

$$\frac{p_1}{p_2}=\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma} \quad \text{أو} \quad \frac{v_1}{v_2}=\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/\gamma}$$

$$\therefore\ \frac{0.015}{v_2}=\left(\frac{6.8}{1.02}\right)^{1/1.4}=6.67^{0.714}=\underline{3.87}$$

$$\therefore\ v_2=\frac{0.015}{3.87}=\underline{0.00388}\ m^3$$

i.e. الحجم النهائى $=\underline{0.00388}\ m^3$

من المعادلة 2.13 لإجراء كاظم الحرارة

$$W=u_1-u_2$$

و لغاز مثالى ، من المعادلة 2.14 $u=c_vT$ لكل kg من الغاز ،

$$\therefore\ W=c_v(T_1-T_2)=0.718(295-507.5)$$

$$=-\underline{152.8}\ kj/kg$$

i.e. شغل الدخل لكل kg $=$ $\underline{152.8}\ kj$

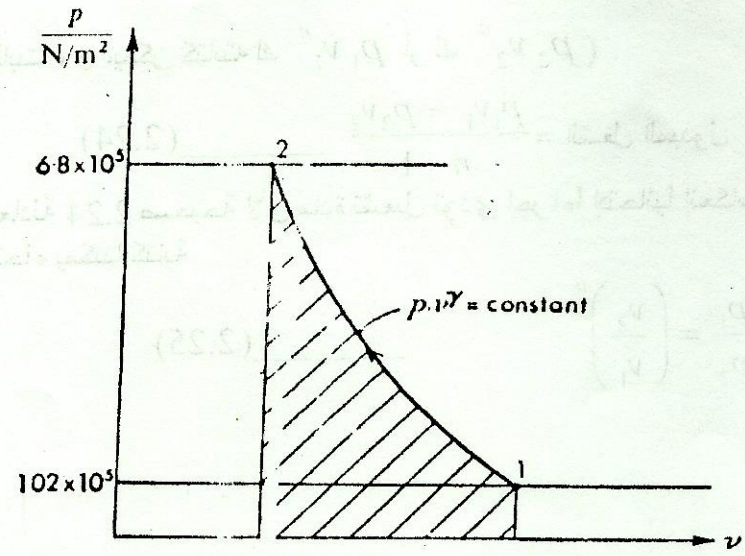


Fig. 2.11

الشكل(2.11)

كتلة الهواء يمكن إيجادها بإستخدام المعادلة $pv = mRT$

$$\therefore m = \frac{p_1 v_1}{R T_1} = \frac{1.02\times10^5\times0.015}{0.287\times10^3\times295} = \underline{0.0181}\ kg$$

i.e. الشغل المبذول الكلى $= 0.0181\times152.8 = \underline{2.76}\ kj$

يتم توضيح الإجراء على مخطط p – v فى الشكل رقم 11 ، تمثل المساحة المظللة الشغل المبذول لكل kg من الهواء .

2.3 إجراء متعدد الإنتحاء:- Polytropic Process

وُجد أن هنالك إجراءات عديدة فى الواقع العملى يتم تقريبها لقانون إنعكاسى بالشكل pv^n =constant حيث n هو مقدار ثابت . كل من البخار و الغازات تُطيع بتقارب هذا القانون فى إجراءات لاسريان عديدة . مثل هذه الإجراءات تكون إنعكاسية داخلياً .

لأى إجراء إنعكاسى ،

$$W = \int_{v1}^{v_2} p\,dv$$

لأى إجراء يكون فيه pv^n =constant نحصل على $p = c/v^n$ حيث c هو مقدار ثابت

$$\therefore W = \int_{v1}^{v_2} \frac{c\,dv}{v^n}$$

$$i.e.\ W = c\int_{v1}^{v_2}\frac{dv}{v^\gamma} = c\left[\frac{v^{-n+1}}{-n+1}\right] = c\left(\frac{v_2^{-n+1} - v_1^{-n+1}}{-n+1}\right)$$

$$= c\left(\frac{v_1^{1-n} - v_2^{1-n}}{n-1}\right) = \frac{p_1 v_1^n v_1^{1-n} - p_2 v_2^n v_2^{1-n}}{n-1}$$

(بماأن الثابت ، c ،يمكن كتابته ك $p_1 v_1^{\,n}$ أو ك $p_2 v_2^{\,n}$)

i.e. الشغل المبذول $= \dfrac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{n-1}$ ________(2.24)

تكون المعادلة 2.24 صحيحة لأى مادة تشغيل تؤدى إجراءاً إنتحائياً إنعكاسياً . يتبع أيضاً أنه لأى إجراء إنتحاء يمكننا كتابة

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^n$$ ________(2.25)

مثال (6) : فى محرك بخار يكون البخار عند بداية إجراء التمدد 7 bar ، كسر جفاف 0.95 ، و يتبع التمدد القانون $pv^{1.1}$=constant ، أسفل الى ضغط مقداره 0.34 bar . أحسب الشغل المبذول لكل kg من البخار أثناء التمدد ، و سريان الحرارة لكل kg من البخار الى أو من الأسطوانة أثناء التمدد.

عند 7 bar ، $v_g = 0.2728\ m^3/kg$

عليه بإستخدام المعادلة

$$v_1 = x\, v_g \doteq 0.95 \times 0.2729 = \underline{0.259}\, m^3/kg$$

بالتالى من المعادلة 2.25

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^n \quad \text{أو} \quad v_2 = v_1\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/n}$$

$$\therefore v_2 = 0.259\left(\frac{7}{0.34}\right)^{1/1.1} = 20.59 \times 0.259$$

$$= 15.64 \times 0.259 = \underline{4.05}\ \ m^3/kg$$

من المعادلة 2.24،

$$W = \frac{p_1v_1 - p_2v_2}{n-1} = \frac{7\times10^5 \times 0.259 - 0.34\times10^5 \times 4.05}{1.1-1}$$

$$i.e. W = \frac{10^5}{0.1}(1.813 - 1.377) = \frac{10^5 \times 0.436}{0.1}\ N.m/kg$$

i.e. الشغل المبذول $= \underline{436}\ kj/kg$

عند 0.34 bar ، $v_g = 4.6499\ \ m^3/kg$

عليه يكون البخار رطباً عند الحالة 2 ،

$$x_2 = \frac{4.05}{4.649} = \underline{0.873}$$

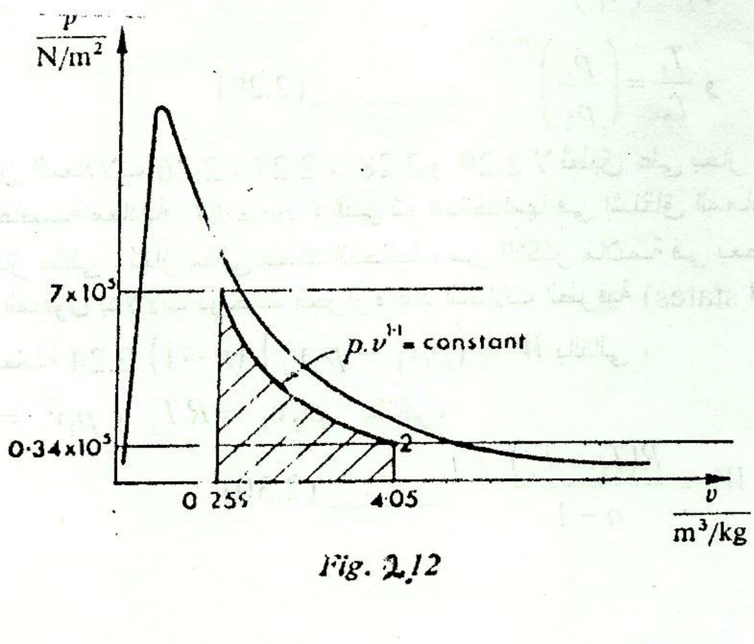


Fig. 2.12 الشكل(2.12)

يتم توضيح التمدد على مخطط p – v فى الشكل رقم 12 ، المساحة المظللة تحت 2 – 1 تُمثل الشغل المبذول لكل kg من البخار.

$$u_1 = (1 - x_1)u_f + x_1 u_g = (1 - 0.95)696 + 0.95 \times 2573$$

$$i.e.\ u_1 = 34.8 + 2442 = \underline{2476.8}\ kj/kg$$

$$u_2 = (1 - x_2)u_f + x_2 u_g = (1 - 0.873)302 + 0.873 \times 2447$$

$$i.e.\ u_2 = 38.35 + 2158 = \underline{2196.4}\ kj/kg$$

من معادلة طاقة اللاسريان ،1.2،

$$Q = (u_2 - u_1) + W = (2196.4 - 2476.8) + 436$$

$$i.e. Q = -280.4 + 436 = \underline{155.6}\ kj/kg$$

i.e. الحرارة المكتسبة $= \underline{155.6}\ kj/kg$

إعتبر الآن إجراء الإنتحاء لغاز مثالى

$$pv = RT \quad \text{أو} \quad p = \frac{RT}{v}$$

بالتالى فى المعادلة pv^n=constant ، نحصل على ،

$$\frac{RT}{v} v^n = \text{constant} \quad \text{أو} \quad Tv^{n-1} = \text{constant} \qquad (2.26)$$

أيضاً بكتابة $v = (RT)/p$ نحصل على ،

$$p\left(\frac{RT}{p}\right)^n = \text{constant} \quad \text{أو} \quad \frac{T}{p^{(n-1)/n}} = \text{constant} \qquad (2.27)$$

يمكن ملاحظة أن هذه المعادلات تكون مشابهة بالضبط للمعادلات 2.17 و 2.18 لإجراء كاظم الحرارة إنعكاسى لغاز مثالى حقيقة أن الإجراء كاظم الحرارة الإنعكاسى لغاز مثالى هو حالة خاصة لإجراء الإنتحاء بالأس n, مساو ل γ.

يمكن كتابة المعادلات 2.26 و 2.27 كالاتى،

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{n-1} \qquad (2.28)$$

و

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{(n-1)/n} \qquad (2.29)$$

لاحظ أن المعادلات 2.26 ، 2.27 ، 2.28 و 2.29 لا تُطبق على بخار لا يؤدى إجراءاً إنتحائياً بما أن خاصية معادلة $pv = RT$ ، التى تم إستخدامها فى إشتقاق المعادلات ، يتم تطبيقها فقط على غاز مثالى . لغاز مثالى يتمدد إنتحائياً ، من الأكثر ملائمة فى بعض الأحيان التعبير عن الشغل المبذول بدلالات درجات الحرارة عند الحالات الطرفية (end states).

من المعادلة 2.24 $W = (p_1v_1 - p_2v_2)/(n-1)$ بالتالى ،

$p_1v_1 = RT_1$ و $p_2v_2 = RT_2$. بالتالى،

$$W = \frac{R(T_1 - T_2)}{n - 1} \qquad (2.30)$$

أو لكتلة ، m ،

$$W = \frac{m\,R\left(T_1 - T_2\right)}{n-1} \qquad \_\_\_\_\_\_(2.31)$$

بإستخدام معادلة طاقة اللاسريان 1.2 ، يمكن إيجاد سريان الحرارة أثناء الإجراء ،

$$i.e \;\; Q = \left(u_2 - u_1\right) + W = c_v\left(T_2 - T_1\right) + \frac{R\left(T_1 - T_2\right)}{n-1}$$

$$i.e \;\; Q = \frac{R\left(T_1 - T_2\right)}{n-1} - c_v\left(T_1 - T_2\right)$$

$$c_v = \frac{R}{(\gamma - 1)}$$

بالتالى بالتعويض

$$i.e \;\; Q = \frac{R}{(n-1)}\left(T_1 - T_2\right) + \frac{R}{(\gamma - 1)}\left(T_1 - T_2\right)$$

$$i.e \;\; Q = R\left(T_1 - T_2\right)\left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{\gamma - 1}\right) = \frac{R\left(T_1 - T_2\right)\left(\gamma - 1 - n + 1\right)}{(\gamma - 1)(n-1)}$$

$$\therefore Q = \frac{(\gamma - n)}{(\gamma - 1)}\,\frac{R\left(T_1 - T_2\right)}{(n-1)}$$

الآن من المعادلة $W = \left(p_1 v_1 - p_2 v_2\right)/(n-1)$ لكل وحدة من الغاز ،
عليه ،

$$Q = \left(\frac{\gamma - n}{\gamma - 1}\right) W \qquad \_\_\_\_\_\_(2.32)$$

المعادلة 2.32 هى تعبيراً ملائماً و موجزاً يربط الحرارة المكتسبة و الشغل المبذول فى إجراء الإنتحاء ، فى التمدد ، يُبذل الشغل بالغاز ، و بالتالى فإن العنصر W يكون موجباً . عليه يمكن الملاحظة من المعادلة 2.32 أنه عندما يكون أس الإنتحاء n أقل من γ ، فى تمدد ، بالتالى فإن الطرف الأيمن للمعادلة يكون موجباً (.i.e يتم إمداد الحرارة أثناء الإجراء) . عكس ذلك ، عندما تكون n اكبر من γ فى تمدد بالتالى فإن الحرارة يتم فقدها بالغاز . نفس الشئ ، فإن الشغل المبذول فى إجراء إنضغاط يكون سالباً ، عليه عندما تكون n أقل من γ فى إنضغاط ، فإن الحرارة يجب إمدادها الى الغاز أثناء الإجراء . لقد تم التوضيح أن ل γ لجميع الغازات المثالية قيمة أكبر من وحدة.

مثال (7) : 1 kg من غاز مثالى يتم إنضغاطه من 1.1 bar ، 27^{0} C طبقاً لقانون $pv^{1.3}$=constant ، حتى يكون الضغط 6.6 bar . أحسب سريان الحرارة الى أو من جدران الأسطوانه:

a/ عندما يكون الغاز إيثان (الكتلة الجزيئية 30 kg/kmol) ، الذى له $c_p = 2.10\ kj/kgK$.

b/ عندمh يكون الغاز أرجون (كتلته الجزيئية 40 kg/kmol) ، الذى له $c_p = 2.10\ kj/kgK$

من المعادلة 2.29 ، لكلٍ من الإيثان و الأرجون ،

$$\frac{T_1}{T_2}=\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{(n-1)/n} \qquad \text{أو}\quad T_2=T_1\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{(n-1)/n}$$

$$i.e.\quad 300\left(\frac{6.6}{1.1}\right)^{(1.3-1)/1.3}=300\times 6^{0.231}\times 1.512=\underline{453.6}\,K$$

($T_1=27+273=300\,K$ حيث)

$R=R_o/M$ ، عليه ، للإيثان ،

$$R=\frac{8.314}{30}=\underline{277}\ kj/kgK$$

$$c_p-c_v=R$$

$$c_v=2.10-0.277=\underline{1.823}\ kj/kgK$$

(حيث $c_p=1.75\ kj/kgK$ للإيثان).

بالتالى

$$\gamma=\frac{c_p}{c_v}=\frac{2.10}{1.823}=\underline{1.152}$$

من المعادلة 2.30

$$W=\frac{R(T_1-T_2)}{n-1}=\frac{0.277\times(300-453.6)}{1.3-1}=-\underline{141.8}\quad kj/kg$$

بالتالى من المعادلة 2.32

$$Q=\left(\frac{\gamma-n}{\gamma-1}\right)W\left(\frac{1.152-1.3}{1.152}\right)\times-141.8=-\frac{0.148}{0.152}\times-141.8$$

$$\therefore Q=+\frac{0.148\times141.8}{0.152}=\underline{138.1}\quad kj/kg$$

i.e. الحرارة المكتسبة $=\underline{138.1}\ kj/kg$

b/ بإستخدام نفس الأسلوب للأرجون نحصل على ،

$$R=\frac{8.314}{40}=\underline{0.208}\ kj/kgK$$

$$c_v=0.520-0.208=\underline{0.312}\ kj/kgK$$

$$\therefore\gamma=\frac{0.520}{0.312}=\underline{1.667}$$

بالتالى فإن الشغل المبذول يُعطى ب

$$W=\frac{R(T_1-T_2)}{n-1}=\frac{0.205\times(300-453.6)}{1.3-1}=-\underline{106.5}\quad kj/kg$$

بالتالى ،

$$Q=\left(\frac{\gamma-n}{\gamma-1}\right)W=\left(\frac{1.667-1.3}{1.667}\right)\times -106.5=-\frac{0.367\times 106.5}{0.667}$$

$$\therefore Q=-\underline{58.6}\ \ kj/kg$$

i.e. الحرارة المفقودة $=\underline{58.6}\ kj/kg$

فى إجراء متعدد الإنتحاء فإن الأس n يعتمد فقط على كميات الحرارة و الشغل أثناء الإجراء . الإجرءات المتنوعة التى يتم إعتبارها فى المقاطع 2.1 و 2.2 هى حالات خاصة للإجراء متعدد الإنتحاء لغاز مثالى . كمثال ،

عندما n=0 $pv^0=$ constant ,i.e. $p=$constant

عندما n=∞ $pv^0=$constant. أو $pv^{1/\infty}=$ constant , i.e. $v=$constant

عندما n=1 $pv=$ constant ,i.e. $T=$constant

(بما أن $pv/T=$constant لغاز مثالى)

عندما n= γ $pv^{\gamma}=$constant ,i.e. كاظم الحرارة إنعكاسى

هذه يتم توضيحها على مخطط p – v فى الشكل رقم (13) . هكذا ،

الحالة 1 الى الحالة A هى تبريد ثابت الضغط (n=0)؛

الحالة 1 الى الحالة B هى إنضغاط ثابت درجة الحرارة (n=1)؛

الحالة 1 الى الحالة C هى إنضغاط كاظم الحرارة إنعكاسى (n=γ)؛

الحالة 1 الى الحالة D هى تسخين ثابت الحجم (n= ∞)؛

نفس الشئ ، 1 الى A' هى تسخين ثابت الضغط ، 1 الى B' هى تمدد ثابت الحرارة ؛ 1 الى C' هى تمدد كاظم الحرارة إنعكاسى ؛ 1 الى D' هى تبريد ثابت الحجم . لاحظ أنه ، بما أن γ تكون دائماً هى أكبر من وحدة ، بالتالى فإن الإجراء 1 الى C يجب أن يقع بين الإجراءات 1 الى B و 1 الى D؛ نفس الشئ ، فإن الإجراء 1 الى C' يجب أن يقع بين 1 الى B' و 1 الى D' .

لبخار فإن تعميمه مثل عاليه لا يكون ممكناً .

هنالك إجراءاً و احداً هاماً لبخار يجب ذكرها هنا . البخار يمكن أن يؤدى إجراءاً طبقاً لقانون $pv=$ constant . فى هذه الحالة ، بما أن معادلة الخاصية للحالة $pv=RT$ ، لا يتم تطبيقها الى بخار ، فإن الإجراء لا يكون ثابت درجة الحرارة . يجب إستخدام جداول لإيجاد الخواص عند الحالات الطرفية ، بالإستفادة من الحقيقية التى تقول أن $p_1v_1=p_2v_2$

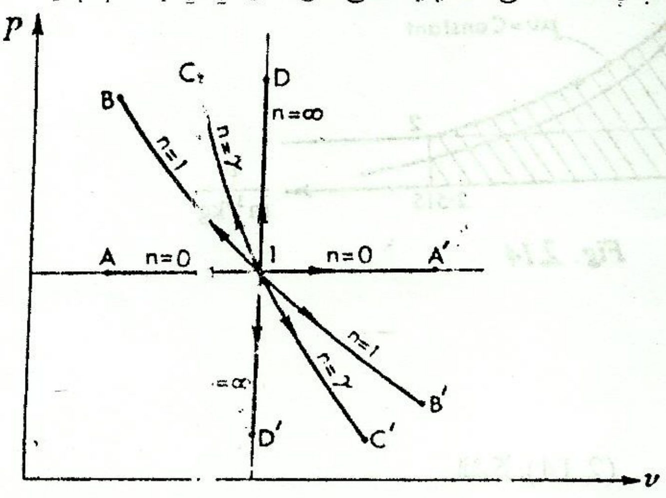


Fig. 2.13

الشكل(2.13)

مثال (8) :

فى أسطوانة محرك بخار يتمدد البخار من 5.5 bar الى 0.75 bar طبقاً قطع ذائد $pv = \text{constant}$. إذا كان البخار إبتدائياً جافاً مشبعاً ، أحسب الشغل المعمول (المبذول) لكل kg من البخار ، و سريان الحرارة الى أو من جدران الأسطوانة.

عند 5.5 bar ،

$$v_1 = v_g = \underline{0.3427}\ m^3/kg$$

بالتالى ،

$$p_1 v_1 = p_2 v_2$$

$$\therefore v_2 = \frac{p_1 v_1}{p_2} = \frac{5.5 \times 0.3427}{0.75} = \underline{2.515}\ m^3/kg$$

عند 0.75 bar $v_g = \underline{2.217}\ m^3/kg$ ، بالتالى يكون البخار محمصاً عند الحالة 2 .

بالإستكمال من جداول التحميص عند 0.75 bar نحصل على ،

$$u_2 = 2510 + \left(\frac{2.515 - 2.271}{2.588 - 2.271}\right)(2585 - 2510)$$

$$i.e.\ u_2 = 2510 + 57.7$$

$$= \underline{2567.7}\ \ kj/kg$$

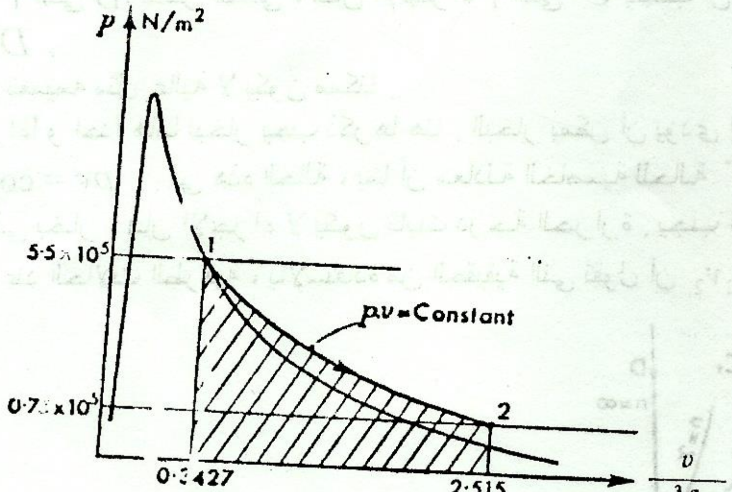


Fig. 2.14

الشكل(2.14)

لبخار جاف مشبع عند ضغط 5.5 bar

$$u_1 = u_2 = \underline{2565}\ kj/kg$$

بالتالي،

الكسب فى الحرارة الداخلية $= 2567.7 - 2565 = \underline{2.7}\ kj/kg$

يتم توضيح الإجراء على مخطط p – v فى الشكل رقم 14 ،حيث أن المساحة المظللة تمثل الشغل المبذول.

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p\,dv = \int_{v_1}^{v_2}\left(\frac{cons\ ant}{v}\right)dv$$

$$= (cons\ ant)\left[\log_e v\right]_{v_1}^{v_2}$$

إما أن يكون الثابت $p_1 v_1$ أو $p_2 v_2$ ،

i.e.

$$W = 5.5\times10^5\times0.3427\times\log_e\frac{v_2}{v_1} = 5.5\times10^5\times0.3427\times\log_e\frac{p_1}{p_2}$$

$$\therefore W = 5.5\times10^5\times0.3427\times\log_e\frac{5.5}{0.75} = \underline{375,500}\ N.m/kg$$

من معادلة طاقة اللاسريان ، 2.2 ،

$$Q = (u_2 - u_1) + W = 2.7 + \frac{375,500}{10^3}2.7 + 375.5 = \underline{378.2}$$

i.e. الحرارة المكتسبة $= \underline{378.2}\ kj/kg$

الإجراءات اللاإنعكاسية : Irreversible process

لقد تم ذكر أحكام الإنعكاسية فى المقطع 1.4 يمكن إستخدام معادلات المقاطع 2.1 ، 2.2 و 2.3 فقط عندما يطيع الإجراء أحكاماً معينة بتقريب جيد . فى إجراءات يكون فيها المائع محاطاً بأسطوانة خلف كباس ، يمكن إفتراض أن تأثيرات الإحتكاك يتم تجاهلها . على أى حال ، لكى يتم تحقيق الحكم (ج) يجب ان لا يكون هنالك إنتقال للحرارة الى أو من النظام خلال فرق درجة حرارة محدد (كبير) . فقط يمكن تخيل هذا فى إجراء ثابت الحرارة ، بما أنه فى جميع الإجرءات الأخرى تكون درجة حرارة النظام متغيرة بإستمرار أثناء الإجراء ؛ لكى يتم تحقيق الحكم (c) فإن درجة حرارة وسيط التبريد أو التسخين خارج النظام سيتطلب تغييرها تبعاً لذلك . مثالياً يمكن تخيل طريقة ما لتحقيق الإنعكاسية ، لكن فى الواقع العملى لا يمكن حتى قبولها كتقريب . بالرغم من ذلك ، إذا قبلنا بلاإ نعكاسيات مؤكدة فى البيئة المحيطة تؤدى تغييراً لاإنعكاسياً . معظم الإجرءات التى تحدث فى أسطوانة خلف كباس يمكن إفتراض أنها تكون إنعكاسية داخلياً كتقريب جيد ، و يمكن إستخدام المعادلات للمقاطع 2.1، 2.2، 2.3 حيثما يمكن تطبيقهما . بعض الإجراءات لا يمكن إفتراض أنها إنعكاسية داخلياً ، و سيتم الآن بإختصار مناقشة الحالات الهامة .

التمدد غير المقاوم أو الحر :- Unresisted , or free expansion

لقد تم ذكر هذا الإجراء مسبقاً و لكى يتم توضيح أنه فى إجراءاً لاإنعكاسياً فإن الشغل المبذول لا يُعطى بالمعادلة $W = \int p\,dv$. إعتبر وعاءان A و B ، يتم توصيلهما بينياً بماسورة قصيرة بصمام X ، و عزلهما حرارياً بمثالية (أنظر الشكل 15) . إبتدائياً إجعل الوعاء A يكون مملوؤاً بمائع عند ضغط معين ، و إجعل B يكون مفرغاً كلياً عندما يتم فتح الصمام X فإن المائع فى A سيتمدد سريعاً ليملأ كلا الوعائين A و B . و سيكون الضغط النهائى أقل من الضغط الإبتدائي فى الوعاء A . هذا يُعرف بالتمدد غير المقاوم أو التمدد الحر . لا يكون الإجراء إنعكاسياً ، بما أن شغلاً خارجياً يجب أداءه لإرجاع المائع الى حالته الإبتدائية.

i.e. $$Q = (u_2 - u_1) + W$$

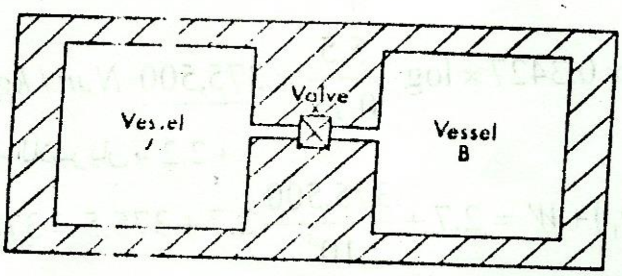


Fig. 2.15

الشكل(2.15)

الآن فى هذا الإجراء لا يكون هنالك شغلاً مبذولاً على أو بالمائع ، بما أن حد النظام لا يتحرك. لا يكون هنالك إنسياب حرارة الى أو من المائع بما أن النظام معزول جيداً بالتالى فإن الإجراء يكون كاظم للحرارة ، لكن لاإنعكاسياً .

i.e. $u_2 - u_1 = 0$ أو $u_2 = u_1$

بالتالى فى التمدد الحر فإن الطاقة الداخلية الإبتدائية تساوى الطاقة الداخلية النهائية .

لغاز مثالى ، من المعادلة 1.14 نحصل على ،

$$u = c_v T$$

عليه لتمدد حر لغازاً مثالياً

$$c_v T_1 = c_v T_2$$

$$i.e. \quad T_1 = T_2$$

عليه لغاز مثالى يؤدى تمدداً حراً ، فإن درجة الحرارة الإبتدائية تكون مكافئة لدرجة الحرارة النهائية.

مثال (9) : هواء عند 20 bar يكون بدايةً محوياً فى وعاء A للشكل رقم (15) ، يمكن إفتراض أن حجمه يكون $1\ m^3$. يتم فتح الصمام X و يتمدد الهواء ليملأ الوعائين A و B . مفترضاً أن الوعاءان يكونان بحجم مكافئ ، أحسب الضغط للهواء .

لغاز يتمدد حر $T_1 = T_2$. أيضاً من المعادلة 3.6 ، $pv = mRT$

بالتالى $p_1 v_1 = p_2 v_2$.

الآن فإن الحجم V_2 هى الحجم المتحد للوعاءان A و B ،

i.e. $V_2 = V_A + V_B = 1 + 1 = 2\ m^3,\ V_1 = 1\ m^3$

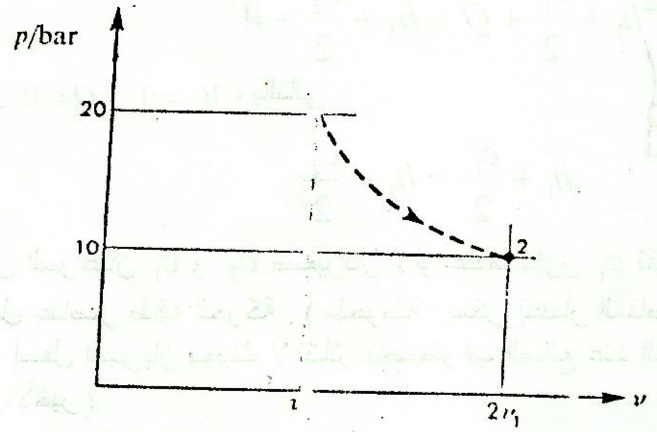


Fig. .16

الشكل(2.16)

عليه نحصّل على

$$p_2 = p_1 \frac{V_1}{V_2} = 20 \times \frac{1}{2} = \underline{10}\ bar$$

i.e. الضغط النهائى $= \underline{10}\ bar$

يتم توضيح الإجراء على مخطط p – v فى الشكل رقم (16) . يتم تثبيت الحالة 1 عند 20 bar و $1\ m^3$ بمعلومية كتلة الغاز ؛ يتم تثبيت الحالة 2 عند 10 bar و $2\ m^3$ لنفس كتلة الغاز . يكون الإجراء بين هاتين الحالتين لاإنعكاسياً و يجب رسمه متقطعاً . النقاط 1 و 2 تقع على خط ثابت درجة الحرارة ، لكن الإجراء بين 1 و 2 لا يمكن تسميته إجراء ثابت درجة الحرارة ، بما أن درجات الحرارة الوسطية لا تكون هى نفسها خلال الإجراء . لا يكون هنالك شغلاً مبذولاً خلال اجراء ، و لا تمثل المساحة المظللة تحت الخط المنقط الشغل المبذول .

الخنق : **Throttling**

يُقال لسريان مائع منخنق عندما يكون هنالك بعض التقييد للسريان ، عندما تكون السرعات قبل و بعد التقييد إما متساويتان أو صغيرتان بحيث يمكن تجاهلهما ، و عندما يكون هنالك فقد حرارة الى البيئة المحيطة يتم تجاهله . التقييد للسريان يمكن أن يكون فتح جزئي لصمام ،ثقب ، أو أى خفض مفاجئى آخر فى مساحة المقطع العرضى للسريان.

هنالك مثالاً للخنق يتم توضيحه فى الشكل (17) . ينساب المائع بإستقرار على طول ماسورة معزولة جيداً و و يمر خلال ثقب عند المقطع X . بما أن الماسورة تكون معزولة جيداً يمكن إفتراض أنه لا يكون هنالك سريان للحرارة الى أو من المائع . يمكن تطبيق معادلة السريان (1.8) بين أى مقطعين للسريان،

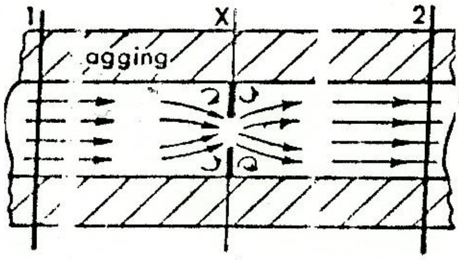


Fig. 2.17

$$h_1 + \frac{c_1^2}{2} + Q = h_2 + \frac{c_2^2}{2} + W$$

الآن بما أن $Q = 0$ و $W = 0$ ، بالتالى ،

$$h_1 + \frac{c_1^2}{2} = h_2 + \frac{c_2^2}{2}$$

عندما تكون السرعتان c_1 و c_2 صغيرتان ، أو عندما تكون c_1 تقريباً مساوية ل c_2 ، بالتالى يمكن تجاهل عناصر طاقة الحركة . (ملحوظة : يمكن إختبار المقاطع 1 و 2 بصورة جيدة أعلى السريان و أسفل السريان بحيث لا تتأثر بإضطراب المائع عند الخنق ، و بحيث يمكن تبرير الإفتراض الأخير).

بالتالى ، $$h_1 = h_2$$

عليه لإجراء خنق فإن المحتوى الحرارى الإبتدائي يكون مكافئاً للمحتوى الحرارى النهائي . يكون الإجراء كاظم للحرارة ، لكنه عالى الإنعكاسية بسبب تدويم المائع حول الثقب، عند X . بين المقاطع 1 و X يهبط المحتوى الحرارى و تزيد طاقة الحركة كلما تسارع السائع خلال الثقب. بين المقاطع X و 2 يزيد المحتوى الحرارى بتحطم طاقة الحركة بدوامات المائع .

لغاز مثال $h = c_p T$ ، عليه ،

$$c_p T_1 = c_p T_2 \quad \text{أو} \quad T_1 = T_2$$

عليه لخنق غاز مثالى فإن درجة الحرارة الإبتدائية تكافئ درجة الحرارة النهائية.

مثال (10) : بخار عند 19 bar يتم خنقه الى 1 bar و وُجد أن درجة الحرارة بعد الخنق تساوى 150^{o} C . أحسب كسر الجفاف الإبتدائى للبخار .

من جداول التحميص 1 bar و 150^{o} C نحصل $h_2 = 2777\ kj/kg$. بالتالى للخنق ،

$$h_1 = h_2 = 2777\ kj/kg$$

مستخدماً المعادلة

$$h_1 = h_f + x_1 h_{fg}$$

$$i.e.\quad 2777 = 897 + x_1 \times 1901$$

$$\therefore \quad x_1 = \frac{1880}{1910} = 0.989$$

i.e. كسر الجفاف الإبتدائى $= 0.989$

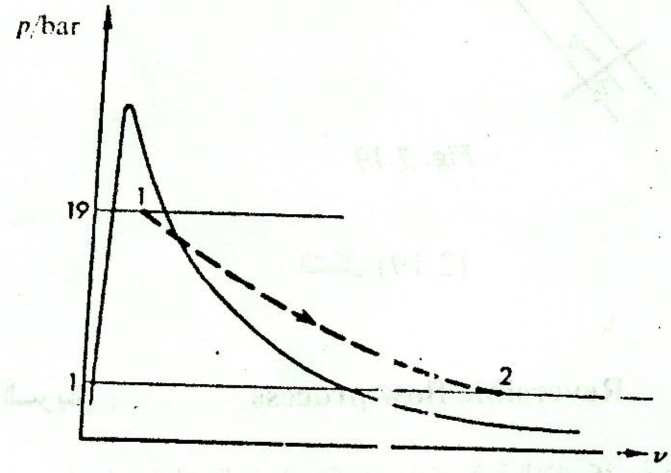


Fig. 2.18

الشكل(2.18)

يتم توضيح الإجراء على مخطط p – v فى الشكل رقم (18) . يتم تثبيت الحالات 1 و 2 ، لكن لا يتم تحديد الحالات الوسطية ، يجب رسم الإجراء منقطاً كما موضح . لا يكون هنالك شغلاً مبذولاً خلال الإجراء ، و المساحة تحت الخط 2 – 1 لا تكون مساوية للشغل المبذول . لبخار يمكن إستخدام الخنق كوسيلة لإيجاد كسر الجفاف للبخار الرطب ، كما فى المثال (10) . هذه سيتعامل معها بتفاصيل أكثر فى المقطع 7.4 .

الخلطة الأديباتية **Adiabatic mixing**

خلط جدولين من مائع يكون عادياً الى حد بعيد فى تطبيقات الهندسية ، و عادة يمكن إفتراض حدوثه أديباتياً (كاظم للحرارة) . إعتبر جدولين من خليط لمائع كما موضح فى الشكل رقم (19) . إجعل للجدولين معادلات إنسياب كتلة $\dot{m}_1$ و $\dot{m}_2$ ، و درجات حرارة T_1 و T_2 .

إجعل للجدول المخلوط الناتج درجة حرارة T_3 . لا يكون هنالك سريان حرارة الى أو من المائع ، و لايكون هنالك شغلاً مبذولاً ، بالتالى من معادلة السريان ،

بتجاهل التغييرات فى طاقة الحركة نحصل على ،

$$H_1 + H_2 = H_3 \text{ و } \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_3 \qquad \_\_\_\_\_\_\_\_(2.33)$$

أو لغاز ، من المعادلة 3.18 $h = c_p T$ ، بالتالى ،

$$\dot{m}_1 c_p T_1 + \dot{m}_2 c_p T_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) c_p T_3$$

$$\text{i.e.}\quad \dot{m}_1 T_1 + \dot{m}_2 T_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) T_3 \qquad \_\_\_\_\_\_\_\_(2.34)$$

يكون إجراء الخلطة عالى الأنعكاسية نتيجة للمقدار الضخم للتدوير الذى يحدث للمائع

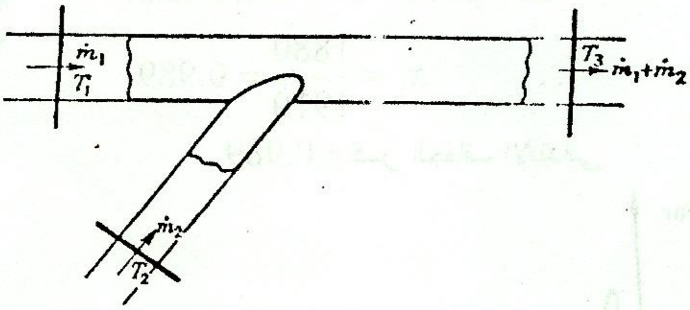


Fig. 2.19

الشكل (2.19)

2.5- إجراءت السريان : **Reversible flow process**

بالرغم من أن إجراءات السريان تكون عادة عالية اللاإنعكاسية فى الواقع العملى ، من الملائم فى بعض الأحيان إفتراض أن إجراء السريان يكون إنعكاسياً و ذلك لكى يتم إعطاء مقارنة مثالية . المُشاهد المتنقل مع سريان المائع سيلاحظ تغيراً فى الخواص الديناميكية الحرارية كما فى حالة إجراء أو اللاسريان . كمثال فى إجراء كاظم الحرارة إنعكاسىلغاز مثالى، فإن المشاهد المتنقل مع الغاز سيلاحظ حدوث الإجراء $p v^{\gamma} = const.$ ، لكن الشغل المبذول بالغاز سوف يعطى بالمعادلة $\int p\,dv$ ، أو بتغير الطاقة الداخلية كما موضح بالمعادلة 2.13. هنالك بعض الشغل يتم بذله على أو بالغاز بتأثير القوى التى تعمل بين الغاز المتحرك و بيئته المحيطة . كمثال ، لإجراء سريان كاظم الحرارة إنعكاسى لغاز مثالى ، من معادلة السريان 1.8

$$h_1 + \frac{c_1^2}{2} + Q = h_2 + \frac{c_2^2}{2} + W$$

بالتالى بما أن $Q = 0$ ،

$$W = (h_1 - h_2) + \left(\frac{c_1^2 - c_2^2}{2}\right)$$

أيضاً بما أن الإجراء يتم إفتراضه إنعكاسياً و عليه و لغاز مثالى $p v^{\gamma} = const.$. هذه المعادلة يمكن إستخدامها لتثبيت الحالات الطرفية .

ملحوظة : حتى لو كانت عناصر الاطاقات الحركية صغيرة يمكن تجاهلها ، فإن الشغل المبذول فى إجراء سريان كاظم الحرارة إنعكاسى بين حالتين لا يكون مساوياً للشغل المبذول فى إجراء لاسريان كاظم الحرارة إنعكاسى بين نفس الحالتين (i.e. $W = (u_2 - u_1)$ كما فى المعادلة (2.13

مثال (11) : توربينة غاز تستقبل غازات من غرفة الإحتراق عند 7 bar و 650° C و بسرعة مقدارها 9 m/s . تغادر الغازات التوربينة عند 1 bar ، بسرعة 45 m/s . مفترضاً أن التمدد أن التمدد يكون كاظماً للحرارة و إنعكاسياً فى الحالة المثالية ، أحسب الشغل المبذول لكل kg من الغاز . للغازات خذ $\gamma = 1.333$ و $c_p = 1.11\ kj/kgK$.

مستخدماً معادلة السريان و لإجراء كاظم الحرارة

$$W = (h_1 - h_2) + \left(\frac{c_1^2 - c_2^2}{2}\right)$$

لغاز مثالى من المعادلة $h = c_p T$ ، عليه ،

$$W = c_p(T_1 - T_2) + \left(\frac{c_1^2 - c_2^2}{2}\right)$$

لإيجاد T_2 إستخدم المعادلة 2.21،

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

$$i.e.\ \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{7}{1}\right)^{(1.333-1)/1.333} = 7^{0.25} = \underline{1.627}$$

$$\therefore T_2 = \frac{T_1}{1.627} = \frac{923}{1.627} = \underline{567}\ K$$

(حيث $T_1 = 650 + 273 = 923\ K$)

بالتالى بالتعويض ،

$$W = 1.11(923 - 567) + \left(\frac{9^2 - 45^2}{2 \times 10^3}\right)$$

$$i.e\ \ W = 395.2 - 0.97 = \underline{394.2}\ kj/kg$$

لاحظ أن تغير طاقة الحركة يكون صغيراً مقارنةً بتغير المحتوى الحرارى . هذه هى غالباً الحالة فى مسائل إجراءات السريان، و يمكن فى بعض الأحيان تجاهل التغير فى طاقة الحركة .

2.6- إجرءات السريان اللامستقر :- Non steady -flow processes

فى الواقع العملى هنالك الكثير من الحالات التي يكون فيها معدل سريان الكتلة العابر لحد نظام عند المدخل غير مساوٍ لمعدل سريان الكتلة عند المخرج . أيضاً ، فإن المعدل الذى يُبذل به الشغل على أو بالمائع ، و المعدل الذى تنتقل به الحرارة الى او بالنظام لايكونا ثابتان مع الزمن. فى مثل هذه الحالة فإن الطاقة الكلية لا تبقى ثابتة خلال حد النظام ، كما هو الحالى فى إجراء سريان مستقر ، بل تتغير مع الزمن.

إجعل الطاقة الكلية للنظام خلال حد النظام عند أى لحظة تساوى E . أثناء فترة زمنية صغيرة ، إجعل الكتلة المدخلة للنظام δm_1 ، و إجعل الكتلة المغادرة للنظام تكون δm_2 ؛ إجعل الحرارة

المنتقلة و الشغل المبذول خلال نفس الزمن يكونا δQ و δW على الترتيب . إعتبر نظاماً مماثلاً الموضح فى الشكل 1.3، يتم أداء شغل عند المدخل و المخرج فى إدخال و إخراج الكتلة عبر الحدود النظام .

i.e. $\delta m_1 p_1 v_1 =$ الطاقة المطلوبة و عند المدخل

$\delta m_2 p_2 v_2 =$ الطاقة المطلوبة و عند المخرج

أيضاً ، كما من قبل ، فإن الطاقة لوحدة كتلة للمانع المناسب تعطى ب($u_1 + c_1^2/2 + z_1 g$)

عند المدخل ، و ب($u_2 + c_2^2/2 + z_2 g$) عند المخرج

بالتالى ،

$$\text{الطاقة الداخلية للنظام} = \delta Q + \delta m_1 (u_1 + c_1^2/2 + z_1 g) + \delta m_1 p_1 v_1$$

و

$$\text{الطاقة المغادرة للنظام} = \delta W + \delta m_2 (u_2 + c_2^2/2 + z_1 g) + \delta m_2 p_2 v_2$$

بتطبيق القانون الأول :-

الطاقة الداخلة للنظام – الطاقة المغادرة = زيادة طاقة النظام ، δE

$$\delta Q + \delta m_1 (u_1 + c_1^2/2 + z_1 g + p_1 v_1) - \delta W - \delta m_2 (u_2 + c_2^2/2 + z_2 g + p_2 v_2) = \delta E$$

خلال زمن كبير فإن الحرارة المنتقلة الكلية تعطى ب $\Sigma \delta Q = Q$

و الشغل المبذول الكلى يُعطى ب $\Sigma \delta W = W$

إجعل الكتلة الإبتدائية خلال حدود النظام تكون مساوية ل m' ، و الطاقة عند نهاية الفترة الزمنية تكون m'' ، و الطاقة الداخلية النهائية تكون u' .

$$\therefore \Sigma \delta E = m'' u'' - m' u'$$

عليه نحصل على:

$$\delta Q + \delta m_1 (u_1 + p_1 v_1 + c_1^2/2 + z_1 g) = \delta W + \Sigma \delta m_2 (u_2 + p_2 v_2 + c_2^2/2 + z_2 g) \quad \text{\_\_\_\_\_\_} 2.36$$

أيضاً من إجراء إستمرارية الكتلة :

الكتلة الداخلة – الكتلة المغادرة = زيادة الكتلة خلال حد النظام

i.e. $\therefore \Sigma \delta m_1 - \Sigma m_2 = m'' - m'$ __________(2.37)

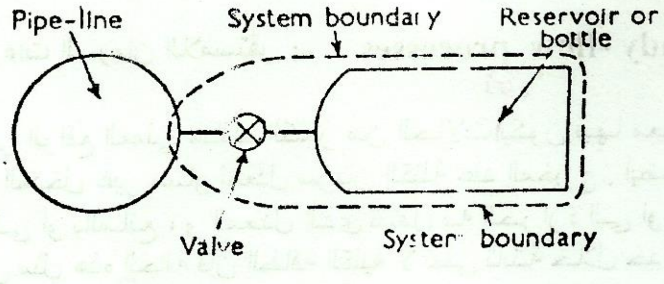


Fig. 2.20

الشكل(2.20)

إحدى المسائل الأكثر حدوثاً ضمن معادلة السريان اللامتسقر هي ملء زجاجة أو وعاء من مصدر ضخم مقارنة بالزجاجة او الوعاء . الشكل 2.20 يوضح مثالاً نموذجياً . يتم إفتراض أن حالة المائع في خط المواسير تكون غير متغيرة أثناء إجراء الملء . في هذه الحالة لا يكون هنالك شغلاً مبذولاً على حد النظام ؛ أيضاً ، لا تكون هنالك كتلة مغادرة للنظام أثناء الإجراء ، بالتالي ،

$$\delta m_2 = 0 \; .$$

بتطبيق المعادلة 2.36 ، و بعمل إفتراض إضافي أن التغييرات في طاقة الوضع تكون صغيرة ، و ان طاقة الحركة $c_1^2/2$ ، تكون صغيرة بالمقارنة مع المحتوى الحراري ، h_2 ، نحصل على :

$$Q + \Sigma \delta m_1 h_1 = m''u'' - m'u'$$

أو بما أن h_1 تكون ثابتة أثناء الإجراء

$$Q + h_1 \Sigma \delta m_1 = m''u'' - m'u'$$

في هذه الحالة فإن المعادلة 2.37 تُصبح :

$$\therefore \Sigma \delta m_1 = m'' - m'$$

بالتالي بالتعويض :

$$Q + h_1(m'' - m') = m''u'' - m'u' \quad \_\_\_\_\_\_\_ (2.38)$$

من الممكن غالباً إفتراض أن الإجراء يكون كاظماً للحرارة ، و في تلك الحالة نحصل على ،

$$h_1(m'' - m') = m''u'' - m'u'$$

أو بالكلمات : المحتوى الحراري لكتلة الذي يدخل الى الزجاجة = زيادة الطاقة الداخلية للنظام .

مثال (12) : و عاء صلد (غير مرن) بحجم $10\ m^3$ يحوى بخاراً عند ضغط 2.1 bar و كسر جفاف 0.9 ، يتم توصيله الى خط مواسير و يُسمح بالسريان من خط المواسير الى الوعاء حتى يكون الضغط و درجة الحرارة في الوعاء مساوٍ ل 6 bar و 200^o C على الترتيب . يكون البخار عند خط المواسير عند 10 bar و 250^o C طول الإجراء. أحسب إنتقال الحرارة الى أو من الوعاء أثناء الإجراء .

كسر الجفاف = كتلة البخار الجاف في وعاء من الخليط

باستخدام الترميز الذي تم تقديمه سابقاً نحصل على

$$u' = u'_f(1 - 0.9) + (u'_g \times 0.9) = 511 \times 0.1 + 2531 \times 0.9$$

$$i.e.\ u' = \underline{2329} \ \ kj/kg$$

أيضاً ،

$$m' = V/v = 10/0.9 v_g = 10/0.9 \times 0.8461 = \underline{13.13} \ \ kg$$

يتم تحميص البخار نهائياً عند 6 bar و 200^o C ، عليه ،

$$u'' = \underline{2640} \ \ kj/kg$$

و

$$v'' = \underline{0.3522} \ m^3/kg$$

$$i.e. \quad m'' = V/v'' = 10/0.3522 = 28.4\,kg$$

يتم تحميص البخار فى خط المواسير عند 10 bar و 250^o C ، بالتالى :

$$h_1 = 2944\,kj/kg$$

بالتالى مستخدماً المعادلة 2.38 :

$$Q + 2944(28.4 - 13.3) = (28.4\times 2640) - (13.3\times 2329)$$

$$\therefore Q = 74980 - 30590 - 44940 = -550\,kj$$

i.e. الحرارة المطرودة من الوعاء $= \underline{550}\ kj$

مثال آخر يحدث عموماً لإجراء السريان اللامستقر هو الحالة التى يفتح فيها وعاءاً الى فراغ كبير و يُسمح للمائع بالهروب (الشكل 2.21) . لا يكون هنالك شغلاً مبذولاً فى هذه الحالة $\delta m_1 = 0$ بما أنه ليس هنالك كتلة تدخل الى النظام . بتجاهل التغييرات فى طاقة الوضع و يتطبيق المعادلة 2.36ك

$$Q = \Sigma \delta m_2 (h_2 + c_2^2/2) + (m''u'' - m'u')$$

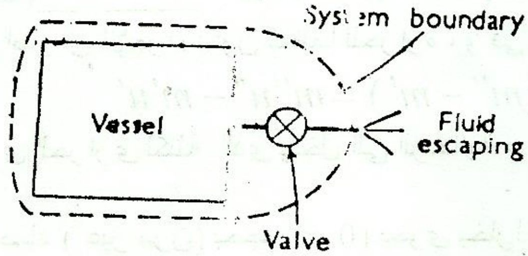


Fig. 2.21

الشكل(2.21)

الصعوبة التى تنشأ فى هذا التحليل هى أن الحالة 2 للكتلة المغادرة للوعاء تكون متغيرة باستمرار ،بالتالى من المستحيل تقييم العنصر $\Sigma \delta m_2 (h_2 + c_2^2/2)$. هنالك تقريباً يمكن عمله لإيجاد كلتة المائع الت تغادر الوعاء كلما يهبط الضغط لقيمة معطاة . يمكن إفتراض أن المائع المتبقى فى الوعاء يؤدى تمدداً كاظم للحرارة إنعكاسياً . هذا يكون تقريباً جيداً إذا كان الوعاء معزولاً جيداً ، أو إذا كانت فترة أستغراق الإجراء قصيرة . بإستخدام هذا الإفتراض يمكن إيجاد الحالة الطرفية للمائع فى الوعاء ، و بالتالى يمكن حساب الكتلة المتبقية فى الوعاء m''

مثال (13) : مُستقبل هواء بحجم $6\ m^3$ يحوى هواءاً عند 15 bar و 40.5^o C . يتم فتح صمام و يسمح لبعض الهواء بالخروج الى الجو . يهبط ضغط الهواء فى المستقبل بسرعة الى 12 bar عندها يتم غلق الصمام . أحسب كتلة الهواء الخارجة فى المستقبل .

إبتداءاً :

$$m' = P'V/RT' = \frac{15\times 10^5\times 6}{0.287\times 10^3\times 313.5} = \underline{100}\ kg$$

مفترضاً أن الكتلة فى المستقبل تؤدى إجراءاً كاظم للحرارة إنعكاسياً ، بالتالى مستخدماً المعادلة 2.21 :

$$\frac{T'}{T''} = \left(\frac{p'}{p''}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} = \left(\frac{15}{12}\right)^{0.4/1.4} = 1.25^{0.286} = \underline{1.066}$$

$$\therefore T'' = 313.5/1.066 = 294.2\ K$$

بالتالى ،

$$m'' = P''V/RT'' = \frac{12\times10\times6}{0.287\times10^{3}\times294.2} = \underline{85.3}\ kg$$

عليه ،

كتلة الهواء الذى يغادر المستقبل $= 100 - 85.3 = \underline{14.7}\ kg$

فى حالة بخار يؤدى تمدداً كاظم للحرارة إنعكاسياً لا تكون هنالك معادلة صحيحة مثل المعادلة 2.21 المستخدمة عاليه . من الضرورى الإستفادة من خاصية القصور الحرارى (entropy) ، s، التى يمكن التوضيح بأنها تبقى ثابتة خلال إجراء كاظم للحرارة إنعكاسى و i.e. $s' = s''$. و من ثم بإستخدام الجداول يمكن حساب قيمة v'' و بالتالى إيجاد m'' .

مثال (14) : عند بداية شوط السحب لمحرك بترول ذو نسبة إنضغاط مقدارها 8/1 ، يكون حجم الخلوص محتلاً بمتبقى غاز عند درجة حرارة 840^{0} C و ضغط 1.034 bar . حجم الخليط أثناء الشوط ، مقاساً عند أحوال جوية 1.013 bar و 15^{0} C ، يكون مساوياً ل 0.75 من الحجم المكتسح للأسطوانة .

يكون الضغط و درجة الحرارة المتوسطان فى مجمع السحب (induction manifold) أثناء السحب مساويان ل 0.965 bar و 27^{0} C على الترتيب ، و يكون متوسط الضغط فى الأسطوانة أثناء شوط السحب مساوياً ل 0.828 bar . أحسب درجة حرارة الخليط عند نهاية شوط السحب مفترضاً إجراءاً كاظماً للحرارة . أحسب أيضاً الضغط النهائى فى الأسطوانة .

للخليط خذ $R = 0.2871\ kj/kgK$ و $c_v = 0.718\ kj/kgK$ ؛ لمتبقى الغاز خذ $R = 0.296\ kj/kgK$ و $c_v = 0.84\ kj/kgK$.

إجعل الحجم المكتسح يكون V_S و حجم الخلوص يكون V_C ، بالتالى ،

$$\text{نسبة الإنضغاط} = \frac{V_S + V_C}{V_C} = 8$$

i.e. $V_S = 7V_C$

إبتدائياً فإن متبقى الغاز يحتل الحجم $V_C = V_S/7$

$$\therefore m' = \frac{P'V_C}{RT'} = \frac{1.034\times10^{5}\times V_S}{0.296\times1113\times7\times10^{3}} = 0.0448\,V_S\ kg$$

($T' = 840 + 297 = 1113\,K$ حيث)

أيضاً مستخدماً المعادلة 2.37 :

$$m'' - m' = \Sigma\delta m_1 - \Sigma\delta m_2$$

و بملاحظة أنه فى هذه المثال ، $\Sigma\delta m_2 = 0$ ، نحصل على :

$$m'' - m' = m_1 = \frac{1.013\times10^5 \times 0.75V_S}{0.2871\times288\times10^3} = 0.919V_S\ kg$$

$$\therefore m'' = 0.919\ V_S + 0.0448V_S = 0.9638V_S\ kg$$

يمكن تجاهل التغييرات فى طاقة الحركة و الوضع ، ويكون الإجراء كاظماً للحرارة ($Q = 0$ i.e.) ، بتطبيق المعادلة 2.36 نحصل على :

$$m_1h_1 = W + m''u'' - m'u'$$

أيضاً ، فإن درجة حرارة الخليط فى مجمع السحب تكون ثابتة طوال الشوط ، i.e. $h_1 = c_pT_1$=constant .

$$\text{i.e. } m_1c_pT_1 = W + m''c_vT'' - m'c_vT'$$

الشغل المبذول يُعطى ب،

W= الحجم المكتسح × متوسط الضغط فى السطوانة أثناء السحب

$$0.828\times10^5\,V_S = 82800\ V_S\quad Nm = \underline{82.8}\ V_S\ kj$$

i.e.

$$V_S\times1.0051\times300 = 82.8V_S + 0.9638V_S\times0.718T''$$
$$-\,0.0448V_S\times0.84\times1113$$

($c_p = c_v + R = 0.718 = 1.0051\ kj/kg\,K$ حيث للخليط المسحوب)

$$\therefore T'' = \frac{236.1}{0.692} = 314\,K = \underline{68}\ ^oC$$

i.e. درجة الحرارة النهائية $= \underline{68}\ ^oC$

بالتالى ،

$$p'' = \frac{m''RT''}{V_S\times V_C} = \frac{0.9638V_S\times0.2871\times341\times10^3}{8V_S/7} = 82700\ N/m^2$$

i.e. الضغط النهائى $= 0.827\ bar$

مسائل

1/ كتلة مقدارها 1 kg من هواء موجود فى حاوية صلدة تكون بداية عند 4.8 bar و 150^{o} C . يتم تسخين الحاوية حتى تكون درجة الحرارة مساوية ل 200^{o} C . أحسب الضغط النهائى للهواء و الحرارة المكتسبة أثناء الإجراء .

Ans.(5.37bar; 35.9kj/kg)

2/ وعاء صلد بحجم 1 m^3 يحوى بخاراً عند 20 bar و 400^{o} C . يتم تبريد الوعاء حتى يكون البخار جافاً مشبعاً . أحسب كتلة البخار فى الوعاء ، الضغط النهائى للبخار ، و الحرارة المزالة أثناء الإجراء .

Ans.(6.62 bar ;13.01 bar ; 23355 kj)

3/ اكسجين(بكتلة جزئية 32 kg/kmol) يتمدد بإنعكاسية فى أسطوانة خلف كباس بضغط مقداره 3 bar . يكون الحجم إبتدائياً مساوياً ل 0.01 m^3 و نهائياً مساوياً ل 0.03 m^3 ، تكون درجة الحرارة الإبتدائية مساوية ل 17^{o} C . أحسب الشغل المبذول بالأكسجين و سريان الحرارة الى أو من جدران الأسطوانة أثناء التمدد . إفترض أن الأوكسجين يكون غازاً مثالياً و خذ $c_p = 0.917 kj/kgK$.

Ans.(6 kj ; 21.16 kj)

4/ بخار عند ضغط 7 bar ، كسر جفاف 0.9 ، يتمدد بإنعكاسية بضغط ثابت حتى تكون درجة الحرارة مساوية ل 200^{o} C. أحسب الشغل المبذول و الحرارة المكتسبة لكل kg من البخار أثناء الإجراء.

Ans. (38.2 kj/kg; 288.7 kj/kg)

5/ حجم مقداره 0.05 m^3 من غاز مثالى عند 6.3 bar يؤدى إجراءاً إنعكاسياً ثابت الحرارة الى ضغط 1.05 bar . أحسب سريان الحرارة الى أو من الغاز .

Ans.(56.4 kj)

6/ بخار جاف مشبع عند ضغط 7 bar يتمدد بإنعكاسية فى أسطوانة خلف كباس حتى يكون الضغط مساوياً ل 0.1 bar . إذا تم إمداد الحرارة بإستمرار أثناء الإجراء للمحافظة على درجة الحرارة ، أحسب التغير لطاقة الداخلية لكل kg من البخار .

Ans.(37.2 kj/kg)

7/ كتلة هواء مقدارها 1 kg يتم إنضغاطها بإجراء ثابت الحرارة و بإنعكاسية من 1bar الى 5 bar . أحسب الشغل المبذول على الهواء و سريان الحرارة الى أو من الهواء .

Ans.(140 kj/kg ; - 140 kj/kg)

8/ كتلة مقدارها 1 kg عند 1 bar و 15^{o} C يتم إنضغاطها إنعكاسياً و بإجراء كاظم للحرارة الى 4 bar . أحسب درجة الحرارة النهائية و الشغل المبذول على الهواء .

Ans.(155^{o} C ; 100.5 kj/kg)

9/ نايتروجين (بكتلة جزيئية 28 kg/kmol) يتمدد إنعكاسياً فى أسطوانة معزولة جيداً حرارياً من 3.5 bar ، 200^{o} C الى حجم مقداره $0.09\ m^3$. إذا كان الحجم الإبتدائى المحتمل مساوياً ل $0.03\ m^3$ ، أحسب الشغل المبذول أثناء التمدد . إفترض أن النايتوجين يكون غازاً مثالياً و خذ $c_v = 0.741\ kj/kgK$.

Ans.(9.31 kj)

الفصل الثالث

3.0 القانون الثانى للديناميكا الحرارية
The Second Law
of thermodynamics

فى الفصل 2 تم توضيح أنه طبقاً للقانون الأول للديناميكا الحرارية ، عندما يؤدى نظاماً دورة كاملة فإن صافى الحرارة المكتسبة يكون مساوياً لصافى الشغل المبذول . و يكون هذا مؤسساً على مبدأ بقاء الطاقة ، الذى يتبع من مشاهدة الأحداث الطبيعية . القانون الثانى للديناميكا الحرارية ، الذى هو أيضاً قانون طبيعى ، يُشير الى أنه ، بالرغم من أن صافى الحرارة المكتسبة فى دورة يكون مساوياً لصافى الشغل المبذول ، فإن إجمالى الحرارة المكتسبة يجب ان يكون أكبر من صافى الشغل المبذول ؛ و ذلك لأن بعض الحرارة يتم فقدها دائماً من النظام.

3.1 المحرك أو الآلة الحرارية : The Heat Engine

المحرك الحرارى هو نظام يعمل فى دورة كاملة و ينتج صافى شغل من إمداد حرارة . يقتضى القانون الثانى ضمناً ان مصدراً لإمداد حرارة و غاطساً لفقد الحرارة يكونا ضروريان ، بما أن بعض الحرارة يجب أن يكون دائماً طردها بواسطة النظام . هنالك تمثيلاً مخططياً يتم توضيحه فى الشكل (3.1) . تكون الحرارة المكتسبة Q_1 ، الشغل المبذول W ، و الحرارة المفقودة هى Q_2 . بالقانون الأول ، فى دورة واحدة كاملة ، فإن

صافى الحرارة المكتسبة = صافى الشغل المبذول

بالتالى من المعادلة 1.1

$$\sum dQ = \sum dW$$

بالرجوع للشكل رقم 5.1

$$Q_1 - Q_2 = W \qquad \_\_\_\_\_\_(3.1)$$

بالقانون الثانى ، فإن إجمالى الحرارة المكتسبة يجب أن يكون أكبر من صافى الشغل المبذول

$$Q_1 > W$$

يتم تعريف الكفاءة الحرارية (thermal efficiency) لمحرك حرارى كالنسبة لصافى الشغل المبذول فى الدورة الى إجمالى الحرارة المكتسبة فى الدورة . و من المعتاد التعبير عنها كنسبة مئوية . بالرجوع للشكل 3.1 ،

$$\text{الكفاءة الحرارية} = \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \qquad \_\_\_\_\_\_(3.2)$$

بالتعويض فى المعادلة 3.1

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \qquad \_\_\_\_\_\_(3.3)$$

يمكن الملاحظة من أن القاون الثانى يقتضى ضمنياً أن الكفاءة الحرارية محرك حرارى يجب أن تكون دائماً أقل من % 100.

من تعريف الحرارة فى المقطع 1.1 ، فإن فرقاً فى درجة الحرارة يكون ضرورياً لسريان الحرارة . يتبع ذلك أن مصدر الحرارة فى الشكل 3.1 يجب أن يكون عند درجة حرارة أعلى من الغاطس . يمكن التفكير بمصدر الحرارة كوعاء ساخن و الغاطس كوعاء بارد . يُوضح القانون الثانى أن فرقاً لدرجة الحرارة ، مهما يكون صغيراً ، يكون ضرورياً قبل أن يمكن إنتاج صافى شغل فى دورة .

هذا يقود لبيان القانون الثانى كالآتى:
يكون مستحيلاً لمحرك حرارى إنتاج صافى شغل فى دورة كاملة إذا تبادل حرارة فقط مع الأجسام عند درجة حرارة مثبتة مفردة .
التقييد المفروض بالقانون الثانى يكون أكثر وضوحاً إذا تم عمل محاولة للتفكير فى نظام لا يكون مشمولاً بالقانون . كمثال ، ليس هنالك شيئاً فى القانون الأول يُشير الى أن الطاقة الداخلية للبحر لا يمكن تحويلها الى شغل ميكانيكى بإسلوب مستمر . يُمثل البحر مقداراً ضخماً للطاقة بملايين الأطنان من الماء عند درجة حرارة فوق الصفر المطلق . على أى حال ، لا يمكن عمل سفينة ستدور محركاتها بأخذ الطاقة من البحر . من القانون الثانى كما ذكر عاليه ، يُلاحظ أن مستودعاً ثابتاً للطاقة عند درجة حرارة ادنى يكون أساسياً قبل أن يمكن إنتاج شغل .
أحد الأمثلة عملياً للمحرك الحرارى كما تم تعريفه عند بداية هذا المقطع ، هو دورة البخار البسيطة . لقد تم إستخدام هذه الدروة مسبقاً لشرح القانون الأول ، فى المثال 1.1 .
بالرجوع للشكل رقم 3.2 ، يتم إمداد حرارة فى الغلاية ، و يُنتج شغلاً فى محرك بخارى أو توربينة ، يتم فقد حرارة فى مكثف ، و يتطلب مقدار صغير لشغل دخل المضخة . يكون المستودع الساخن هو فرن الغلاية ، بينما يكون المستودع البارد هو ماء التبريد الدائر فى المكثف ، و يكون النظام نفسه هو البخار .

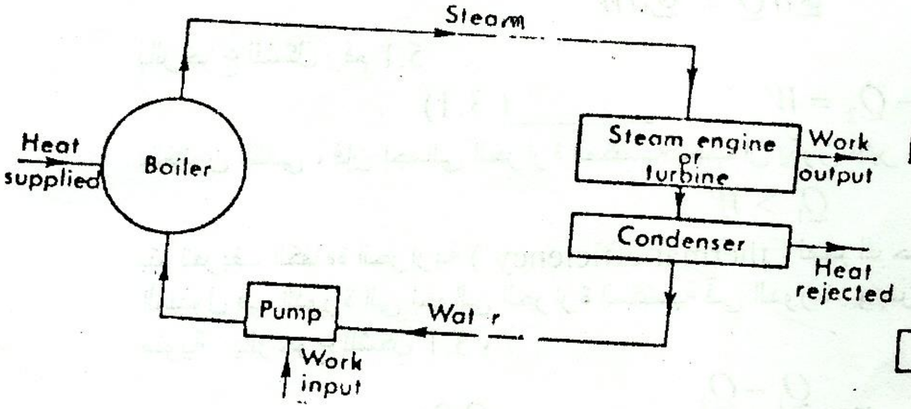


Fig. 5.2

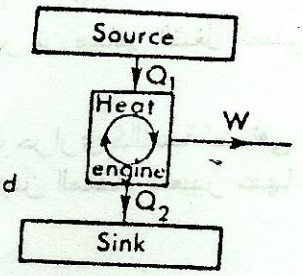


Fig. 3.1

الشكل(3.2)

الشكل(3.1)

مثال آخر لمحرك حرارة هو الدورة المغلقة لمحطة توربينة غاز كما موضح فى الشكل 3.3 . يكون المظام فى هذه الحالة هو الهواء . يتم إمداد الحرارة الى الهواء بالغازات الساخنة ى مبادل حرارى ، يتم أنتاج شغل بواسطة التوربينة . يتم فقد الحرارة لماء التبريد فى مبرد ، و يتم بذل شغل على الهواء فى ضاغط . المستودع الساخن هو الغاز الساخن الدائر حول الهواء فى المبادل الحرارى ؛ المستودع البارد هو ماء التبريد الدائر فى المبرد .

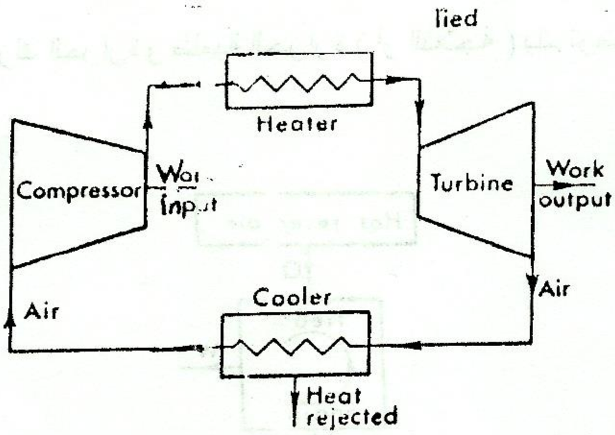


Fig. 3.3

الشكل(3.3)

فى محطة توربينة غاز مفتوحة الدورة يتم إمداد الطاقة برش الوقود فى جدول الهواء فى غرفة إحتراق ؛ تتمدد الغازات الناتجة فى التوربينة و من بعدُيخرج الى الجو ، (أنظر الشكل رقم 3.4) . لا تكون هذه الدورة هى دورة محرك حرارة طبقاً للتعريف المُعطى ،بما أن النظام لا يسترجع لحالته الأصلية ، و حقيقية يتعرض لتغيير كيميائى بالإحتراق . نفس الشئ فى محرك إحتراق داخلى ترددى يتم خلط الهواء مع و قود و يُحرق فى الأسطوانة ، و تستنفد الغازات الناتجة بعد التمدد الى الجو . على أى حال ، فإن محطة توربية الغاز مفتوحة الدورة ، و محرك الإحتراق هما مولدات قدرة هامان فى الهندسة و يطلق عليهما عادة محركات حرارة . من الممكن تجاهل كتلة الوقود بالمقارنة مع كتلة الهواء ، و يمكن أخذ الحرارة المفقودة كطاقة الغاز المستنفذ (exhaust gas) ناقصاً طاقة الهواء عند المدخل (i.e. الطاقة المفقودة إذا تم تبريد العادم الى أحوال المدخل و من بعد إعادة تدويرها)

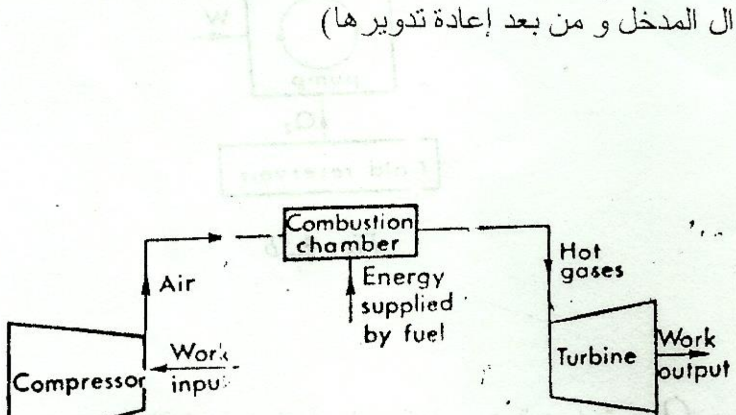


Fig. 3.4

الشكل(3.4)

يتم تطبيق القانون الأول و الثانى لدورات تشتغل فى الإتجاه المعكوس لتلك للمحرك الحرارى . فى حالة دورة معكوسة ، فإن صافى الشغل يُبذل على النظام و يساوى صافى الحرارة المفقودة بواسطة النظام . مثل هذه الدورات تحدث فى طلمبات الحرارة و الثلاجات .

المخططات المكافئة لمحرك الحرارة و طلمبة الحرارة (أو الثلاجة) يتم توضيحهما فى الشكل 3.5 a و الشكل 3.5 b

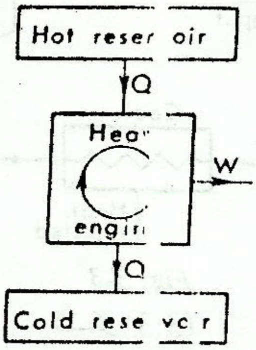


Fig. 3.5a

الشكل(3.5a)

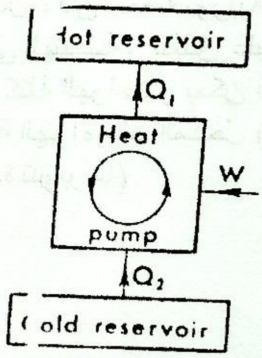


Fig. 3.5b

الشكل(3.5b)

فى دورة طلمبة الحرارة (أو الثلاجة) يتم إمداد مقدار من الحرارة ، Q_2 ، من المستودع البارد ، ويتم فقد الحرارة ، Q_1 الى المستودع الساخن . بالقانون الأول نحصل على ،

$$Q_1 = Q_2 + W \qquad \_\_\_\_\_(3.4)$$

بالقانون الثانى يمكن القول بأن شغل الدخل يكون أساساً لكى يكون هنالك إنتقال للحرارة من المستودع البارد الى المستودع الساخن ،

$$\text{i.e.} \quad W > 0$$

هذه يمكن برهانها من بيان القانون الثانى المُعطى مسبقاً ، لكن سوف لن يتم إعطاء البرهان هنا . هنالك بياناً للقانون الثانى متعلقاً بمضخة الحرارة (أو الثلاجة) يُعزى ل clausuis ، و يكون كما يلى :

يكون من المستحيل بناء جهاز عندما يشتغل فى دورة سوف لن ينتج تأثيراً أكثر من إنتقال حرارة من مبرد الى جسم ساخن.

هذا البيان يتم برهانه بسهولة بتجربة (خبرة) الإجراءات الطبيعية :
من الملاحظ أن الحرارة لا تسرى من جسم بارد الى جسم ساخن ؛ تتطلب الثلاجة مدخلاً للطاقة لكى تجرى الحرارة من الغرفة الباردة و تطردها عند درجة حرارة أعلى .
عندما يتم إعتبار بيانى القانون الثانى ، تبدو حقيقة هامة . بالرجوع للشكل 3.5 a و البيان الأول للقانون الثانى يتضح أن Q_2 لا يمكن أن تكون صفراً ، بمعنى آخر ، من المستحيل تحويل بإستمرار من الحرارة بالكامل الى شغل ميكانيكى .

على أى حال . بالرجوع الى الشكل 3.5 b ، يمكن الملاحظ أن Q_2 فى هذه الحالة يمكن أن تكون صفراً ، بدون أنتهاك للقانون الثانى . بالتالى من المستحيل تحويل شغلاً ميكانيكياً بالكامل الى حرارة . يتم توضيح هذه الحقيقة بسهولة كمثال ، عندما يتم تطبيق الفرامل فى سيارة لإجتذابها الى السكون ، فإنه يتم تحويل طاقة الحركة بالكامل الى حرارة عند العجلات . لا يمكنة إيجاد مثال يمكن فيه تحويل حرارة بإستمرار و بالكامل الى شغل ميكانيكى .

3.2 القصور الحرارى : Entropy

فى المقطع 2.2 ، وُجد أن هنالك خاصية هامة ، التى هى الطاقة الداخلية تنشأ كنتيجة للقانون الأول للديناميكا الحرارية . هنالك خاصية هامة أخرى تتبع من القانون الثانى الا و هى القصور الحرارى .
إعتبر إجراءاً كاظماً للحرارة إنعكاسياً لاى نظام على مخطط p – v . هذا يُمثل بالخط AB على الشكل 3.6 . دعنا نفترض أنه من الممكن للنظام أن يؤدى إجراءاً ثابت الحرارة إنعكاسى عند درجة الحرارة T_1 من B الى C و من بعد يتم إسترجاعه لحالته الأولى بإجراء ثان كاظم للحرارة إنعكاسى من C الى A . الآن بالتعريف فإن الإجراء الكاظم للحرارة هو أحد الإجراءات التى لا يكون فيها سريان للحرارة الى أو من النظام . بالتالى فإن الحرارة المنتقلة الوحيدة هى من B الى C أثناء الإجراء ثابت الحرارة . يتم إعطاء الشغل المبذول بالنظام بالمساحة المطوقة. عليه فإننا نملك نظاماً يُؤدى دورة و يطور صافى شغل بينما يقوم بسحب حرارة من مستودع عند درجة حرارة مفردة مثبتة .هذه تكون مستحيلة لأنها تنتهك القانون الثانى ، كما ذكر فى المقطع 3.1 . عليه الإفتراض الأصلى يكون خاطئاً ، و يكون من المستحيل وجود إجراءين كاظمين للحرارة يمران خلال نفس الحالة A .
الآن ، فإن إحدى الخصائص (المميزات) لخاصية نظام هى أنه هنالك خطاً و حيداً يمثل قيمة للخاصية على مخطط الخواص . (كمثال ، فإن الخط BC على الشكل 3.6 يمثل ثابت الحرارة عند T_1) . بالتالى يجب أن يكون هنالك خاصية تُمثل بإجراء كاظم للحرارة إنعكاسى . تسمى هذه الخاصية بالقصور الحرارى ، s.
يتبع ذلك أنه ليس هنالك تغييراً للقصور الحرارى فى إجراء كاظم للحرارة . على مخطط p – v هنالك سلسلة من الإجراءات كاظمة للجرارة إنعكاسية كما موضح فى الشكل 3.7 a ، يكون كل خط ممثلاً لقيمة واحدة من القصور الحرارى . هذه تكون مشابهة للشكل 3.7 b الذى يتم فيه رسم خطوط ثابتة درجة الحرارة ، كل تمثل قيمة واحدة لدرجة الحرارة . لكى يتم تعريف القصور الحرارى بدلالات الخواص الديناميكية الحرارية الأخرى يكون من الضرورى إستخدام إسلوباً صارماً.
فى المقطع 2.2 لقد تم توضيح إجراءاً كاظماً للحرارة إنعكاسياً لغاز مثالى يتبع القانون pv^{γ} =constant . الآن فإن القانون pv^{γ} =constant هو خطاً وحيداً على مخطط p – v ،

بحيث أن البرهان المعطى فى المقطع 2.2 لغاز مثالى هو برهان مشابه لذلك المعطى عاليه(i.e. برهان أن هنالك إجراءاً كاظماً للحرارة إنعكاسياً يحتل خطاً وحيداً على مخطط الخواص) . البرهان المعطى عاليه يعتمد على القانون الثانى و لقد لإستخدم لتقديم القصور الحرارى كخاصية . عليه يتبع أن البرهان ل pv^{γ} =constant فى المقطع 2.2 يجب أن يتضمن حقيقة أن القصور الحرارى لا يتغير أثناء إجراءاً كاظماً للحرارى إنعكاسياً .

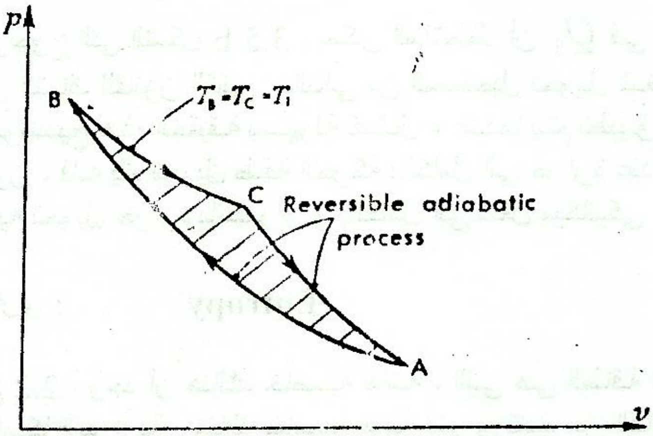


Fig. 3.6

الشكل(3.6)

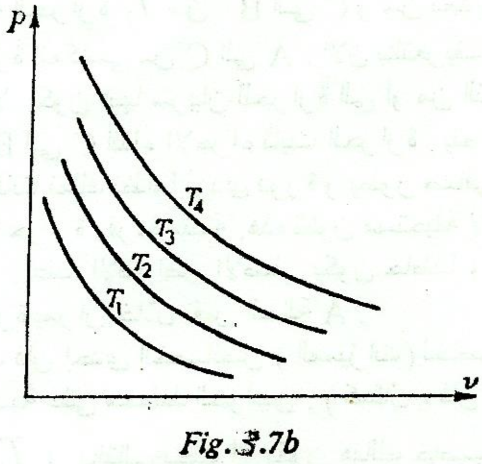


Fig. 3.7b

الشكل(3.7b)

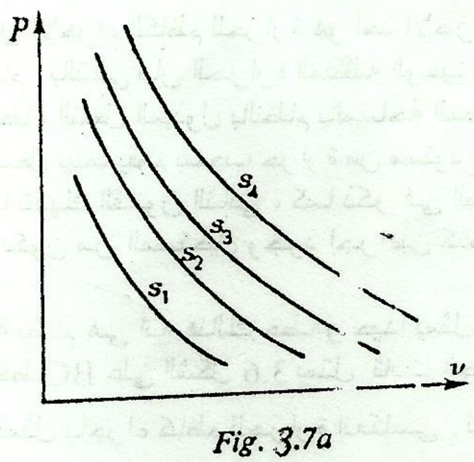


Fig. 3.7a

الشكل(3.7b)

بالرجوع الى البرهان فى المقطع 2.2 ، بدءاً بمعادلة اللاسريان لإجراء أنعكاسياً ،

$$dQ = du + p\,dv$$

و لغاز مثالى ،

$$dQ = c_v\,dT + RT\,\frac{dv}{v}$$

هذه المعادلة يمكن تكاملها بقسمة طرفى المعادلة على T ،

$$\text{i.e.}\quad \frac{dQ}{T} = \frac{c_v\,dT}{T} + \frac{Rdv}{v}$$

ايضاً لإجراء كاظم للحرارة ، $dQ = 0$ ،

$$\text{i.e.} \quad \frac{dQ}{T} = \frac{c_v\, dT}{T} + \frac{R dv}{v} = 0 \qquad \_\_\_\_\_\_\_(3.5)$$

الآن بعيداً عن المعالجة الرياضية و إدخال العلاقة بين γ و c_v, c_p, R ، لا يكون هنالك خطوات أساسية أخرى في البرهان . هذا يجب أن يعني أنه قسمة طرفي المعادلة على T هي إحدى الخطوات التي تتضمن تقييد القانون الثاني ، و الحقيقة الهامة التي تقول أن التغيير في القصور الحراري يكون صفراً عليه يمكننا القول أن $dQ/T = 0$ لإجراء كاظم للحرارة إنعكاسي . لأي إجراء إنعكاسي آخر $dQ/T \neq 0$.

يمكن توضيح أن هذه النتيجة تنطبق على جميع المواد التشغيلية ،

$$\text{i.e.} \quad ds = \frac{dQ}{T} \quad \text{لجميع المواد التشغيلية} \qquad \_\_\_\_\_\_\_(3.6)$$

(حيث s هو القصور الحراري)

لاحظ بما أن المعادلة 3.5 تكون لإجراءاً إنعكاسياً ، فإن dQ في المعادلة 3.6 تكون هي الحرارة المضافة بإنعكاسية .

يكون التغير في القصور الحراري أكثر أهمية عن قيمته المطلقة ، و يمكن إختيار القصور الحراري العنصري على نحو إعتباطي . كمثال ، في جداول البخار يُوضع القصور الحراري مساوياً لصفر عند 0.01^o C ؛ في جداول سوائل التبريد فإن القصور الحراري يُوضع مساوياً لصفر عند -40^o C .

بتكامل المعادلة 3.6 يُعطى ،

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \qquad \_\_\_\_\_\_\_(3.7)$$

معتبراً 1 kg لمائع ، يمكن إعطاء وحدات القصور الحراري ب kj/kg مقسومة على K . عليه فإن وحدات القصور الحراري ، s ، هي kj/kgK .

سيتم إستخدام الرمز S للقصور الحراري لكتلة ، m، لمائع ،

$$\text{i.e.} \quad S = ms$$

بإعادة كتابة المعادلة 3.6 نحصل على ،

$$dQ = Tds$$

أو لأي إجراء إنعكاسي

$$Q = \int_1^2 T\, ds \qquad \_\_\_\_\_\_\_(3.8)$$

تكون هذه المعادلة مناظرة لأي إجراء إنعكاسي

$$W = \int_1^2 p\, dv$$

هكذا ، كما يكون هنالك مخططاً تُمثل عليه المساحات شغلاً مبذولاً في إجراءاً إنعكاسياً ، يكون هنالك أيضاً مخططاً تُمثل عليه المساحات سريان الحرارة في إجراء إنعكاسي . تكون هذه

المخططات هى مخططات p – v و T – s على الترتيب ، كما موضح فى الأشكال 3.8 a و 3.8 b . إجراءاً إنعكاسياً 2 – 1 فى الشكل 3.8 a ، فإن المساحة المظللة $W = \int_1^2 p\,dv$ ، تمثل الشغل المبذول ؛ و لإجراءاً إنعكاسياً 2 – 1 فى الشكل 3.8 b فإن المساحة المظللة $W = \int_1^2 T\,ds$ ، تُمثل سريان الحرارة . عليه فإن إحدى الفوائد لخاصية القصور الحرارى هى التمكين من رسم مخطط تكون عليه المساحات ممُثلة لسريان الحرارة فى إجراء إنعكاسى .

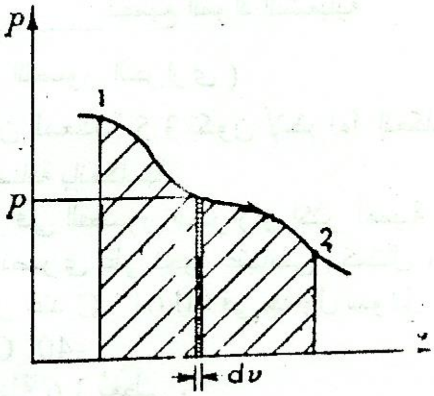


Fig. 3.8a

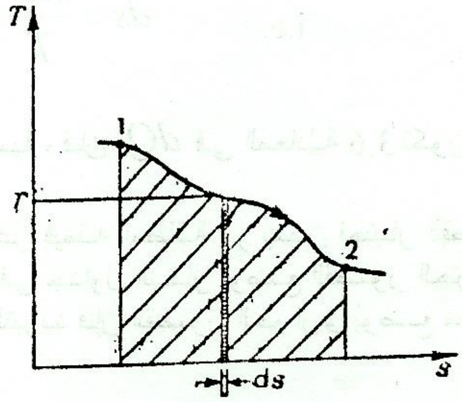


Fig. 3.8b

الشكل(3.8a)

الشكل(3.8b)

3.3 مخطط T – S :-

a/ لبخار : For a vapour

كما ذُكر سابقاً ، فإن الصفر للقصور الحرارى يُؤخذ ك 0.01^o C لبخار و ك -40^o C لسوائل التبريد . سيتم هنا فقط إعتبار مخطط T – S للبخار ؛ و يكون المخطط لمواد التبريد مشابهاً بالضبط بإستثناء صفر القصور الحرارى . يتم توضيح مخطط T – S للبخار فى الشكل 3.9 . يتم توضيح ثلاث خطوط ضغط ذات ضغط ثابت (p_1 , p_2 و p_3) (i.e. الخطوط ABCD ، EFGH و JKLM) . تكون خطوط الضغط فى منطقة عملياً متطابقة مع خط السائل المشبع (i.e. الأجزاء AB ، EF، JK) ، و يتم عادة تجاهل الفرق . يبقى الضغط ثابتاً مع درجة الحرارة عندما يتم إضافة الحرارة الكامنة ، بالتالى فإن خطوط الضغط تكون متوازية فى المنطقة الرطبة (i.e. الأجزاء BC، FG، و KL) . تتقوس خطوط الضغط لأعلى فى منطقة التحميص كما موضح (i.e. الأجزاء CD ، GH، و LM) . هكذا فإن درجة الحرارة ترتفع بإستمرار التسخين بضغط ثابت .

هنالك خط حجم ثابت واحد (موضح منقطاً سلسلياً) يتم رسمه في الشكل 3.9 . تكون خطوط الحجم الثابت مقعرة لأسفل في المنطقة الرطبة ويميل لأعلى بإنحدار أكثر عن خطوط الضغط في منطقة التحميص .
في جداول البخار فإن القصور الحراري للسائل المشبع و البخار الجاف المشبع يتم تمثيلها ب s_f و s_g على الترتيب . يتم أيضاً جدولة الفرق $s_g - s_f = s_{fg}$. يتم إعطاء القصور الحراري لبخار رطب بالقصور الحراري للماء في خليط زائداً القصور الحراري للبخار الجاف في الخليط .

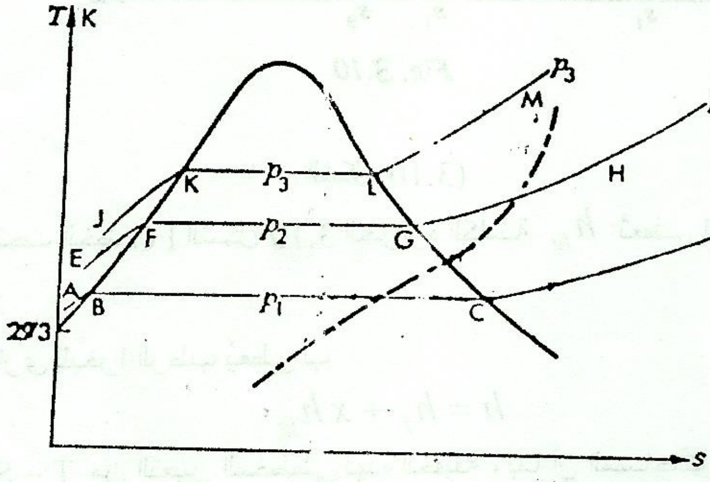


Fig. 3.9

الشكل(3.9)

لبخار رطب بكسر جفاف ، x ، نحصل على ،

$$s = (1-x)s_f + x\,s_g \qquad \_\_\_\_\_\_\_(3.9)$$

أو $s = s_f + x(s_g - s_f)$

$$\text{i.e.} \quad s = s_f + x\,s_{fg} \qquad \_\_\_\_\_\_\_(3.10)$$

بالتالي فإن كسر الحفاف يُعطى ب

$$x = \frac{s - s_f}{s_{fg}} \qquad \_\_\_\_\_\_\_(3.11)$$

يمكن الملاحظة من المعادلة 3.11 أن كسر الجفاف يكون متناسباً مع بعد نقطة الحالة من خط السائل على مخطط $T - S$. كمثال ، للحالة 1 على الشكل 3.10 فإن كسر الجفاف ،

$$x_1 = \frac{\text{البعد } F1}{\text{البعد } FG} = \frac{s - s_f}{s_{fg}}$$

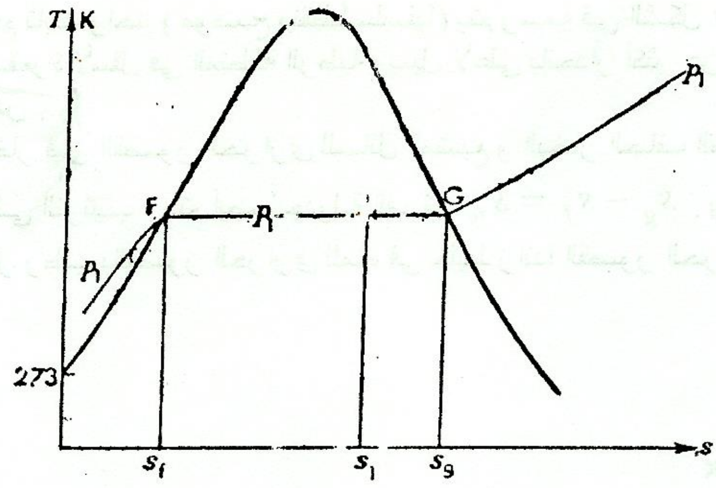


Fig. 3.10

الشكل(3.10)

تمثل المساحة تحت الخط FG الشكل 3.10 الحرارة الكامنة h_{fg} .تُعطى المساحة تحت الخط F1 ب $x_1 h_{fg}$.

المحتوى الحراري للبخار الرطب يُعطى ب

$$h = h_f + x\, h_{fg}$$

يمكن مخطط T – S من التعبير المخططي لهذه الحقيقة ، بما أن المساحات على المخطط تمثل سريان الحرارة . بإفتراض أن خط الضغط فى منطقة السائل يكون متطابقاً مع خط السائل المشبع ، بالتالى يمكن تمثيل المحتوى الحرارى على المخطط . بالرجوع للشكل 3.11 ، عندما يكون هنالك ماءاً عند أى ضغط p ، وعند 0.01° C ، يتم تسخينه بضغط ثابت فإنه يتبع بالتقريب الخط AB ؛ تكون النقطة B عند درجة حرارة التشبع T التى يغلى عندها الماء عند الضغط p . من المعادلة 2.4 ، بضغط ثابت ،

$$Q = h_B - h_A = h_B$$

(بما أن h_A عند 0.01° C هو تقريباً صفر)

نحصل على ،

عند ضغط p $\quad ABFOA = h_B = h_f$ المساحة

عند النقطة B ، إذا أستمر التسخين فإن الماء يتغير تدريجياً الى بخار حتى عند C التى يكون عندها البخار بالضبط جافاً مشبعاً. عليه نحصل على ،

عند ضغط $p = h_C - h_B$ و $h_{fg} =$ الحرارة الكامنة = المساحة $BCHFB$

بالتالى عند النقطة C ، يُعطى المحتوى الحرارى ب

عند ضغط p و $h_C =$ المساحة $ABFOA$ + المساحة $BCHFB = h_g$

لبخار رطب عند النقطة E ،

$$h_E = h_B + x_E h_{fg}$$

i.e. $\quad h_E = ABEGOA$ المساحة

عندما يتم التسخين إضافياً لبخار جاف مشبع يُصبح محمصاً .

يتم إعطاء الحرارة المضافة من C الى D بضغط ثابت p ، ب

$$Q = h_D - h_C = CDJHC \text{ المساحة}$$

بالتالى فإن المحتوى الحرارى عند D يكون ،

$$h_D = h_C + CDJHC \text{ المساحة} = ABCDJOA \text{ المساحة}$$

مثال 3.1 :- 1 kg من بخار عند 7 bar و قصور حرارى 6.5 kj/kgK ، يتم تسخينه إنعكاسياً عند ضغط ثابت حتى تكون درجة الحرارة مساوية ل 250^o C . أحسب الحرارة المكتسبة ، و وضح على مخطط T – S المساحة التى تمثل سريان الحرارة .

عند 7 bar $s_g = 6.709\ kj/kgK$ ، بالتالى يكون البخار رطباً ، بما أن القصور الحرارى الفعلى، s ، يكون أقل من s_g .

من المعادلة 3.11

$$x_1 = \frac{s_1 - s_{f1}}{s_{fg1}} = \frac{6.5 - 1.992}{4.717} = \underline{0.955}$$

بالتالى ،

$$h_1 = h_{f1} + x_1 h_{fg1} = 697 + 0.955 \times 2067$$

$$i.e.\quad h_1 = 697 + 1975 = \underline{2672}\ kj/kg$$

عند الحالة 2 يكون البخار عند 250^o C عند 7 bar ، و عليه يكون محمصاً . من جداول التحميص

$$h_2 = \underline{2955}\ kj/kg$$

عند ضغط ثابت من المعادلة 2.3 ،

$$Q = h_2 - h_1 = 2955 - 2672 = \underline{283}\ kj/kg$$

يُعطى الإجراء على مخطط T – S فى الشكل رقم 3.12 ، تُمثل المساحة المظللة سران الحرارة

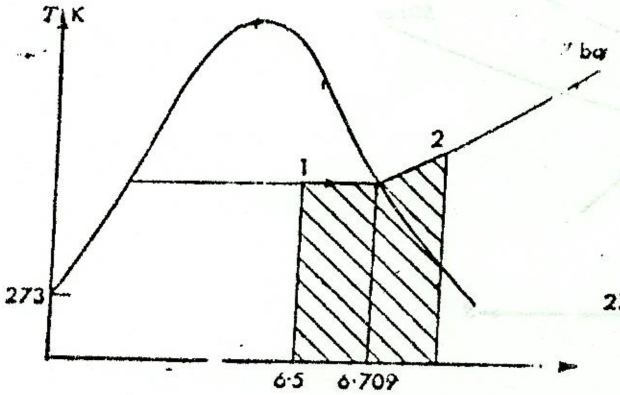


Fig. 3.12

الشكل(3.12)

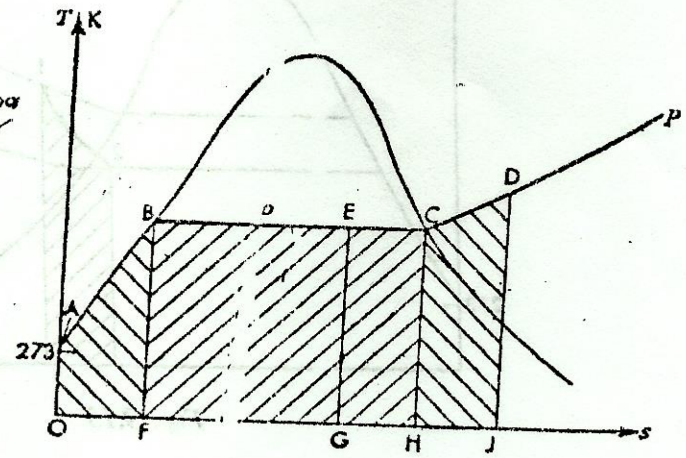


Fig. 3.11

الشكل(3.11)

مثال 3.2 : أسطوانة صلدة بحجم $0.025\ m^3$ تحوى بخاراً عند 80 bar و 350^0 C . يتم تبريد الأسطوانة حتى يكون الضغط مساوياً ل 50 bar . أحسب حالة البخار بعد التبريد و مقدار الحرارة المرفوضة بواسطة البخار. وضح الإجراء على مخطط T – S مشيراً للمساحة التى تُمثل سريان الحرارة .

البخار عند 80 bar و 350^0 C يكون محمصاً ، و يكون الحجم النوعى من الجداول مساوياً ل $0.0299\ m^3/kg$. بالتالى فإن كتلة البخار فى الأسطوانة تُعطى ب

$$m = \frac{0.025}{0.02944} = \underline{0.835\ kg}$$

لبخار محمص فوق 80 bar يتم إيجاد الطاقة الداخلية من المعادلة 1.7،

$$u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 2990 - \frac{80 \times 10^5 \times 0.02994}{10^3}$$

$$i.e.\quad u_1 = \underline{2750.5}\ kj/kg$$

عند الحالة 2 ، $p_2 = 50\ bar$ و $v_2 = 0.02994\ m^3/kg$ عليه يكون البخار رطباً، و يُعطى كسر الجفاف بالمعادلة ،

$$x_2 = \frac{v_2}{v_{g_2}} = \frac{0.02994}{0.03994} = \underline{0.758}$$

من المعادلة ،

$$u_2 = (1 - x_2)u_{f_2} + x_2 u_{g_2} = 0.242 \times 1149 + 0.758 \times 2597$$

$$i.e.\quad u_2 = 278 + 1969 = \underline{2247}\ kj/kg$$

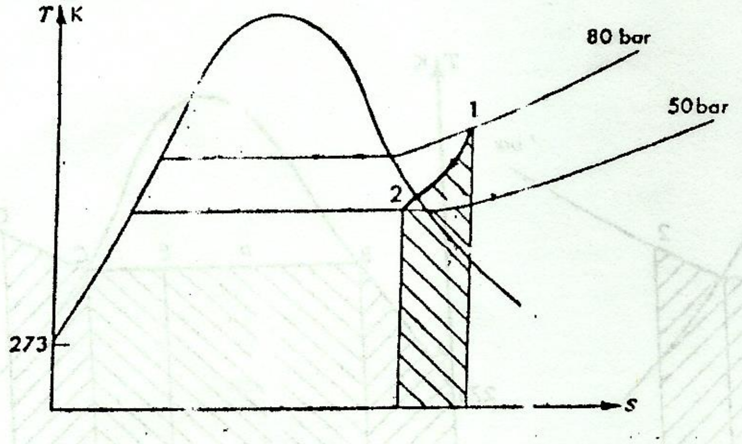


Fig. 3.13

الشكل(3.13)

بحجم ثا بت من المعادلة 2.2 ،

$$Q = U_2 - U_1 = m(u_2 - u_1) = 0.835(2247 - 2750.5)$$

$$i.e.\quad Q = -0.835 \times 503.5 = \underline{-420}\quad kj$$

i.e. الحرارة المفقودة $= \underline{420}\ kj$

الشكل رقم 3.13 يُوضح الإجراء مرسوماً على مخطط S – T ، و تُمثل المساحة المظللة الحرارة المفقودة بالنظام .

b/ لغاز مثالى : For a perfect gas

من المفيد رسم خطوط الضغط الثابت و الحجم الثابت على مخطط T – S لغاز مثالى . بما أن تغييرات القصور الحرارى تكون ذات تطبيق مباشر أكثر من القيمة المطلقة ، فيمكن إختبار القصور الحرارى الصفرى عند أى مرجعية إعطباطية كدرجة الحرارة و الضغط . فى الشكل 3.14 فإن الضغط p_1 و خط الحجم v_1 يتم رسمها ماران خلال النقطة 1. لاحظ أن خطاً للضغط الثابت يميل بأقل إنحداراً عن خط الحجم الثابت . هذه يمكن برهانها بسهولة بالرجوع للشكل 3.14 . إجعل النقاط A و B تكونان عند T_2 و v_1 ، و T_2 و p_1 على الترتيب كما موضح . الآن بين 1 و A من المعادلة 3.7 نحصل على ،

$$s_A - s_1 = \int_1^A \frac{dQ}{T}$$

أيضاً لحجم ثابت ل 1kg من الغاز من المعادلة $dQ = c_v\,dT$

$$\therefore s_A - s_1 = \int_1^A \frac{c_v\,dT}{T} = c_v \log_e \frac{T_A}{T_1} = c_v \log_e \frac{T_2}{T_1}$$

نفس الشئ ، عند ضغط ثابت 1 kg من الغاز ، $dQ = c_p\,dT$. بالتالى ،

$$s_B - s_1 = \int_1^B \frac{c_p\,dT}{T} = c_p \log_e \frac{T_B}{T_1} = c_v \log_e \frac{T_2}{T_1}$$

الآن يمكن بما أن c_p تكون أكبر من c_v لأى غاز مثالى ، بالتالى ، $s_B - s_1$ يكون أكبر من $s_A - s_1$. عليه يجب أن تقع النقطة A يسار النقطة B على المخطط ، بالتالى فإن خط ثابت الضغط يميل بأقل عن خط الضغط الثابت . يُوضح الشكل 3.15a متسلسلة خطوط ضغط ثابت على مخطط T – S ، و يُضح الشكل 1.15b متسلسلة خطوط حجم ثابت على مخطط T – S . لاحظ أنه فى الشكل 3.15a $p_6 > p_5 > p_4 > p_3\ etc$ ؛ و فى الشكل 3.15b، $v_1 > v_2 > v_3\ etc$. كلما يرتفع الضغط ، ترتفع درجة الحرارة و ينخفض الحجم ؛ بالعكس كلما هبط الضغط و درجة الحرارة، يزداد الحجم.

مثال (3.5) :-

هواء عند 15^o C و 1.05 bar يحتل حجماً مقداره $0.02\ m^3$. يُسخن الهواء بحجم ثابت حتى يكون الضغط مساوياً ل 4.2 bar، و من ثم يبردبضغط ثابت الى درجة الحرارة الأصلية . أحسب صافى سريان الحرارة الى أو من الهواء و صافى التغير فى القصور الحرارى . أرسم الإجراء على مخطط S – T .

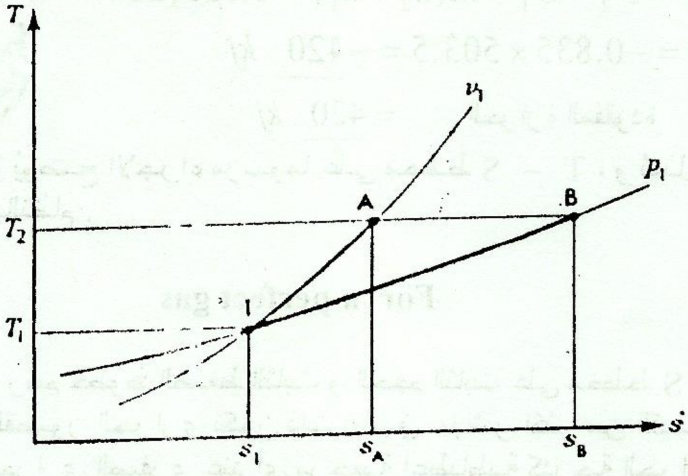


Fig. 3.14

الشكل(3.14)

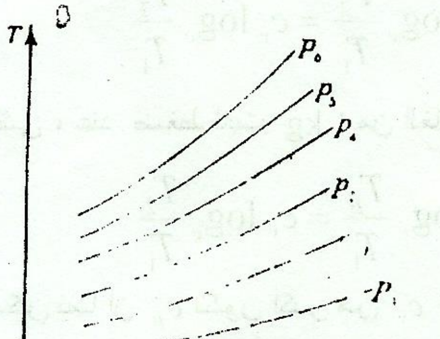


Fig. 3.15a

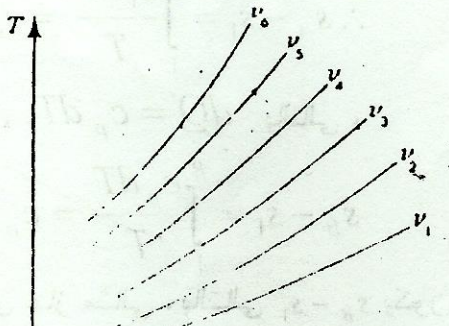


Fig. 3.15b

الشكل(3.15a)

الشكل(3.15b)

يتم توضيح الإجراء على مخطط T – S فى الشكل رقم 3.16.
لغاز مثالى ،

$$m = \frac{p\,v}{R\,T} = \frac{1.05 \times 10^5 \times 0.02}{0.287 \times 10^3 \times 288} = \underline{0.0254}\ kg$$

(حيث $T_1 = 15 + 273 = 288\ K$)

لغاز مثالى عند حجم ثابت ، $p_1 / T_1 = p_2 / T_2$ ، بالتالى،

$$T_2 = \frac{4.2 \times 288}{1.05} = \underline{1152}\ K$$

عند حجم ثابت،

$$Q = m\,c_v (T_2 - T_1) = 0.0254 \times 0.718(1152 - 288)$$

$$i.e.\ \ Q_{1-2} = \underline{15.75}\ kj$$

عند ضغط ثابت

$$Q = m\,c_p (T_3 - T_2) = 0.0254 \times 1.005(288 - 1152)$$

$$i.e.\ \ Q_{2-3} = -\underline{22.05}\ kj$$

$\therefore$ صافى سريان الحرارة $= Q_{1-2} + Q_{2-3} = 15.75 - 22.05 = \underline{-6.5}\ kj$

i.e. الحرارة المفقودة $= \underline{6.3}\ kj$

بالرجوع للشكل 3.16،

صافى النقصان فى القصور الحرارى $= s_1 + s_3 = (s_2 - s_3) - (s_2 - s_1)$

عند ضغط ثابت، $dQ = m\,c_p dT$ ، بالتالى ، مستخدماً المعادلة 3.7،

$$m(s_2 - s_3) = \int_{288}^{1152} \frac{m\,c_p dT}{T} = 0.0254 \times 1.005 \times \log_e \frac{1152}{288}$$

$$= \underline{0.0354}\ kj / K$$

عند حجم ثابت، $dQ = m\,c_v d\,T$ ،بالتالى، بإستخدام المعادلة 3.7،

$$m(s_2 - s_1) = \int_{288}^{1152} \frac{m\,c_v dT}{T} = 0.0254 \times 0.718 \times \log_e \frac{1152}{288}$$

$$= \underline{0.0253}\ kj / K$$

عليه ،

$$m(s_1 - s_3) = 0.354 - 0.0253 = \underline{0.0101}\ kj / K$$

i.e. النقصان فى القصور الحرارى $= \underline{0.0101}\ kj / K$

لاحظ ا،ه بما أن القصور الحرارى هو عبارة عن خاصية، فإن النقصان فى القصور الحرارى فى المثال 3.3، المعطى ب $(s_1 - s_3)$ ، يكون مستقلاً عن الإجراءات الخاضعة بين الحالات 1 و 3. يمكن أيضاً إيجاد التغير $(s_1 - s_3)$ بتخيل إجراءاً ثابتاً لدرجة الحرارة إنعكاسياً يحدث بين 1 و 3.

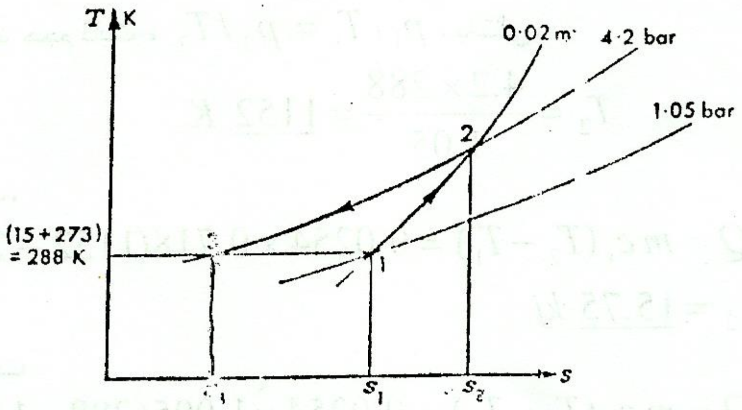


Fig. 3.16

الشكل(3.16)

3.4 إجراءات إنعكاسية على مخطط T – S :-
Reversible process on the T – S diagram

الإجراءات الإنعكاسية العديدة التى تم التعامل معها فى الفصل 2 سيتم الآن إعتبارها بالعلاقة على مخطط T – s . لقد تم تمثيل إجراءات الحجم الثابت و الضغط الثابت على مخطط T – S فى المقطع 3.3، وعليه فسوف لن يتم نقاشها مرة أخرى فى هذا المقطع.

الإجراء ثابت درجة الحرارة الإنعكاسى:-
Reversible Isothermal Process

سيبدو الإجراء ثابت درجة الحرارة الإنعكاسى كخط مستقيم على مخطط T – S ، و تُمثل المساحة تحت الخط سريان الحرارة أثناء الإجراء. كمثال، فإن الشكل 3.17 يُوضح تمدد ثابت لدرجة الحرارة إنعكاسى لبخار رطب فى منطقة التحميص. تُمثل المساحة المظللة الحرارة المكتسبة أثناء الإجراء،

i.e. الحرارة المكتسبة $= T\,(s_2 - s_1)$

لاحظ أنه يجب إستخدام درجة الحرارة المطلقة . تكون درجة الحرارة المجدولة فى جداول البخار هى t^oC ، و يجب تحويلها الى T K.

عندما يتم إعتبار الإجراء ثابت درجة الحرارة لبخار فى المقطع 2.1، لم يكن هنالك أسلوباً متاحاً لتقييم سريان الحرارة . يُمكن إدخال مخطط T – S من إيجاد سريان الحرارة ، كما موضح فى المثال التالى.

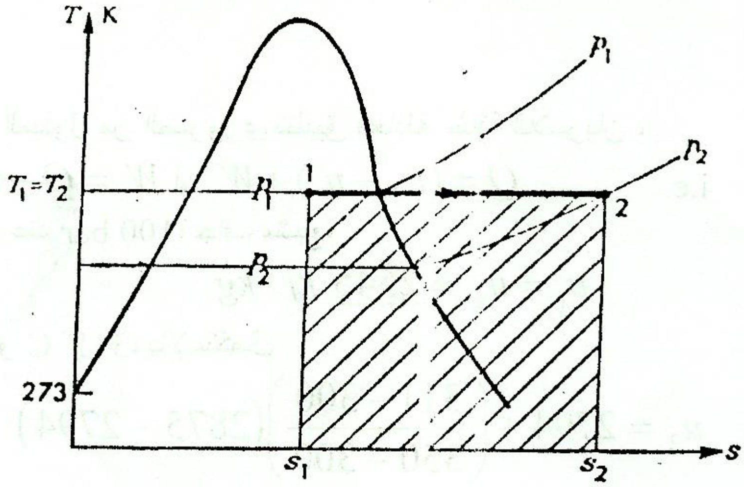


Fig. 3.17

الشكل(3.17)

مثال 3.5 :-

بخار جاف مشبَع عند 100 bar يتمدد بثبات درجة الحرارة و بإنعكاسية الى ضغط مقداره 10 bar . أحسب الحرارة المكتسبة و الشغل المبذول لكل kg من البخار اثناء الإجراء.

يتم توضيح الإجراء فى الشكل 3.18، حيث المساحة المظللة تُمثل الحرارة المكتسبة .

من الجداول عند 100 bar، جاف مشبع

$$s_1 = s_g = 5.615 \ kj/kgK \ , \ T_1 = 311^oC$$

عند 10 bar و 311^o C يكون البخار محمصاً ، بالتالى بالإستكمال

$$s_2 = 7.124 + \left(\frac{311-300}{350-300}\right)(7.simuladores301-7.124)$$

$$i.e. \quad s_2 = 7.124 + 0.039 = \underline{7.163} \ kj/kgK$$

بالتالى نحصل على ،

المساحة المظللة = الحرارة المكتسبة $= T\,(s_2 - s_1)$

$$= 584\,(7.163 - 5.615) = 584 \times 1.548$$

(حيث T=311+273=584)

i.e. الحرارة المكتسبة $= 584 \times 1.548 = \underline{904} \ kj/kg$

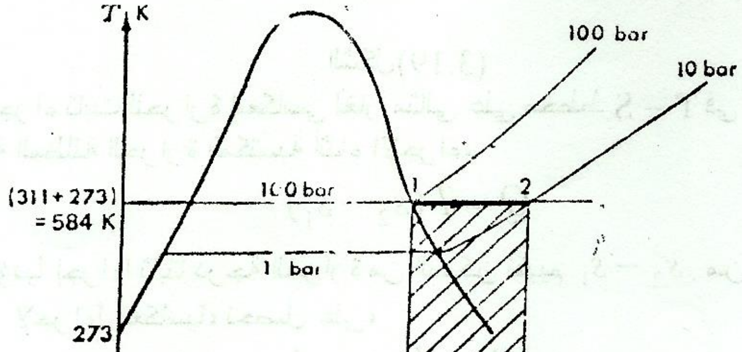


Fig. 3.18

الشكل(3.18)

لإيجاد الشغل المبذول من الضروري تطبيق معادلة طاقة اللاسريان ،

i.e. $Q=(u_2-u_1)+W$ أو $W=Q-(u_2-u_1)$

من الجداول ، عند 100 bar، جاف مشبع،

$$u_1=u_g=\underline{2545}\ kj/kg$$

عند 10 bar و 311^o C، بالإستكمال

$$u_2=2794+\left(\frac{311-300}{350-300}\right)(2875-2794)$$

$$i.e.\quad u_2=2794+17.8=\underline{2811.8}\ kj/kg$$

بالتالى،

$$\begin{aligned}W&=Q-(u_2-u_1)\\&=904-(2811.8-2545)\\&=904-266.8\end{aligned}$$

$$i.e.\ W=637.2\ kj/kg$$

i.e. الشغل المبذول بواسطة البخار $=637.2\ kj/kg$

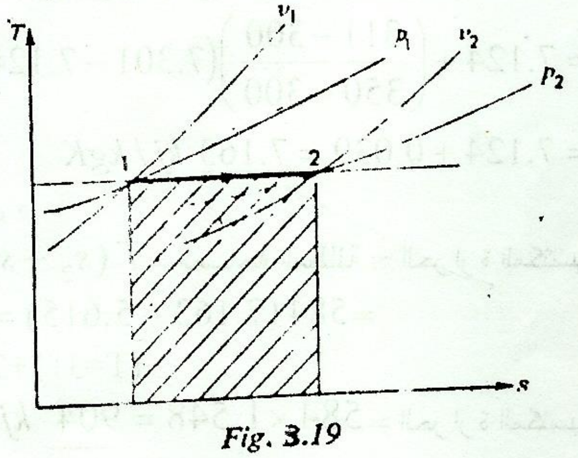


Fig. 3.19

الشكل(3.19)

يتم توضيح إجراء ثابت للحرارة إنعكاسى لغاز مثالى على مخطط T – S فى الشكل رقم 3.19.
تُمثل المساحة المظللة الحرارة المكتسبة أثناء الإجراء،

$$Q=T(s_2-s_1)$$

لغاز مثالى مؤدياً إجراءاً ثابتاً درجة الحرارة من الممكن تقييم s_2-s_1. من معادلة اللاسريان 1.4، لإجراءاً إنعكاسياً، نحصل على،

$$dQ=du+p\,dv$$

i.e. $dQ=c_v dT+p\,dv$ أيضاً لغاز مثالى من قانون جول

لإجراء ثابت درجة الحرارة ، $dT = 0$ ، بالتالى،

$$dQ = p\,dv$$

بالتالى بما أن $pv = RT$ ، نحصل على،

$$dQ = RT\frac{dv}{v}$$

الآن من المعادلة 3.7 ،

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \int_{v_1}^{v_2} \frac{RT\,dv}{T\,v} = R\int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v}$$

$$i.e. \quad s_2 - s_1 = R\log_e \frac{v_2}{v_1} = R\log_e \frac{p_1}{p_2} \qquad \_\_\_\_\_(3.12)$$

عليه تعطى الحرارة المكتسبة ب

$$Q = T(s_2 - s_1) = RT\log_e \frac{v_2}{v_1} = RT\log_e \frac{p_1}{p_2}$$

لاحظ أن هذه النتيجة هى نفس التى تم إشتقاقها فى المقطع 2.1،

$$i.e. \quad Q = W = RT\log_e \frac{p_1}{p_2} = p_1 v_1 \log_e \frac{p_1}{p_2}, etc$$

مثال 3.6 :-

$0.03\ m^3$ من نايتروجين (بكتلة جزيئية 28 kg/kmol) محتوى فى أسطوانة خلف كباس ، يكون إبتدائياً عند 1.05 bar و $15^o\ C$. يتم إنضغاط الغاز بثبات درجة الحرارة و بإنعكاسية حتى يكون مساوياً ل 4.2 bar . أحسب التغير فى القصور الحرارى، سريان الحرارة، و الشغل المبذول، و أرسم الإجراء على مخطط p – v و T – S

إفترض أن النايتروجين يعمل كغازاً مثالياً .
يُوضح الإجراء على مخطط p – v و T – S فى الأشكال 3.20 a و 3.20 b على الترتيب، تُمثل المساحات المظللة على الشكل 3.20 a شغل الدخل، بينما تُمثل المساحة المظللة على الشكل الحرارة المفقودة.

$$R = \frac{R_o}{M} = \frac{8314}{28} = \underline{297}\ \ N.m/kgK$$

بالتالى بما أن $pv = mRT$ ، نحصل على

$$m = \frac{pv}{RT} = \frac{1.05 \times 10^5 \times 0.03}{297 \times 288} = \underline{0.0368}\ \ kg$$

(حيث $T = 15 + 273 = 288\ K$)

بالتالى من المعادلة 3.12، ل m kg،

$$s_2 - s_1 = mR\log_e \frac{p_1}{p_2} = \frac{0.0368 \times 297}{10^3}\log_e \frac{1.05}{4.2}$$

$$i.e. \quad s_2 - s_1 = -\frac{0.0368 \times 297}{10^3}\log_e \frac{4.2}{1.05} = -\underline{0.01516}\ kj/K$$

$\therefore$ النقصان فى القصور الحرارى،

$$s_2 - s_1 = \underline{0.01516}\ kj/K$$

الحرارة المفقودة = المساحة المظللة على الشكل 3.5 b = $T(s_2 - s_1)$

$$= 288 \times 0.01516 = \underline{4.37}\ kj$$

بالتالى لإجراء ثابت الحرارة لغاز مثالى، من المعادلة 2.12

$$W = Q = 4.37\ kj$$

i.e. شغل الدخل = $4.37\ kj$

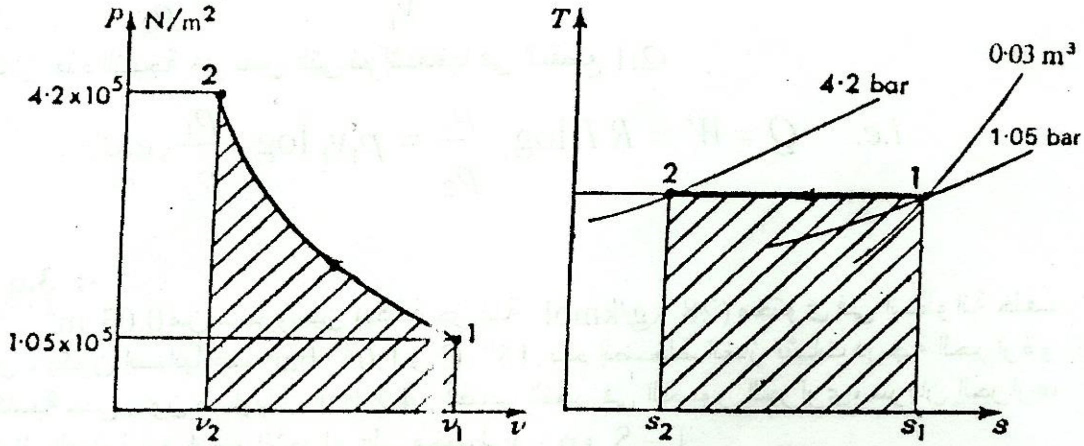


Fig. 3.20a — الشكل(3.20a)

Fig. 3.20b — الشكل(3.20b)

إجراء كاظم للحرارة إنعكاسى (أو إجراء ثابت القصور الحرارى) :-

Reversible adiabatic process (or isentropic process)

لإجراء كاظم للحرارة إنعكاسى يبقى القصور الحرارى ثابتاً، و بالتالى يُسمى ثابت القصور الحرارى. لاحظ أنه لكى يكون الإجراء ثابت القصور الحرارى فإنه لا يحتاج أن يكون كاظماً للحرارة أو إنعكاسياً، لكن سيبدو الإجراء دائماً كخط رأسى على مخطط T – S. الحالات التى لا يكون فيها الإجراء ثابت القصور الحرارى كاظماً للحرارة أو إنعكاسياً تحدث قليلاً لذا سيتم تجاهلها طوال هذه المذكرات.

هنالك إجراءاً ثابت للقصور الحرارى لبخار محمص يتمدد فى المنطقة الرطبة يُوضح فى الشكل 3.21. عندما تم إعتبار الإجراء كاظم الحرارة إنعكاسى فى المقطع 2.1، لقد تم ذكر

أنه ليس هنالك أسلوباً متاحاً لتثبيت الحالات الطرفية. الآن بإستخدام حقيقة أن القصور الحراري يبقى ثابتاً ، فإن الحالات الطرفية يمكن إيجادها بسهولة من الجداول.
هذه تُوضح في المثال التالي

مثال 3.7 :-

بخار عند 100 bar و 375^o C يتمدد بثبوت القصور الحراري في أسطوانة خلف كبّاس الى ضغط مقداره 10 bar. أحسب الشغل المبذول لكل kg من البخار.

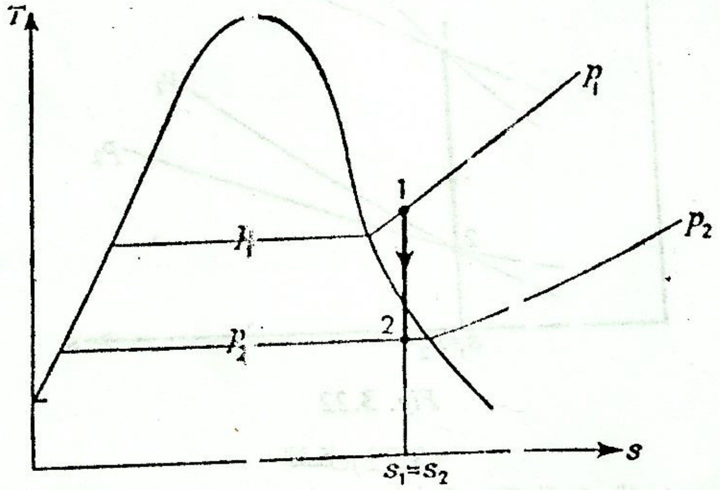


Fig. 3.21

الشكل(3.21)

من جداول التحميص، عند 100 bar ، 375^o C، نحصل على،

$$s_1 = s_2 = \underline{6.091} \ kj/kgK$$

عند 10 bar و $s_2 = \underline{6.091}$ ، فإن البخار يكون رطباً، بالتالي ، تكون s_2 أقل من s_{g_2}

من المعادلة 3.11،

$$x_2 = \frac{s_2 - s_{f_2}}{s_{fg_2}} = \frac{6.091 - 2.138}{4.448} = \underline{0.889}$$

بالتالي،

$$u_2 = (1 - x_2)u_{f_2} + x_2 \ u_{g_2} = (0.111 \times 762) + (0.88 \times 2584)$$

$$i.e. \quad u_2 = 84.6 + 2297 = \underline{2381.6} \ kj/kg$$

عند ضغط 100 bar ، 375^o C، نحصل من الجداول ، $h_1 = 3017 \ kj/kg$ و $v_1 = 3017 \ m^3/kg$. بالتالي بإستخدام المعادلة 1.7،

$$u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 3017 - \frac{100 \times 10^5 \times 0.02453}{10^3} = 3017 - 245.3$$

$$i.e. \quad u_2 = \underline{2771.7} \ kj/kg$$

لإجراء كاظم للحرارة من المعادلة 2.13

$$i.e. \quad W = u_1 - u_2$$

$\therefore$ الشغل المبذول بالبخار $= 2771.7 - 2381.6 = 390.1 \ kj/kg$

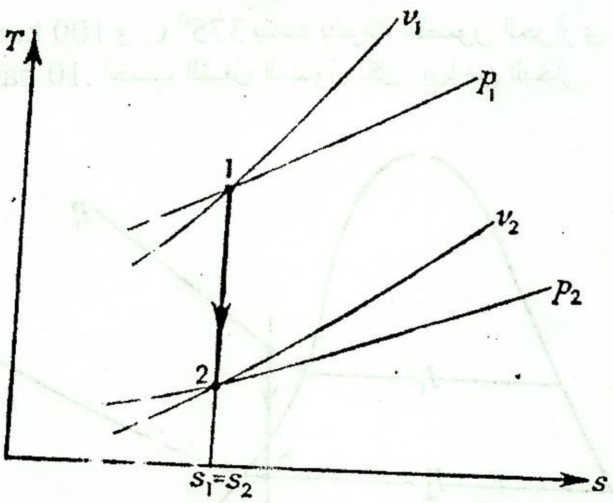


Fig. 3.22

الشكل(3.22)

يتم توضيح إجراءاً ثابتاً للقصور الحرارى على مخطط T – S. لقد تم التوضيح فى المقطع 2.1 أنه لإجراء كاظم للحرارة إنعكاسى لغاز مثالى فإن الإجراء يتبع القانون $pv^{\gamma} = const.$ بما أن الإجراء كاظم الحرارة الإنعكاسى يحدث عند قصور حرارى ثابت، و يُسمى بالإجراء ثابت القصور الحرارى، فإن الأس γ يُعرف بالأس ثابت القصور الحرارى للغاز.

إجراء متعدد الإنتحاء:- Polytropic Process

لإيجاد التغير فى القصور الحرارى فى إجراءاً متعدد الإنتحاء لبخار يتم تثبيت الحالات الطرفية بإستخدام $p_1v_1^n = p_2v_2^n$ ، فإن قيم القصور الحرارى عند الحالات الطرفية يمكن قراءتها مباشرة من الجداول.

مثال 3.8 :-

فى محرك بخار يكون البخار عند بداية إجراء التمدد عند 7 bar، كسر جفاف 0.95، يتبع التمدد القانون $pv^{1.1} = const.$ ، أسفل الى ضغط مقداره 0.34 bar. أحسب التغير فى القصور الحرارى لكل kg من البخار أثناء الإجراء.

(لاحظ أن هذه هى بيانات المثال 2.6)

عند 7 bar ، $v_g = 0.2728 \ m^3/kg$ ، بالتالى،

$$v_1 = x_1 v_{g_1} = 0.95 \times 0.2728 = \underline{0.26} \ m^3/kg$$

بالتالى من المعادلة 2.25،

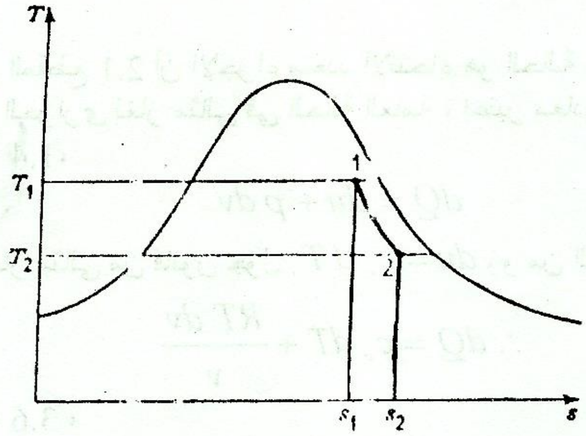


Fig. 3.23
الشكل(3.23)

$$\frac{p_1}{p_2}=\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{1.1} \quad \text{أو} \quad \frac{v_2}{v_1}=\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/1.1}$$

$$\therefore v_2 = 0.26\times\left(\frac{7}{0.34}\right)^{0.909} = 0.26\times 20.59^{0.909} = \underline{4.06}\ m^3/kg$$

عند 0.34 bar ، و $v_2 = 4.06\ m^3/kg$ ، يكون البخار رطباً، بما أن $v_g = 4.649$

$$x_2 = \frac{v_2}{v_{g_2}} = \frac{4.06}{0.649} = \underline{0.876}$$

بالتالى من المعادلة 3.10،

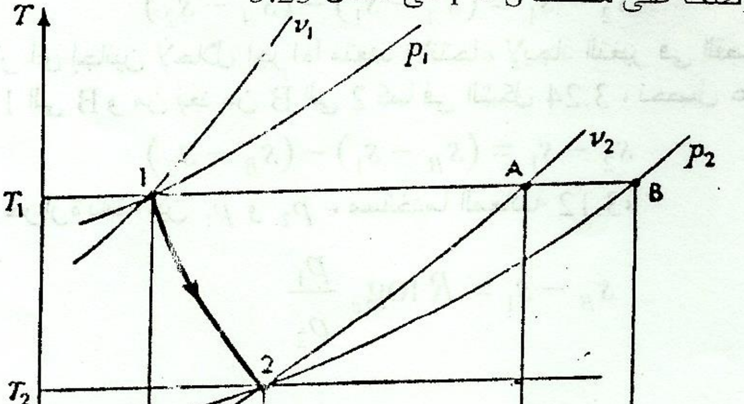
$$s_f = s_{f_1} + x_1 s_{fg_1} = 1.992 + 0.95\times 4.717 = \underline{6.472}\ \ kj/kgK$$

و

$$s_2 = s_{f_2} + x_2 s_{fg_2} = 0.98 + 0.876\times 6.745 = \underline{6.889}\ \ kj/kgK$$

الزيادة فى القصور الحرارى $(s_2 - s_1) = 6.889 - 6.472 = \underline{0.417}\ \ kj/kgK$

$\therefore$ يكون الإجراء موضحاً على مخطط T – S فى الشكل 3.23



الشكل(3.24)

Fig. 3.24

لقد تم التوضيح فى المقطع 2.1 أن الإجراء متعدد الإنتحاء هو الحالة العامة لغاز مثالى. لإيجاد التغير فى القصور الحرارى لغاز مثالى فى الحالة العامة ، إعتبر معادلة طاقة اللاسريان لإجراء إنعكاسى ، المعادلة 1.4،

$$dQ = du + p\,dv$$

أيضاً لوحدة كتلة غاز مثالى من قانون جول $du = c_v\,dT$ ، و من المعادلة $pv = RT$

$$\therefore dQ = c_v\,dT + \frac{RT\,dv}{v}$$

بالتالى من المعادلة 3.6 ،

$$ds = \frac{dQ}{T} = \frac{c_v\,dT}{T} + \frac{R\,dv}{v}$$

بالتالى بين اى حالتين 1 و 2

$$s_2 - s_1 = c_v \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} + R \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = c_v \log_e \frac{T_2}{T_1} + R \log \frac{v_2}{v_1} \qquad \_\_\_(3.13)$$

هذه يتم توضيحها على مخطط T − S كما فى الشكل رقم 3.24. بما أنه فى الإجراء فى الشكل 3.24 ، $T_2 > T_1$ ،بالتالى من الملائم أكثر كتابة

$$s_2 - s_1 = R \log \frac{v_2}{v_1} - c_v \log_e \frac{T_1}{T_2} \qquad \_\_\_(3.14)$$

الجزء الأول من التعبير ل $s_2 - s_1$ فى المعادلة 3.15 هو التغير فى القصور الحرارى فى إجراء ثابت درجة الحجم من T_1 الى T_2 ،

i.e. بالرجوع للشكل 3.24،

$$s_A - s_2 = c_v \log_e \frac{T_1}{T_2}$$

عليه يمكن الملاحظة أنه بحساب التغير فى القصور الحرارى فى إجراء متعدد الإنتحاء من الحالة 1 الى الحالة 2 نكون قد إستبدلنا الإجراء بإجرائين أبسط؛ من 1 الى A و من A الى 2.

من الواضح من الشكل 3.24 أن

$$s_2 - s_1 = (s_A - s_1) - (s_A - s_2)$$

يمكن إختيار أى إجائين لإحلال إجراءاً متعدد الإنتحاء لإيجاد التغير فى القصور الحرارى.

كمثال من 1 الى B و من بعد من B الى 2 كما فى الشكل 3.24 ، نحصل على

$$s_2 - s_1 = (s_B - s_1) - (s_B - s_2)$$

عند درجة حرارة ثابتة بين p_1 و p_2 ، مستخدماً المعادلة 3.12،

$$s_B - s_1 = R \log_e \frac{p_1}{p_2}$$

عند ضغط ثابت بين T_1 و T_2 نحصل على،

$$s_B - s_2 = c_p \log_e \frac{T_1}{T_2}$$

بالتالى ،

$$s_2 - s_1 = R \log \frac{p_1}{p_2} - c_p \log_e \frac{T_1}{T_2}$$

أو

$$s_2 - s_1 = c_p \log_e \frac{T_2}{T_1} + R \log \frac{p_1}{p_2} \qquad \_\_\_\_\_\_ (3.15)$$

يمكن إشتقاق المعادلة 3.15 بسهولة من المعادلة 3.13. من الواضح أن هنالك عدد كبير من المعادلات الممكنة للتغير فى القصور الحرارى فى إجراء متعدد الإنتحاء ، و يتم التأكيد على أنه لا يجب عمل أى محاولة لتذكر جميع المعادلات مثل هذه التعبيرات. يمكن التعامل مع كل مسألة برسم مخطط T – S و إستبدال الإجراء بإجرائين آخرين إنعكاسيين أبسط ، كما فى الشكل 3.24.

مثال 3.9 :-

أحسب التغير فى القصور الحرارى ل 1 kg من هواء يتمدد بإنتحاء فى أسطوانة خلف كباس من 6.3 bar ، 550° C الى 1.05 bar . يكون أس التمدد مساوياً ل 1.3 .

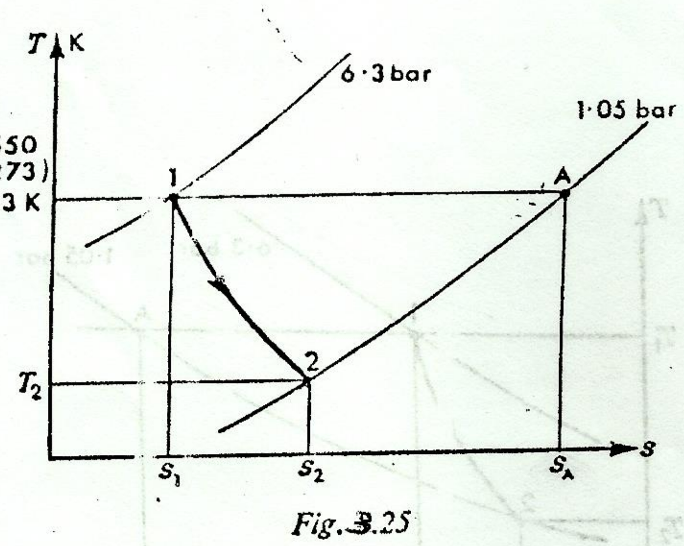


Fig. 3.25

الشكل(3.25)

يتم توضيح الإجراء على مخطط T – S فى الشكل رقم 3.25. من المعادلة 2.29،

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{(n-1)/n} = \left(\frac{6.3}{1.05}\right)^{(1.3-1)/1.3} = 6^{0.231} = 1.512$$

$$\therefore T_2 = \frac{823}{1.512} = \underline{544} \ K$$

(حيث $T_1 = 550 + 273 = 823\ K$).

الآن إستبدل الإجراء 1 الى 2 بإجرائين ، 1 الى A و A الى 2. بالتالى عند درجة حرارة ثابتة من 1 الى A ، من المعادلة 3.12 ،

$$s_B - s_1 = R \log_e \frac{p_1}{p_2} = 0.287 \log_e \frac{6.3}{1.05}$$

$$= 0.287 \times 1.792 = \underline{0.515} \quad kj / kgK$$

عند ضغط ثابت من A الى 2 ،

$$s_A - s_2 = c_p \log_e \frac{T_1}{T_2} = 1.005 \log_e \frac{823}{544}$$

$$= 1.005 \times 0.413 = \underline{0.415} \quad kj / kgK$$

بالتالى $s_2 - s_1 = 0.515 - 0.415 = \underline{0.1}\ kj / kgK$

i.e. الزيادة فى القصور الحرارى $= \underline{0.1}\ kj / kgK$

لاحظ أنه فى هذه المسألة إذا أصبحت $s_A - s_2$ أو $s_A - s_1$ ، هذا سيعنى أن تكون s_1 أكبر من s_2 ، و يجب أن يبدو الإجراء كما فى الشكل 3.26 ،

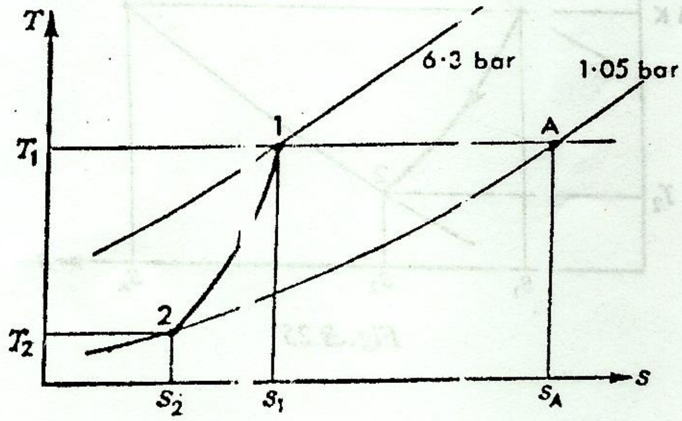


Fig. 3.26

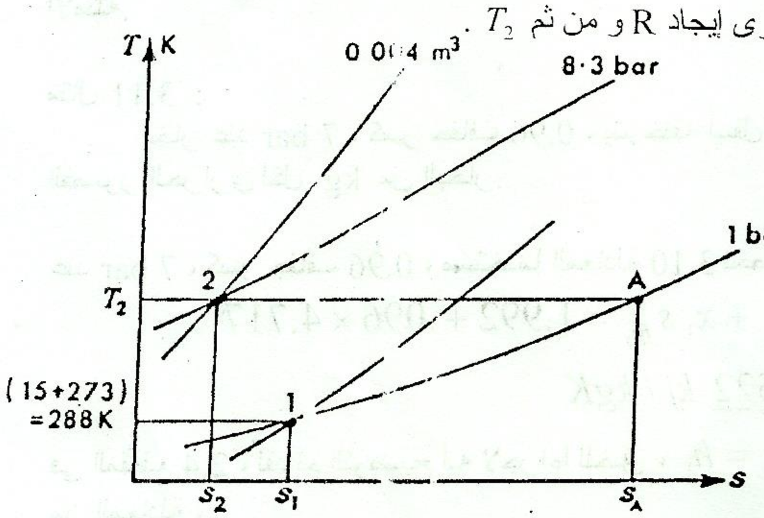
الشكل(3.26)

مثال 5.10 :-

كتلة مقدارها 0.05 kg من ثانى أكسيد كربون (بكتلة جزيئية 44 kg/kmol) يتم إنضغاطه من 1 bar ، 15° C ، حتى يكون الضغط مساوياً ل 8.3 bar ، و يكون عنده الحجم 0.004 m^3 . أحسب التغير فى القصور الحرارى. خذ c_p لثانى أكسيد الكربون ك 0.88 kj/kg K ، و أفترض أن ثانى أكسيد الكربون يكون غازاً مثالياً.

يتم توضيح الحالتين الطرفيتين على مخطط T – S فى الشكل رقم 3.27. لم يتم تحديد الإجراء فى المثال و ليس هنالك معلومات ضرورية حوله. يتم تثبيت الحالات 1 و 2 و بالتالى فان $s_1 - s_2$ تكون مثبتة . يمكن أن يكون الإجراء بين 1 و 2 إنعكاسياً أو لاأنعكاسياً ؛ يكون التغير فى القصور الحرارى هو نفسه بين الحالات الطرفية المعطاة.

بالرجوع للشكل 3.27 ، لإيجاد $s_1 - s_2$ يمكن أولاً إيجاد $s_A - s_2$ و من بعد طرح $s_A - s_1$. أولاً و قبل كل شئى من الضرورى إيجاد R و من ثم T_2 .



الشكل (3-27)

من المعادلة ،

$$R = \frac{R_o}{M} = \frac{8314}{44} = \underline{189}\ N.m / kgK$$

من المعادلة ، $pv = mRT$ عليه ،

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{Rm} = \frac{8.3 \times 10^5 \times 0.004}{0.05 \times 189} = \underline{315}\ K$$

بالتالى من المعادلة 3.12

$$s_A - s_2 = R \log_e \frac{p_2}{p_A} = 0.189 \log_e \frac{8.3}{1} = \underline{0.4}\quad kj / kgK$$

أيضاً عند ضغط ثابت من 1 الى A

$$s_A - s_1 = c_p \log_e \frac{T_2}{T_1} = 0.88 \log_e \frac{351}{288} = \underline{0.174}\quad kj / kgK$$

(حيث $T_1 = 15 + 273 = 288\ K$)

بالتالى

$$s_1 - s_2 = 0.4 - 0.174 = \underline{0.226} \ kj/kgK$$

بالتالى ل 0.05 kg من ثانى أكسيد الكربون،

$$\text{النقصان فى القصور الحرارى} = 0.05 \times 0.226 = \underline{0.0113} \quad kj/K$$

3.5- القصور الحرارى والإنعكاسية:
Entropy and Irreversibility

لقد تمت الإشارة فى المقطع السابق الى أنه ، بما أن القصور الحرارى هو خاصية ، فإن التغير فى القصور الحرارى يعتمد فقط على الحالات الطرفية و ليس على الإجراء بين الحالات الطرفية . عليه ، فإن إجراءاً لا إنعكاسياً معطى يعطى معلومات كافية لتثبيت الحالات الطرفية بالتالى يمكن إيجاد التغير فى القصور الحرارى . هذه يمكن توضيحها بصورة أفضل ببعض الأمثلة.

مثال 3.11 :

بخار عند 7 bar ، كسر جفاف 0.96 ، يتم خنقه أسفل الى 3.5 bar. أحسب التغير فى القصور الحرارى لكل kg من البخار.

عند 7 bar ، كسر جفاف 0.96 ، مستخدماً المعادلة 3.10 نحصل على ،

$$s_1 = s_{f_1} + x_1 s_{fg_1} = 1.992 + .096 \times 4.717$$

$$i.e. \quad s_1 = \underline{6.522} \ kj/kgK$$

فى المقطع 2.4 ، لقد تم التوضيح أنه لإجراءاً للخنق ، $h_2 = h_1$.

من المعادلة ،

$$h_2 = h_1 = x_1 h_{fg_1} = 697 + 0.96 \times 2067 = \underline{2682} \ kj/kg$$

عند 3.5 bar و $h_2 = 2682 \, kj/kg$ يكون البخار مايزال رطباً ، بما أن $h_{g_2} > h_2$

من المعادلة ، $h_2 = h_1 = x_1 h_{fg_1}$ ، عليه ،

$$x_2 = \frac{h_2 - h_{f_2}}{h_{fg_2}} = \frac{2682 - 584}{} = \underline{0.977}$$

بالتالى ،

$$\text{الزيادة فى القصور الحرارى} = 6.817 - 6.522 = \underline{0.295} \ kj/kgK$$

يتم توضيح ذلك على مخطط T – S فى الشكل 3.28 . لاحظ أن الإجراء يُوضح منقطاً ، و لا تمثل المساحة تحت الخط سريان الحرارة ؛ يفترض إجراء الخنق أنه ليس هنالك سريان حرارة ، بل يكون هنالك تغيراً فى القصور الحرارى لأن الإجراء يكون إنعكاسياً.

مثال 3.12 :-

وعاءان بحجمٍ متساوٍ يتم توصيلهما بماسورة قصيرة الطول تحتوى على صمام ؛ كلا الوعائين يكونان معزولان حرارياً . أحد الوعائين يحتوى على هواء و الآخر يكون مفرغاً تماماً. أحسب التغير فى القصور الحرارى لكل kg من الهواء فى النظام عندما يُفتح الصمام للهواء بملء كلا الوعائين.

بداية يكون الوعاء A حاوياً لهواء و يكون الوعاء B مفرغاً تماماً، كما فى الشكل 3.29 ؛ أخيراً يحتل الهواء الوعائين A و B . فى المقطع 2.4 لقد تم التوضيح أنه فى تمدد غير مقاوم (unresisted expansion) لغاز مثالى ، تكون درجات الحرارة الإبتدائية و النهائية متساوية. فى هذه الحالة يكون الحجم الإبتدائى V_A و الحجم النهائى $V_A + V_B = 2V_A$. يمكن توضيح الحالات الطرفية على مخطط T – S كما موضح فى الشكل 3.30.يكون الإجراء 1 الى 2 لاإنعكاسياً و يجب رسمه منقطاً . يكون التغير فى القصور الحرارى هو $s_2 - s_1$ ، بدون النظر لممر الإجراء بين 1 و 2 . بالتالى، لحساب التغير فى القصور الحرارى ، تخيل أن الإجراء يتم إستبداله بإجراءاً ثابتاً للحرارة إنعكاسياً بين الحالات 1 و 2 . بالتالى من المعادلة 3.12 .

$$(s_2 - s_1) = R \log_e \frac{v_2}{v_A} = 0.287 \log_e \frac{2v_A}{v_A}$$

$$= 0.287 \log_e 2 = \underline{0.119} \quad kj / kgK$$

i.e. الزيادة فى القصور الحرارى $= \underline{0.119} \; kj / kg\,K$

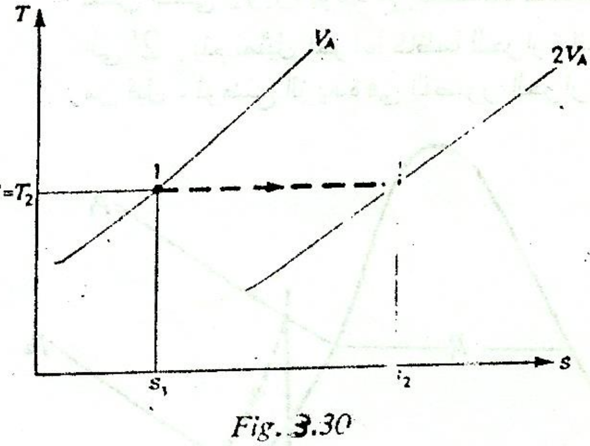


Fig. 3.30

الشكل (3-30)

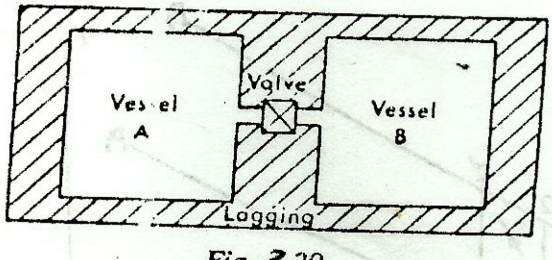


Fig. 3.29

الشكل (3-29)

لاحظ أن الإجراء يتم رسمه منقطاً فى الشكل 3.30 ، و تكون المساحة تحت الخط ليست ذات أهمية ؛ يكون الإجراء كاظماً للحرارة و يكون هنالك تغيراً فى القصور الحرارى بما أن الإجراء يكون لا إنعكاسياً .

من المهم التذكر بأن المعادلة 3.6 $ds = dQ / T$ ، تكون صحيحة فقط لإجراءات لاإنعكاسية.

بنفس الطريقة فإن المعادلة $dW = p\,dv$ ، أو $dv = dW / p$ ، تكون صحيحة فقط

لإجراءات إنعكاسية . فى المثال 3.12 يزداد حجم الهواء من V_A الى $2V_A$ ، و لايكون هنالك شغلاً مبذولاً بالهواء خلال الإجراء،

$$\text{i.e.} \qquad dW = 0 \text{ و } v_2 - v_1 = 2V_A - V_A = V_A$$

بالتالى فى الإجراء اللاإنعكاسى للمثال 3.12 $dv \neq dW / p$. نفس الشئ ، فإن المحتوى الحرارى فى المثال 3.12 يزداد ب 0.199 kj/kgK و يكون سريان الحرارة صفراً ، i.e. ، $ds \neq dQ / T$. لا يجب أن يكون هنالك إلتباساً إذا تم رسم مخطط T – S أو مخطط p – v لكل مسألة و تحديد نقاط الحالة فى مواضعها الصحيحة . بالتالى ، عندما يكون هنالك إجراءاً إنعكاسياً بين حالتين ، يمكن رسم الخطوط التى تمثل الإجراء بخطوط متصلة ، و تمثل الحرارة تحت الخط سريان الحرارة على مخطط T – S و الشغل المبذول على مخطط p – v .

عندما يكون الإجراء بين الحالتين لاإنعكاسياً ، يجب رسم الخط منقطاً ، و لا تكون للمساحة تحت الخط أى أهميةعلى أى من المخططات.

يمكن التوضيح من القانون الثانى أن القصور الحرارى لنظام نعزول حرارياً يجب إما أن يزيد أو يبقى كما هو ، كمثال ، فإن إجراءاً كاظماً للحرارة معزولاً من بيئته المحيطة بما أنه لا يوجد سريان للحرارة الى أو من النظام . لقد لاحظنا أنه فى إجراء كاظم للحرارة إنعكاسى فإن القصور الحرارى يبقى كما هو . فى إجراءٍ كاظم للحرارة لاإنعكاسى يجب أن يزيد القصور الحرارى دائماً ، و يكون الكسب فى القصور الحرارى هو قياس للاإنعكاسية الإجراء. تُوضح الإجراءات فى الأمثلة 3.11 و 3.12 هذه الحقيقة . كمثال آخر ، إعتبر تمدداً كاظماً للحرارة لاإنعكاسياً فى توربينة بخار كما موضح فى الشكل 3.31 بالإجراء 1 الى $2'$ كما فى الشكل 3.31 . الزيادة فى القصور الحرارى ، $s_2' - s_1 = s_{2'} - s_2$ هى قياساً للاإنعكاسية الإجراء.

نفس الشئ 3.32، يوضح إنضغاطاً كاظماً للحرارة لاإنعكاسياً فى ضاغط دوّار بالإجراء 1 الى $2'$. يتم تمثيل إجراءاً كاظماً للحرارة إنعكاسياً بين نفس الضغوط بالإجراء 1 الى 2 . كما من قبل ، تُوضّح الزيادة فى القصور الحرارى لاإنعكاسية الإجراء

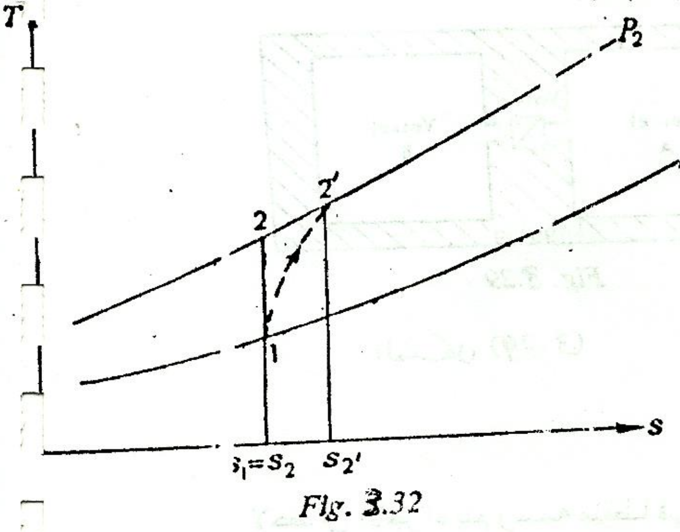


Fig. 3.32

الشكل (3-32)

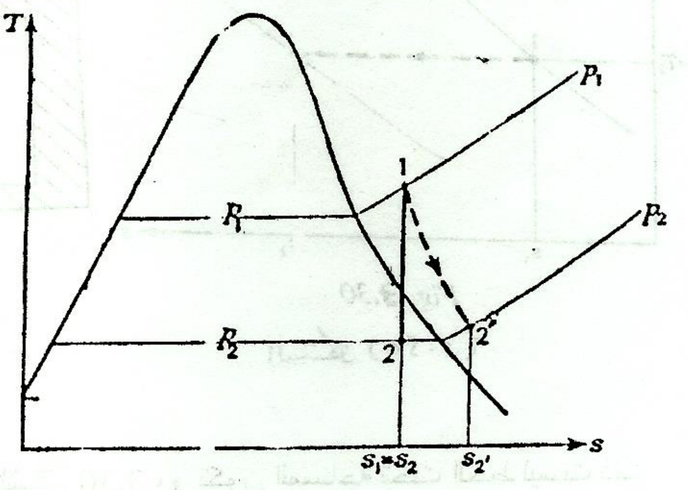


Fig. 3.31

الشكل (3.31)

مثال 3.13 :-

فى توربينة هواء يتمدد الهواء من 6.8 bar و 430^{o} C الى 1.013 bar و 150^{o} C.
يمكن إفتراض أن الفقد الحرارى من التوربينة يكون متغيراً يحيث يتم تجاهله . وضّح أن الإجراء يكون لاإنعكاسياً ، و أحسب التغير فى القصور الحرارى لكل kg من الهواء.

بما أنه تم تجاهل الفقد الحرارى ، فإن الإجراء يكون كاظماً للحرارة . لإجراء كاظم للحرارة إنعكاسى لغاز مثالى ، بإستخدام المعادلة 2.21،

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

$$i.e.\ \frac{703}{T_2}=\left(\frac{6.8}{1.013}\right)^{(1.4-1)/1.4}$$

حيث $T_1 = 430+273 = 703\ K$)

$$i.e.\ T_2=\frac{703}{6.71^{0.286}}=\frac{703}{1.724}=408\,K\ =408-273=\underline{135}^{o}C$$

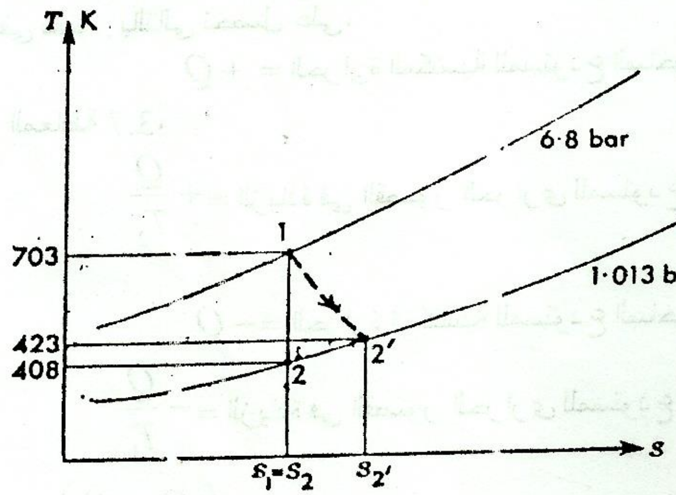


Fig. 3.33

الشكل(3.33)

لكن درجة الحرارة الفعلية تكون مساوية ل 150^{o} C عند الضغط 1.013 bar ، بالتالى يكون الإجراء لاإنعكاسياً . يُوضح الإجراء ب 1 الى $2'$ فى الشكل رقم 3.33 ؛ يتم أيضاً توضيح الإجراء ثابت القصور الحرارى ب 1 الى 2 . من غير الممكن أن يكون الإجراء 1 الى $2'$ إنعكاسياً ، لأنه فى تلك الحالة ستُمثل المساحة نحن الخط 1 - $2'$ سريان الحرارة و يكون كاظماً للحرارة .

يمكن إيجاد القصور الحرارى ، $s_2 - s_1$ بإعتبار إجراءاً ثابتاً للضغط إنعكاسياً بين 2 و $2'$.
بالتالى من المعادلة 3.6 $ds = dQ/T$ و عند ضغط ثابت ل 1 kg من غاز مثالى نحصل على $dQ = c_p dT$ ، عليه ،

$$s_2 - s_1 = \int_2^{2'} \frac{c_p\, dT}{T} + R\int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = cp \log_e \frac{T_{2'}}{T_2}$$

$$= 1.005 \log_e \frac{423}{408} = \underline{0.0355}\ kj/kgK$$

i.e. الزيادة فى القصور الحرارى $= s_2' - s_1 = \underline{0.0355}\ kj/kgK$

الآن إعتبر حالة عندما يكون هنالك نظاماً غير معزول حرارياً من بيئته المحيطة . يمكن للقصور الحرارى لمثل هذا النظام أن يزيد ، ينقص، أو يبقى كما هو، إعتماداً على الحرارى العابرة للحد. على أى حال ، إذا إستطال الحد ليشمل مصدر أو غاطس الحرارة الذى يكون معه النظام فى إتصال ، بالتالى فإن مستودعاً ساخناً عند T_1 و مستودعاً بارداً عند T_2 ، و إفترض أن المستودعان معزولان حرارياً من البيئة المحيطة كما فى الشكل 3.31 . إجعل Q يكون سريان الحرارة من المستودع الساخن الى البارد . يكون هنالك إنحداراً مستمراً لدرجة الحرارة من T_1 الى T_2 بين النقاط A و B ، و يمكن إفتراض أن الحرارة تنتقل بإنعكاسية من المستودع الساخن الى النقطة A ، و من النقطة B الى المستودع البارد . سيتم إفتراض أن درجة الحرارة لكل مستودع تبقى ثابتة . بالتالى نحصل على،

الحرارة المكتسبة للمستودع الساخن $= +Q$

بالتالى من المعادلة 3.7،

الزيادة فى القصور الحرارى للمستودع البارد $= +\dfrac{Q}{T_2}$

أيضاً ،

الحرارة المكتسبة للمستودع الساخن $= -Q$

$\therefore$ الزيادة فى القصور الحرارى للمستودع الساخن $= -\dfrac{Q}{T_1}$

i.e. صافى الزيادة فى القصور الحرارى $\Delta s = \left(\dfrac{Q}{T_2} - \dfrac{Q}{T_1}\right)$

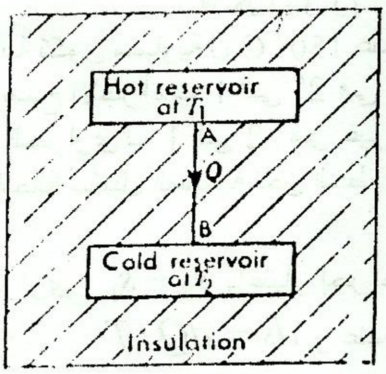


Fig. 3.34

الشكل(3.34)

بماأن $T_1 > T_2$ ، يُلاحظ أن Δs تكون موجبة ، و بالتالى يجب أن يزيد القصور الحرارى للنظام. فى الحد عندما يكون الفرق فى درجة الحرارة صغير جداً ، بالتالى $\Delta s = 0$. هذا يؤكد مبدأ أن القصور الحرارى لنظام معزول يجب إما أن يزيد أو يبقى كما هو .

لقد تم ذكر الحكم (ج) للإنعكاسية كما يلى:

يجب أن يكون فرق درجة الحرارة بين النظام و بيئته المحيطة صغيراً جداً أثناء الإجراء الإنعكاسى.

فى المثال عاليه ، عندما $T_1 > T_2$ ، فإن سريان الحرارة بين الوعائين يكون لاإنعكاسياً طبقاً للحكم عليه . هكذا يزيد القصور الحرارى للنظام عندما يكون إجراء سريان الحرارة لاإنعكاسياً بينما يبقى كما هو عندما يكون الإجراء إنعكاسياً . الزيادة فى القصور الحرارى هو مقياس اللاإنعكاسية . يمكن رسم الإجراءات فى المثال السابق على مخطط T – S كما موضح فى الشكل 3.35 . لقد تم تراكب الإجراءان على نفس المخطط. يُمثل الإجراء P – R إنتقال وحدات Q للحرارة من المستودع الساخن ، و تكون المساحة تحت P – R مساوية ل Q . و يُمثل الإجراء X – Y إنتقال وحدات Q للحرارة الى المستودع البارد ، و تكون المساحة تحت X - Y مساوية ل Q . تكون المساحة تحت P – R مساوية للمساحة تحت X – Y ، بالتالى يمكن الملاحظة من المخطط أن القصور الحرارى للوعاء البارد يجب دائماً أن يزيد بصورة أكبر من النقصان فى المحتوى الحرارى للمستودع الساخن . عليه فإن القصور الحرارى المتحد يجب أن يزيد . لاحظ ، بما أنه فى المثال السابق يكون كل من الإجراءان P – R و X – Y هما إنعكاسيان، بالتالى تحدث اللاإنعكاسية بين A و B. متى ما تم إنتقال للحرارة خلال فرق درجة حرارة كبير ، فإن الإجراء يكون لاإنعكاسياً و تكون هنالك زيادة فى القصور الحرارى للنظام و بيئته المحيطة.

فى حالات معينة (إجراءات معينة) يمكن أن تحدث اللاإنعكاسية فى البيئة المحيطة ، بالتالى فإن الإجراء يكون إنعكاسياً داخلياً ، و تكون المساحات على مخططات p – v و T – S قريبة جداً من الشغل المبذول و سريان الحرارة على الترتيب.

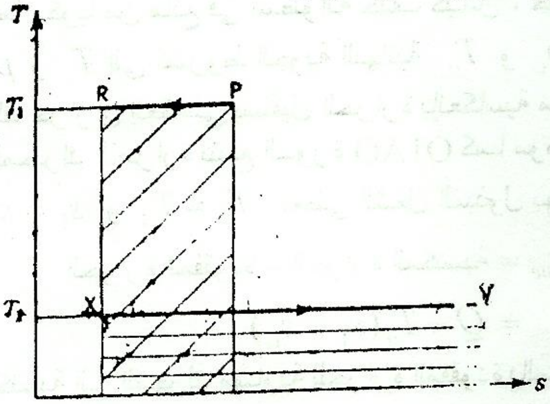


Fig. 3.35

الشكل(3.35)

فى معظم المسائل عندمل يتم إفتراض إجراءاً إنعكاسياً يكون المفهوم الضمنى هو الإنعكاسية الداخلية . عكس ذلك ، فإن معظم الإجراءات العملية التى يُقال أنها لاإنعكاسية ، هى لاإنعكاسية داخلية نتيجة لدويم مانع التشغيل كما فى المثال 3.13.

بالرجوع للشكل رقم 3.34 ، إذا تم وضع محرك حرارة بينياً بين المستودعين الساخن و البارد ، فإنه يمكن توليد بعض الشغل . يذكر القانون الثانى أن الحرارة لا يمكن أن تسرى بدون مساعدة من مستودع بارد الى مستودع ساخن ، عليه لتوليد شغل من كمية الطاقة Q ، بعد أن يتم إنتقالها الى المستودع البارد ، سيكون من الضرورى و جود مستودع ثالث عند درجة حرارة أدنى من

المستودع البارد . من الواضح أنه عندما يتم إنتقال كمية حرارة خلال فرق درجة حرارة كبير ، فإن فائدتها تصبح أقل ، و فى الحد عندما يتم إنتقال الحرارة لمستودع درجة الحرارة الأدنى الموجود بالتالى لا يمكن توليد أى شغل إضافى . عليه فإن اللاإنعكاسية لديها تأثير سئ على الطاقة المتاحة ، و يمكن إعتبار القصور الحرارى ليس كقياس فقط للاإنعكاسية بل أيضاً لإنحلال الطاقة . لاحظ أنه ، بمبدأ بقاء الطاقة ، فإن الطاقة لا يمكن تحطيمها ؛ بالقانون الثانى للديناميكا الحرارية ، يمكن فقط للطاقة أن تصبح أقل فائدة . تميل النظم طبيعياً لحالات ذات رتبة طاقة أدنى؛ عليه فإن أى نظام يتحرك لحالة ذات رتبة أعلى بدون إمداد خارجى للطاقة سيخرق القانون الثانى.

يمكن الملاحظة أن القانون الثانى يشتمل على إتجاه أو ميل للإستفادة من الطاقة. يكون الشغل أكثر فائدة من الحرارة ؛ كلما زادت درجة الحرارة لمستودع الطاقة ، كلما يكون مقدار الطاقة المتاح أكثر فائدة . بتطبيق الخاتمة الأخيرة لمحرك حرارة يمكن إستنتاج أنه ، لمستودع بارد معطى (e.g. الجو) ، كلما تكون درجة حرارة المستودع الساخن عالية ، ستكون الكفاءة الحرارية للمحرك الحرارى عالية.

3.6 - الإتاحية: Availability

المقدار الأقصى النظرى للشغل يمكن الحصول عليه من نظام عند حالة p_1 و T_1 عندما يعمل مع مستودع عند درجة حرارة و ضغط ثابتين T_o و p_o يُسمى بالإتاحة.

a/ نظم اللاسريان: Non- flow systems

إعتبر نظاماً مكوناً من مائع فى أسطوانة خلف كباس ، حيث يتمدد المائع إنعكاسياً من الشروط الأولية p_1 و T_1 الى الشروط الجوية النهائية T_o و p_o . تخَيل أيضاً أن النظام يعمل بالإقتران مع محرك حرارى إنعكاسى يستقبل الحرارة بإنعكاسية من المائع فى الأسطوانة بحيث أن مادة التشغيل لمحرك الحرارة يتبع الدورة O1AO كما موضح فى الأشكال 3.36 a و 3.36b ، حيث $s_1 = s_A$ و $T_o = T_A$. يُعطى الشغل المبذول بهذا المحرك ب:

$$W_{Engine} = \text{الحرارة المكتسبة} - \text{الحرارة المفقودة}$$

$$= Q - T_o(s_1 - s_o)$$

تكون الحرارة المكتسبة الى المحرك مساوية للحرارة المفقودة بالمائع الذى يؤدى الإجراء 1 الى صفر ، نحصل على ،

$$-Q = (u_o - u_1) + W_{Fluid}$$

$$i.e. \quad W_{Fluid} = (u_1 - u_o) - Q$$

عليه بجمع المعادلتين ،

$$W_{Fluid} + W_{Engine} = (u_1 - u_o) - T_o(s_1 - s_o)$$

يكون الشغل المبذول بالمائع على الكباس أقل من الشغل المبذول الكلى بالمائع، بما أن هنالك شغلاً مبذولاً على الجو يكون عند الضغط p_o (أنظر المسألة 2.24)

i.e. $\quad \text{الشغل المبذول على الجو} = p_o(v_o - v_1)$

بالتالى ،

الشغل المتاح الكلى $= (u_1 - u_o) - T_o(s_1 - s_o) - p(v_o - v_1)$

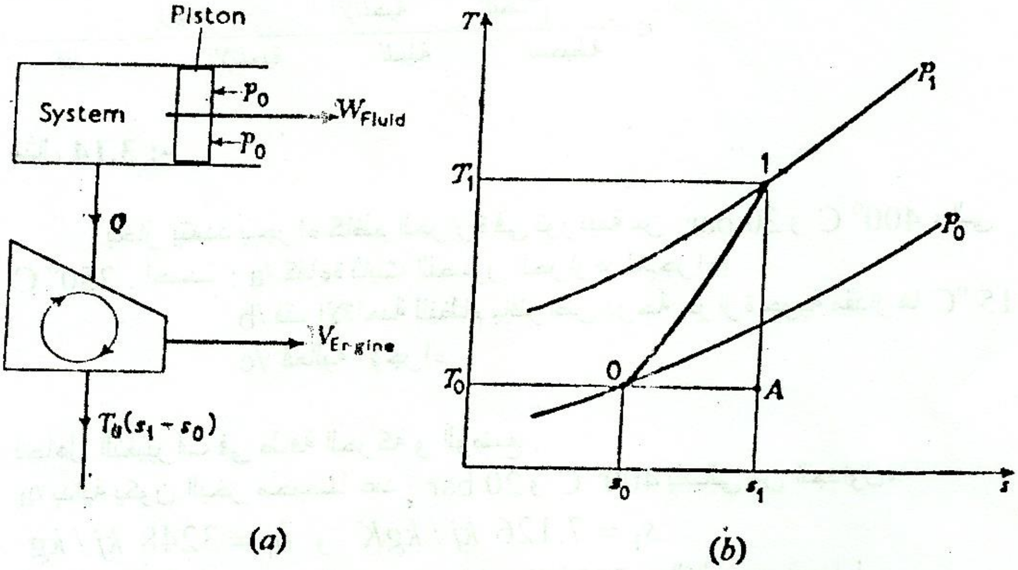
(ملحوظة عندما يؤدى مانعاً دورة كاملة فإن صافى الشغل المبذول على الجو يكون صغيراً)

$$W_{max} = (u_1 + p_o v_1 - T_o s_1) - (u_o p_o - T_o s_o)$$

$$\therefore W_{max} = a_1 - a_o$$

تُسمى الخاصية $a = u + p_o v - T_o s$ بالدالة المتاحة للاسريان

(non-flow availability function)



(a) (b)

Fig. 3.36

الشكل(3.36)

b/ نظم اليسريان المستقر: **Steady Flow Systems**

إجعل مانعاً يسرى بسرعة C_1 من مستودع يكون فيه الضغط و درجة الحرارة ثابتين عند p_1 و T_1 خلال جهاز لضغط جوى مقداره p_o . إجعل المستودع يكون عند إرتفاع z_1 من خط المرجعية ، الذى يمكن أخذه عند مخرج الجهاز، i.e. $z_o = 0$. للحصول على أقصى شغل من الجهاز فإن سرعة المخرج C_o ، يجب أن تكون صفراً . يمكن التوضيح كما فى (a) عاليه أن محركاً حرارياً إنعكاسياً يشتغل بين الحدود سيرفض مقداراً من الحرارة يعادل $T_o(s_1 - s_o)$ وحدة ، حيث T_o هى درجة الحرارة الجوية.

عليه نحصل على :

$$W_{max} = (h_1 + C_1^2 / 2 + z_1 g) - h_o - T_o(s_1 - s_o)$$

فى نظم عديدة للديناميكا الحرارية يتم تجاهل عناصر طاقة الحركة و الوضع.

$$W_{max} = (h_1 - T_o s_1) - (h_o - T_o s_o) = b_1 - b_o$$

تُسمى الخاصية $b = h - T_o s$ بالدالة المتاحة للسريان المستقر

steady flow availability function

الفعالية: Effectiveness

بدلاً من مقارنة إجراء بإجراء مثالى تخيلى، كما يُعمل فى حالة الكفاءة ثابتة القصور الحرارى كمثال ، من القياس الأفضل الفائدة من الإجراء هو مقارنة الخرج المستفاد من الإجراء بفقد الإتاحية لنظام . يُعطى الخرج المستفاد من نظام بزيادة الإتاحية للبيئة المحيطة.

$$\text{الفعالية} ، \in = \frac{\text{زيادة الإتاحية للبيئة المحيطة}}{\text{فقد الإتاحية للنظام}}$$

لإجراء إنضغاط أو تسخين تصبح الفعالية ،

$$\in = \frac{\text{زيادة الإتاحية للنظام}}{\text{فقد الإتاحية للبيئة المحيطة}}$$

مثال 3.14 :-

بخار يتمدد بإجراء كاظم الحرارة فى توربينة من 20 bar و 400^o C ، الى 4 bar ، 250^o C . أحسب : a/ كفاءة ثابت القصور الحرارى للإجراء؛

b/ فقد الإتاحية للنظام بإفتراض درجة حرارة جوية مقدارها $15\ ^oC$؛

c/ فعالية الإجراء.

تجاهل التغييرات فى طاقة الحركة و الوضع .

a/ بداية يكون البخر محمصاً عند 20 bar و 400^o C بالتالى من الجداول،

$$s_1 = 7.126\ kj/kgK \quad و \quad h_1 = 3248\ kj/kg$$

أخيراً يكون البخار محمصاً عند 4 bar ، 250^o C ، بالتالى من الجداول،

$$s_2' = 7.379\ kj/kgK \quad و \quad h_2' = 2965\ kj/kg$$

يُوضح الإجراء ك 1 الى $2'$ فى الشكل 3.37

$$s_1 = s_2 = 7.126\ \ kj/kgK$$

بالتالى بالإستكمال ،

$$h_2 = 2753 + \left(\frac{7.126 - 6.929}{7.172 - 2 - 6.929}\right)(2862 - 2753) = \underline{2841.4}\ kj/kg$$

كفاءة ثابت القصور الحرارى = شغل الخرج الفعلى / شغل ثابت القصور الحرارى

$$\frac{h_1 - h_2'}{h_1 - h_2} = \frac{3248 - 2965}{3248 - 2841.4} = \frac{283}{406.6} = \underline{69.6}\,\%$$

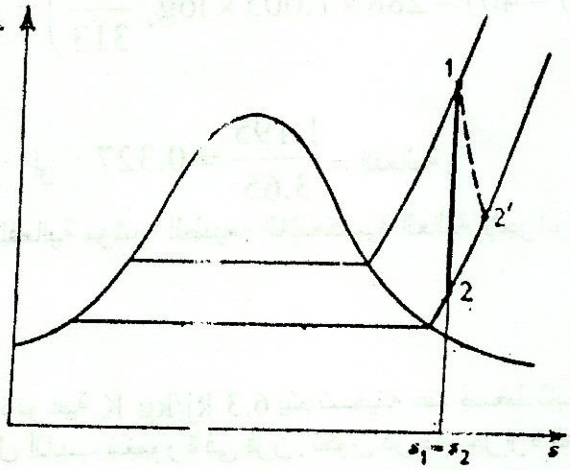
b/ فقد الإتاحية،

$$= b_1 - b_2' = h_1 - h_{2'} + T_o(s_{2'} - s_1)$$
$$= 283 + 288(7.379 - 7.126) = \underline{355.9}\ kj/kg$$

c/ الفعالية، $\in$ ،

$$\in = \frac{W}{b_1 - b_{2'}} = \frac{h_1 - h_{2'}}{b_1 - b_{2'}}$$

$$i.e. \quad \in = \frac{283}{355.9} = \underline{79.6}\ \%$$



الشكل(3.37)

مثال 3.15 :-

هواء عند 15^oC يتم تسخينه الى $40^o\ C$ بخلطه فى سريان مستقر مع كمية من هواء $90^o\ C$. مفترضاً أن إجراء الخلط يكون كاظماً للحرارة و متجاهلاً التغييرات فى طاقة الحركة و الوضع ، أحسب نسبة سريان الكتلة لهواء يكون بداية عند $90^o\ C$ الى تلك التى تكون بداية عند $15^o\ C$. أحسب أيضاً فعالية إجراء التسخين ، إذا كانت درجة الحرارة الجوية تساوى $15^o\ C$.

إجعل نسبة سريان الكتلة المكلوبة تكون y ؛ إجعل الهواء عند $15^o\ C$ يكون الجدول 1 ، و الهواء $90^o\ C$ يكون الجدول 2 ، ز من جدول الهواء المخلوط عند $40^o\ C$ يكون الجدول 3. بالتالى ،

$$c_p T_1 + y c_p T_2 = (1+y) c_p T_3$$

$$\text{أو} \quad y c_p (T_2 - T_1) = c_p (T_3 - T_1)$$

$$i.e. \quad (90-40) = 40-15$$

$$\therefore y = \frac{25}{50} = \underline{0.5}$$

إجعل النظام المعتبر يكون جدولاً من الهواء لوحدة الكتلة ، يتم تسخينه من $15^o\ C$ الى $40^o\ C$.

$$\text{زيادة الإتاحية للنظام} = b_3 - b_1 = (b_3 - b_1) - T_o(s_3 - s_1)$$

$$1.005(40-15) - 288(s_3 - s_1)$$

$$\text{ايضا ،} \quad s_3 - s_1 = c_p \log_e \frac{T_3}{T_1} = 1.005 \log \frac{313}{288} = \underline{0.0831}\ kj/kgK$$

$$\therefore \quad \text{زيادة الإتاحية للنظام} = 1.005 \times 25 - 288 \times 0.0831$$

$$= \underline{1.195}\ kj/kg$$

النظام ، الذى هو الهواء المراد تسخينه ، يكون محاطاً بجدول الهواء المراد تبريده . عليه ، فإن فقد الإتاحية للبيئة المحيطة يُعطى ب ،

$$y(b_2 - b_1)$$

i.e. فقد الإتاحية للبيئة المحيطة $= 0.5\{(h_2 - h_3) - T_o(s_2 - s_3)\}$

$$= 0.5\left(1.005(90-40) - 288 \times 1.005 \times \log_e \frac{363}{313}\right) = \underline{3.65}\ kj/kg$$

عليه ،

الفعالية $= \dfrac{1.195}{3.65} = 0.327$ أو $\underline{32.7}\,\%$

يكون الرقم الصغير للفعالية مؤشراً للطبيعة اللاإنعكاسية العالية لإجراء الخلط.

مثال 3.16 :-

سائل بحرارة نوعية 6.3 kj/kg K يتم تسخينه عند ضغط ثابت تقريباً من 15^o C الى 70^o C بتمريره خلال أنابيب مغمورة فى فرن. تكون درجة حرارة الفرن ثابته عند 1400^o C . أحسب الفعالية لإجراء التسخين عندما تكون درجة الحرارة الجوية مساوية ل 10^o C.

زيادة الإتاحية للسائل ،

$$= b_2 - b_1 = (h_2 - h_1) + T_o(s_2 - s_1)$$

$$i.e.\ b_2 - b_1 = 6.3(70-15) - 288 \times 6.3 \log_e \frac{343}{288} = \underline{34.7}\ kj/kg$$

الآن درجة الحرارة الملفوظة بواسطة الفرن تكون مساوية للحرارة المكتسبة للسائل ، $(h_2 - h_1)$. إذا تم إمداد هذه الكمية من الحرارة الى محرك حرارة. يشتغل على دورة كارنوت فستكون كفاءته الحرارية $\left(1 - \dfrac{T_O}{1400+273}\right)$

عليه فإن الشغل الذى يمكن الحصول عليه من محرك حرارة يعطى بحاصل ضرب الكفاءة الحرارية و الحرارة المكتسبة ،

$$(h_1 - h_2)\left(1 - \frac{283}{1673}\right)$$

الشغل الممكن من محرك حرارة هو قياس لفقد الإتاحية للفرن.

i.e. فقدان الإتاحية للبيئة المحيطة $= 6.3(70-15)\left(1 - \dfrac{283}{1673}\right)$

$$= \underline{288}\ kj/kg$$

بالتالى ،

الفعالية $= \dfrac{34.7}{288} = 0.121$ أو $\underline{12.1}\%$

تعكس القيمة المنخفضة جدا للفعالية اللاإنعكاسية لإنتقال الحرارة خلال فرق درجات حرارة كبير .إذا إذا كانت درجة حرارة الفرن أصغر بكثير فسيكون الإجراء أكثر فعالية بالرغم من أن الحرارة المنتقلة للسائل ستبقى نفسها.

مسائل

-1 1 kg من بخار عند 20 bar ، كسر جفاف 0.9 ، يتم تسخينه إنعكاسياً بضغط ثابت الى درجة حرارة 300^{o} C . أحسب الحرارة المكتسبة ، التغير فى القصور الحرارى ، و وضح الإجراء على مخطط T – S ، مشيراً للمساحة التى تُمثل سريان الحرارة.

Ans.(415 kj/kg ; 0.8173 kj/kg K)

-2 بخار عند 0.05 bar ، 100^{o} C يتم تكثيفه بالكامل بإجراء إنعكاسى ثابت الضغط . أحسب الحرارة التى يتم إزالتها لكل kg من البخار ، و التغير فى القصور الحرارى . أرسم الإجراء على مخطط T – S و ظلل المساحة التى تُمثل سريان الحرارة.

Ans.(2550 kj/kg ; 8.292 kj/kg K)

-3 0.005 kg من بخار عند 10 bar ، كسر جفاف 0.84، يتم تسخينه إنعكاسياً فى وعاء صلد حتى يكون الضغط مساوياً ل 20 bar. أحسب التغير فى القصور الحرارى و الحرارة المكتسبة. وضّح المساحة التى تُمثل الحرارة المكتسبة على مخطط T – S .

Ans.(0.0704 kj/kg K ; 36.85 kj)

-4 أسطوانة صلدة تحوى $0.006\ m^3$ من نايتروجين (بكتلة جزيئية 28 kg/kmol) عند 1.04 bar ، 15^{o} ، يتم تسخينه إنعكاسياً حتى تصل درجة الحرارة الى 90^{o} C . أحسب التغير فى القصور الحرارى و الحرارة المكتسبة . أرسم الإجراء على مخطط T – S . خذ الأس ثابت القصور الحرارى، γ ، للنايتروجين ك 1.4، و أفترض أن النايتروجين يكون غازاً مثالياً.

Ans.(0.00125 kj/K ; 0.407 kj)

-5 $1\ m^3$ من هواء يتم تسخينه إنعكاسياً بضغط ثابت من 15^{o} C الى 300^{o} C ، و من بعد يتم تبريده إنعكاسياً بحجم ثابت الى درجة حرارته الإبتدائية. يكون الضغط الإبتدائى مساوياً ل 1.03 bar . أحسب صافى سريان الحرارة و التغير فى القصور الحرارى ، و أرسم الإجراءات على مخطط T – S .

Ans.(101.5 kj ; 0.246 kj/K)

-6 1 kg من بخار يؤدى إجراءاً إنعكاسياً ثابتاً درجة الحرارة من 20 bar ، 250^{o} C الى ضغط 30 bar . أحسب سريان الحرارة ، ذاكراً ما إذا كان مكتسباً أم مفقوداً ، و أرسم الإجراء على مخطط T – S .

Ans.(- 135 kj/kg)

الفصل الرابع

4.0 دورة المحرك الحرارى
The Heat Engine Cycle

فى هذا الفصل يتم مناقشة دورة المحرك الحرارى بالتفصيل و أيضاً إعتبار دورات قدرة الغاز. يمكن ملاحظة أن هنالك دورة نظرية مثالية بكفاءة أكبر مما نتخيل ؛ تسمى هذه الدورة بدورة كارنوت (Carnot Cycle) . و تكون الكفاءة الحرارية القصوى الممكنة لمحرك حرارى فى الواقع العملى هى فقط حوالى نصف تلك لدورة كارنوت النظرية المثالية . بين نفس حدود درجات الحرارة . هذه تكون نتيجة للالإنعكاسيات فى الدورة الفعلية، وللإنحراف عن الدورة المثالية التىيتم عملها لأسباب متنوعة . يتم إختبار محطة القدرة عملياً بالتوافق بين الكفاءة الحرارية و عوامل عديدة مثل حجم المحطة لمتطلبات قدرة معطاة ، التعقيدات الميكانيكية ، تكلفة التشغيل ، و التكلفة الرأسمالية.

4.1 دورة كارنوت: The Carnot Cycle

يمكن التوضيح من القانون الثانى للديناميكا الحرارية أنه ليس هنالك محرك حرارى يمكن أن يكون أكبر كفاءة من محرك حرارى إنعكاسى يعمل بين نفس حدود درجة الحرارة. كارنوت الذى هو مهندس فرنسى ، أوضح فى ورقة كُتبت فى العام 1824 أن الدورة الممكنة الأكثر كفاءة هى تلك التى يتم فيها إمداد جميع الحرارة المكتسبة عند درجة حرارة مفردة مُثبتة ، و يتم فيها رفض جميع الحرارة المفقودة عند درجة الحرارة موصلان بإجراءين كاظمى للحرارة. بماأن جميع الإجراءات تكون إنعكاسية ، بالتالى فإن الإجراءات الكاظمة للحرارة فى الدورة تكون أيضاً ثابتة القصور الحرارى. من الأكثر ملائمة تمثيل الدورة على مخطط T – S كما هو موضح فى الشكل 4.1.

الإجراء 1 الى تمدداً ثابتاً للقصور الحرارى من T_1 الى T_2 .

الإجراء 2 الى 3 فقداً للحرارة بثبات درجة الحرارة.

الإجراء 3 الى 4 يكون إنضغاطاً ثابتاً للقصور الحرارى من T_2 الى T_1 .

الإجراء 4 الى 1 يكون إمداداً للحرارة بثبات درجة الحرارة.

تكون الدورة مستقلة تماماً عن مادة التشغيل المستخدمة.

الكفاءة الحرارية لمحرك حرارى المُعرفة فى المقطع 3.1، أُعطيت بالمعادلة 3.3

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

فى دورة كارنوت بالرجوع للشكل 4.1 ، يمكن ملاحظة أن الحرارة المكتسبة Q_1 ، تعطى بالمساحة 41BA4 ،

$$\text{i.e.} \quad Q_1 = \text{المساحة } 41BA4 = T_1 (s_B - s_A)$$

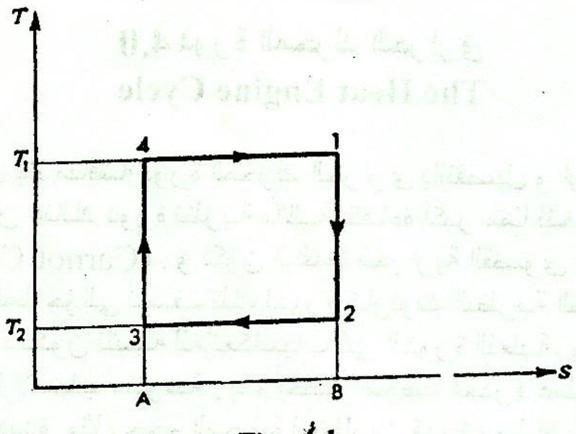


Fig. 4.1

الشكل(4.1)

بالمثل فإن الحرارة المفقودة ، Q_2 ، تعطى بالمساحة 23AB2،

$$\text{i.e.} \quad Q_2 = \text{المساحة } 23AB2 = T_2(s_B - s_A)$$

بالتالى نحصل على ،

$$\text{الكفاءة الحرارية لدورة كارنوت ،} \ \eta_{carnot} = 1 - \frac{T_2(s_B - s_A)}{T_1(s_B - s_A)}$$

$$\text{i.e.} \quad \eta_{carnot} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \qquad \text{\_\_\_\_\_(4.1)}$$

إذا كان هنالك غاطساً متوفراً للفقد الحرارى عند درجة حرارة مثبتة T_2 (e.g. إمداد ضخم لماء التبريد) ، بالتالى فإن النسبة T_2/T_1 ستقل كلما تزيد درجة حرارة المصدر T_1 . من المعادلة 4.1 يمكن ملاحظة انه كلما زادت T_2/T_1 ، تزيد بالتالى الكفاءة الحرارية . بالتالىلدرجة حرارة أدنى مثبتة لفقد الحرارة ، فإن درجة الحرارة العليا التى يتم عندها إمداد الحرارة يجب عملها أكبر مما يمكن . الكفاءة الحرارية الممكنة القصوى بين درجتى حرارة هى تلك لدورة كارنوت.

يمكن إيجاد شغل الخرج لدورة كارنوت ببساطة من مخطط T – S . من القانون الأول ،

$$\Sigma Q = \Sigma W$$

عليه ، فإن شغل الخرج للدورة تُعطى ب

$$W = Q_1 - Q_2$$

بالتالى لدورة كارنوت ، بالرجوع للشكل 4.1 ،

$$\text{i.e.} \quad W_{carnot} = \text{المساحة } 12341 = (T_1 - T_2)(s_B - s_A)$$

مثال 4.1 :-

ماهى الكفاءة النظرية الممكنة القصوى لمحرك حرارى التى تعمل مع مستودع ساخن لغازات فرن عند 2000^o C عندما يكون ماء التبريد متاحاً عند 10^o C؟

من المعادلة 4.1 ،

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{10 + 273}{2000 + 273} = 1 - \frac{283}{2273}$$

i.e. الكفاءة القصوى الممكنة $= 1 - 0.1246 = \underline{0.8754}$

أو $\underline{87.54}$ %

يجب ملاحظة أن نظاماً عملياً يعمل بين نفس درجات الحرارة (e.g. محطة توليد بخار) سيمتلك كفاءة حرارية بحوالى % 30 . يكون التناقص (التعارض) نتيجة للفقودات الناجمة من اللاإنعكاسية فى المحطة الفعلية ، و أيضاً بسبب الإنحرافات عن دورة كارنوت المثلية الى تُعمل لأسباب عملية متنوعة.

من الصعوبة بمكان عملياً عمل نظام يستقبل و يفقد الحرارة عند درجة حرارة ثابتة. البخار الرطب هو مادة التشغيل الوحيدة التى يمكن أن تؤدى هذا بملائمة ، بما أنه لبخار رطب فإن درجة الحرارة و الضغط يظلا ثابتين كلما يتم إمداد أو فقد الحرارة الكامنة . دورة كارنوت لبخار رطب تكون موضحة فى الشكل رقم 4.2. بالرغم من أن هذه الدورة هى الأكفاء الممكنة لبخار ، فإنها لا تستخدم فى محطة البخار. تعرف الدورة النظرية و التى يتم عليها تأسيس دورات البخار بدورة رانكن.

4.2 مقياس درجة الحرارة المطلقة : Absolute temperature scale

فى الفصول السابقة لقد تم إفتراض مقياساً لدرجة الحرارة مؤسساً على ثيرموميتر الغاز المثالى. بإستخدام القانون الثانى للديناميكا الحرارية من الممكن تأسيس مقياساً لدرجة الحرارة يكون مستقلاً عن مادة التشغيل .

لأى محرك حرارى من المعادلة 3.3،

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \qquad \_\_\_\_(4.2)$$

أيضاً فإن الكفاءة لمحرك يشتغل على دورة كارنوت تعتمد فقط على درجة الحرارة للمستودعين الساخن و البارد . بترميز درجة الحرارة على اساس مقياس إعتباطى ب X ، نحصل على،

$$\eta = \phi(X_1, X_2) \qquad \_\_\_\_(4.3)$$

(حيث ϕ هى دالة و X_2, X_1 هما درجتا الحرارة للمستودعين البارد و الساخن)

بتوحيد المعادلتين نحصل على،

$$\frac{Q_2}{Q_1} = F(X_1, X_2)$$

(حيث F دالة جديدة)

هنالك عدد ضخم ممكن لمقاييس درجة الحرارة يكون مستقلاً عن مادة التشغيل . يمكن إختيار أى مقياس تشغيل بالإختيار المناسب لقيمة الدالة F . يمكن إختبار الدالة بحيث أن

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{X_2}{X_1} \qquad \_\_\_\_(4.4)$$

أيضاً من المعادلة 4.1، نحصل على ،

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

بالتالى بإستخدام المعادلة 4.2،

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

أو $$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \qquad \text{\_\_\_\_\_\_}(4.5)$$

بمقارنة المعادلات 4.4 و 4.5 يمكن الملاحظة أن درجة الحرارة X تكون مكافئة لدرجة الحرارة T . عليه بالإختيار المباسب للدالة F ، يتم جعل مقياس درجة الحرارة المثالى مكافئاً للمقياس المؤسس على ثيرموميتر الغاز المثالى.

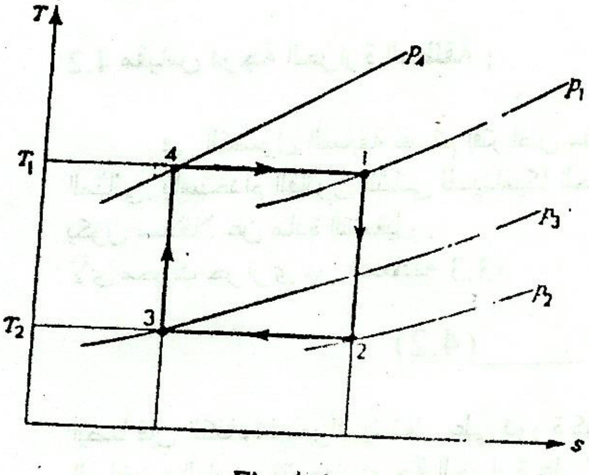


Fig. 4.3

الشكل(4.3)

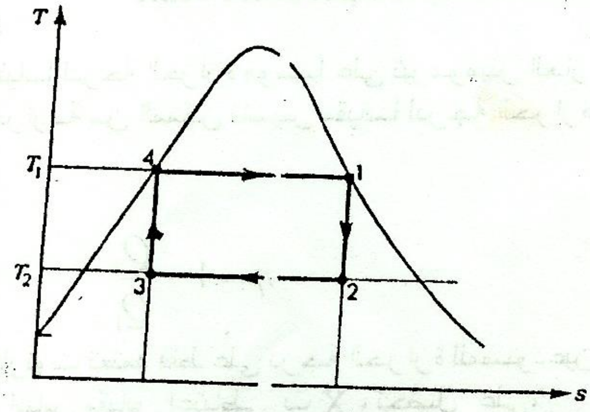


Fig. 4.2

الشكل(4.2)

4.3 دورة كارنوت لغاز مثالى:

The Carnot cycle for a perfect gas

يتم توضيح دورة كارنوت على مخطط T – S فى الشكل 4.3. لاحظ أن ضغط الغاز يتغير بإستمرار من p_4 الى p_1 أثناء إمداد الحرارة بثبات درجة الحرارة ، و من p_2 الى p_3 أثناء فقد الحرارة بثبات درجة الحرارة. من الملائم أكثر عملياً تسخين غازٍ بضغط ثابت تقريباً أو بحجم ثابت ، بالتالى من الصعوبة بمكان محاولة تشغيل محرك حرارى فعلى على دورة كارنوت عملياً بإستخدام غازٍ كمادة تشغيل . هنالك سبب هام آخر لعدم محاولة إستخدام دورة كارنوت عملياً يوُضح برسم الدورة على مخطط p – v ، كما فى الشكل 4.4. يعطى صافى الشغل للدورة بالمساحة 12341. تكون هذه كمية صغيرة مقارنة بإجمالى الشغل لإجراءات التمدد للدورة المعطاة بالمساحة 41BA4 . شغل إجراءات الإنضغاط (.i.e الشغل المبذول على الغاز) يُعطى بالمساحة 234AB2 .تُسمى نسبة صافى شغل الخرج الى إجمالى شغل الخرج بنسبة الشغل (Work ratio) . بالرغم من أن الكفاء الحرارية العالية لدورة كارنوت ، فإنها تمتلك نسب شغل منخفضة.

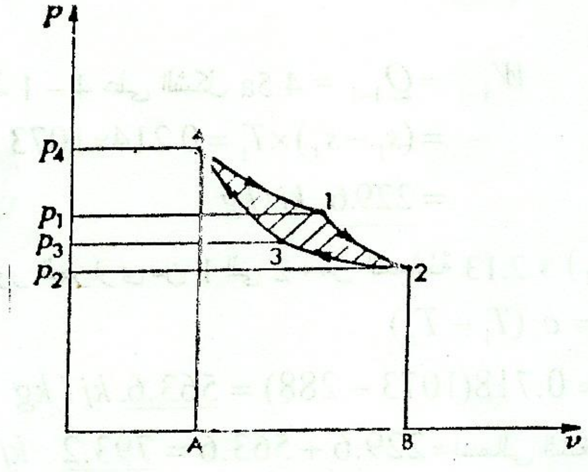


Fig. 4.4

الشكل(4.4)

مثال 4.2 :-

إذا كان هنالك مستودع ساخن عند درجة حرارة مقداوها 800^o C و مستودع بارد عند درجة حرارة 15^o C . أحسب الكفاءة الحرارية و نيبة الشغل لدورة كارنوت بإستخدام الهواء للتشغيل ، إذا كان الضغوط القصوى فى الدورة هما 210 bar و 1 bar.

يتم توضيح الدورة على مخطط T – S و p – v فى الأشكال 4.5a و 4.5b على الترتيب . بإستخدام المعادلة 4.1،

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{15+273}{300+273} = 1 - 0.268 = 0.732$$

أو $\underline{73.2\%}$

لكى يتم إيجاد شغل الخرج و نسبة الشغل الكلى من الضرورى إيجاد التغير فى القصور الحرارى، $(s_1 - s_4)$ ،

لإجراء ثابت الحرارة من 4 الى A ، مستخدما المعادلة 3.12،

$$(s_A - s_4) = R\log_e \frac{p_4}{p_2} = 0.287\log_e \frac{210}{1} = \underline{1.535}\, kj/kgK$$

عند ضغط ثابت من A الى 2 ، نحصل على ،

$$(s_A - s_2) = c_p \log_e \frac{T_1}{T_2} = 1.005\log_e \frac{1073}{288} = \underline{1.321}\, kj/kgK$$

$$\therefore s_1 - s_4 = 1.535 - 1.321 = \underline{0.214}\, kj/kgK$$

بالتالى

$$\text{صافى شغل الخرج} = (T_1 - T_2)(s_1 - s_2) = \text{المساحة} \quad 12341$$

$$= (1073 - 288) \times 0.214 = \underline{168}\ kj/kgK$$

صافى الشغل للتمدد = الشغل المبذول 4 الى 1 + الشغل المبذول 1 الى 2

من المعادلة 2.12، لإجراء ثابت درجة الحرارة ، $Q = W$

i.e. $W_{4-1} = Q_{4-1} = 4.5\text{a}$ على الشكل $4-1$ المساحة تحت الخط

$$= (s_1 - s_4) \times T_1 = 0.214 \times 1073$$

$$= \underline{229.6} \quad kj/kg$$

لإجراء ثابت القصور الحرارى من 1 الى 2 ، من المعادلة 2.13 ، $W = (u_1 - u_2)$

$$W_{1-2} = c_v (T_1 - T_2)$$

$$= 0.718(1073 - 288) = \underline{563.6} \quad kj/kg$$

$\therefore$ إجمالى الشغل $= 229.6 + 563.6 = \underline{793.2} \quad kj/kg$

i.e. نسبة الشغل $= \dfrac{\text{صافى الشغل}}{\text{إجمالى الشغل}} = \dfrac{168}{793.2} = \underline{0.212}$

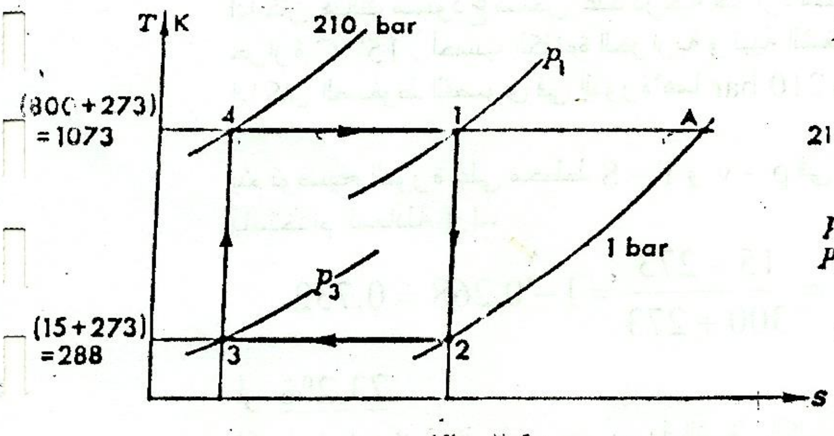


Fig. 4.5a

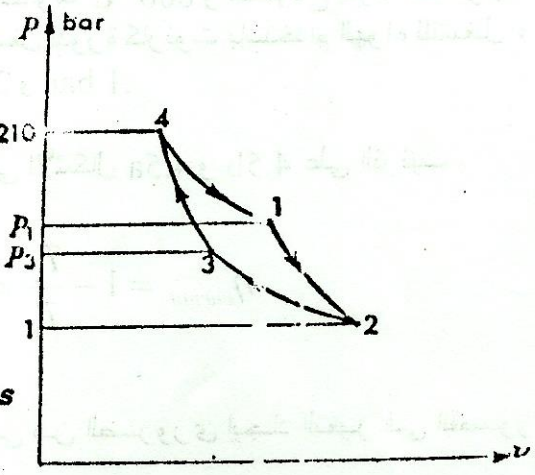


Fig. 4.5b

الشكل (4.5)

4.4 دورة الضغط الثابت:-

The Constant Pressure Cycle

فى هذه الدورة فإن إجراءات إمداد الحرارة و فقد الحرارة تحدث إنعكاسياً بضغط ثابت . و تكون إجراءات التمدد و الإنضغاط ثابتة القصور الحرارى . يتم توضيح الدورة على مخطط T – S و p – v فى الأشكل 4.6a و 4.6b . أستخدمت هذه الدورة فى إحدى الأوقات كأساس مثالى لمحرك تردد لهواء ساخن، و تُسمى بدورة جول أو بريتون (Joule or Brayton cycle) . فى أيامنا الحاضرة ، فإن هذه الدورة هى الدورة المثالية لوحدة توربينة غاز مغلقة الحلقة . هنالك مخططاً بسيطاً للمحطة موضحاً فى الشكل 4.7 ، بأرقام مناظرة لتلك الأشكال 4.6a و 4.6b. تكون مادة التشغيل هى الهواء الذى ينساب بسريان مستقر حول الدورة، بالتالى، بتجاهل تغييرات السرعة ، و بتطبيق معادلة طاقة السريان المستقر لكل جزء من الدورة ، نحصل على ،

شغل الدخل ال الضاغط $= (h_2 - h_1) = c_p (T_2 - T_1)$

شغل الخرج من التوربينة $= (h_3 - h_4) = c_p (T_3 - T_4)$

الحرارة المكتسبة فى السخان ، $Q_1 = (h_3 - h_2) = c_p(T_3 - T_2)$

الحرارة المفقودة فى المبرد ، $Q_2 = (h_4 - h_1) = c_p(T_4 - T_1)$

بالتالى من المعادلة 3.3 ،

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

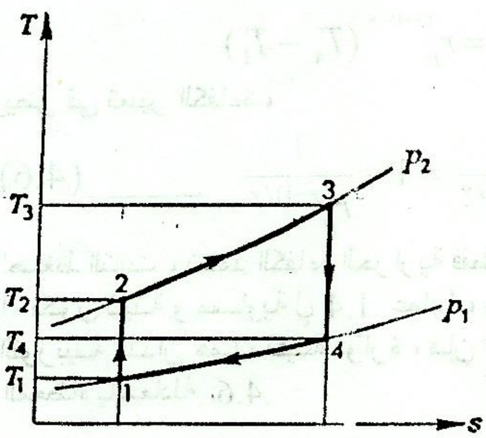


Fig. 4.6a

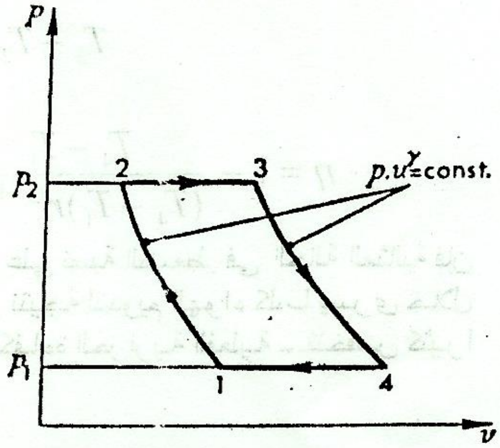


Fig. 4.6b

الشكل(4.6b)

الشكل(4.6a)

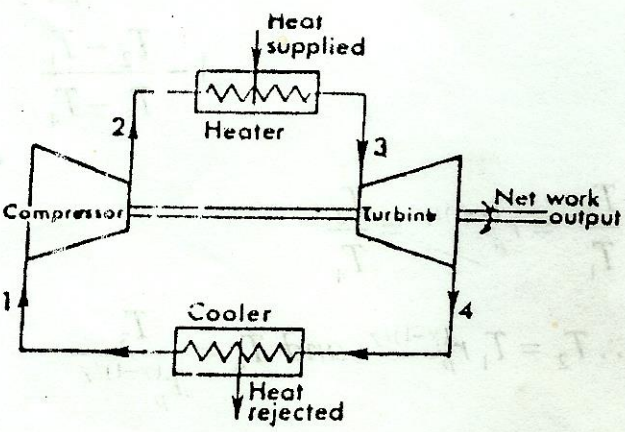


Fig. 4.7

الشكل(4.7)

الآن بما أن الإجراءات 1 الى 2 و 3 الى 4 هما ثابتان القصور الحرارى بين نفس الضغوط p_2 و p_1 ، مستخدماً المعادلة 2.21،نحصل على ،

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} = \frac{T_3}{T_4} = r_p^{(\gamma-1)/\gamma}$$

(حيث r_p هى نسبة الضغط $\frac{p_2}{p_1}$)

بالتالى ،

$$T_3 = T_4\, r_p^{(\gamma-1)/\gamma} \quad \text{و} \quad T_2 = T_1\, r_p^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$T_3 - T_2 = r_p^{(\gamma-1)/\gamma}\,(T_4 - T_1)$$

بالتالى بالتعويض فى تعبير الكفاءة ،

$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{(T_4 - T_1)\, r_p^{(\gamma-1)/\gamma}} = 1 - \frac{1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}} \qquad \_\_\_\_\_\_(4.6)$$

عليه لدورة الضغط الثابت ، تعتمد الكفاءة الحرارية فقط على نسبة الضغط. فى الحالة المثالية فإن قيمة γ للهواء تكون ثابتة و مساوية ل 1.4. عملياً ، و نتيجة لتدويم الهواء كلما يسرى خلال الضاغط و التوربينة اللذان هما ماكينة دوّارة ، فإن الكفاءة الحرارية الفعلية ستنخفض كثيراً مقارنة بتلك المعطاة بالمعادلة 4.6.

نسبة الشغل لدورة الضغط الثابت يمكن إيجادها كمايلى:-

$$\text{نسبة الشغل} = \frac{c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T_3 - T_4)}$$

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

الآن كما في سابقه ،

$$\frac{T_2}{T_1} = r_p^{(\gamma-1)/\gamma} = \frac{T_3}{T_4}$$

$$\therefore T_2 = T_1\, r_p^{(\gamma-1)/\gamma} \quad and \quad T_4 = \frac{T_3}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}}$$

بالتالى بالتعويض ،

$$\text{نسبة الشغل} = 1 - \frac{T_1\left(r_p^{(\gamma-1)/\gamma} - 1\right)}{T_3\left[1 - \left(1 / r_p^{(\gamma-1)/\gamma}\right)\right]}$$

$$= 1 - \frac{T_1}{T_3}\left(\frac{r_p^{(\gamma-1)/\gamma} - 1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma} - 1}\right) r_p^{(\gamma-1)/\gamma}$$

i.e. $$\text{نسبة الشغل} = 1 - \frac{T_1}{T_3}\, r_p^{(\gamma-1)/\gamma} \qquad \_\_\_\_\_\_(4.7)$$

يمكن الملاحظة من المعادلة 4.7 أن نسبة الشغل لا تعتمد فقط على نسبة الشغل بل أيضاً على نسبة درجات الحرارة معطاة ، T_1 ، فإن درجة الحرارة القصوى ، T_3 ، يجب جعلها أكبر ما يمكن للحصول على نسبة شغل عاليه.
لوحدة توربينة غاز مفتوحة الحلقة فإن الدورة الفعلية لا تكون تقريباً جيّدة لدورة الضغط الثابت المثالية ، بما أن الوقود يتم حرقه بالهواء ، و يتم سحب شحنة طازجة بإستمرار فى الضاغط . بالرغم من ذلك تُعطى الدورة المثالية أساساً جيّداً للمقارنة و فى حسابات كثيرة التوربينة غاز ذات حلقة مفتوحة مثالياً يتم تجاهل تأثيرات كتلة الوقود و التغير فى مائع التشغيل.

مثال 4.3 :-

فى وحدة توربينة غاز يتم سحب الهواء عند ضغط 1.02 bar و 15^{o} C ، و يتم إنضغاطه الى 6.12 bar . أحسب الكفاءة الحرارية و نسبة الشغل لدورة الضغط الثابت المثالية ، عندما تكون درجة الحرارة القصوى محدودة ب 800^{o} C .

يتم توضيح الدورة المثالية على مخطط T – S فى الشكل 4.8 ، من المعادلة 4.6،

الكفاءة الحرارية ، $\eta = 1 - \dfrac{1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}}$

$$\text{i.e.}\quad \eta = 1 - \frac{1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}} = 1 - \left(\frac{1.02}{6.12}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} = 1 - \frac{1}{6^{0.286}} = 1 - 0.598$$

∴ الكفاءة الحرارية = $\underline{0.402}$ أو $\underline{40.2\,\%}$

يُعطى صافى الشغل للدورة بالشغل المبذول بالتوربينةناقصاً الشغل المبذول على الهواء فى الضاغط.

i.e. صافى الشغل $= c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1)$

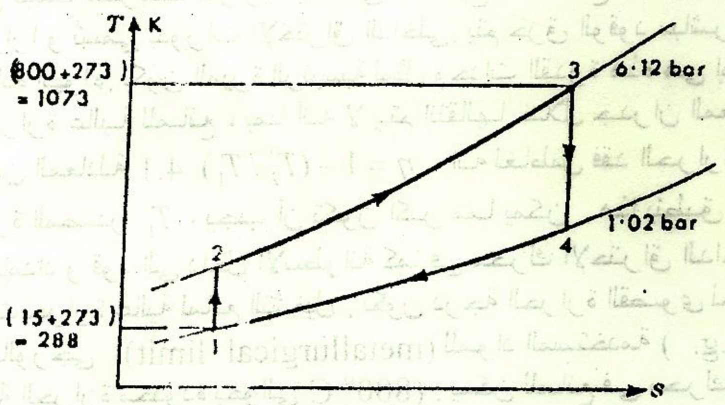


Fig. 4.8

الشكل(4.8)

من المعادلة 2.21

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} = \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{6.12}{1.02}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} = 6^{0.286} = \underline{1.67}$$

$$\therefore T_2 = 1.67 \times T_1 = 1.67 \times 288 = \underline{481}\ K$$

(حيث $T_1 = 15 + 273 = 288\,K$)

$$T_4 = \frac{T_3}{1.67} = \frac{1073}{1.67} = \underline{643}\,K$$

(حيث $T_3 = 800 + 273 = 1073\,K$)

∴ صافى الشغل $= 1.005(1073 - 643) - 1.005(481 - 288)$

$$= (1.005 \times 430 - 1.005 \times 193) = \underline{288}\ kj/kg$$

إجمالى الشغل = شغل التوربينة $= c_p (T_3 - T_4)$

$$= 1.005(1073 - 643) = \underline{432}\ kj/kg$$

بالتالى ،

نسبة الشغل $= \dfrac{288}{432} = \underline{0.55}$

4.5 دورة الهواء القياسية:

The Air Standard Cycle

لقد تمت الإشارة فى المقطع 3.1 أن الدورات التى يتم فيها حرق الوقود مباشرةً فى مائع التشغيل هى ليست محركات حرارية بالمعنى الصحيح للمصطلح . عملياً فإن مثل هذه الدورات تستخدم تكراراً و تُسمى بدورات الإحتراق الداخلى. يتم حرق الوقود مباشرةً فى مائع التشغيل ، الذى هو عادة الهواء. تكون الميزة الرئيسية لمثل وحدات القدرة هذه هى إمكانية الحصول على درجات حرارة عالية للمائع ، بما أنه لا يتم إنتقالها خلال جدران المعدن الى المائع . يتم الملاحظة من المعادلة 4.1 $\eta = 1 - (T_2 / T_1)$ ، أنه لغاطس فقد الحرارة معطى عند T_2 فإن درجة حرارة المصدر T_1 ، يجب أن تكون أكبر مما يمكن . هذا ينطبق على جميع محركات الحرارة . بإمداد و قود الى داخل الأسطوانة كما فى محرك الإحتراق الداخلى ، يمكن الحصول على درجات حرارة عالية لمائع التشغيل . تكون درجة الحرارة القصوى لجميع الدورات محدودة بالحد الميتالورجى (metallurgical limit) للمواد المستخدمة (e.g. فى توربينات الغاز تكون درجة الحرارة محدودة بحوالى $800^{o}\,C$) . يمكن للمائع فى محرك الإحتراق الداخلى أن يصل الى درجة حرارة مساوية لحوالى $2750^{o}\,C$. هذا يُجعل ممكناً بتبريد الأسطوانة خارجياً بماء أو هواء ؛ أيضاً ، نتيجة للطبيعة المتقطعة للدورة فإن مائع التشغيل يصل لدرجة حرارته القصوى فقط للحظة أثناء كل دورة .

من أمثلة دورات الإحتراق الداخلى هى وحدة توربينة الغاز مفتوحة الحلقة ، محرك البترول، محرك الديزل أو محرك الزيت ، محرك الغاز. و حدة توربينة الغاز مفتوحة الحلقة ، رغم أنها دورة إحتراق داخلى ، تكون بالرغم من ذلك ذات تصنيف مختلف عن محركات الإحتراق

الداخلى الأخرى. لقد تم ذكر الدورة فى المقطع 3.1 و تم توضيح مخططاً للمحطة فى الشكل 3.4 . يمكن الملاحظة أن الدورة تكون ذات سريان مستقر ينساب فيها مائع التشغيل من أحد المكونات الى المكون الآخر حول الدورة. عليه سيتم إفتراض أن وحدة توربينة الغاز إذا ما تم تشغيلها على دورة مفتوحة أو مغلقة ، يمكن مقارنتها مع دورة الضغط الثابت المثالية. التى تم التعامل معها فى المقطع 4.4.

فى محرك البترول يتم سحب خليطاً من الهواء و البترول الى الأسطوانة، حيث يتم إنضغاطه بالكباس ، و من بعد إشعاله بشرارة كهربائية . تتمدد الغازات الساخنة دافعة الكباس للوراء و من بعد تُكسح للخارج الى العادم ، و تُعاد الدورة بسحب شحنة طازجة من البترول و الهواء . فى محرك الديزل أو الزيت يتم رش زيت تحت ضغط فى الهواء المنضغط عند نهاية شوط الإنضغاط ، و يكون الإحتراق تلقائياً نتيجة لدرجة الحرارة العالية للهواء بعد الإنضغاط . فى محرك غاز فإن خليطاً من الغاز و الهواء يتم سحبه فى الأسطوانة ، إنضغاطه ، و من بعد إشعاله كما فى محرك البترول بشرارة كهربائية . لإعطاء أساس للمقارنة لمحرك الإحتراق الداخلى الفعلى يتم تعريف دورة الهواء القياسية.

فى دورة هواء قياسية يتم إفتراض ان مادة التشغيل تكون هواء طوال الدورة ، يتم إفتراض أن جميع الإجراءات تكون إنعكاسية ، و يتم إفتراض أن مصدر إمداد الحرارة و غاطس فقد الحرارة يكونان خارجيان بالنسبة للهواء. يتم تمثيل الدورةعلى مخطط للخواص ، و عادة مايتم رسمه على مخطط $p-v$ ، بما أن هذه تسمح بمقارنة مباشرة يتم عملها مع دورة المحرك الفعلى التى يمكن الحصول عليها من مخطط بيانى. يجب التأكيد على أن دورة هواء قياسية على مخطط $p-v$ تكون عبارة عن دورة ديناميكية حرارية صحيحة ، بينما يكون مخطط البيان المأخوذ من محرك فعلى هو سجلاً لتفاوتات الضغط فى الأسطوانة ضد إزاحة الكباس.

4.6 دورة أوتو:-

The Otto Cycle

دورة أوتو هى دورة الهواء القياسية المثالية لمحرك البترول ، محرك الغاز ، و محرك الزيت ذو السرعة العالية .

يتم توضيح دورة أوتو على مخطط $p-v$ فى الشكل 4.9

الإجراء من 1 الى 2 هو إنضغاط ثابت القصور الحرارى.

الإجراء من 2 الى 3 هو تسخين ثابت الحجم إنعكاسى.

الإجراء من 3 الى 4 هو تمدد ثابت القصور الحرارى.

الإجراء من4 الى 1 هو تبريد إنعكاسى ثابت الحجم.

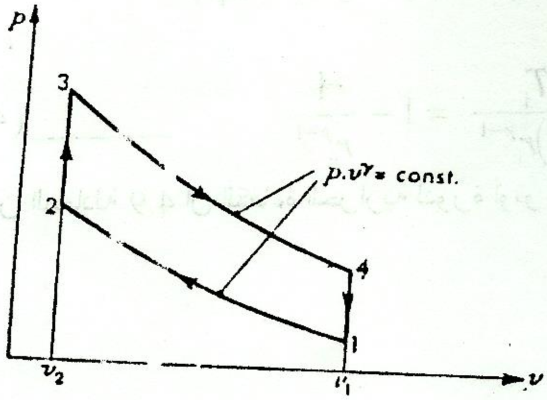


Fig. 4.9

الشكل(4.9)

لإعطاء مقارنة مباشرة بالمحرك الفعلى فإن نسبة الحجوم النوعية v_1 / v_2 يتم أخذها كنفس نسبة الإنضغاط للمحرك الفعلى،

$$\text{i.e.} \qquad \text{نسبة الإنضغاط ،}\ r_v = \frac{v_1}{v_2}$$

$$= \frac{\text{حجم الخلوص + الحجم المكتسح}}{\text{حجم الخلوص}} \qquad (4.8)$$

يمكن إيجاد الكفاءة الحرارية لدورة أوتو بإستخدام المعادلة 3.3

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2}$$

يتم إعطاء الحرارة المكتسبة ، Q_1 ، بحجم ثابت بين T_2 و T_3 تعطى بالمعادلة 3.13، لكل kg من الهواء،

$$Q_1 = c_v(T_3 - T_2)$$

بالمثل فإن الحرارة المفقودة ، Q_2 ، بحجم ثابت بين T_4 و T_1 بالمعادلة التالية ، لكل kg من الهواء.

$$Q_2 = c_v(T_4 - T_1)$$

تكون الإجراءات 1 الى 2 و 3 الى 4 هى ثابتة القصور الحرارى و عليه لا يكون هنالك سريان حرارة أثناء هذا الإجراءات.

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)} = 1 - \left(\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}\right)$$

الآن بما أن الإجراءات من 1 الى 2 و 3 الى 4 هى ثابتة القصور الحرارى ، بالتالى بإستخدام المعادلة 2.21،

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_3}{T_4} = r_v^{\gamma-1}$$

(حيث r_v هى نسبة الإنضغاط من المعادلة 4.8)

بالتالى،

$$T_3 = T_4 r_v^{\gamma-1} \text{ و } T_2 = T_1 r_v^{\gamma-1}$$

بالتالى بالتعويض ،

$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{(T_4 - T_1) r_v^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{r_v^{\gamma-1}} \qquad (4.9)$$

يمكن الملاحظة من المعادلة 4.9 أن الكفاءة الحرارية لدورة أوتو تعتمد فقط على نسبة الإنضغاط r_v.