

# الأكاديمية العربية الدولية



الأكاديمية العربية الدولية  
Arab International Academy

## الأكاديمية العربية الدولية المقررات الجامعية

# كتاب ديناميكا حرارية

## الجزء الأول



تأليف

د.أسامة محمد المرضي سليمان

قسم الهندسة الميكانيكية

كلية الهندسة والتكنولوجيا

جامعة وادي النيل

عطبرة ، السودان

الطبعة الأولى فبراير 1995م

الطبعة الثانية أكتوبر 2018 م

## شكر وعرفان

الشكر والعرفان لله والتبريات والصلوات على رسوله وخادمه محمد وعلى آله وصحابته وجميع من تبعه ونَقَّى  
أثره إلى يوم القيمة.

يود الكاتب ان يتقدم بالشكر أجزله لكل من ساهم بجهده وفكره ووقته في إخراج هذا الكتاب بالصورة المطلوبة ،  
ويُخص بذلك الزملاء/ الأساتذة بقسم الهندسة الميكانيكية بجامعة وادي النيل . عطبرة ، وأيضاً الإخوة/ الأساتذة  
بقسم الهندسة الميكانيكية بجامعة البحر الأحمر . بورتسودان.

الشكر والنقدير والعرفان للبروفيسور / محمود يس عثمان الذي ساهم بقدر كبير في مراجعة وإعادة مراجعة  
محتويات الكتاب.

اهدي هذا الكتاب بصفة أساسية لطلاب دبلوم وبكالوريوس الهندسة في جميع التخصصات خاصة طلاب قسم  
الهندسة الميكانيكية ، حيث يستعرض هذا الكتاب الكثير من التطبيقات في مجال الديناميكا الحرارية وتطبيقاتها.  
وأعبر عن شكري وامتناني إلى المهندس/ أسامة محمود محمد علي بمركز دانية لخدمات الحاسوب والطباعة  
بمدينة عطبرة، الذي أنفق العديد من الساعات في طباعة ، مراجعة وتعديل وإعادة طباعة هذا الكتاب أكثر من  
مرة. والشكر موصول أيضاً للمهندس/ عوض علي بكري الذي شارك في تنسيق هذا العمل.

أخيراً ، أرجو من الله سبحانه وتعالى أن يتقبل هذا العمل المتواضع والذي آمل أن يكون ذا فائدة للقارئ.

## مقدمة

إنَّ مؤلِّف هذا الكتاب وإيماناً منه بالدور العظيم والمُقدَّر للأستاذ الجامعي في إثراء حركة التأليف والتعريف والترجمة للمراجع والكتب الهندسية يأمل أن يفي هذا الكتاب بمتطلبات برامج البكالوريوس والدبلوم لطلاب الهندسة الميكانيكية ، الهندسة الكهربائية والهندسة المدنية حيث يُغطّى مناهج نظرية ومخترية في الديناميكا الحرارية وتطبيقاتها. يتحقق هذا الكتاب لغويًا مع القاموس الهندي الموحد السوداني ، ويُعد الكتاب مرجعًا في مجاله حيث يمكن أن يستفيد منه الطالب والمهندس والباحث. هذا الكتاب مقتبس من مذكرة مؤلفه في تدريسه لهذا المقرر لفترة لا تقل عن خمس وعشرون عاماً.

يهدف هذا الكتاب لتأكيد أهمية دراسة الديناميكا الحرارية نظرياً ، عملياً ومختررياً . فقد اشتمل هذا الكتاب على صياغة بعض النماذج الرياضية في الديناميكا الحرارية وتطويرها حتى الوصول إلى الصيغ النهائية المستخدمة في حل المسائل بالإضافة لإيراده بعض الأمثلة لنظم مستخدمة في التطبيقات العملية والمختبرية. يشتمل هذا الكتاب على أربعة فصول. يناقش الفصل الأول القانون الأول للديناميكا الحرارية من وجهات نظر قانون بقاء الطاقة ، معادلة السريان ، معادلة السريان المستقر من خلال العديد من الأمثلة والمسائل المحلولة بالإضافة لمسائل إضافية في نهاية الفصل .

أما الفصل الثاني فيستعرض الإجراءات الإنعكاسية واللإنعكاسية في الأنظمة الحرارية كإجراء الحجم الثابت ، الإجراء ثابت، درجة الحرارة، والإجراء متعدد الإنتحاء. يناقش هذا الفصل بعض الحالات الهمة لإجراءات لا يمكن إفتراض أنها إنعكاسية داخلياً مثل التمرد الحر ، الخنق ، الخلطة الأدبية ، إجراءات السريان الإنعكاسي ، وإجراءات السريان اللامستقر. تكون هذه الحالات مشفوعة بالعديد من الأمثلة والمسائل المحلولة بالإضافة لبعض المسائل غير المحلولة.

أما الفصل الثالث فيتناول القانون الثاني للديناميكا الحرارية من وجهات نظر عديدة من أهمها الآلة الحرارية ، القصور الحراري ، مخطط درجة الحرارة – القصور الحراري لبخار ولغاز مثالي ، تمثيل الإجراءات

الإنعكاسية على مخطط  $s - T$  ، القصور الحراري واللإنعكاسية ، والإتحادية بالإضافة لعدد من الأمثلة والمسائل

المحلولة وغير المحلولة التي نرجو أن تُبسط على القارئ هضم وفهم هذا الكتاب.

أما الفصل الرابع والأخير دورة المحرك الحراري المتمثّلة في دورة كارنوت المثالية ، مقاييس در

إنَّ الكاتب يأمل أن يساهم هذا الكتاب في إثراء المكتبة الجامعية داخل السودان وخارجه في هذا المجال من

المعرفة ويأمل من القارئ ضرورة إرسال تغذية راجعة إن كانت هناك ثمة أخطاء حتى يستطيع الكاتب

تصويبها في الطبعة التالية للكتاب.

والله الموفق

المؤلف

أكتوبر 2018م

## المحتويات

الصفحة	الموضوع
i	شكر وعرفان
ii	مقدمة
iv	المحتويات
<b>الفصل الأول : القانون الأول للدينамиكا الحرارية</b>	
1	1.1 بقاء الطاقة
3	1.2 معادلة الالإنسياب (اللاسريان)
6	1.3 معادلة السريان المستقر
12	1.4 مسائل
<b>الفصل الثاني : الإجراءات الإنعكاسية واللإنعكاسية</b>	
15	2.1 إجراءات لا سريانية إنعكاسية
27	2.2 الإجراء اللاسرياني كاظم الحرارة الإنعكاسي
35	2.3 إجراء متعدد الإنتحاء
45	2.4 إجراءات اللإنعكاسية
51	2.5 إجراءات السريان الإنعكاسي
53	2.6 إجراءات السريان اللامستقر
60	2.7 مسائل
<b>الفصل الثالث : القانون الثاني للديناميكا الحرارية</b>	
63	3.1 المحرك أو الآلة الحرارية
69	3.2 القصور الحراري
74	3.3 مخطط $T - s$
84	3.4 إجراءات إنعكاسية على مخطط $s - T$
100	3.5 القصور الحراري واللإنعكاسية
109	3.6 الإاتاحية
116	3.7 مسائل

## **الفصل الرابع : دورة المحرك الحراري**

118	4.1 دورة كارنوت
121	4.2 مقياس درجة الحرارة المطلقة
123	4.3 دورة كارنوت لغاز مثالي
126	4.4 دورة الضغط الثابت
131	4.5 دورة الهواء القياسية
132	4.6 دورة أوتو
135	4.7 دورة ديزل
138	4.8 دورة الاحتراق الثاني
142	4.9 متوسط الضغط الفعال
144	4.10 دورة استيرلنج وأريكسون
148	4.11 مسائل
<b>الكتب والمراجع</b>	
150	الكتب والمراجع العربية
150	الكتب والمراجع الإنجليزية
153	نبذة عن المؤلف

## الفصل الأول

### القانون الأول للديناميكا الحرارية

#### (The First Law of Thermodynamics)

##### (Conservation of Energy)

##### 1.1 بقاء الطاقة:

مفهوم الطاقة والفرضية التي تقول أنها لا تستحدث ولا تفنى قد تم تطويرها بواسطة العديد من العلماء

في الجزء المبكر للقرن التاسع عشر، وأصبحت تعرف بمبدأ بقاء الطاقة.

القانون الأول للديناميكا الحرارية هو ليس إلا واحداً من التعبيرات لهذا المبدأ العام بمرجعية خاصة لطاقة

الحرارة والطاقة الميكانيكية (i.e. الشغل).

عندما يتم عمل نظام ليؤدي دورة كاملة فإن صافي الشغل يُبذل على أو بالنظام. إن دورة يكون فيها

صافي الشغل مبذولاً بالنظام. بما أنَّ الطاقة لا يمكن خلقها (استحداثها)، فإنَّ هذه الطاقة الميكانيكية يجب أن

يتم إمدادها من بعض مصادر الطاقة. لقد تمَّ الآن إعادة النظام لحالته الإبتدائية، وهكذا فإنَّ طاقته الحقيقة لا

تتغير، وبالتالي فإنَّ الطاقة الميكانيكية لم يتم توفيرها بالنظام نفسه.

الطاقة الوحيدة الأخرى المشتركة في الدورة هي الحرارة التي يتم إكتسابها وفقدانها في الإجراءات المختلفة.

بال التالي، بمبدأ بقاء الطاقة، فإنَّ صافي الشغل المبذول بواسطة النظام يساوى صافي الحرارة المكتسبة إلى النظام.

القانون الأول للديناميكا الحرارية يمكن بيانه كما يلي:

عندما يؤدي نظاماً دورة حرارية فإنَّ صافي الحرارة المكتسبة إلى النظام من بيئته المحيطة تعادل صافي

الشغل المبذول بواسطة النظام على بيئته المحيطة.

بالرموز،

$$\sum Q + \sum W = 0 \quad (1.1)$$

حيث  $\Sigma$  تمثل المجموع لدورة كاملة.

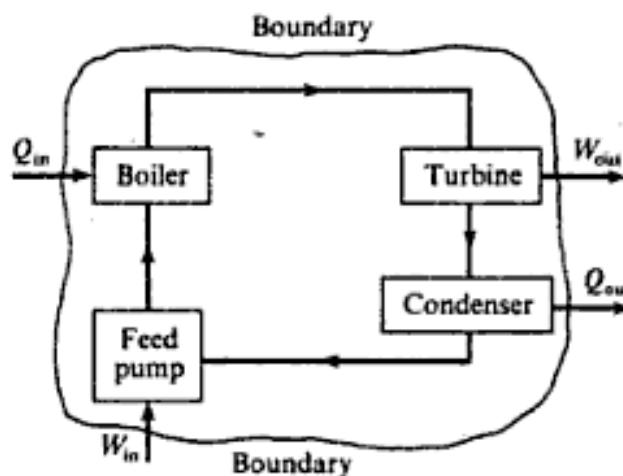
مثال (1.1) :

في محطة بخار معينة ينتج التوربين  $1000 \text{ kW}$ . والحرارة التي يتم إمدادها إلى البخار في الغالية تعادل  $2100 \text{ kJ/kg}$ ، والحرارة التي يفقدتها (بطردها) النظام إلى ماء التبريد في المكثف تساوي  $2800 \text{ kJ/kg}$  وشغل مضخة التغذية المطلوب لضخ البخار المكثف إلى الغالية يساوي  $5 \text{ kW}$ . أحسب معدل إنساب البخار خلال الدورة بال  $\text{kg/s}$ . يتم توضيح الدورة تخطيطياً في الشكل رقم (1.1)، ويتم توضيح حد النظام الذي يطوق المحطة بأكملها.

بصراحة، فإنَّ حد النظام هذا يجب التفكير في أنه يطوق فقط مائع التشغيل.

الحل:

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



شكل (1.1) محطة قدرة بخارية

إجعل معدل إنساب البخار  $\dot{m}$  بال  $\text{kg/s}$  ،

$$\therefore \sum dQ = \underline{\underline{700 \text{ m kJ/kg}}}$$

$$\sum dW = 1000 - 5 = 955 \text{ kW} = \underline{\underline{955 \text{ kJ/kg}}}$$

بالتالي في المعادلة (1.1) ،

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

$$\text{i.e. } 700 \times \dot{m} = 955 \quad \therefore \dot{m} = \frac{955}{700} = 1.421 \text{ kg/s}$$

$$\text{i.e. } 1.421 \text{ kg/s} = \text{إنساب البخار المطلوب}$$

## 1.2 معادلة اللانسياب (اللاسريان): (The Non – Flow Equation)

لقد تم التوضيح في المقطع السابق أنه عندما يؤدي نظاماً يمتلك طاقة حقيقة معينة دورة بتحويل الحرارة والشغل، فإن صافي الحرارة المكتسبة يكون مساوياً لصافي شغل الخرج. هذا يكون صحيحاً لدورة كاملة عندما تكون الطاقة الحقيقة للنظام مساوية لقيمة الطاقة الإبتدائية. إعتبر الآن إجراءً تكون فيه الطاقة الحقيقة للنظام أخيراً أكبر من الطاقة الحقيقة الإبتدائية. الفرق بين صافي الحرارة المكتسبة وصافي شغل الخرج سيزيد الطاقة الحقيقة للنظام،

$$\text{الكسب في الطاقة الحقيقة} = \text{صافي الحرارة المكتسبة} - \text{صافي شغل الخرج}$$

عندما يكون صافي التأثير هو إنتقال طاقة من النظام، وبالتالي سيكون هنالك فقداً في الطاقة الحقيقة للنظام. عندما يكون هنالك مائعاً ليس في حركة فإن طاقته الحقيقة لكل وحدة كتلة تعرف بالطاقة الداخلية النوعية للمائع وتعطي بالرمز  $u$ . تعتمد الطاقة الداخلية لمائع على ضغطه ودرجة حرارته، وهي في حد ذاتها خاصية. الطاقة الداخلية للكتلة،  $m$ , يتم كتابتها ك  $U$ , i.e.  $U = mu$ . وحدات الطاقة الداخلية،  $U$  تكتب عادة ك  $\text{kJ}$ . بما أن الطاقة الداخلية خاصية فإن الكسب في الطاقة الداخلية في التغيير من الحالة 1 إلى الحالة 2 يمكن كتابتها ك  $U_2 - U_1$ .

$$\text{أيضاً، الكسب في الطاقة الداخلية} = \text{صافي الحرارة المكتسبة} - \text{صافي شغل الخرج}$$

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

هذه المعادلة تكون صحيحة لإجراء أو سلسلة من الإجراءات بين الحالة 1 والحالة 2 بمعلومية أنه ليس هنالك سريان للمائع إلى أو من النظام. في أي إجراء لا سريان ي سيكون هنالك إما حرارة مكتسبة أو حرارة مفقودة، لكن

ليس الإثنان، نفس الشئ سيكون هنالك إما شغل خرج أو شغل دخل، لكن ليس الإثنان. وبالتالي، بإعتبار الحرارة المكتسبة إلى النظام كموجبة والشغل المبذول (i.e. شغل الخرج) كموجب، سنحصل على،

$$U_2 - U_1 = Q - W$$

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

$$\text{أو } Q = (U_2 - U_1) + W \quad (1.2)$$

هذه المعادلة تعرف بمعادلة طاقة اللاسريان. في أحوال كثيرة فإنَّ المعادلة (1.2) تكتب في صورة تفاضلية.  
لقدار صغير للحرارة المكتسبة  $dQ$ ، مقدار صغير للشغل المبذول بالمائع  $dW$ ، ولكسب صغير في الطاقة الداخلية النوعية، فإنَّ،

$$dQ = du + dW \quad (1.3)$$

مثال (1.2):

في شوط الإنضغاط لمحرك احتراق داخلي، تكون الحرارة المفقودة لماء التبريد مساوية لـ  $45\text{ kJ/kg}$  وشغل الدخل مساوياً لـ  $90\text{ kJ/kg}$ . أحسب التغير في الطاقة الداخلية النوعية لمائع التشغيل ذاكراً ما إذا كان كسباً أم فقداً.

الحل:

$$Q = -45\text{ kJ/kg} \quad \text{- بما أنَّ الحرارة مفقودة}$$

$$W = -90\text{ kJ/kg} \quad \text{- بما أنَّ الشغل هو شغل دخل للنظام}$$

مستخدماً المعادلة (1.2)،

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

$$\therefore -45 = (u_2 - u_1) - 90$$

$$\therefore u_2 - u_1 = +90 - 45 = 45\text{ kJ / kg}$$

$\therefore$  الكسب في الطاقة الداخلية  $= 45\text{ kJ/kg}$

مثال (1.3) :

في أسطوانة محرك هواء فإن الهواء المنضغط له طاقة داخلية نوعية مقدارها  $240 \text{ kJ/kg}$  عند بداية التمدد وطاقة داخلية مقدارها  $200 \text{ kJ/kg}$  بعد التمدد. أحسب سريان الحرارة إلى أو من الأسطوانة عندما يكون الشغل المبذول بواسطة الهواء أثناء التمدد مساوياً لـ  $100 \text{ kJ/kg}$ .

الحل:

من المعادلة (1.2)،

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

$$\therefore Q = (200 - 240) + 100 = -200 + 100 = -120 \text{ kJ/kg}$$

i.e. 120 kJ/kg = الحرارة المفقودة بالهواء

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

لإجراء سريان إنعكاسي سنتلك من المعادلة (1.1)،

$$W = \int_1^2 pdv$$

$$dW = p dv \quad \text{أو لكميات صغيرة،}$$

بالتالي لأي إجراء لا سرياني إنعكاسي، معمولاً في المعادلة (1.3)،

$$dQ = du + pdv \quad (1.4)$$

أو بالتعويض في المعادلة (1.2)،

$$Q = (u_2 - u_1) + \int_1^2 pdv \quad (1.5)$$

المعادلات (1.4)، (1.5) يمكن استخدامهما فقط لإجراءات لا سريانية إنعكاسية مثالية.

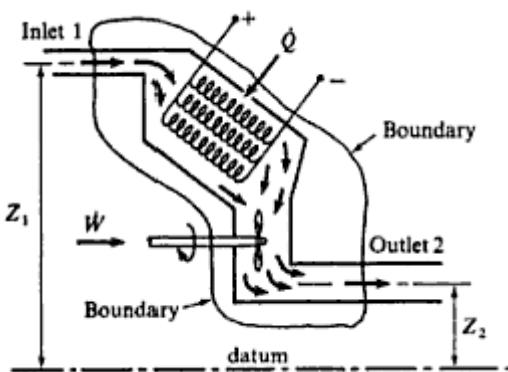
## (The Steady Flow Equation)

### 1.3 معادلة السريان المستقر:

في المقطع (1.2)، قيل أن الطاقة الداخلية لمائع تكون هي الطاقة الحقيقة للمائع نتيجة لخواصه الديناميكية الحرارية. عندما يكون هنالك مائع كتلته  $1\text{kg}$  بطاقة داخلية نوعية،  $u$ ، يتحرك بسرعة  $C$  ويكون عند إرتفاع  $z$  فوق مستوى المرجعية، وبالتالي فإنه يمتلك طاقة كلية مقدارها  $u + \frac{C^2}{2} + zg$ ، حيث  $\frac{C^2}{2}$  هي طاقة الحركة لـ  $1\text{kg}$  من مائع و  $zg$  هي طاقة الوضع لـ  $1\text{kg}$  من المائع.

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

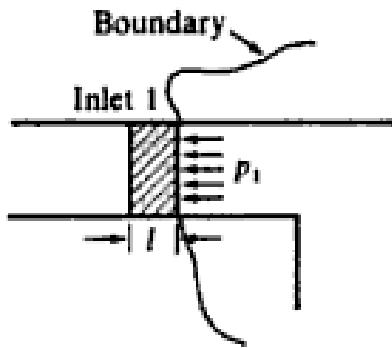
اعتبر  $1\text{kg}$  من مائع ينساب بسريان مستقر خلال قطعة من الجهاز شكل (1.2). هذا يشكل نظام مفتوح كما تم توضيحه في المقطع (1.2). يتم توضيح الحد قاطعاً ماسورة المدخل عند 1 والمخرج عند المقطع 2. يسمى هذا الحد في بعض الأحيان بسطح التحكم، والنظام المطلق بحجم التحكم.



شكل (1.2) نظام مفتوح لسريان مستقر

افتراض أنه يتم إمداد سريان مستقر لحرارة بمقدار  $Q$  وحدة لكل  $\text{kg}$  من المائع، وأن كل  $\text{kg}$  من المائع يؤدي  $W$  وحدة من الشغل كلما يمر خلال الجهاز. والآن لكي يتم إدخال  $1\text{kg}$  من المائع عبر الحد يتطلب ذلك إنفاقاً للطاقة؛ نفس الشيء لكي يتم دفع  $1\text{kg}$  من المائع عبر الحد عند المخرج، فإنه يتطلب أيضاً إنفاقاً للطاقة.

يتم توضيح مقطع المدخل مكملاً في الشكل (1.3) أدناه،



شكل (1.3) مقطع عند مدخل النظام

اعتبر عنصراً من مائع بطول  $L$ ، وجعل مساحة المقطع العرضي لامساورة المدخل  $A_1$ . وبالتالي سنحصل على ،

$$p_1 A_1 \times L = \text{الطاقة المطلوبة لدفع العنصر عبر الحد}$$

$$= p_1 \times (\text{حجم عنصر المائع})$$

عليه ،

$$p_1 v_1 = \text{الطاقة المطلوبة لـ } 1\text{kg من المائع}$$

(حيث  $v_1$  هو الحجم النوعي للمائع عند المقطع 1)

نفس الشيء ، يمكن توضيح أنَّ ،

$$p_2 v_2 = \text{الطاقة المطلوبة عند المخرج لـ } 1\text{kg من المائع عبر الحد}$$

اعتبر الآن الطاقة الداخلة والمغادرة للنظام. الطاقة الداخلة للنظام تتكون من طاقة المائع المناسب عند المدخل

$$\cdot \left( u_1 + \frac{C_1^2}{2} + z_2 g \right)$$

مصطلاح الطاقة  $p_1 v_1$ ، الحرارة المكتسبة  $Q$  والشغل المبذول بواسطة المائع  $W$ . بما أنَّ هنالك سريان مستقر

للمائع إلى أو من النظام، ستكون هنالك سريانات مستقرة للحرارة والشغل، وبالتالي الطاقة المدخلة يجب أن تساوى بالضبط الطاقة المغادرة.

$$u_1 + \frac{C_1^2}{2} + z_1 g + p_1 v_1 + Q = u_2 + \frac{C_2^2}{2} + z_2 g + p_2 v_2 + W \quad (1.6)$$

تقريباً في جميع المسائل في الديناميكا الحرارية التطبيقية يتم تجاهل التغييرات في الارتفاع و عليه يمكن حذف عناصر طاقة الوضع من المعادلة. العناصر  $u$  و  $pv$  تقع على كلا جانبي المعادلة وهي دائماً ستكون كذلك في الإجراء السرياني، بما أنَّ المائع يمتلك دائماً طاقة داخلية معينة، والعنصر  $pv$  يعطي بالرمز  $h$ ، الذي يعرف بالمحتوى الحراري النوعي (Specific Enthalpy).

$$i.e. \quad h = u + pv \quad (1.7)$$

المحتوى الحراري لمائع هو خاصية لذلك المائع، بما أنَّ المحتوى الحراري هو خاصية مثل الطاقة الداخلية، الضغط، الحجم النوعي، ودرجة الحرارة، يمكن إدخاله في أي مسألة بغض النظر عن أنَّ الإجراء سرياني أم لا سرياني. المحتوى الحراري لكتلة  $m$ ، من مائع يمكن كتابته ك  $(mh = H)$ . وحدات  $h$  هي نفسها كتلك للطاقة الداخلية.

معوضاً المعادلة (1.6) في المعادلة (1.7)،

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

المعادلة (1.8) تعرف بمعادلة طاقة السريان المستقر. في السريان المستقر فإنَّ معدل إنسياط الكتلة للمائع عند أي مقطع هي نفسها عند أي مقطع آخر. إعتبر أي مقطع عرضي  $A$ ، حيث تكون سرعة المائع  $C$ ، وبالتالي معدل سريان الحجم المار بالمقطع يكون  $CA$ . أيضاً بما أنَّ سريان الكتلة هو عبارة عن سريان حجم مقسوماً على الحجم النوعي،

$$\dot{m} = \frac{CA}{v} = \rho CA \quad (1.9)$$

(حيث  $v$  = الحجم النوعي عند المقطع؛  $\rho$  الكثافة عند المقطع).

هذه المعادلة تعرف بمعادلة الاستمرارية للكتلة.

بالرجوع للشكل رقم (1.2)،

$$\dot{m} = \frac{C_1 A_1}{V_1} = \frac{C_2 A_2}{V_2}$$

مثال (1.4) :

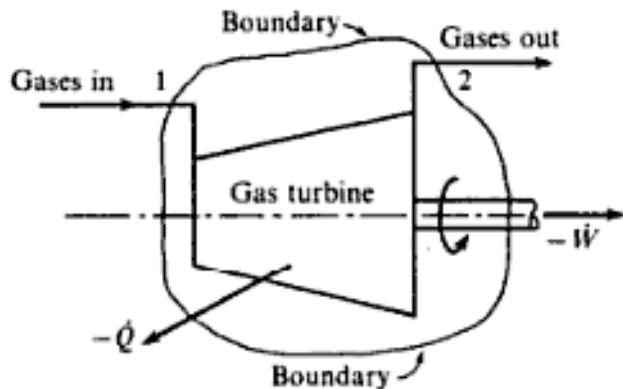
في توربينة وحدة توربينية غازية تنساب الغازات خلال التوربين عند  $17\text{ kg/s}$  وتكون القدرة المتولدة بواسطة التوربينة متساوية لـ  $14,000 \text{ kW}$ . وتكون المحتويات الحرارية للغازات عند المدخل والمخرج هما  $1200 \text{ kJ/kg}$  و  $360 \text{ kJ/kg}$  على الترتيب، والسرعات للغازات عند المدخل والمخرج هما  $60\text{ m/s}$  و  $150\text{ m/s}$  على الترتيب. أحسب المعدل الذي تفقد به الحرارة من التوربينة. أوجد أيضاً مساحة ماسورة المدخل بمعلومية أن الحجم النوعي للغازات عند المدخل  $0.5 \text{ m}^3/\text{kg}$ .

الحل:

يتم توضيح تمثيل تخطيطي للتوربينة في الشكل (1.4) أدناه.

من المعادلة (1.8)،

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



شكل (1.4) توربين غازي

$$= \frac{C_1^2}{2} = \frac{60^2}{2} \text{ m}^2 / \text{s}^2 = \frac{60^2}{2} \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2 \text{ kg}}$$

$$= 1800 \text{ N m/kg} = 1.8 \text{ kJ/kg}$$

$$(طاقـةـ الـحرـكةـ عـنـ الدـخـلـ) \times \frac{C_2^2}{2} = 2.5^2 \times \frac{C_2^2}{2}$$

$$2.5^2 \times 1.8 = 11.25 \text{ kJ/kg} \quad C_2 = 2.5C_2$$

$$W = \frac{14,000}{17} \text{ kJ/kg} = 823.5 \text{ kJ/kg}$$

بـالـتـعـويـضـ فـيـ المـعـادـلـةـ (1.8)،

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

$$\therefore Q = -7.02 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{i.e. } +7.02 \text{ kJ/kg} = 7.02 \times 17 = 119.3 \text{ W}$$

لـإـيجـادـ مـسـاحـةـ الدـخـلـ، اـسـتـخـدـمـ المـعـادـلـةـ (1.9)،

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

$$\therefore A_1 = \frac{17 \times 0.5}{60} = 0.142 \text{ m}^2$$

مـثـالـ (1.5):

ينـسـابـ هـوـاءـ بـإـسـتـقـارـ بـمـعـدـلـ 0.4 kg/s خـلـالـ ضـاغـطـ هـوـاءـ، حـيـثـ يـدـخـلـ بـسـرـعـةـ 6 m/s، بـضـغـطـ 1 bar وـبـحـجمـ نوعـيـ 0.85 m^3/kg، وـيـغـادـرـ بـسـرـعـةـ 4.5 m/s، وـبـضـغـطـ 6.9 bar وـحـجمـ نوعـيـ 1.6 m^3/kg. وـتـكـونـ الطـاقـةـ الداخليةـ النوعـيـةـ لـلـهـوـاءـ المـغـادـرـ أـكـبـرـ منـ تـلـكـ لـلـهـوـاءـ الدـاخـلـ بـمـقـدـارـ 88 kJ/kg. مـاءـ التـبـرـيدـ المـوـجـودـ فيـ تـجاـوـيفـ مـحـيـطـةـ بـالـأـسـطـوـانـةـ يـمـتـصـ الـحـرـارـةـ منـ الـهـوـاءـ بـمـعـدـلـ 59 kJ/s. أـحـسـبـ الـقـدـرـةـ المـطـلـوـبـةـ لـإـدـارـةـ الضـاغـطـ وـمـسـاحـةـ المـقـطـعـ العـرـضـيـ لـمـدـخـلـ وـمـخـرـجـ الـمـاسـوـرـةـ.

الـحـلـ:

فيـ هـذـهـ الـمـسـأـلـةـ مـاـنـ الـمـلـائـمـ أـكـبـرـ كـتـابـةـ مـعـدـلـ السـرـيـانـ كـمـاـ فـيـ المـعـادـلـةـ (1.6)، بـحـذـفـ العـنـاصـرـ z.

$$u_1 + \frac{C_1^2}{2} + p_1 v_1 + Q = u_2 + \frac{C_2^2}{2} + p_2 v_2 + W$$

هناك تمثيل تخطيطي للضاغط يتم توضيحه في الشكل (1.5) أدناه.

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

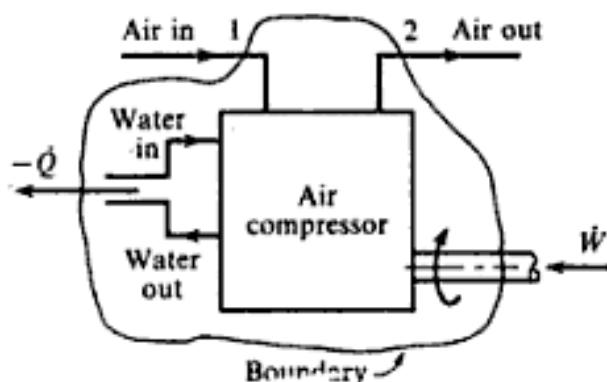
$$\frac{C_1^2}{2} = \frac{6 \times 6}{2} \text{ J/kg} = \underline{18 \text{ J/kg}}$$

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

$$p_1 v_1 = 1 \times 10^5 \times 0.85 = 85,000 \text{ J/kg}$$

$$p_2 v_2 = 6.9 \times 10^5 \times 0.16 = 110,000 \text{ J/kg}$$

$$u_2 - u_1 = 88 \text{ kJ/kg}$$



شكل (1.5) تمثيل تخطيطي للضاغط

$$59 = 59 \text{ kJ/s} = \frac{59}{0.4} = \underline{147.5 \text{ kJ/kg}}$$

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

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

**ملحوظة:** يكون التغير في طاقة الحركة صغير جداً بحيث يمكن تجاهله بالمقارنة مع العناصر الأخرى).

$$\text{i.e. } \underline{260.9 \text{ kJ/kg}} = \text{شغل الدخل المطلوب}$$

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

من المعادلة (1.9)،

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

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

$=$  مساحة المقطع العرضي لمسورة المدخل i.e.  $0.057 m^2$

نفس الشيء ،

$$A_2 = \frac{0.4 \times 0.16}{6} m^2 = 0.014 m^2$$

$=$  مساحة المقطع العرضي لمسورة المخرج i.e.  $0.014 m^2$

في المثال (1.5) تم استخدام معادلة طاقة السريان المستقر، بالرغم من الحقيقة التي تقول أن الانضغاط يتكون من: سحب هواء؛ إنضغاط في أسطوانة مغلقة؛ وتصريف هواء. يمكن استخدام معادلة السريان المستقر لأن دورة الإجراءات تحدث مرات عديدة في الدقيقة، وبالتالي فإن التأثير المتوسط يكون سريان مستقر لهواء خلال الماكينة.

#### 1.4 مسائل: (Problems)

1- في ضاغط هواء يحدث الإنضغاط بطاقة داخلية ثابتة وهناك  $50\text{ kJ}$  من الحرارة يتم فقدانها لماء التبريد لكل  $\text{kg}$  من الهواء. أوجد الشغل المطلوب لشوط الإنضغاط لكل  $\text{kg}$  من الهواء.

Ans. ( $50\text{ kJ/kg}$ )

2- في شوط الإنضغاط لتوربينة غاز فإن الشغل المبذول على الغاز بواسطة الكباس يساوي  $70\text{ kJ/kg}$  والحرارة المفقودة لماء التبريد تعادل  $42\text{ kJ/kg}$ . أوجد التغير في الطاقة الداخلية، ذاكراً ما إذا كانت كسباً أم فقداناً.

Ans. ( $28 \text{ kJ/kg}$ )

3- كتلة غاز بطاقة داخلية مقدارها  $1500 \text{ kJ}$  تكون محتوة في أسطوانة ذات عزل حراري مثالي. يُسمح للغاز بالتمدد خلف الكباس حتى تكون طاقته الداخلية متساوية لـ  $1400 \text{ kJ}$ . أحسب الشغل المبذول بالغاز. إذا كان

التمدد يتبع القانون  $pv^2 = \text{constant}$  ، الضغط والحجم الابتدائيان للغاز هما 28bar و  $0.06m^3$  على الترتيب، أحسب الضغط والحجم النهائيان.

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

4- للغازات في أسطوانة محرك إحتراق داخلي طاقة داخلية مقدارها  $800 kJ/kg$  وحجم نوعي مقداره  $0.06m^3/kg$  عند بداية التمدد، تمدد الغازات يمكن إفتراض حدوثه طبقاً للقانون الانعكاسي  $pv^{1.5} = \text{constant}$  من 55bar إلى 1.4bar . وتكون الطاقة الداخلية بعد التمدد مساوياً لـ  $230 kJ/kg$ . أحسب الحرارة المفقودة إلى أسطوانة ماء التبريد لكل kg من الغازات أثناء شوط التمدد.

Ans. (104 kJ/kg)

5- توربينة بخار تستقبل سريان بخار بمقدار  $s = 1.35 kg/s$  . وتقوم بتوليد  $500 kW$  . فقدان الحرارة من الغلاف يمكن تجاهله.

أ- أوجد التغير في المحتوى الحراري النوعي عبر التوربينة عندما يتم تجاهل السرعات عند المدخل والمخرج والفرق في الإرتفاع عند المدخل والمخرج.

ب- أوجد التغير في المحتوى الحراري النوعي عبر التوربينة عندما تكون السرعة عند المدخل مساوية لـ  $60 m/s$  ، السرعة عند المخرج  $360 m/s$  ، وتبعد ماسورة المدخل مسافة  $3m$  فوق ماسورة العادم.

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

6- بخار ذو سريان مستقر يدخل مكتفأً بمحتوى حراري مقداره  $2300 kJ/kg$  وبسرعة  $350 m/s$  . يغادر البخار المتكاف المكتف بمحتوى حراري مقداره  $160 kJ/kg$  وبسرعة مقدارها  $70 m/s$  . أوجد الحرارة المنقلة لمائع التبريد لكل kg من البخار المكتف.

Ans. (- 2199 kJ/kg)

7- توربينة تشغّل تحت شروط سريان مستقر تستقبل بخاراً عند الحالة التالية: ضغط  $13.8 bar$ ؛ حجم نوعي  $0.143 m^3/kg$ ؛ طاقة داخلية  $2590 kJ/kg$ ؛ سرعة  $30 m/s$  . وحالة البخار المغادر للتوربينة هي: ضغط  $0.35 bar$ ؛ حجم نوعي  $4.37 m^3/kg$ ؛ طاقة داخلية  $2360 kJ/kg$ ؛ سرعة  $90 m/s$  . تُفقد الحرارة إلى البيئة

المحيطة بمعدل  $0.25 \text{ kJ/s}$ . إذا كان معدل سريان البخار يساوي  $0.38 \text{ kJ/s}$ , ما هي القدرة المتولدة بواسطة التوربينة.

Ans. ( $102.8 \text{ kW}$ )

8- الفوهة هي عبارة عن جهاز لزيادة السرعة لجدول مائع ذو سريان مستقر. عند المدخل لفوهة معينة فإن المحتوى الحراري للمائع يكون  $3025 \text{ kJ/kg}$  والسرعة  $60 \text{ m/s}$ . عند المخرج من الفوهة يكون المحتوى الحراري  $2790 \text{ kJ/kg}$ . إذا كانت الفوهة أفقية والفقد الحراري منها يتم تجاهله.

A- أحسب السرعة عند مخرج الفوهة.

ب- إذا كانت مساحة المدخل تساوي  $0.1 \text{ m}^2$  والحجم النوعي عند المدخل يساوي  $0.19 \text{ m}^3/\text{kg}$ , أوجد معدل سريان المائع.

ج- إذا كان الحجم النوعي عند مخرج الفوهة يساوي  $0.5 \text{ m}^3/\text{kg}$ , أوجد مساحة المخرج للفوهة.

Ans. ( $688 \text{ m/s}$  ,  $31.6 \text{ kg/s}$  ,  $0.0229 \text{ m}^2$ )

## الفصل الثاني

### الإجراءات الإنعكاسية واللا انعكاسية

#### (Reversible and Irreversible Processes)

في الفصول السابقة تم إشتقاق معادلات الطاقة لإجراءات اللا سريان وللسريان، وتم تقديم مفاهيم الإنعكاسية واللإنعكاسية، ومناقشة خواص البخار والغازات المثالية. الغرض من هذا الفصل هو اعتبار إجراءات من الواقع العملي وتوحيد هذا بالعمل الموجود في الفصول السابقة.

#### 2.1 إجراءات لا سريانية إنعكاسية: (Reversible Non – Flow Processes)

##### 1. إجراء الحجم الثابت: (Constant Volume Process)

في إجراء ثابت الحجم تكون مادة التشغيل محتواة في وعاء صلد (rigid vessel)، وبالتالي فإن حدود النظام تكون غير قابلة للحركة و لا يمكن أن يكون هنالك شغلاً مبذولاً على أو بالنظام، غير شغل دخل عجلة التحرير. سيتم إفتراض أن الحجم الثابت يتضمن شغلاً صغيراً صغيراً ما لم يذكر غير ذلك.

من معادلة طاقة اللا سريان (1.2)،

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

بما أنه ليس هنالك شغلاً مبذولاً، عليه نحصل على،

$$Q = u_2 - u_1 \quad (2.1)$$

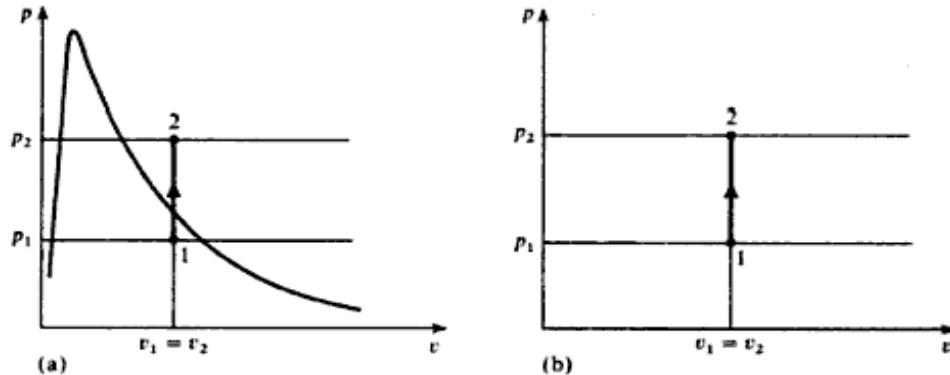
أو لكتلة،  $m$ ، من مادة التشغيل،

$$Q = U_2 - U_1 \quad (2.2)$$

تستخدم جميع الحرارة المكتسبة في إجراء الحجم الثابت في زيادة الطاقة الداخلية. يتم توضيح إجراء حجم ثابت لبخار على مخطط  $v - p$  في الشكل رقم (2.1(a)). ولقد تم اختيار الحالات الأولية و النهائية لتكونا في المنطقة الرطبة والمنطقة المحمصة على الترتيب. في الشكل رقم (2.1(b)) يتم

توضيح إجراء ثابت الحجم على مخطط  $p - v$  لغاز مثالي . لغاز مثالي نحصل على،

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



شكل (2.1) إجراء ثابت الحجم لبخار ولغاز مثالي

## 2. إجراء الضغط الثابت: (Constant Pressure Process)

يمكن الملاحظة من الأشكال ((2.1(a)) و ((2.1(b)) عندما تكون حدود النظام غير مرنة كما في إجراء الحجم الثابت، إنَّ الضغط يرتفع عندما يتم إمداد الحرارة. وبالتالي لإجراء ثابت الضغط فإنَّ الحد يجب أن يتحرك ضد مقاومة خارجية كلما يتم إمداد الحرارة؛ كمثال فإنَّ مائعاً في أسطوانة خلف كباس يمكن ترتيبه لأداء إجراء ثابت الضغط. بما أنَّه يتم دفع الكباس خلال مسافة معينة بالقوة التي يؤديها المائع، وبالتالي فإنَّ الشغل يكون مبذولاً على بيئته المحيطة.

من المعادلة لأي إجراءً إنعكاسياً،

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

عليه بما أن  $p$  تكون ثابتة،

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

من معادلة طاقة اللا سريان (1.2)،

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

بالتالي لإجراء ثابت الضغط إنعكاسي،

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

الآن من المعادلة (1.7)، المحتوى الحراري،  $h = u + pv$ ، وبالتالي،

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

أو لكتلة،  $m$ ، لمائع،

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

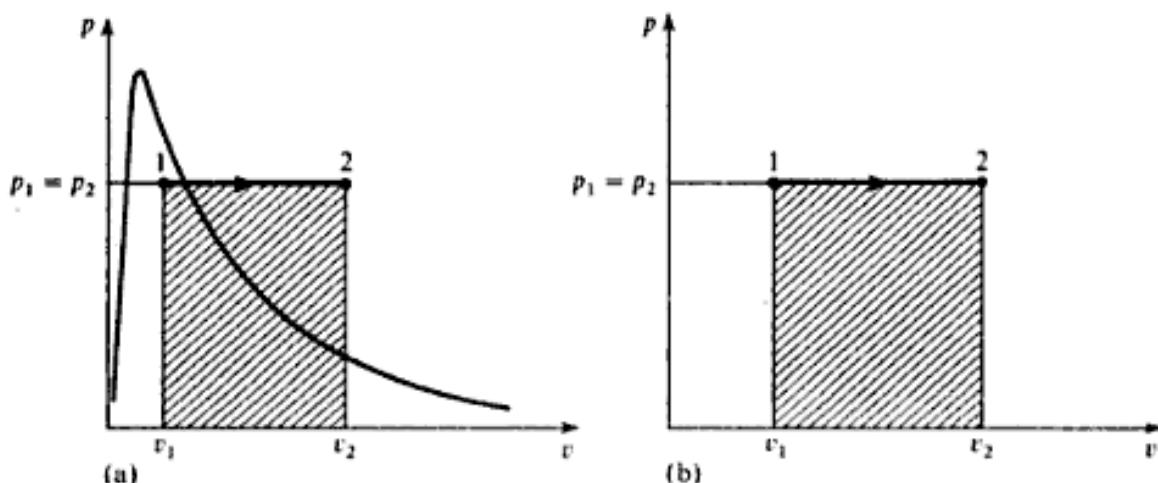
إجراء الضغط الثابت لبخار يكون موضحاً على مخطط  $p - v$  في الشكل (2.1(a)).

لقد تم اختيار الحالات الأولية والنهائية لتكونا في المنطقة الرطبة والمنطقة المحمصة على الترتيب. في الشكل

((2.2(b)) يتم توضيح إجراء ثابت الضغط لغاز مثالي على مخطط  $p - v$ .

لغاز مثالي نحصل من إجراء ال拉斯ربان الإنعكاسي عند ضغط ثابت على ،

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



شكل (2.2) إجراء ثابت الضغط لبخار ولغاز مثالي

لاحظ أنه في الأشكال ((2.2(a)) و ((2.2(b))) أن المساحات المظللة تمثل الشغل المبذول بواسطة المائع

$$\cdot p(v_2 - v_1)$$

مثال (2.1) :

كتلة مقدارها 0.05kg من ماء يتم تسخينها بضغط ثابت مقداره 2bar حتى يكون الحجم المحتل مساوياً لـ 0.0658m<sup>3</sup>. أحسب الحرارة المكتسبة والشغل المبذول:

a/ عندما يكون الماء بخاراً، إبتدائياً جافاً مشبعاً.

b/ عندما يكون الماء هواء، إبتدائياً عند 130°C.

الحل:

a/ إبتدائياً يكون الماء جافاً مشبعاً عند الضغط 2bar، وبالتالي،

$$h_1 = h_g \text{ at } 2 \text{ bar} = 2707 \text{ kJ/kg}$$

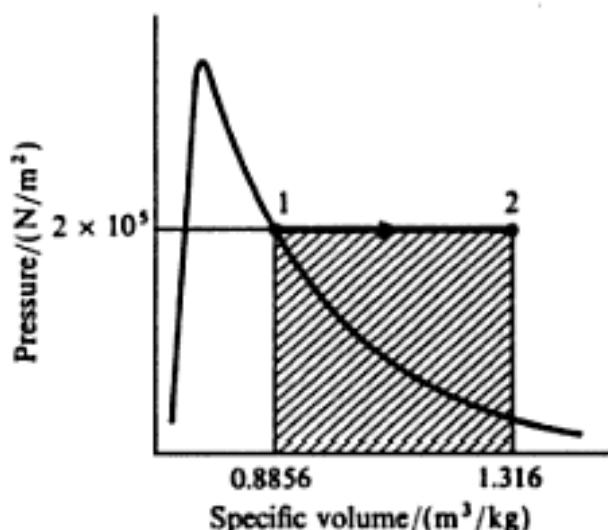
نهاياً يكون الماء عند 2 bar ويعطي الحجم النوعي بـ

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

بالناتي من المعادلة (2.4) ،

$$Q = H_2 - H_1 = m(h_2 - h_1) = 0.05 \times (3072 - 2707) = 18.25 \text{ kJ}$$

i.e. الحرارة المكتسبة = 0.05 × 365 = 18.25kJ



شكل (2.3) إجراء لبخار

i.e. يتم توضيح الإجراء على مخطط  $v-p$  في الشكل (2.3). يتم إعطاء الشغل المبذول بالمساحة المظللة؛

$$W = p(v_2 - v_1)N.m/kg$$

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

$$\therefore W = 2 \times 10^5 (1.316 - 0.8856) = 2 \times 10^5 \times 0.4304 \text{ N.m/kg}$$

$$= \text{الشغل المبذول بالكتلة الكلية الموجدة} = 0.05 \times 2 \times 10^5 \times 0.4304 \times 10^{-3} \text{ N.m}$$

$$= 4.034 \text{ kj}$$

/b مستخدماً المعادلة،

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{mR} = \frac{2 \times 10^5 \times 0.0658}{0.05 \times 0.287 \times 10^3} = 917K$$

لغازاً مثاليًّا يؤدي إجراءً ثابت الحجم،

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

$$\text{i.e. الحرارة المكتسبة} = 0.05 \times 1.005 (917 - 403)$$

$$(\text{حيث } T_1 = 130 + 273 = 403K)$$

$$= 0.05 \times 1.005 \times 514 = 25.83 \text{ kj}$$

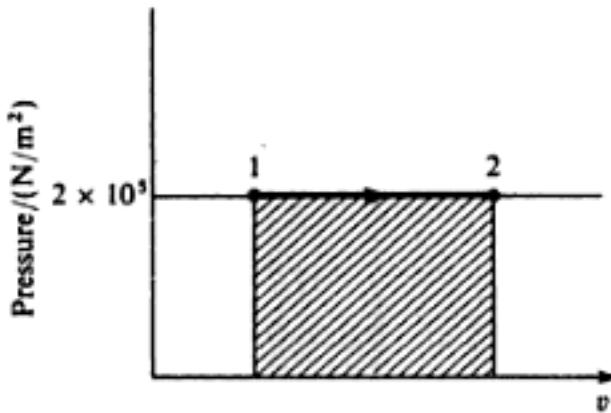
i.e. يتم توضيح الإجراء على مخطط  $v-p$  في الشكل (2.4). يتم إعطاء الشغل المبذول بالمساحة المظللة،

$$pv = RT \quad \text{من المعادلة} \quad W = p(v_2 - v_1)N.m/kg$$

$$\therefore \text{الشغل المبذول} = R(T_2 - T_1) = 0.287(917 - 403) \text{ kj/kg}$$

$$\text{i.e. الطاقة المبذولة بكتلة الغاز الموجدة} = 0.05 \times 287 \times 514$$

$$= 7.38 \text{ kj}$$



شكل (2.4) إجراء لغاز مثالي

### 3. الإجراء ثابت درجة الحرارة:

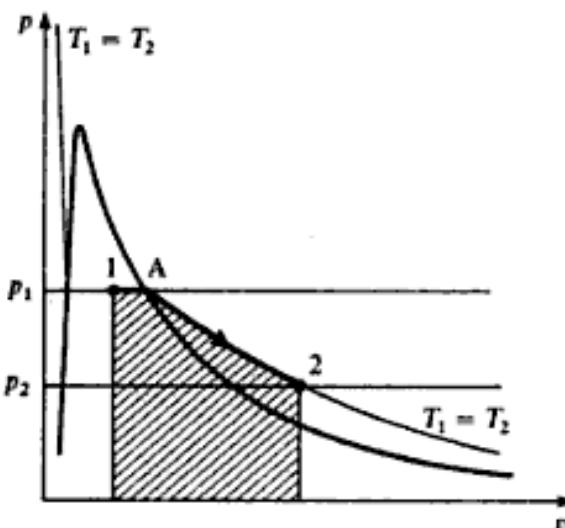
#### (Constant Temperature Process or Isothermal Process)

الإجراء عند درجة حرارة ثابتة يسمى بإجراء ثابت درجة الحرارة. عندما يتمدد الماء في أسطوانة خلف كباس من ضغط عالٍ إلى ضغط منخفض يكون هناك ميلًا لهبوط درجة الحرارة. في التمدد ثابت درجة الحرارة فإن الحرارة يجب أن تضاف باستمرار لكي تحافظ على درجة الحرارة عند القيمة الإبتدائية. نفس الشيء في انضغاط ثابت درجة الحرارة فإن الحرارة يجب إزالتها من الماء باستمرار خلال الإجراء. يتم توضيح إجراء ثابت درجة الحرارة على مخطط  $v - p$  كما في الشكل (2.5). لقد تم اختيار الحالات الإبتدائية والنهائية في المنطقة الرطبة والمنطقة المحمصة على الترتيب.

من الحالة 1 إلى الحالة A يبقى الضغط عند  $p_1$ ، بما أنه في المنطقة الرطبة فإن الضغط ودرجة الحرارة هما قيمتا التشبع المنشورة. عليه يمكن الملاحظة أن الإجراء ثابت درجة الحرارة لبخار يكون أيضاً عند ضغط ثابت ويمكن استخدام المعادلات (2.3) و(2.4) e.g. الحرارة المكتسبة من الحالة 1 إلى الحالة A لكل  $kg$  من البخار تساوي  $(h_A - h_1)$ . في المنطقة المحمصة يهبط الضغط إلى  $p_2$  كما موضح في الشكل (2.5). لا يكون الإجراء بسيطاً. عندما يتم تثبيت الحالات 1 و 2 فإنه يمكن الحصول على الطاقات الداخلية  $u_1$  و  $u_2$  من الجدول. يعطي الشغل المبذول بالمساحة المظللة في الشكل (2.5). هذا يمكن تقديره فقط برسم الإجراء وقياس المساحة مخططيًا. على أي حال، عندما يتم تقديم خاصية القصور الحراري،  $s$  ، 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)،

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



شكل (2.5) إجراء ثابت درجة الحرارة لبخار على مخطط  $p - v$ .

- مثال (2.2)

بخار عند ضغط 7bar وكسر جفاف 0.9 يتمدد في أسطوانة خلف كباس بثبوت درجة الحرارة وبانعكاسية إلى ضغط 1.5bar. أحسب التغير في الطاقة الداخلية والتغير في المحتوى الحراري لكل kg من البخار. وُجد أنَّ الحرارة المكتسبة أثناء الإجراء تكون مساوية لـ  $574 \text{ kJ/kg}$ ، أحسب الشغل المبذول لكل kg من البخار.

الحل:

يتم توضيح الإجراء في الشكل (2.6). تكون درجة حرارة التشبع المنشورة لـ 7bar هي  $165^\circ\text{C}$ . عليه فإنَّ البخار يكون محمصاً عند الحالة 2. الطاقة الداخلية عند الحالة 1 يتم إيجادها من المعادلة،

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

$$\therefore u_1 = 69.6 + 2315.7 = \underline{\underline{2385.3 \text{ kJ/kg}}}$$

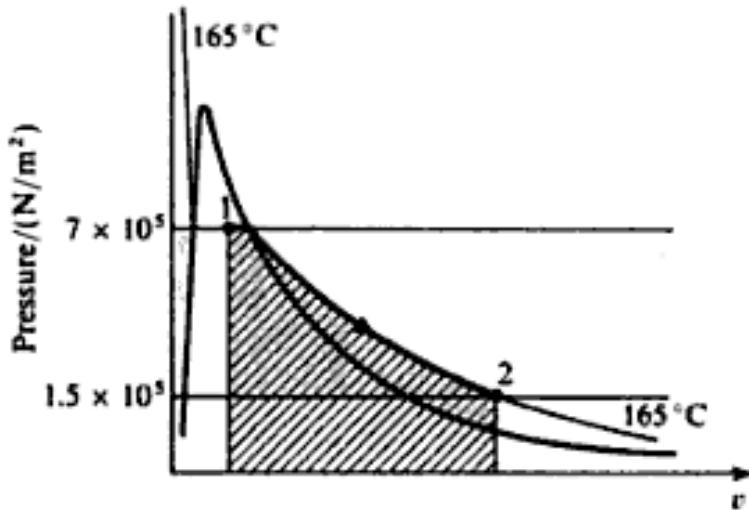
بالاستكمال من جداول التحميص عند 1.5bar و  $165^\circ\text{C}$ ، نحصل على،

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

$$\text{i.e. } u_2 = \underline{2602.8 \text{ kJ/kg}}$$

عليه،  $u_2 - u_1 = 2602.8 - 2385.3$

$$= \underline{217.5 \text{ kJ/kg}}$$



شكل (2.6) إجراء ثابت درجة الحرارة على مخطط  $p - v$

$$h_1 = h_f + xh_{fg} = 697 + 0.9 \times 2067$$

$$\therefore h_1 = 697 + 1860.3 = \underline{25573 \text{ kJ/kg}}$$

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

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

$$\text{i.e. } u_2 = \underline{2803 \text{ kJ/kg}}$$

$$\text{i.e. } h_2 - h_1 = 2803 - 2557.3 = 245.7 \text{ kJ/kg}$$

من معادلة اللاسيان (1.2)،

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

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

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

(الشغل المبذول يُعطي أيضاً بالمعادلة من الشكل (2.6)، هذا يمكن تقييمه فقط مخططياً).

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

$$p v = R T$$

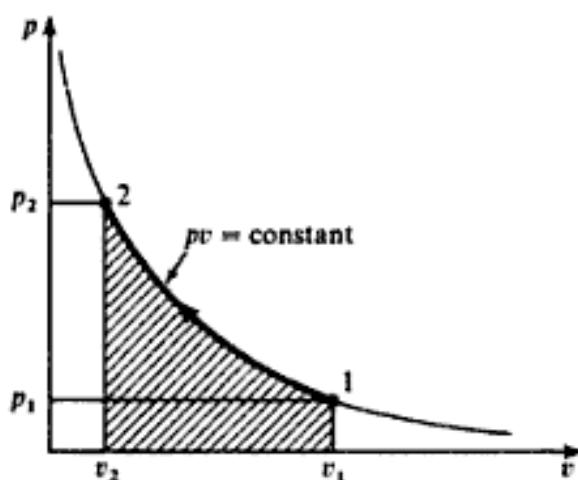
الآن عندما تكون درجة الحرارة ثابتة كما في إجراء ثابت درجة الحرارة وبالتالي نحصل على

$$p v = R T = \text{constant}$$

عليه لإجراء ثابت درجة الحرارة لغاز مثالي.

$$p v = \text{constant} \quad (2.5)$$

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



شكل (2.7) إجراء ثابت درجة الحرارة لغاز مثالي

في الشكل (2.7) يتم توضيح إجراء ثابت الحرارة لغاز مثالي على مخطط  $v - p$ . تكون المعادلة للإجراء هي

$pv = \text{constant}$  والتي هي معادلة قطع زائد.

يجب التأكيد بأنَّ الإجراء ثابت درجة الحرارة يكون فقط في الصورة  $p v = \text{constant}$  لغاز مثالي ، لأنَّه فقط

لغاز مثالي يمكن تطبيق معادلة الحالة  $pv = RT$ . يتمدد الشغل المبذول بغاز مثالي يمكن تطبيق معادلة الحالة

$pv = RT$ . يتمدد الشغل المبذول بغاز مثالي من الحالة 1 إلى الحالة 2 بثبوت درجة الحرارة وبإنعكاسية

ويعطي بالمساحة المظللة على الشكل (2.7).

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

في هذه الحالة  $p = C/v$  أو  $pv = \text{constant}$  حيث ثابت  $(C=)$ .

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

الثابت  $C$  يمكن كتابته كـ  $p_1 v_1 = p_2 v_2 = \text{constant}$  أو  $p_1 v_1 = p_2 v_2$  بما أن  $p_1 v_1 = p_2 v_2$

i.e.  $W = p_1 v_1 \log_e \frac{v_2}{v_1}$  (2.6) لكل وحدة من كتلة الغاز

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

لكتلة،  $m$ ، للغاز،

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

أيضاً بما أن  $p_1 v_1 = p_2 v_2$ ، وبالتالي،

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

بالتالي بالتعويض في المعادلة (2.6)،

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

أو لكتلة،  $m$ ، من الغاز،

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

مستخدماً المعادلة،

$$p_1 v_1 = RT$$

بالتالي بالتعويض في المعادلة (2.8)،

$$W = RT \log_e \frac{P_1}{P_2} \quad (2.10) \quad \text{لكل وحدة كتلة من الغاز}$$

أو لكتلة،  $m$ ، من الغاز ،

$$W = RT \log_e \frac{P_1}{P_2} \quad (2.11)$$

من الواضح أن هناك عدد كبير من المعادلات للشغل المبذول ، ولا يجب بذل أي محاولة لتذكرها بما أنها جميعاً يمكن إستقاقها ببساطة شديدة من المبادئ الأولية.

لغاز مثالي من قانون جول ،

$$U_2 - U_1 = mc_v(T_2 - T_1)$$

بال التالي لإجراء ثابت درجة الحرارة لغاز مثالي ، بما أن  $T_1 = T_2$  ، فإن ،

$$U_2 - U_1 = 0$$

i.e. تبقى الطاقة الداخلية ثابتة المقدار في إجراء ثابت درجة الحرارة لغاز مثالي.

من معادلة اللاسريان (1.2)،

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

بما أن  $u_2 = u_1$  ، فإن ،

$$Q = W \quad (2.12)$$

لإجراء ثابت درجة الحرارة لغاز مثالي .

لاحظ سريان الحرارة يكون مكافئاً للشغل المبذول في إجراء ثابت درجة الحرارة لغاز مثالي فقط . من المثال

(2.2) لبخار يلاحظ أنه ، بالرغم من أن الإجراء يكون ثابت درجة الحرارة ، فإن التغير في الطاقة الداخلية يكون

مساوياً لـ  $217.5 \text{ kJ/kg}$  ، ولا تكون الحرارة المكتسبة مكافئة للشغل المبذول .

مثال (2.3) :-

كتلة مقدارها  $1\text{kg}$  من النيتروجين (كتلته الجزيئية  $28\text{kg/kmol}$ ) يتم إنضغاطه بإنعكاسية وبثبوت درجة الحرارة

من  $20^{\circ}\text{C}$ ،  $1.01\text{bar}$  إلى  $4.2\text{bar}$ . أحسب الشغل المبذول وسريان الحرارة أثناء الإجراء. افترض أن النيتروجين يكون غازاً مثالياً.

- الحل:-

للنيتروجين،

$$R = \frac{R_{\circ}}{M} = \frac{8.314}{28} = 0.297 \text{ kJ/kgK}$$

يكون الإجراء موضحاً على مخطط  $p - v$  كما في الشكل (2.8). لقد تمت الإشارة إلى أن الإجراء يحدث من اليمين إلى اليسار على مخطط  $v - p$  وبالتالي فإن الشغل المبذول بواسطة المائع يكون سالباً. أي أن الشغل يكون مبذولاً على المائع.

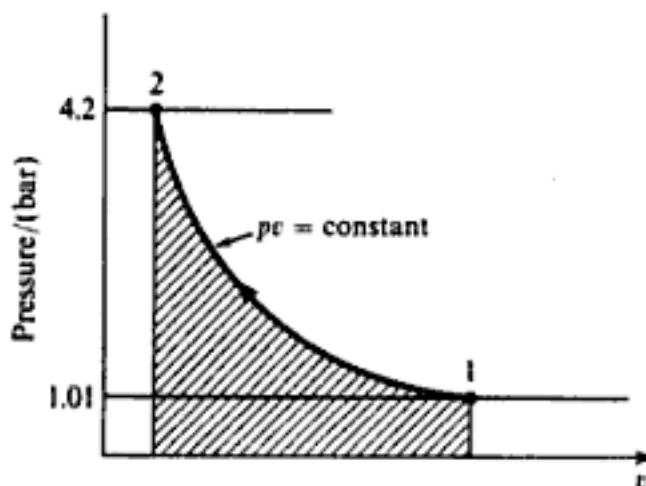
من المعادلة (2.10)،

$$W = RT \log_e \frac{p_1}{p_2} = 0.297 \times 293 \times \log^2 \frac{1.01}{4.2}$$

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

$$(\text{حيث } T = 20 + 273 = 293\text{K})$$

$$\text{i.e. } +0.297 \times 293 \times 1.425 = 124 \text{ kJ/kg}$$



شكل (2.8) إجراء ثابت درجة الحرارة على مخطط  $v - p$

من المعادلة (2.12)، لإجراء ثابت درجة الحرارة لغاز مثالي،

$$Q = W = -124 \text{ kJ/kg}$$

i.e.  $+124 \text{ kJ/kg}$  = الحرارة المفقودة

## 2.2 الإجراء اللاسرياني كاظم الحرارة الإنعكاسي:

### (Reversible Adiabatic Non-Flow Process)

الإجراء كاظم الحرارة هو ذلك الإجراء الذي لا تنتقل فيه الحرارة إلى أو من المائع أثناء الإجراء. مثل

هذا الإجراء يمكن أن يكون إنعكاسياً أو لا إنعكاسياً. سيتم اعتبار الإجراء اللاسرياني كاظم الحرارة الإنعكاسي في هذا المقطع.

من معادلة اللاسريان (1.2)،

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

$$Q = 0 \quad \text{ولإجراء كاظم الحرارة،}$$

عليه نحصل على،

$$(2.13) \quad \text{لأي إجراء كاظم للحرارة} \quad Q = u_2 - u_1$$

تكون المعادلة (2.13) صحيحة لإجراء كاظم الحرارة إذا ما كان الإجراء إنعكاسياً أم غير ذلك. في التمدد كاظم الحرارة، فإن الشغل المبذول بواسطة المائع يكون على حساب الانخفاض في الطاقة الداخلية للمائع. نفس الشيء، في إجراء إنضغاط كاظم الحرارة فإن جميع الشغل المبذول على المائع يؤدي لزيادة الطاقة الداخلية للمائع. لكي يحدث إجراء كاظم للحرارة، يجب أن يكون هنالك عزل حراري مثالي متاح للنظام.

لبخار يؤدي إجراء كاظم للحرارة إنعكاسياً فإن الشغل المبذول يمكن إيجاده من المعادلة (2.13) بتقييم  $u_1$  و  $u_2$  من الجداول. لكي يتم تثبيت الحالة 2 ، يجب استخدام الحقيقة القائلة أن الإجراء يكون إنعكاسياً وكاظم للحرارة . عندما يتم تقديم خاصية قصور الحراري،  $s$ ، سيتم توضيح أن إجراءً كاظم للحرارة إنعكاسياً يحدث قصور حراري ثابت، وهذه الحقيقة يمكن أن تستخدمن لتثبيت الحالة 2.

لغاز مثالي، فإنَّ قانوناً يربط بين  $p$  و  $v$  يمكن الحصول عليه لإجراء كاظم للحرارة إنعكاسي، باعتبار

معادلة طاقة اللاسريان في شكل تقاضلي. من المعادلة (2.2)،

$$dQ = du + dW$$

أيضاً لإجراء إنعكاسي  $dW = p dv$ ، وبالتالي لإجراء كاظم الحرارة،

$$dQ = du + dW = 0 \quad (2.14)$$

بما أنَّ  $h = u + pv$

$dh = du + p dv + v dp$  فإنَّ،

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

وبالتالي،

$$dQ = dh - v dp = 0 \quad (2.15)$$

بالتالي،

$$du + \frac{RT dv}{v} = 0$$

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

$$\therefore c_v dT + \frac{RT dv}{v} = 0$$

بقسمة المعادلة  $T$  لإعطاء شكلاً يمكن تكامله،

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

بالتكامل،

$$c_v \log_e T + R \log_e v = \text{cons tan t}$$

$$T = (pv)/R, \text{ عليه بالتعويض،}$$

$$c_v \log_e \frac{pv}{R} + R \log_e v = \text{cons tan t}$$

بقسمة المعادلة  $c_v \%$

$$\log_e \frac{pv}{R} + \frac{R}{c_v} \log_e v = \text{cons tan t}$$

أيضاً،

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

بالتالي بالتعويض،

$$\log_e \frac{pv}{R} + (\gamma - 1) \log_e v = \text{constant}$$

$$\text{أو } \log_e \frac{pv}{R} + \log_e v^{\gamma-1} = \text{constant}$$

$$\therefore \log_e \frac{pvv^{\gamma-1}}{R} = \text{constant}$$

$$\text{i.e. } \log_e \frac{pv^\gamma}{R} = \text{constant}$$

$$\text{i.e. } \log_e \frac{pv^\gamma}{R} = e^{(\text{constant})} = \text{constant}$$

$$\text{أو } pv^\gamma = \text{constant} \quad (2.16)$$

عليه سنملك علاقة بسيطة بين  $p$  و  $v$  لأي غاز مثالي يؤدي إجراء كاظم الحرارة إنعكاسي. كل غاز مثالي يكون لديه قيمته الخاصة  $\gamma$ .

العلاقات بين  $T$ ،  $v$ ،  $T$ ،  $p$  يمكن اشتقاقها،  $pv = RT$

$$\text{i.e. } pv = RT$$

$$\therefore p = \frac{RT}{v}$$

معوضاً في المعادلة (2.16)،

$$= \text{constant} \frac{RT}{v} v^\gamma$$

$$\text{i.e. } TV^{\gamma-1} = \text{constant} \quad (2.17)$$

أيضاً  $v = (RT)/p$ ; وبالتالي بالتعويض في المعادلة (2.16)،

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

عليه ،

$$\therefore \frac{T^\gamma}{p^{\gamma-1}} = \text{constant} \quad (2.18)$$

عليه لإجراء كاظم الحرارة إنعكاسي لغاز مثالي بين الحالات 1 و 2 يمكننا كتابة الآتي. من المعادلة (2.16)،

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

من المعادلة (2.17)،

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

من المعادلة (2.18)،

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

من المعادلة (2.13) فإن الشغل المبذول في إجراء كاظم الحرارة لكل kg من الغاز يُعطى بـ

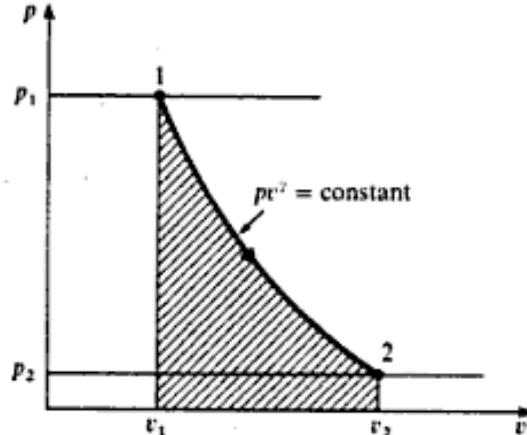
ويعطى الكسب في الطاقة الداخلية لغاز مثالي بالمعادلة،

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

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

أيضاً،

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



شكل (2.9) إجراء إنعكاسي كاظم للحرارة لغاز مثالي

بالتالي بالتعويض،

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

مستخدماً المعادلة  $pv = RT$

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

يتم توضيح إجراء كاظم للحرارة لغاز مثالي على مخطط  $v - p$  في الشكل (2.9)، يعطي الشغل المبذول بالمساحة المظللة، وهذه المساحة يمكن تقديرها بالتكامل،

$$\text{i.e. } W = \int_{v_1}^{v_2} p \, dv$$

عليه بما أن  $pv^\gamma = \text{constant}$ ، بالتالي،

$$W = \int_{v_1}^{v_2} \frac{C}{V^\gamma} \, dv$$

$$W = C \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{V^\gamma} = C \left[ \frac{V^{-\gamma+1}}{-\gamma+1} \right]_{v_1}^{v_2}$$

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

بالتالي، يمكن كتابة الثابت في المعادلة ك  $p_1 v_1^\gamma$  أو ك  $p_2 v_2^\gamma$ .

بالتالي،

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

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

هذا هو نفس التعبير المتحصل عليه من قبل كما في المعادلة (2.23).

مثال (2.4):

1kg من بخار عند 100bar و 375°C يتمدد إعكاسياً في أسطوانة معزولة جيداً حرارياً خلف كباس حتى يكون الضغط 38bar ويكون الغاز من بعد جافاً مشبعاً. أحسب الشغل المبذول بواسطة البخار.

الحل:

من جداول التحميص عند 100bar و 375°C

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

مستخدماً المعادلة (1.7)،

$$u = h - pv$$

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

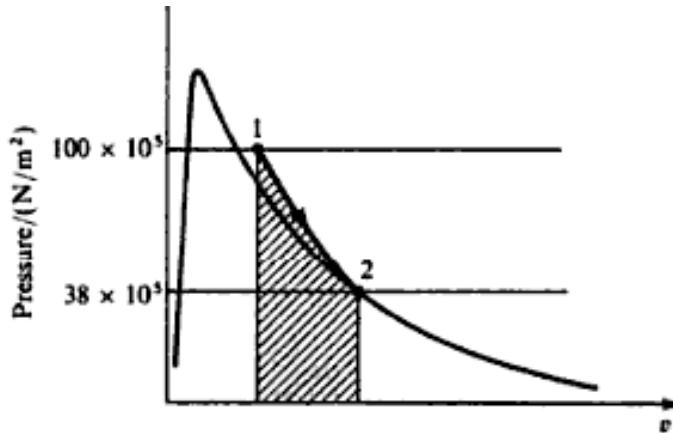
$$u_2 = u_g \text{ at } 38\text{bar} = 2602 \text{ kJ/kg} \quad \text{أيضاً،}$$

بما أنَّ الأسطوانة معزولة جيداً حرارياً وبالتالي لا يكون هناك سريان حرارة إلى أو من البخار أثناء التمدد، وبالتالي يكون الإجراء كاظم الحرارة. مستخدماً المعادلة (2.13)،

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

$$\therefore W = \underline{169.7 \text{ kJ/kg}}$$

يتم توضيح الإجراء على مخطط  $v - p$  كما في الشكل (2.10)، المساحة المظللة تمثل الشغل المبذول.



شكل (2.10) إجراء إنعكاسي كاظم للحرارة لبخار على مخطط  $v - p$ .

: مثال (2.5)

هواء عند ضغط  $1.02\text{bar}$ ،  $22^\circ\text{C}$ ، يكون ابتدائياً محظلاً حجماً لأسطوانة مقداره  $0.015\text{m}^3$ ، يتم إنضغاطه إنعكاسياً وبإجراء كاظم للحرارة بكمية  $6.8\text{bar}$ . أحسب درجة الحرارة النهائية، الحجم النهائي، والشغل المبذول على كتلة الهواء في الأسطوانة.

الحل:

من المعادلة (2.21)،

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{(r-1)/r} \quad \text{أو} \quad T_2 = T_1 \times \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(r-1)/r}$$

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

(حيث  $\gamma = 1.4$  للهواء،  $T_1 = 22 + 273 = 295\text{K}$ )

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

من المعادلة (2.19)،

$$\frac{p_1}{p_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^\gamma \quad \text{أو} \quad \frac{v_1}{v_2} = \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

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

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

i.e. الحجم النهائي = 0.00388 m<sup>3</sup>

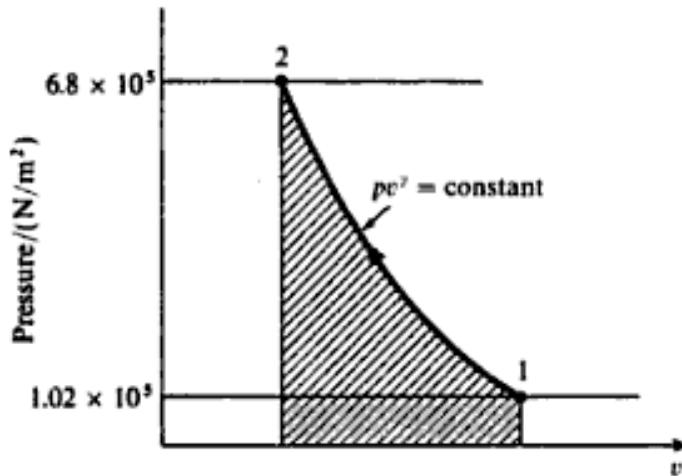
من المعادلة (2.13) لإجراء كاظم الحرارة،

$$W = u_1 - u_2$$

ولغاز مثالي، من المعادلة (2.14)  $u = c_v T$  لكل kg من الغاز،

$$\begin{aligned} \therefore W &= c_v (T_1 - T_2) = 0.718 \times (295 - 507.5) \\ &= \underline{-152.8 \text{ kJ/kg}} \end{aligned}$$

i.e. شغل الدخل لكل kg = 152.8 kJ



شكل (2.11) إجراء إعكاسي كاظم للحرارة لهواء على مخطط  $p - v$ .

كتلة الهواء يمكن إيجادها بإستخدام المعادلة  $pV = mRT$

$$\therefore m = \frac{p_1 V_1}{R T_1} = \frac{1.02 \times 10^5 \times 0.015}{0.287 \times 10^3 \times 295} = \underline{0.0181 \text{ kg}}$$

$$\text{i.e.} \quad \text{الشغل المبذول الكلي} = 0.0181 \times 152.8 = 2.76 \text{ kJ}$$

يتم توضيح الإجراء على مخطط  $p - v$  في الشكل (2.11)، تمثل المساحة المظللة الشغل المبذول لكل kg من الهواء.

### 2.3 إجراء متعدد الإنتحاء: (Polytropic Process)

وُجد أن هنالك إجراءات عديدة في الواقع العملي يتم تقريبها لقانون إنعكاسي بالشكل  $pv^n = \text{constant}$  حيث  $n$  هو مقدار ثابت. كل من البخار والغازات تطبع بمقارب هذا القانون في إجراءات لا سريان عديدة. مثل هذه الإجراءات تكون إنعكاسية داخلياً.

لأي إجراء إنعكاسي،

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

لأي إجراء يكون فيه  $pv^n = \text{constant}$  نحصل على  $p = c/v^n$  حيث  $c$  هو مقدار ثابت.

$$\therefore W = \int_{v_1}^{v_2} \frac{c}{v^n} \, dv$$

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

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

(بما أن الثابت،  $c$ ، يمكن كتابته ك  $p_1 v_1^n$  أو ك  $p_2 v_2^n$ )

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

تكون المعادلة (2.24) صحيحة لأي مادة تؤدي إجراءاً إنتحائياً إنعكاسياً. يتبع أيضاً أنه لأي إجراء إنتحاء يمكن كتابة،

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

مثال (2.6):

في محرك بخار يكون البخار عند بداية إجراء التمدد عند ضغط مقداره 7bar، كسر جفاف 0.95، ويتبعد التمدد القانون  $pv^{1.1} = \text{constant}$ ، أسفل إلى ضغط مقداره 0.34bar. أحسب الشغل المبذول لكل kg من البخار أثناء التمدد، وسريان الحرارة لكل kg من البخار إلى أو من الأسطوانة أثناء التمدد.

الحل:

$$\text{عند } v_g = 0.2728 \text{ m}^3/\text{kg}, 7\text{bar}$$

عليه باستخدام المعادلة،

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

بالتالي من المعادلة (2.25)،

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

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

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

من المعادلة (2.24)،

$$W = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{n-1} = \frac{7 \times 10^5 \times 0.259 - 0.34 \times 10^5 \times 4.05}{1.1-1}$$

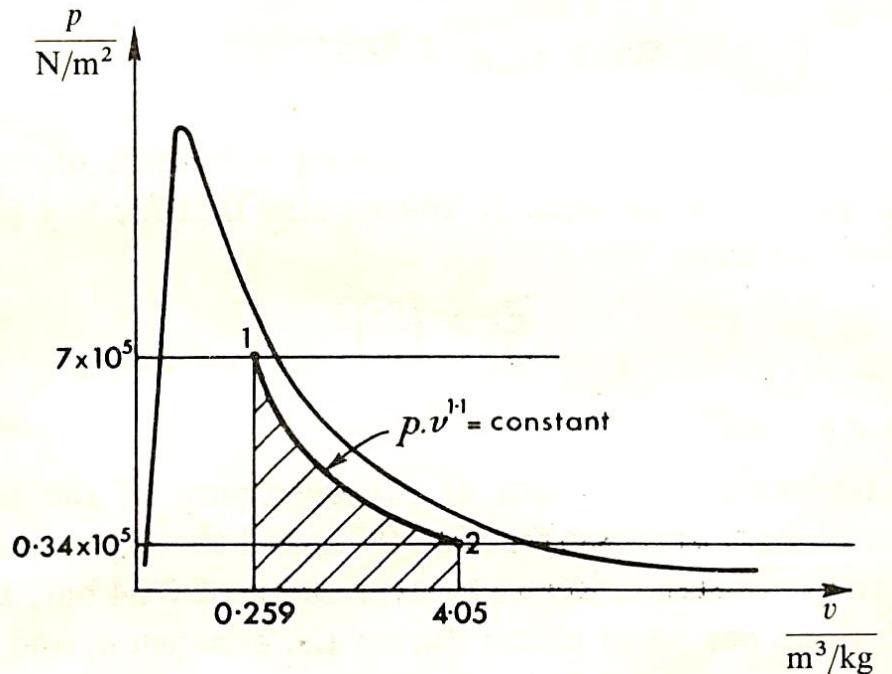
$$\text{i.e. } W = \frac{10^5}{0.1} (1.813 - 1.377) = \frac{10^5 \times 0.436}{0.1} \text{ N.m/kg}$$

$$\text{i.e. } \text{الشغل المبذول} = 436 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{عند } v_g = 4.6499 \text{ m}^3/\text{kg}, 0.34\text{bar}$$

عليه يكون البخار رطباً عند الحالة 2،

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



شكل (2.12)

يتم توضيح التمدد على مخطط  $v - p$  كما في الشكل (2.12)، المساحة المظللة تحت 1-2 تمثل الشغل المبذول لكل kg من البخار.

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

$$\text{i.e. } u_1 = 34.8 + 2442 = 2476.8 \text{ kJ/kg}$$

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

$$\text{i.e. } u_2 = 38.35 + 2158 = 2196.4 \text{ kJ/kg}$$

من معادلة طاقة اللاسريان (1.2)،

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

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

$$\text{i.e. } \text{الحرارة المكتسبة} = 155.6 \text{ kJ/kg}$$

إعتبر الآن إجراء الإنتحاء لغاز مثالي،

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

بالتالي في المعادلة  $pV^n = \text{constant}$ ، نحصل على،

$$\frac{RT}{V} V^n = \text{constant} \quad \text{أو} \quad TV^{n-1} = \text{constant} \quad (2.26)$$

أيضاً بكتابة  $V = (RT/p)$ ، نحصل على،

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

يمكن ملاحظة أن هذه المعادلات تكون مشابهة بالضبط للمعادلات (2.17) و (2.18) لإجراء كاظم الحرارة إنعكاسي لغاز مثالي . حقيقة أن الإجراء كاظم الحرارة الإنعكاسي لغاز مثالي هو حالة خاصة لإجراء الإنتحاء بالأوس  $n$ ، مساوٍ لـ  $\gamma$ .

يمكن كتابة المعادلات (2.26) و (2.27) كالتالي،

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{n-1} \quad (2.28)$$

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

لاحظ أن المعادلات (2.26)، (2.27)، و (2.28) لا تطبق على بخار لا يؤدي إجراء إنتحائياً بما أن خاصية معادلة  $pv = RT$ ، التي تم استخدامها في إشتقاق المعادلات، يتم تطبيقها فقط على غاز مثالي. لغاز مثالي يتعدد إنتحائياً، من الأكثر ملائمة في بعض الأحيان التعبير عن الشغل المبذول بدلالات درجات الحرارة عند الحالات الطرفية (end states).

من المعادلة (2.24)،  $W = (p_1V_1 - p_2V_2)/(n-1)$  ، بالتالي،

$p_2V_2 = RT_2$  أو  $p_1V_1 = RT_1$

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

أو لكتلة،  $m$

$$W = \frac{mR(T_1 - T_2)}{n - 1} \quad (2.31)$$

باستخدام معادلة طاقة ال拉斯يران (1.2)، يمكن إيجاد سريان الحرارة أثناء الإجراء،

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

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

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

بالتالي بالتعويض،

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

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

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

الآن من المعادلة،  $W = (p_1 v_1 - p_2 v_2)/(n - 1)$

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

المعادلة (2.32) هي تعبيراً ملائماً و موجزاً يربط الحرارة المكتسبة والشغل المبذول في إجراء الإنتحاء، في

التمدد، يُبذل الشغل بالغاز، وبالتالي فإن العنصر  $W$  يكون موجباً. عليه يمكن الملاحظة من المعادلة (2.32)

أنه عندما يكون أس الإنتحاء  $n$  أقل من  $\gamma$ ، في تمدد، وبالتالي فإن الطرف الأيمن للمعادلة يكون موجباً (i.e.) يتم

إمداد الحرارة أثناء الإجراء). عكس ذلك، عندما تكون  $n$  أكبر من  $\gamma$  في تمدد وبالتالي فإن الحرارة يتم فقدانها

بالغاز. نفس الشيء، فإن الشغل المبذول في إجراء إنضغاط يكون سالباً، عليه عندما تكون  $n$  أقل من  $\gamma$  في إنضغاط، فإن الحرارة يجب إمدادها إلى الغاز أثناء الإجراء. لقد تم التوضيح أن  $\gamma$  لجميع الغازات المثالية قيمة أكبر من وحدة.

مثال (2.7):

1kg من غاز مثالي يتم إنضغاطه من  $1.1\text{bar}$ ،  $27^\circ\text{C}$  طبقاً لقانون  $pv^{1.3} = \text{constant}$ ، حتى يكون الضغط  $6.6\text{bar}$ . أحسب سريان الحرارة إلى أو من جدران الأسطوانة:

$c_p = 2.10\text{kJ/kgK}$  (الكتلة الجزيئية  $30\text{kg/kmol}$ )، الذي له  $a$

$c_p = 0.520\text{kJ/kgK}$  (الكتلة الجزيئية  $40\text{kg/kmol}$ )، الذي له  $b$

الحل:

من المعادلة (2.29)، لكل من الإيثان والأرجون،

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

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

(حيث  $T_1 = 27 + 273 = 300\text{K}$ )

$R = R_o/M$ ، عليه، للإيثان،

$$R = \frac{8.314}{30} = \underline{0.277\text{ kJ/kg}}$$

$$c_p - c_v = R$$

$$c_v = 2.10 - 0.277 = \underline{1.823\text{ kJ/kg}}$$

(حيث  $c_p = 1.75\text{ kJ/kg}$  للإيثان).

بالتالي،

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

من المعادلة (2.30)،

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

بالتالي من المعادلة (3.32)،

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

$$\therefore Q = +\frac{0.148 \times 141.8}{0.152} = \underline{138.1 \text{ kJ/kg}}$$

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

b/ باستخدام نفس الأسلوب للأرجون نحصل على،

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

$$c_v = 0.520 - 0.208 = \underline{0.312 \text{ kJ/kg}}$$

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

بالتالي الشغل المبذول يعطى بـ،

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

بالتالي،

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

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

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

في إجراء متعدد الإنتحاء فإنَّ الأس  $n$  يعتمد فقط على كميات الحرارة والشغل أثناء الإجراء . الإجراءات المتنوعة التي يتم اعتبارها في المقاطع (2.1) و (2.2) هي حالات خاصة للإجراء متعدد الإنتحاء لغاز مثالي.

كمثال ،

عندما  $pv^0 = \text{constant}$ , i.e.  $p = \text{constant}$   $n = 0$

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

عندما  $pv = \text{constant}$ , i.e.  $T = \text{constant}$   $n = 1$

(بما أنَّ  $pv/T = \text{constant}$  لغاز مثالي).

عندما  $n = \gamma$  كاظم الحرارة إنعكاسي

هذه يتم توضيحيها على مخطط  $v - p$  في الشكل (2.13). هكذا ،

الحالة 1 إلى الحالة A هي تبريد ثابت الضغط ( $n = 0$ )؛

الحالة 1 إلى الحالة B هي انضغاط ثابت درجة الحرارة ( $n = 1$ )؛

الحالة 1 إلى C هي انضغاط كاظم الحرارة إنعكاسي ( $n = \gamma$ )؛

الحالة 1 إلى D هي تسخين ثابت الحجم ( $n = \infty$ )

نفس الشئ، 1 إلى 'A هي تسخين ثابت الضغط؛ 1 إلى 'B هي تمدد ثابت الحرارة؛ 1 إلى 'C هي تمدد كاظم

الحرارة إنعكاسي؛ 1 إلى 'D هي تبريد ثابت الحجم. لاحظ أنَّه، بما أنَّ  $\gamma$  تكون دائمًا أكبر من وحدة، وبالتالي فإنَّ

الإجراء 1 إلى C يجب أن يقع بين الإجراءات 1 إلى B و 1 إلى D؛ نفس الشئ، فإنَّ الإجراء 1 إلى 'C

يجب أن يقع بين 1 إلى 'B و 1 إلى 'D.

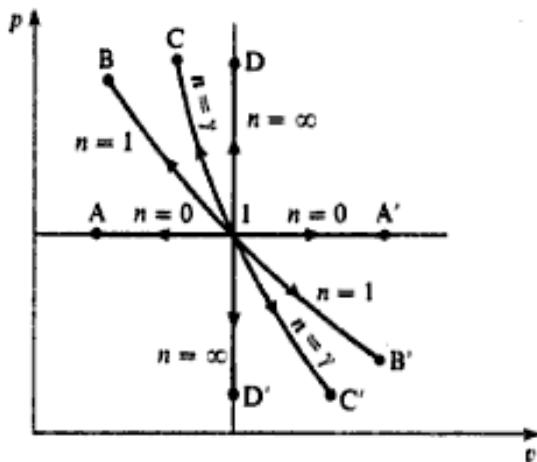
لبخار فإنَّ تعديلاً مثل عاليه لا يكون ممكناً.

هناك إجراءً واحداً هاماً لبخار يجب ذكره هنا. البخار يمكن أن يؤدي إجراءً طبقاً لقانون  $pv = \text{constant}$ . في

هذه الحالة، بما أنَّ معادلة الخاصية  $RT = pv$ ، لا يتم تطبيقها إلى بخار، فإنَّ الإجراء لا يكون ثابت درجة

الحرارة. يجب إستخدام جداول لإيجاد الخواص عند الحالات الطرفية، بالاستفادة من الحقيقة التي تقول أنَّ  $p_1v_1$

$$\cdot = p_2v_2$$



شكل (2.13) إجراءات متعددة الإنحناء عامة مرسومة على  
مخطط  $p - v$

مثال (2.8)

في أسطوانة محرك بخار يتَمدد البخار من  $0.75\text{bar}$  إلى  $5.5\text{bar}$  طبقاً لقانون قطع زائد  $pv=\text{constant}$ . إذا كان البخار إبتدائياً جافاً مشيناً، أحسب الشغل المبذول لكل  $\text{kg}$  من البخار، وسريان الحرارة إلى أو من جدران الأسطوانة.

الحل:

عند  $5.5\text{bar}$

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

بالتالي،

$$p_1v_1 = p_2v_2$$

$$\therefore v_2 = \frac{p_1v_1}{p_2} = \frac{5.5 \times 0.3427}{0.75} = \underline{2.515} \text{ m}^3 / \text{kg}$$

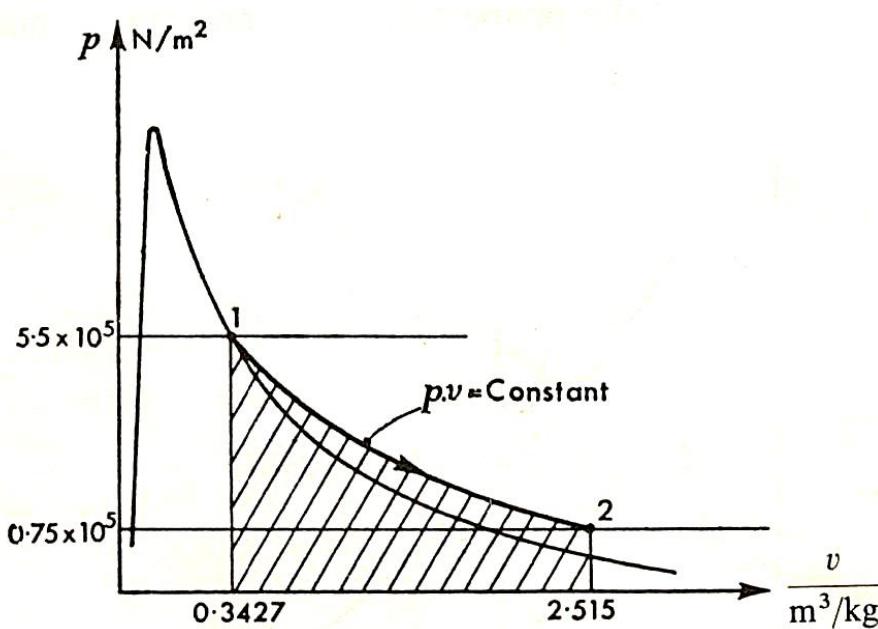
عند  $v_g = \underline{2.217} \text{ m}^3/\text{kg}$ ، بالتالي يكون البخار محمضاً عند الحالة 2.

بالاستكمال من جداول التحميص عند 0.75bar نحصل على،

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

$$u_2 = 2510 + 57.7$$

$$= \underline{2567.7} \text{ kJ/kg}$$



شكل (2.14)

بخار مشبع عند ضغط 5.5bar،

$$u_1 = u_2 = \underline{2565} \text{ kJ/kg}$$

بالتالي،

$$2567.7 - 2565 = \underline{2.7} \text{ kJ/kg}$$

يتم توضيح الإجراء على مخطط  $v - p$  كما في الشكل (2.14)، حيث أن المساحة المظللة تمثل الشغل المبذول.

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

$$= (\text{cons} \tan t) [\log_e v]_{v_1}^{v_2}$$

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

$$\text{i.e. } W = 5.5 \times 10^5 \times 0.3427 \times \log_e \frac{V_2}{V_1} = 5.5 \times 10^5 \times 0.3427 \times \log_e \frac{P_1}{P_2}$$

$$\therefore W = 5.5 \times 10^5 \times 0.3427 \times \log_e \frac{5.5}{0.75} = \underline{375,500 \text{ N.m/kg}}$$

من معادلة طاقة اللاسيران، (1.2)،

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

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

#### 2.4 الإجراءات الإنعكاسية: (Irreversible Processes)

يمكن استخدام معادلات المقاطع 2.1، 2.2 و 2.3 فقط عندما يطيع الإجراء أحكاماً معينة بتقريب جيد.

في إجراءات يكون فيها المائع محاطاً بأسطوانة خلف كباس، يمكن إفتراض أن تأثيرات الإحتكاك يتم تجاهلها.

على أي حال، لكي يتم تحقيق أحكام الإنعكاسية يجب أن لا يكون هناك إنتقال للحرارة إلى أو من النظام خلال

فرق درجة حرارة محدد (كبير). فقط يمكن تخيل هذا في إجراء ثابت درجة الحرارة، بما أنه في جميع الإجراءات

الأخرى تكون درجة حرارة النظام متغيرة بإستمرار أثناء الإجراء؛ لكي يتم تحقيق أحكام الإنعكاسية فإن درجة

حرارة وسيط التبريد أو التسخين خارج النظام سيطلب تغييرها تبعاً لذلك. مثاليًا يمكن تخيل طريقة ما لتحقيق

الإنعكاسية، لكن في الواقع العملي لا يمكن حتى قبولها كتقريب. بالرغم من ذلك، إذا قبلنا بلإنعكاسية مؤكدة في

البيئة المحيطة تؤدي تغييراً لا إنعكاسياً . معظم الإجراءات التي تحدث في أسطوانة خلف كباس يمكن إفتراض

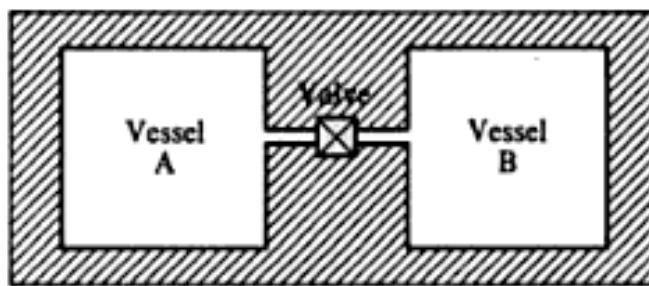
أنها تكون إنعكاسية داخلياً كتقريب جيد، ويمكن استخدام المعادلات للمقاطع 2.1، 2.2، 2.3 حيثما يمكن

تطبيقاتها. بعض الإجراءات لا يمكن إفتراض أنها إنعكاسية داخلياً، وسيتم الآن بإختصار مناقشة الحالات الهمامة.

## 1. التمدد غير المقاوم أو الحر: (Unresisted or Free Expansion)

لقد تم ذكر هذا الإجراء مسبقاً ولكي يتم توضيح أنه في أي إجراء لا إنعكاسياً فإن الشغل المبذول لا يُعطى بالمعادلة  $W = \int p \, dv$ . اعتبر وعاءان A و B، يتم توصيلهما بينياً بمسورة قصيرة بضماء X، وعزلهما حرارياً بمثالية (أنظر الشكل (2.15)). إبتدائياً يجعل الوعاء A يكون مملوءاً بمائع عند ضغط معين، وإجعل B يكون مفرغاً كلياً. عندما يتم فتح الصمام X فإن المائع A سيتمدد سريعاً ليملأ الوعاءين A و B. وسيكون الضغط النهائي أقل من الضغط الإبتدائي في الوعاء A. هذا يُعرف بالتمدد غير المقاوم أو التمدد الحر. لا يكون الإجراء إنعكاسياً، بما أن شغلاً خارجياً يجب أداءه لإرجاع المائع إلى حالته الإبتدائية.

$$\text{i.e. } Q = (u_2 - u_1) + W$$



شكل (2.15) وعاءان معزولان جيداً وموصلان بينياً

الآن في هذا الإجراء لا يكون هنالك شغلاً مبذولاً على أو بالمائع، بما أن حد النظام لا يتحرك لا يكون هنالك إنسياپ حرارة إلى أو من المائع بما أن النظام معزول جيداً وبالتالي فإن الإجراء يكون كاظم للحرارة، لكن لا إنعكاسياً.

$$\text{i.e. } u_1 - u_2 = 0 \quad \text{أو} \quad u_2 = u_1$$

بالتالي في التمدد الحر فإن الطاقة الداخلية الإبتدائية تساوي الطاقة الداخلية النهائية.

لغاز مثالي، من المعادلة،

$$u = c_v T$$

عليه لتمدد حر لغازاً مثاليًّا،

$$c_v T_1 = c_v T_2$$

$$\text{i.e.} \quad T_1 = T_2$$

عليه لغاز مثالي يؤدي تمدداً حرًّا، فإنَّ درجة الحرارة الإبتدائية تكون مكافئة لدرجة الحرارة النهاية.

مثال (2.9) :

هواء عند 20bar يكون بداية محواً في وعاء A كما في الشكل (2.15)، يمكن إفتراض أن حجمه يكون  $1m^3$ . يتم فتح الصمام X ويتمدد الهواء ليملأ الوعاءان A و B. مفترضاً أن الوعاءان يكونان بحجم مكافئ، أحسب الضغط للهواء.

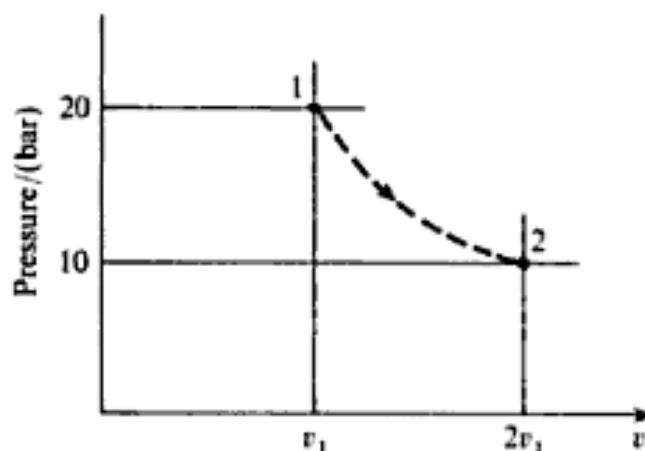
الحل:

لغاز مثالي بتمدد حر  $T_2 = T_1$ . أيضاً من المعادلة،  $pV = mRT$

$$\cdot p_1 V_1 = p_2 V_2$$

الآن فإنَّ الحجم  $V_2$  هو الحجم المتحد للوعاءان A و B،

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



شكل (2.16) إجراء لا إنعكاسي على مخطط  $p - v$

عليه نحصل على،

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

i.e. الضغط النهائي = 10 bar

يتم توضيح الإجراء على مخطط  $v - p$  في الشكل (2.16). يتم تثبيت الحالة 1 عند 20bar و  $1m^3$  بمعلومية كثافة الغاز؛ يتم تثبيت الحالة 2 عند 10bar و  $2m^3$  لنفس كثافة الغاز. يكون الإجراء بين هاتين الحالتين لا إنعكاسياً ويجب رسمه متقطعاً. النقاط 1 و 2 تقع على خط ثابت درجة الحرارة، لكن الإجراء بين 1 و 2 لا يمكن تسميتها إجراء ثابت درجة الحرارة، بما أن درجات الحرارة الوسطية لا تكون هي نفسها خلال الإجراء. لا يكون هناك شغلاً مبذولاً خلال الإجراء، ولا تمثل المساحة المظللة تحت الخط المتقطع الشغل المبذول.

## 2. الخنق: (Throttling)

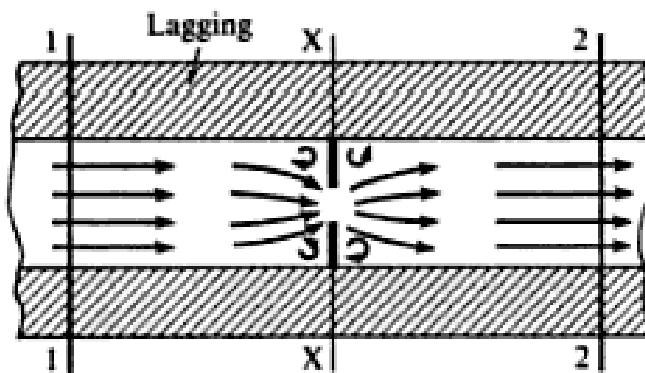
يُوصف سريان المائع بالمنخفض عندما يكون هناك بعض التقييد للسريان، عندما تكون السرعات قبل وبعد التقييد إما متساوية أو صغيرةتان بحيث يمكن تجاهلها، وعندما يكون هناك فقد حرارة إلى البيئة المحيطة يمكن تجاهله. التقييد للسريان يمكن أن يكون فتح جزئي لصمام، ثقب، أو أي خفض مفاجئ آخر في مساحة المقطع العرضي للسريان.

هناك مثالاً للخنق يتم توضيجه في الشكل (2.17). ينساب المائع باستقرار على طول ماسورة معزولة جيداً ويمر خلال ثقب عند المقطع X. بما أن الماسورة تكون معزولة جيداً يمكن إفتراض أنه لا يكون هناك سريان للحرارة إلى أو من المائع. يمكن تطبيق معادلة السريان (1.8) بين أي مقطعين للسريان،

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

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

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



شكل (2.17) إجراء الخنق

عندما تكون السرعتان  $c_1$  و  $c_2$  صغيرتان، أو عندما تكون  $c_1$  تقرباً مساوية لـ  $c_2$ ، وبالتالي يمكن تجاهل عناصر طاقة الحركة. (ملحوظة: يمكن إختبار المقاطع 1 و 2 بصورة جيدة أعلى السريان وأسفل السريان بحيث لا تتأثر بإضطراب المائع عند الخنق، وبحيث يمكن تبرير الإفتراض الأخير).

$$h_1 = h_2$$

عليه لإجراء خنق فإنَّ المحتوى الحراري الإبتدائي يكون مكافئاً للمحتوى الحراري النهائي. يكون الإجراء كاظم للحرارة، لكنه عالي اللا إنعكاسية بسبب تدويم المائع حول الثقب عند X. بين المقاطع 1 و X يهبط المحتوى الحراري وتزيد طاقة الحركة كلما تسارع المائع خلال الثقب. بين المقاطع X و 2 يزيد المحتوى الحراري بتحطم طاقة الحركة بدوامات المائع.

$$\text{لغاز مثالي } h = c_p T, \text{ عليه،}$$

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

عليه لخنق غاز فإنَّ درجة الحرارة الإبتدائية تكافئ درجة الحرارة النهائية.

: مثال (2.10)

بخار عند 19bar يتم خنقه إلى 1bar وُجِدَ أنَّ درجة الحرارة بعد الخنق تساوي 150°C. أحسب كسر الجفاف الإبتدائي للبخار.

الحل:

من جداول التحميص  $1\text{bar}$  و  $150^\circ\text{C}$  نحصل على  $h_2 = 2777 \text{ kJ/kg}$ . بالتالي للخنق،

$$h_1 = h_2 = 2777 \text{ kJ/kg}$$

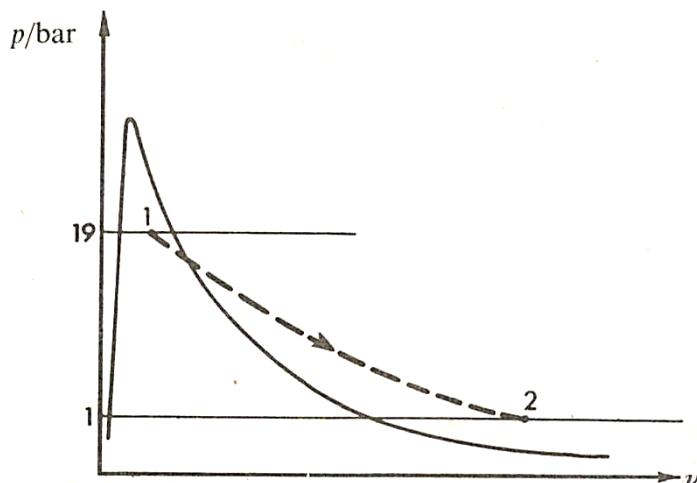
مستخدماً المعادلة،

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

$$\text{i.e. } 2777 + 897 + x_1 \times 1901$$

$$\therefore x_1 = \frac{1880}{1901} = 0.989$$

i.e. كسر الجفاف الابتدائي = 0.989



شكل (2.18)

يتم توضيح الإجراء على مخطط  $v - p$  في الشكل (2.18). يتم تثبيت الحالات 1 و 2، لكن لا يتم تحديد الحالات الوسطية، يجب رسم الإجراء متقطعاً كما موضح. لا يكون هنالك شغلاً مبدولاً خلال الإجراء، والمساحة تحت الخط 2 - 1 لا تكون متساوية للشغل المبذول. لبخار يمكن استخدام الخنق كوسيلة لإيجاد كسر الجفاف للبخار الرطب، كما في المثال (2.10).

### 3. الخلطة الإديبانية: (Adiabatic Mixing)

خلط جدولين من مائع يكون عاديًّا إلى حد بعيد في التطبيقات الهندسية، وعادة يمكن إفتراض حدوثه أديبانياً (كافظ للحرارة). إنعتبر جدولين من خليط لمائع كما موضح في الشكل (2.19). إجعل للجدولين

معادلات إنساب كتلة  $\dot{m}_1$  و  $\dot{m}_2$ ، ودرجات حرارة  $T_1$  و  $T_2$ . إجعل للجدول المخلوط الناتج درجة حرارة  $T_3$ . لا يكون هنالك سريان حرارة إلى أو من المائع، ولا يكون هنالك شغلاً مبذولاً، وبالتالي من معادلة السريان، وبتجاهل التغييرات في طاقة الحركة نحصل على،

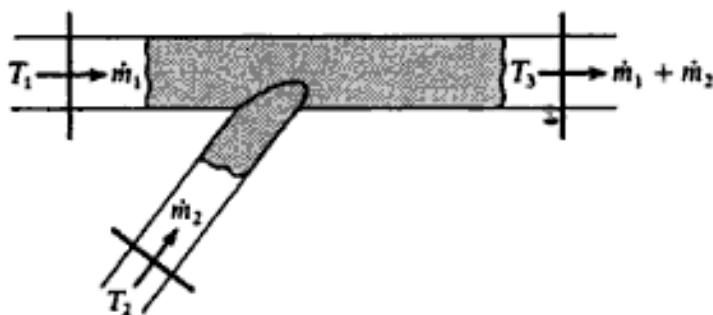
$$H_1 + H_2 = H_3 \text{ و } \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_3 \quad (2.33)$$

أو لغاز، من المعادلة  $c_p T = h$ ، وبالتالي،

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

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

يكون إجراء الخلطة عالي الإنعكاسية نتيجة للمقدار الضخم للتدوير الذي يحدث للمائع.



شكل (2.19) إجراء الخلط

## 2.5 إجراءات السريان الإنعكاسي: (Reversible Flow Processes)

بالرغم من أنَّ إجراءات السريان تكون عادة عالية الإنعكاسية في الواقع العملي، من الملائم في بعض الأحيان إفتراض أنَّ إجراء السريان يكون إنعكاسياً وذلك لكي يتم إعطاء مقارنة مثالية. المشاهد المتنتقل مع سريان المائع سيلاحظ تغيراً في الخواص الديناميكية الحرارية كما في حالة إجراء اللاسريان. كمثال في إجراء كاظم الحرارة إنعكاسي لغاز مثالي، فإنَّ المشاهد المتنتقل مع الغاز سيلاحظ حدوث الإجراء  $pV^\gamma = \text{const.}$  لكن الشغل المبذول بالغاز سوف يعطى بالمعادلة  $\int pdV$ ، أو بتغيير الطاقة الداخلية كما موضح بالمعادلة (2.13). هنالك بعض الشغل يتم بذله على أو بالغاز بتأثير القوي التي تعمل بين الغاز المتحرك وبيئته المحيطة. كمثال، لإجراء سريان كاظم الحرارة إنعكاسي لغاز مثالي، من معادلة السريان (1.8)،

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

بالتالي، بما أنّ  $Q = 0$ ،

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

أيضاً بما أنّ الإجراء يتم إفتراضه إنعكاسياً عليه ولغاز مثالي  $p v^\gamma = \text{const.}$

هذه المعادلة يمكن استخدامها لتبسيط الحالات الظرفية.

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

**مثال (2.11):**

توربينة غاز تستقبل غازات من غرفة الاحتراق عند  $7\text{bar}$  و  $650^\circ\text{C}$  وبسرعة مقدارها  $9\text{m/s}$ . تغادر الغازات التوربينة عند  $1\text{bar}$ ، بسرعة  $45\text{m/s}$ . مفترضاً أن التمدد يكون كاظماً للحرارة وإنعكاسياً في الحالة المثلية، أحسب الشغل المبذول لكل  $\text{kg}$  من الغاز. للغازات خذ  $\gamma = 1.333$  و  $c_p = 1.11\text{kJ/kg}$ .

**الحل:**

مستخدماً معادلة السريان وإجراء كاظم الحرارة،

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

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

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

لإيجاد  $T_2$  نستخدم المعادلة (2.21)،

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

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

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

. (  $T_1 = 650 + 273 = 923 \text{ K}$  )

بالتالي بالتعويض،

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

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

لاحظ أنَّ تغير طاقة الحركة يكون صغيراً مقارنة بتغير المحتوى الحراري. هذه هي غالباً الحالة في مسائل إجراءات السريان، ويمكن في بعض الأحيان تجاهل التغير في طاقة الحركة.

## 2.6 إجراءات السريان اللا مستقر: (Non Steady – Flow Processes)

في الواقع العملي هناك الكثير من الحالات التي يكون فيها معدُّل سريان الكتلة العابر لحد نظام عند المدخل مساوٍ لمعدُّل سريان الكتلة عند المخرج. أيضاً، فإنَّ المعدُّل الذي يُبذَل به الشغل على أو بالمائع، والمعدُّل الذي تنتقل به الحرارة إلى أو بالنظام لا يكون ثابتاً مع الزمن. في مثل هذه الحالة فإنَّ الطاقة الكلية لا تبقى ثابتة خلال حد النظام، كما هو الحال في إجراء سريان مستقر، بل تتغير مع الزمن.

إجعل الطاقة الكلية للنظام خلال حد النظام عن أي لحظة تساوي  $E$ . أثاء فترة زمنية صغيرة، إجعل الكتلة المدخلة للنظام  $\delta m_1$ ، وإجعل الكتلة المغادرة للنظام تكون  $\delta m_2$ ; إجعل الحرارة المنتقلة والشغل المبذول خلال نفس الزمن يكونا  $\delta Q$  و  $\delta W$  على الترتيب. اعتبر نظاماً مماثلاً للموضح في الشكل (1.2)، يتم أداء شغل عند المدخل والمخرج في إدخال وإخراج الكتلة عبر حدود النظام.

i.e.  $\delta m_1 p_1 v_1 = \text{الطاقة المطلوبة عند المدخل}$

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

أيضاً، كما من قبل فإن الطاقة لوحدة كتلة للمائع المناسب تعطي بـ  $(u_1 + c_1^2 / 2 + z_1 g)$  عند المدخل، وبـ  $(u_2 + c_2^2 / 2 + z_2 g)$  عند المخرج.

بالتالي، الطاقة الداخلة للنظام،

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

والطاقة المغادرة للنظام،

$\delta W + \delta m_2 (u_2 + c_2^2 / 2 + z_2 g) + \delta m_2 p_2 v_2$  = الطاقة المغادرة للنظام

بتطبيق القانون الأول:

الطاقة الداخلة للنظام - الطاقة المغادرة = زيادة طاقة النظام،  $\delta E$

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

خلال زمن كبير فإن الحرارة المنقولة الكلية تعطي بـ  $\sum \delta Q = Q$

والشغل المبذول الكلي يعطي بـ  $\sum \delta W = W$

إجعل الكتلة الإبتدائية خلال حدود النظام تكون مساوية لـ  $m'$  ، والطاقة الداخلة الإبتدائية تكون ' $u'$  ، والكتلة عند

نهاية الفترة الزمنية تكون "  $m$  " ، والطاقة الداخلية النهائية تكون ' $u$ '

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

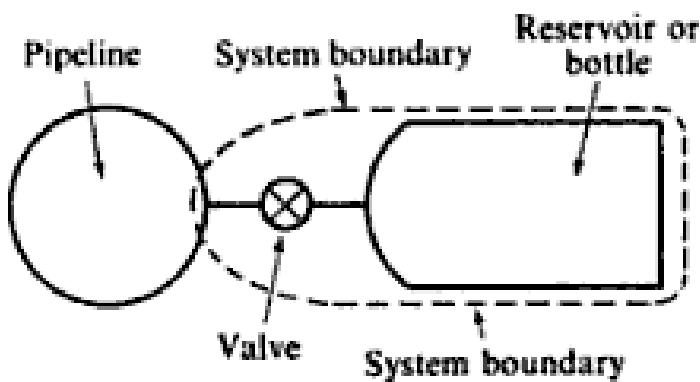
عليه نحصل على،

$$\begin{aligned} \delta Q + \delta m_1 (u_1 + c_1^2 / 2 + z_1 g + p_1 v_1) \\ = \delta W + \sum \delta m_2 (u_2 + c_2^2 / 2 + z_2 g + p_2 v_2) + (m'' u'' - m' u') \end{aligned} \quad (2.35)$$

أيضاً من إجراء إستمارية الكتلة،

الكتلة الدخلة - الكتلة المغادرة = زيادة الكتلة خلال حد النظام

$$\text{i.e. } \therefore \sum \delta m_1 - \sum \delta m_2 = m'' - m' \quad (2.36)$$



شكل (2.20) ملء قارورة أو وعاء من خط أنابيب

إحدى المسائل الأكثر حدوثاً ضمن معادلة السريان اللا مستقر هي ملء زجاجة أو وعاء من مصدر ضخم مقارنة بالزجاجة أو الوعاء. الشكل (2.20) يوضح مثالاً نموذجياً. يتم إفتراض أنَّ حالة المائع في خط المواسير تكون متغيرة أثناء إجراء الماء. في هذه الحالة لا يكون هناك سغالاً مبذولاً على حد النظام؛ أيضاً لا تكون

هناك كتلة مغادرة للنظام أثناء الإجراء، وبالتالي،  $\delta m_2 = 0$

بتطبيق المعادلة (2.35)، ويعمل إفتراض إضافي أن التغيرات في طاقة الوضع تكون صغيرة، وأنَّ طاقة

الحركة  $2 / c_1^2$ ، تكون صغيرة بالمقارنة مع المحتوى الحراري،  $h_2$ ، نحصل على،

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

أو بما أنَّ  $h_1$  تكون ثابتة أثناء الإجراء،

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

في هذه الحالة فإنَّ المعادلة (2.36) تُصبح،

$$\sum \delta m_1 = m'' - m'$$

بالتالي بالتعويض ،

$$Q + h_1 (m'' - m') = m'' u'' - m' u' \quad (2.37)$$

من الممكن غالباً إفتراض أنَّ الإجراء يكون كاظماً للحرارة، وفي تلك الحالة نحصل على،

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

أو بالكلمات: المحتوى الحراري للكتلة الذي يدخل إلى الزجاجة = زيادة الطاقة الداخلية للنظام.

: (2.12) مثال

وعاء صل (غير من) بحجم  $10m^3$  يحوى بخاراً عند ضغط  $2.1\text{bar}$  وكسر جفاف  $0.9$ ، يتم توصيله إلى خط أنابيب ويسماح بالسريان من خط المواسير إلى الوعاء حتى يكون الضغط ودرجة الحرارة في الوعاء مساواً لـ  $6\text{bar}$  و  $200^\circ\text{C}$  على الترتيب. يكون البخار في خط المواسير عند  $10\text{bar}$  و  $250^\circ\text{C}$  طوال الإجراء. أحسب إنتقال الحرارة إلى أو من الوعاء أثناء الإجراء.

الحل:

كسر الجفاف = كتلة البخار في  $1\text{kg}$  من الخليط.

باستخدام الترميز الذي تم تقديمها سابقاً نحصل على،

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

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

أيضاً،

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

أخيراً يتم تحميص البخار عند  $6\text{bar}$  و  $200^\circ\text{C}$  عليه،

$$u'' = \underline{2640} \text{ kJ/kg}$$

و

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

$$\text{i.e. } m'' = V / v'' = 10 / 0.3522 = 28.4 \text{ kg}$$

يتم تحميص البخار في خط المواسير عند  $10\text{bar}$  و  $250^\circ\text{C}$ ، وبالتالي،

$$h_1 = 2944 \text{ kJ/kg}$$

بالناتالي مستخدماً المعادلة (72.3)،

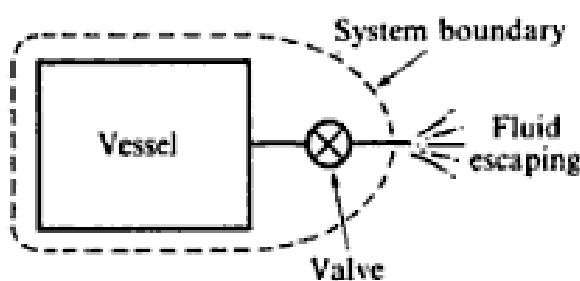
$$Q + 2944(28.4 - 13.3) = (28.4 \times 2640) - (13.3 \times 2329)$$

$$\therefore Q = 74980 - 30590 - 44940 = -550 \text{ kJ}$$

i.e. 550 kJ = الحرارة المطرودة من الوعاء

مثال آخر يحدث عموماً في إجراء السريان اللامستقر هو الحالة التي يفتح بها وعاءً إلى فراغ كبير ويُسمح للمائع بالهروب (الشكل (2.21)). لا يكون هنالك شغلاً مبذولاً في هذه الحالة  $\delta m_1 = 0$  بما أنه ليس هنالك كتلة تدخل إلى النظام. بتجاهل التغييرات في طاقة الوضع وبنطبيق المعادلة (2.35)،

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



شكل (2.21) تفريغ مائع من وعاء

الصعوبة التي تنشأ في هذا التحليل هي أنَّ الحالة 2 للكتلة المغادرة للوعاء تكون متغيره باستمرار، وبالتالي من المستحيل تقييم العنصر  $\sum \delta m_2 (h_2 + c_2^2 / 2)$ . هنالك تقريب مناسب يمكن عمله لإيجاد كتلة المائع التي تغادر الوعاء كلما يهبط الضغط لقيمة معطاة. يمكن إفتراض أنَّ المائع المتبقى في الوعاء يؤدي تمدداً كاظم للحرارة إنعكاسياً. هذا يكون تقريب جيد إذا كان الوعاء معزولاً جيداً، أو إذا كانت فترة استغراق الإجراء قصيرة. بإستخدام هذا الإفتراض يمكن إيجاد الحالة الظرفية للمائع في الوعاء، وبالتالي يمكن حساب الكتلة المتبقية في الوعاء ".

مثال (2.13):

مستقبل هواء بحجم  $6\text{m}^3$  يحوي هواءاً عند  $15\text{bar}$  و  $40.5^\circ\text{C}$ . يتم فتح صمام ويُسمح لبعض الهواء بالخروج إلى الجو. يهبط ضغط الهواء في المستقبل بسرعة إلى  $12\text{bar}$  عندها يتم غلق الصمام. أحسب كتلة الهواء الخارجة من المستقبل.

الحل:

ابتداءً،

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

مفترضاً أن الكتلة في المستقبل تؤدي إجراءً كاظم للحرارة إنعكاسياً، وبالتالي مستخدماً المعادلة (2.21)،

$$\frac{T'}{T''} = \left( \frac{P'}{P''} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} = \left( \frac{15}{12} \right)^{0.4/1.4} = 1.25^{0.386} = \underline{1.066}$$

$$\therefore T'' = 313.5 / 1.066 = 294.2 \text{ K}$$

بالتالي،

$$m'' = P''V / RT'' = \frac{12 \times 10^5 \times 6}{0.287 \times 10^3 \times 294.2} = \underline{85.3} \text{ kg}$$

عليه،

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

في حالة بخار يؤدي تمدداً كاظم للحرارة إنعكاسياً لا تكون هنالك معادلة صحيحة مثل المعادلة (2.21)

المستخدمة عليه. من الضروري الإستفادة من خاصية القصور الحراري (entropy)،  $s$ ، التي يمكن التوضيح

بأنها تبقى ثابتة خلال إجراء كاظم للحرارة إنعكاسي و  $i.e. s'' = s'$ . ومن ثم بإستخدام الجداول يمكن حساب

قيمة "v" وبالتالي إيجاد "m".

مثال (2.14) :

عند بداية شوط السحب لمحرك بترويل ذو نسبة إنضغاط مقدارها 8/1، يكون حجم الخلوص محتملاً بمتبقي غاز

عند درجة حرارة  $840^\circ\text{C}$  وضغط 1.013bar . حجم الخليط أثناء الشوط ، مقاساً عند أحوال جوية 1.013bar

$15^\circ\text{C}$ ، يكون مساوياً لـ 0.75 من الحجم المكتسح للأسطوانة.

يكون الضغط ودرجة الحرارة المتوسطان في مجمع السحب (induction manifold) أثناء السحب مساوياً لـ 0.965bar و 27°C على الترتيب، ويكون متوسط الضغط في الأسطوانة أثناء شوط السحب مساوياً لـ 0.828bar. أحسب درجة حرارة الخليط عند نهاية شوط السحب مفترضاً إجراءً كاظماً للحرارة. أحسب أيضاً الضغط النهائي في الأسطوانة.

$R = 0.2871 \text{ kJ/kgK}$  و  $c_v = 0.718 \text{ kJ/kg}$  و  $c_v = 0.84 \text{ kJ/kgK}$  للخليل.

الحل:

إجعل الحجم المكتسح يكون  $V_s$  وحجم الخلوص يكون  $V_c$ ، وبالتالي،

$$\frac{V_s - V_c}{V_c} = \frac{\text{نسبة الإنضغاط}}{V_c} = 8$$

$$\text{i.e. } V_s = 7 V_c$$

ابتدائياً فإنَّ متبقى الغاز يحتل الحجم ،

$$\therefore m' = \frac{P'V_c}{RT'} = \frac{1.034 \times 10^5 \times V_s}{0.296 \times 1113 \times 7 \times 10^3} = 0.0448 V_s \text{ kg}$$

(حيث  $T' = 840 + 273 = 1113 \text{ K}$ )

أيضاً مستخدماً المعادلة (2.36) ،

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

وبملاحظة أنه في هذا المثال،  $\sum \delta m_2 = 0$  ، نحصل على،

$$m'' - m' = m_1 = \frac{1.013 \times 10^5 \times 0.75 V_s}{0.2871 \times 288 \times 10^3} = 0.919 V_s \text{ kg}$$

$$\therefore m'' = 0.919 V_s + 0.0448 V_s = 0.9638 V_s \text{ kg}$$

يمكن تجاهل التغيرات في طاقة الحركة والوضع، ويكون الإجراء كاظماً للحرارة (i.e.  $Q = 0$ )، بتطبيق المعادلة (2.35) نحصل على،

$$m_1 h_1 = W + m'' u'' - m' u'$$

أيضاً، فإنَّ درجة حرارة الخليط في مجمع السحب تكون ثابتة طول الشوط، i.e.

$$\text{i.e. } m_1 c_p T_1 = W + m'' c_v T'' - m' c_v T'$$

الشغل المبذول يعطى بـ

الحجم المكتسح × متوسط الضغط في الأسطوانة أثناء السحب =  $W$

$$0.828 \times 10^5 V_s = 828000 V_s N.m = \underline{82.8} V_s \text{ kJ}$$

i.e.

$$V_s \times 1.0051 \times 300 = 82.8 V_s + 0.9628 V_s \times 0.718 T''$$

$$- 0.0448 V_s \times 0.84 \times 1113$$

(حيث للكيلوغرام المسحوب ،  $c_p = c_v + R = 0.718 + 0.2871 = 1.0051 \text{ kJ/kgK}$ )

$$\therefore T'' = \frac{236.1}{0.692} = 341 K = \underline{68^\circ C}$$

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

بالتالي،

$$p'' = \frac{m'' RT''}{V_s \times V_c} = \frac{0.9638 V_s \times 0.2871 \times 341 \times 10^3}{8 V_s / 7} = 82700 N/m^2$$

i.e. الضغط النهائي =  $0.827 \text{ bar}$

## 2.7 مسائل: (Problems)

1/ كتلة مقدارها  $1\text{kg}$  من هواء موجود في حاوية صلدة تكون بداية عند  $4.8\text{bar}$  و  $150^\circ C$ . يتم تسخين

الحاوية حتى تكون درجة الحرارة مساوية لـ  $200^\circ C$ . أحسب الضغط النهائي للهواء والحرارة المكتسبة أثناء

الإجراء.

Ans. (5.37 bar; 35.9 kJ/kg)

2/وعاء صلد بحجم  $1\text{m}^3$  يحوى بخاراً عند 20bar و  $400^\circ\text{C}$ . يتم تبريد الوعاء حتى يكون البخار جافاً مشبعاً. أحسب كتلة البخار في الوعاء، الضغط النهائي للبخار، والحرارة المُزالة أثناء الإجراء.

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

3/أكسجين (بكتلة جزيئية 32kg/kmol) يتمدد بإنعكاسية في أسطوانة خلف كباس بضغط مقداره 3bar. يكون الحجم إبتدائياً مساوياً لـ  $0.01\text{m}^3$  ونهائياً مساوياً لـ  $0.03\text{m}^3$ ، تكون درجة الحرارة الإبتدائية مساوية لـ  $17^\circ\text{C}$ . أحسب الشغل المبذول بالأكسجين وسريان الحرارة إلى أو من جدران الأسطوانة أثناء التمدد. إفترض أن الأكسجين يكون غازاً مثالياً وخذ  $c_p=0.917 \text{ kJ/kg K}$ .

Ans. (6 kJ; 21.16 kJ)

4/بخار عند ضغط 7bar، كسر جاف 0.9، يتمدد بإنعكاسية بضغط ثابت حتى تكون درجة الحرارة مساوية لـ  $200^\circ\text{C}$ . أحسب الشغل المبذول والحرارة المكتسبة لكل kg من البخار أثناء الإجراء.

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

5/حجم مقداره  $0.05\text{m}^3$  من غاز مثالي عند 6.3bar يؤدي إجراءً إنعكاسياً ثابت درجة الحرارة إلى ضغط 1.05bar. أحسب سريان الحرارة إلى أو من الغاز.

Ans. (56.4 kJ)

6/بخار جاف مشبعب عند ضغط 7bar يتمدد بإنعكاسية في أسطوانة خلف كباس حتى يكون الضغط مساوياً لـ 0.1bar. إذا تم إمداد الحرارة بـاستمرار أثناء الإجراء للمحافظة على درجة الحرارة، أحسب التغير في الطاقة الداخلية لكل kg من البخار.

Ans. (37.2 kJ/kg)

7/كتلة هواء مقدارها 1kg يتم إنضغاطها بـإجراء ثابت درجة الحرارة وبـإنعكاسية من 1bar إلى 5bar. أحسب الشغل المبذول على الهواء وسريان الحرارة إلى أو من الهواء.

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

8/ كتلة مقدارها 1kg عند 1bar و 15°C يتم إنضغاطها إنعكاسياً وبإجراء كاظم للحرارة إلى 4bar. أحسب درجة الحرارة النهائية والشغل المبذول على الهواء.

Ans. (155°C; 100.5 kJ/kg)

9/ نايتروجين (بكتلة جزيئية 28 kg/kmol) يتمدد إنعكاسياً في أسطوانة معزولة جيداً حرارياً من 3.5bar إلى 200°C حجم مقداره 0.09m<sup>3</sup>. إذا كان الحجم الإبتدائي المحتمل مساوياً لـ 0.03m<sup>3</sup>، أحسب الشغل المبذول أثناء التمدد. افترض أن النايتروجين يكون غازاً مثاليًا و خذ  $c_v = 0.741 \text{ kJ/kgK}$ .

Ans. (9.31 kJ)

### **الفصل الثالث**

#### **القانون الثاني للديناميكا الحرارية**

#### **(The Second Law of Thermodynamics)**

في الفصل الأول تم توضيح أنه طبقاً للقانون الأول للديناميكا الحرارية، عندما يؤدي نظاماً دورة كاملة فإنَّ صافي الحرارة المكتسبة يكون مساوياً لصافي الشغل المبذول. ويكون هذا مؤسساً على مبدأ بقاء الطاقة، الذي يتبع من مشاهدة الأحداث الطبيعية. القانون الثاني للديناميكا الحرارية، الذي هو أيضاً قانون طبيعي، يُشير إلى أنه، بالرغم من أنَّ صافي الحرارة المكتسبة في دورة يكون مساوياً لصافي الشغل المبذول، فإنَّ إجمالي الحرارة المكتسبة يجب أن يكون أكبر من صافي الشغل المبذول، وذلك لأنَّ بعض الحرارة يتم فقدانها دائماً من النظام.

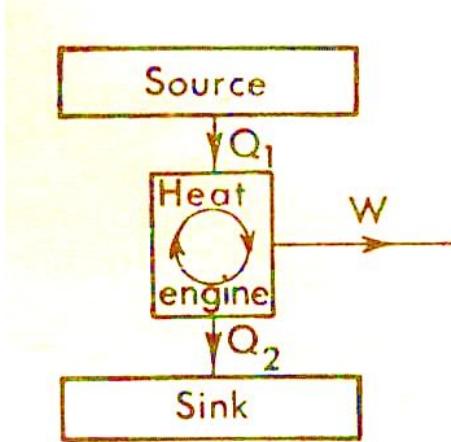
#### **3.1 المحرك أو الآلة الحرارية: (The Heat Engine)**

المحرك الحراري هو نظام يعمل في دورة كاملة وينتج صافي شغل من إمداد حرارة. يقتضي القانون الثاني ضمناً أن مصدراً لإمداد حرارة وغاطساً لفقد الحرارة يكونا ضروريان، بما أنَّ بعض الحرارة يجب أن يتم دائماً طردها بواسطة النظام. هنالك تمثيلاً مخططياً يتم توضيحه في الشكل (3.1). تكون الحرارة المكتسبة  $Q_1$ ، الشغل المبذول  $W$ ، والحرارة المفقودة هي  $Q_2$ . بالقانون الأول، في دورة واحدة كاملة، فإنَّ،

$$\text{صافي الحرارة المكتسبة} = \text{صافي الشغل المبذول}$$

بال التالي من المعادلة (1.1)،

$$\sum dQ = \sum dW$$



شكل (3.1)

بالرجوع للشكل (3.1)،

$$Q_1 - Q_2 = W \quad (3.1)$$

بالقانون الثاني، فإن إجمالي الحرارة المكتسبة يجب أن يكون أكبر من صافي الشغل المبذول

$$Q_1 > W$$

يتم تعريف الكفاءة الحرارية (thermal efficiency) لمحرك حراري كنسبة صافي الشغل المبذول في الدورة

إلى إجمالي الحرارة المكتسبة في الدورة. ومن المعتمد التعبير عنها كنسبة مؤدية. بالرجوع للشكل (3.1)،

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \text{ ، الكفاءة الحرارية} \quad (3.2)$$

بالتعميض في المعادلة (3.1)،

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

يمكن الملاحظة من أن القانون الثاني يقتضي ضمنياً أن الكفاءة الحرارية لمحرك حراري يجب أن تكون دائماً أقل من 100%.

من تعريف الحرارة، فإن فرقاً في درجة الحرارة يكون ضرورياً لسريان الحرارة. يتبع ذلك أن مصدر الحرارة في الشكل (3.1) يجب أن يكون عند درجة حرارة أعلى من الغاطس. يمكن التفكير بمصدر الحرارة كوعاء ساخن

والغاطس كوعاء بارد. يُوضح القانون الثاني أنَّ فرقاً في درجة الحرارة، مهما يكون صغيراً، يكون ضرورياً قبل أن يمكن إنتاج صافي شغل في دورة.

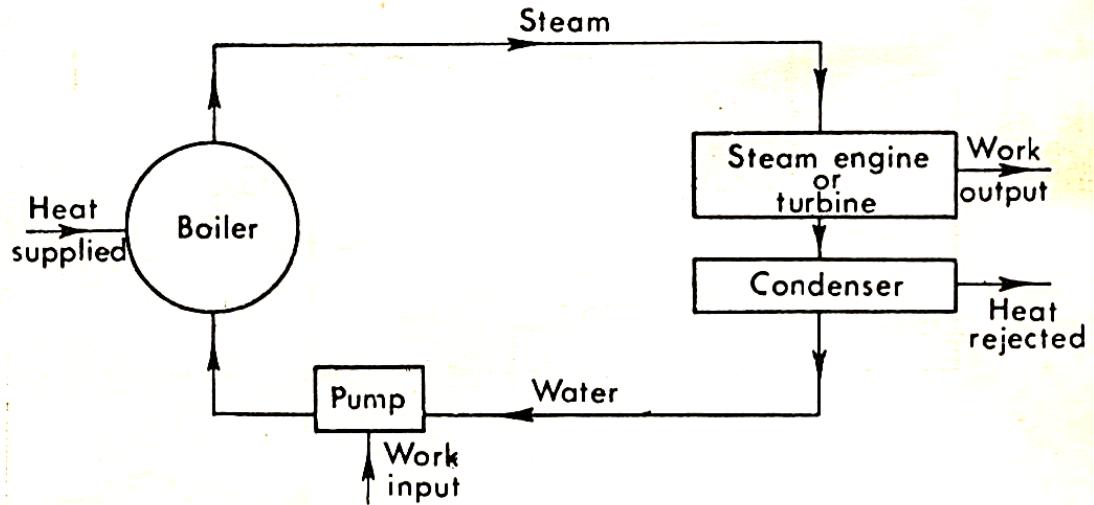
هذا يقود لبيان القانون الثاني كالتالي:

يكون مستحيلًا لمحرك حاري إنتاج صافي شغل في دورة كاملة إذا تبادل حرارة فقط مع أجسام عند درجة حرارة مثبتة مفردة.

القييد المفروض بالقانون الثاني يكون أكثر وضوحاً إذا تم عمل محاولة للتفكير في نظام لا يكون مشمولاً بالقانون. كمثال، ليس هنالك شيئاً في القانون الأول يُشير إلى أنَّ الطاقة الداخلية للبحر لا يمكن تحويلها إلى شغل ميكانيكي بأسلوب مستمر. يُمثل البحر مقداراً ضخماً للطاقة بملابس الأطنان من الماء عند درجة حرارة فوق الصفر المطلق. على أي حال، لا يمكن عمل سفينة ستدور محركاتها بأخذ الطاقة من البحر. من القانون الثاني كما ذكر عاليه، يلاحظ أنَّ مستودعاً ثابتاً للطاقة عند درجة حرارة أدنى يكون أساسياً قبل أن يمكن إنتاج شغل.

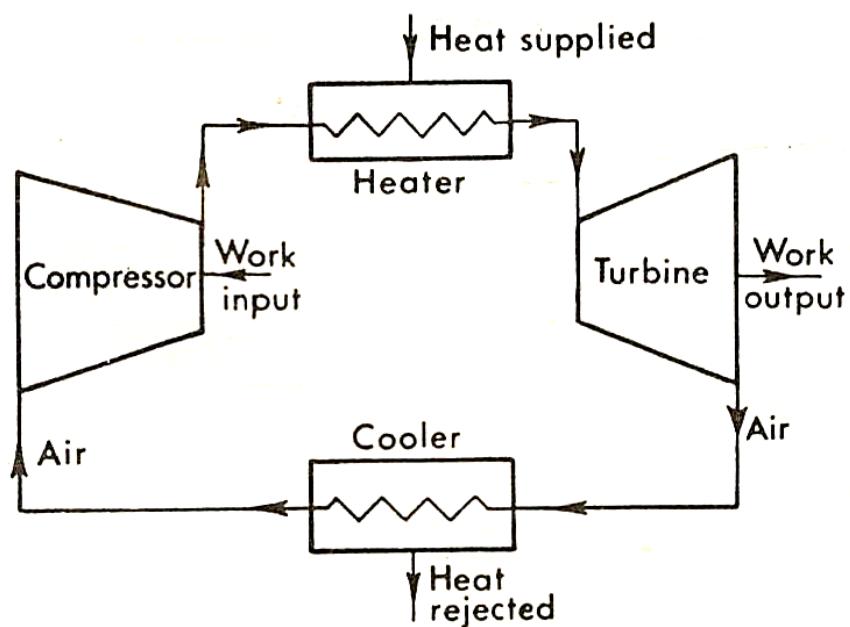
إحدى الأمثلة العملية لمحرك حاري هو دورة البخار البسيطة. لقد تم استخدام هذا الدورة مسبقاً لشرح القانون الأول.

بالرجوع للشكل (3.2) ، يتم إمداد حرارة في الغلاية، وينتاج شغلاً في محرك بخاري أو توربينة، يتم فقد حرارة في المكثف ويطلب مقدار صغير لشغل دخل للمضخة. يكون المستودع الساخن هو فرن الغلاية، بينما يكون المستودع البارد هو ماء التبريد الدائري في المكثف، ويكون النظام نفسه هو البخار.



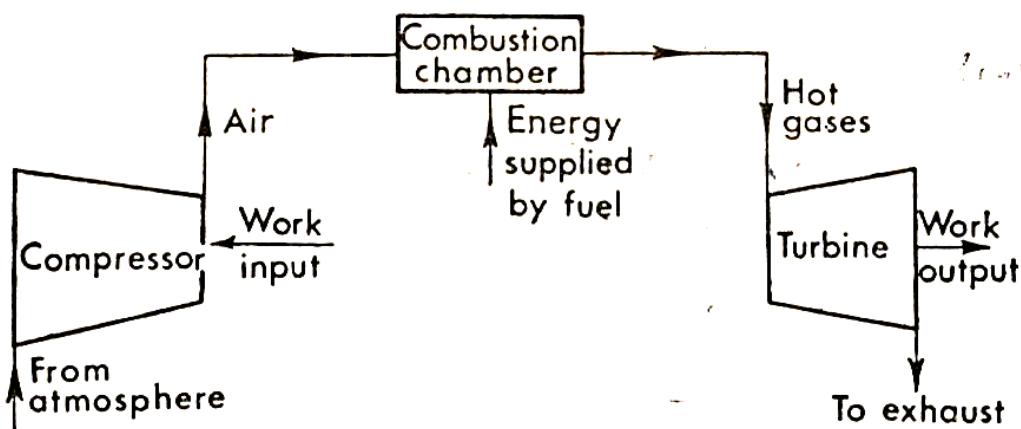
شكل (3.2)

مثال آخر لمحرك حرارة هو الدورة المغلقة لمحطة توربينة غاز كما موضح في الشكل (3.3). يكون النظام في هذه الحالة هو الهواء. يتم إمداد الحرارة إلى الهواء بالغازات الساخنة في مبادل حراري، يتم إنتاج شغل بواسطة التوربينة. يتم فقد الحرارة لماء التبريد في مبرد، ويتم بذلك شغل على الهواء في ضاغط. المستودع الساخن هو الغاز الساخن الدائر حول الهواء في المبادل الحراري؛ المستودع البارد هو ماء التبريد الدائر في المبرد.



شكل (3.3)

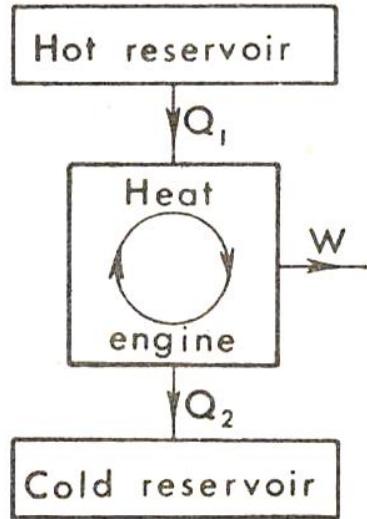
في محطة توربينة غاز مفتوحة الدورة يتم إمداد الطاقة برش الوقود في جدول من الهواء في غرفة إحتراق؛ تتمدد الغازات الناتجة في التوربينة ومن بعد تخرج إلى الجو، (أنظر الشكل (3.4)). لا تكون هذه الدورة هي دورة محرك حرارة طبقاً للتعريف المعطى، بما أنَّ النظام لا يسترجع لحالته الأصلية، وحقيقة يتعرض لتغيير كيميائي بالاحتراق. نفس الشئ في محرك إحتراق داخلي ترددبي يتم خلط الهواء مع وقود ويُحرق في الأسطوانة، وتستنفذ الغازات الناتجة بعد التمدد إلى الجو. على أي حال، فإنَّ محطة توربينة الغاز مفتوحة الدورة، ومحرك الاحتراق هما مولدات قدرة هامان في الهندسة ويُطلق عليهما عادة محركات حرارة. من الممكن تجاهل كتلة الوقود بالمقارنة مع كتلة الهواء، ويمكن أخذ الحرارة المفقودة كطاقة الغاز المستنفد (exhaust gas) ناقصاً طاقة الهواء عند المدخل (i.e.) إذا تم تبريد العادم إلى أحوال المدخل ومن بعد إعادة تدويرها.



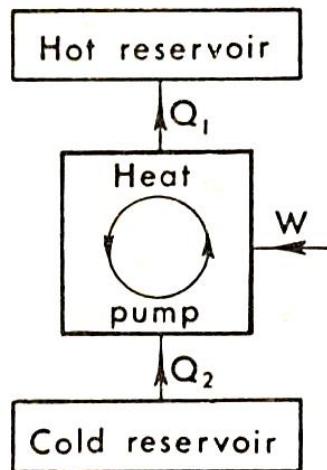
شكل (3.4)

يتم تطبيق القانون الأول والثاني لدورات تشتعل في الإتجاه المعكوس لذلك المحرك الحراري. في حالة دورة معكوسه، فإنَّ صافي الشغل يُبذل على النظام ويساوي صافي الحرارة المفقودة بواسطة النظام. مثل هذه الدورات تحدث في مضخات الحرارة والثلجات.

المخططات المكافئة لمحرك الحرارة ومضخة الحرارة (أو الثلاجة) يتم توضيحيهما في الشكل (3.5(a)) والشكل (3.5(b)).



شكل (3.5(a))



شكل (3.5(b))

في دورة مضخة الحرارة (أو الثلاجة) يتم إمداد مقدار من الحرارة،  $Q_2$ ، من المستودع البارد، ويتم فقد الحرارة،

$Q_1$  إلى المستودع الساخن. بالقانون الأول نحصل على،

$$Q_1 = Q_2 + W \quad (3.4)$$

بالقانون الثاني يمكن القول بأنّ شغل الدخل يكون أساساً لكي يكون هنالك إنتقال للحرارة من المستودع البارد إلى

المستودع الساخن،

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

هذه يمكن برهانها من بيان القانون الثاني المعطى مسبقاً، لكن سوف لن يتم إعطاء البرهان هنا. هنالك بياناً للقانون الثاني متعلقاً بمضخة الحرارة (أو الثلاجة) يُعزى لـ Clausius، ويقول كما يلي:

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

هذا البيان يتم برهانه بسهولة بتجربة (خبرة) الإجراءات الطبيعية:

من الملاحظ أنَّ الحرارة لا تسري من جسم بارد إلى جسم ساخن؛ تتطلب الثلاجة مدخلاً للطاقة لكي تستخلص الحرارة من الغرفة الباردة وتطردتها عند درجة حرارة أعلى.

عندما يتم اعتبار بياناً القانون الثاني، تبدو حقيقة هامة. بالرجوع للشكل ((3.5(a))) والبيان الأول للقانون الثاني يتضح أنَّ  $Q_2$  لا يمكن أن تكون صفرًا، بمعنى آخر، من المستحيل تحويل إمداد حرارة بالكامل إلى شغل ميكانيكي.

على أي حال، بالرجوع إلى الشكل ((3.5(b))), يتم ملاحظة أنَّ  $Q_2$  في هذه الحالة يمكن أن تكون صفرًا، بدون انتهاءك للقانون الثاني. وبالتالي من الممكن تحويل شغلاً ميكانيكيًا بالكامل إلى حرارة. يتم توضيح هذه الحقيقة بسهولة كمثال، عندما يتم تطبيق الفرامل في سيارة لاجتذابها إلى السكون، فإنَّه يتم تحويل طاقة الحركة بالكامل إلى حرارة عند العجلات. لا يمكن إيجاد مثال يمكن فيه تحويل حرارة بإستمرار وبالكامل إلى شغل ميكانيكي.

### 3.2 القصور الحراري: (Entropy)

وُجد أنَّ هنالك خاصية هامة، هي الطاقة الداخلية التي تنشأ كنتيجة للقانون الأول للديناميكا الحرارية. هنالك خاصية هامة أخرى تنشأ من القانون الثاني ألا وهي القصور الحراري.

اعتبر إجراءً كاظماً للحرارة إنعكاسياً لأي نظام على مخطط  $v - p$ . هذا يُمثل بالخط AB على الشكل (3.6).

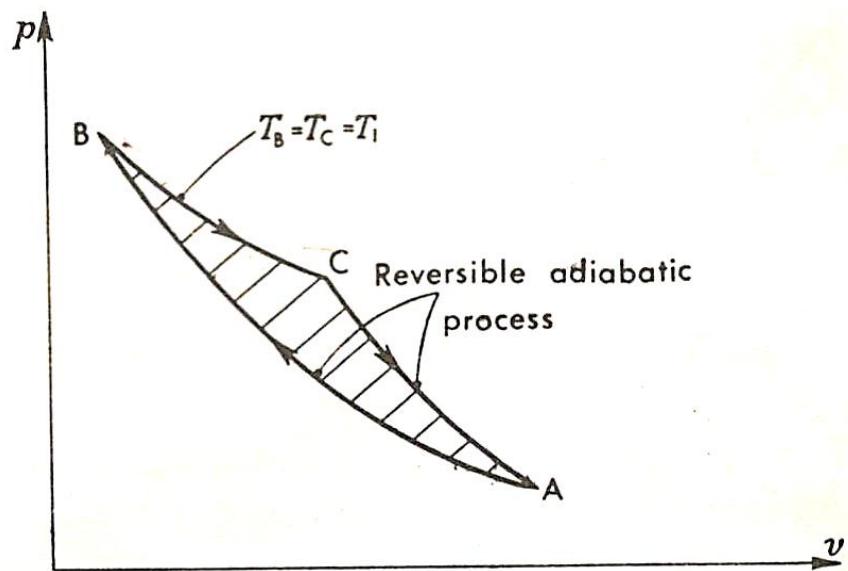
دعنا نفترض أنَّه من الممكن للنظام أن يؤدي إجراءً ثابت للحرارة إنعكاسي عند درجة حرارة  $T_1$  من B إلى C ومن بعد يتم استرجاعه لحالته الأولى بإجراء ثانٍ كاظم للحرارة إنعكاسي من C إلى A. الآن بالتعريف فإنَّ الإجراء الكاظم للحرارة هو أحد الإجراءات التي لا يكون فيها سريان للحرارة إلى أو من النظام. وبالتالي فإنَّ

الحرارة المنقلة الوحيدة هي من C إلى B أثناء الإجراء الثابت الحرارة. يتم إعطاء الشغل المبذول بالنظام بالمساحة المطروقة. عليه فإننا نملك نظاماً يؤدي دورة ويطور صافى شغل بينما يقوم بسحب حرارة من مستودع عند درجة حرارة مفردة مثبتة. هذه تكون مستحيلة لأنها تنتهك القانون الثاني. عليه الإفتراض الأصلي يكون خطأ، ويكون من المستحيل وجود إجراءين كاظمين للحرارة يمران خلال نفس الحالة A.

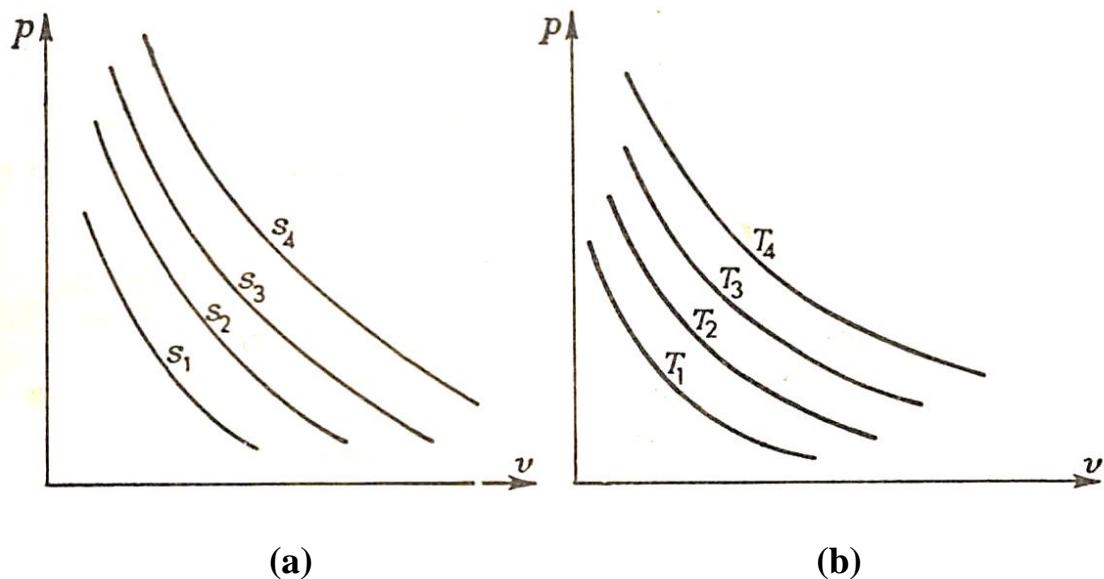
الآن، فإن إحدى الخصائص (المميزات) لخاصية نظام هي أنه هناك خطًا وحيدًا يمثل قيمة لخاصية على مخطط الخواص. (كمثال، فإن الخط BC على الشكل (3.6) يمثل ثابت الحرارة عند  $T_1$ ). بالتالي يجب أن يكون هناك خاصية تمثل بإجراء كاظم للحرارة إنعكاسي. تسمى هذه الخاصية بالقصور الحراري، s.

يتبع ذلك أنه ليس هناك تغييرًا للقصور الحراري في إجراء كاظم للحرارة. على مخطط  $v - p$  هناك سلسلة من الإجراءات كاظمة للحرارة إنعكاسية كما موضح في الشكل (a) ، يكون كل خط ممثلاً لقيمة واحدة من القصور الحراري. هذه تكون مشابهة للشكل (b) الذي يتم فيه رسم خطوط ثابتة درجة الحرارة، كل تمثل قيمة واحدة لدرجة الحرارة. لكي يتم تعريف القصور الحراري بدلالات الخواص الديناميكية الحرارية الأخرى يكون من الضروري استخدام أسلوباً صارماً.

في المقطع 2.2 لقد تم توضيح إجراءً كاظماً للحرارة إنعكاسيًا لغاز مثالي يتبع القانون  $pv^{\gamma}=\text{constant}$ . الآن فإن القانون  $pv^{\gamma} = \text{constant}$  هو خطًا وحيدًا على مخطط  $v - p$ ، بحيث أن البرهان المعطى في المقطع 2.2 لغاز مثالي هو برهان مشابه لذلك المعطى عاليه (i.e.) برهان أنَّ هناك إجراءً كاظماً للحرارة إنعكاسيًا يحتل خطًا وحيدًا على مخطط الخواص). البرهان المعطى عاليه يعتمد على القانون الثاني ولقد استخدم لتقديم القصور الحراري كخاصية. يتبع ذلك أنَّ البرهان له في المقطع 2.2 يجب أن يتضمن حقيقة أنَّ القصور الحراري لا يتغير أثناء إجراءً كاظماً للحرارة إنعكاسيًا.



شكل (3.6) الدورة الإفتراضية على مخطط  $p - v$ .



شكل (3.7) متسلسلة من خطوط ثابت القصور الحراري وثابت درجة الحرارة على مخطط  $p - v$

بالرجوع إلى البرهان في المقطع 2.2، بدءاً بمعادلة اللاسريان لإجراءً إنعكاسياً،

$$dQ = du + pdv$$

ولغاز مثالي،

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

هذه المعادلة يمكن تكاملها بقسمة طرفي المعادلة على  $T$

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

أيضاً لإجراء كاظم للحرارة،  $dQ = 0$

$$\text{i.e. } \frac{dQ}{T} = \frac{c_v dT}{T} + \frac{Rdv}{v} = 0 \quad (3.5)$$

الآن بعيداً عن المعالجة الرياضية وإدخال العلاقة بين  $R$ ,  $c_p$ ,  $c_v$  و  $\gamma$ ، لا يكون هنالك خطوات أساسية أخرى في البرهان. هذا يجب أن يعني أنه قسمة طرفي المعادلة على  $T$  هي إحدى الخطوات التي تتضمن تقيد القانون الثاني، والحقيقة الهامة التي تقول أن التغيير في القصور الحراري يكون صفراء، عليه يمكننا القول أن  $dQ/T = 0$  لإجراء كاظم للحرارة إنعكاسي. لأي إجراء إنعكاسي آخر  $dQ/T \neq 0$ . يمكن توضيح أن هذه النتيجة تتطبق على جميع المواد التشغيلية.

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

(حيث  $s$  هو القصور الحراري).

لاحظ بما أن المعادلة (3.5) تكون لإجراءاً إنعكاسياً، فإن  $dQ$  في المعادلة (3.6) هي الحرارة المضافة وإنعكاسية.

يكون التغير في القصور الحراري أكثر أهمية من قيمته المطلقة، ويمكن اختيار القصور الحراري الصافي على نحو اعتباطي. كمثال، في جداول البخار يوضع القصور الحراري مساوياً لصفر عند  $0.01^\circ\text{C}$ ؛ في جداول سوائل التبريد فإن القصور الحراري يوضع مساوياً لصفر عند  $-40^\circ\text{C}$ .

بتكمال المعادلة (3.6) يعطي،

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

معنباً  $1\text{kg}$  لماء، يمكن إعطاء وحدات القصور الحراري بـ  $\text{kJ/kg}$  مقسومة على  $\text{K}$ . عليه فإنَّ وحدات القصور الحراري،  $s$ ، هي  $\cdot \text{kJ/kg K}$

سيتم استخدام الرمز  $S$  للقصور الحراري لكتلة،  $m$ ، لماء،

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

بإعادة كتابة المعادلة (3.6) نحصل على،

$$dQ = T ds$$

أو لأي إجراء إنعكاسي،

$$Q = \int_1^2 T ds \quad (3.8)$$

تكون هذه المعادلة مناظرة لأي إجراء إنعكاسي،

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

هكذا، كما يكون هنالك مخططًا يُمثل عليه المساحات كشغلاً مبذولاً في إجراءً إنعكاسيًا، يكون هنالك أيضًا

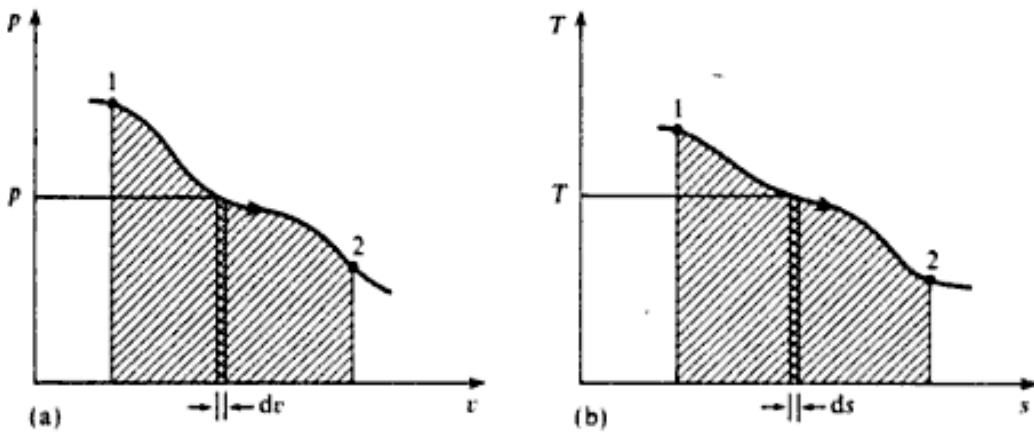
مخططًا يُمثل عليه المساحات كسريان للحرارة في إجراء إنعكاسي. تكون هذه المخططات هي مخططات  $v - p$

و  $s - T$  على الترتيب، كما موضح في الأشكال (3.8(a) و (3.8(b)). لإجراءً إنعكاسيًّا 2 - 1 في الشكل

3.8(a)، فإنَّ المساحة المظللة  $W = \int_1^2 p dv$ ، تمثل الشغل المبذول؛ ولإجراءً إنعكاسيًّا 2 - 1 في

الشكل (3.8(b)، فإنَّ المساحة المظللة  $W = \int_1^2 T ds$ ، تمثل سريان الحرارة. عليه فإنَّ إحدى الفوائد لخاصية

القصور الحراري هي التمكين من رسم مخطط تكون عليه المساحات ممثلاً لسريان الحرارة في إجراء إنعكاسي.



شكل (3.8) المساحة تحت إجراء إنعكاسي على مخطط  $P - v$   
وعلى مخطط  $T - s$

### (The T – S Diagram) : T – S مخطط 3.3

(For Vapor) / a لبخار:

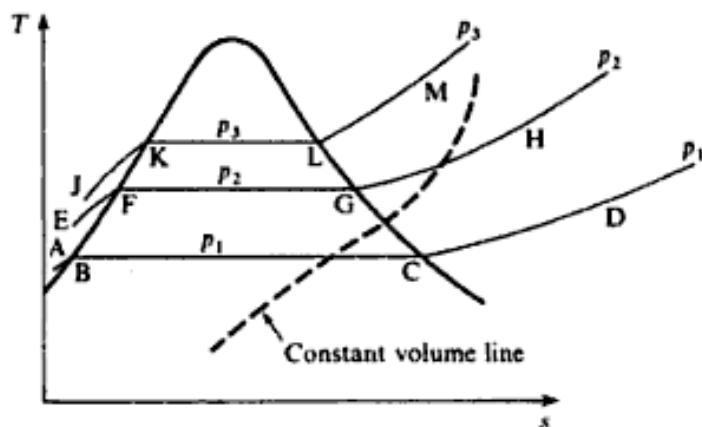
كما ذُكر سابقاً، فإنَّ الصفر للصور الحراري يُؤخذ كـ  $0.01^{\circ}\text{C}$  لبخار و كـ  $-40^{\circ}\text{C}$  لسوائل التبريد.

سيتم هنا فقط اعتبار مخطط  $T - S$  للبخار؛ ويكون المخطط لمادة التبريد مشابهاً بالضبط بِإسثناء صفر القصور الحراري. يتم توضيح مخطط  $T - S$  للبخار في الشكل (3.9). يتم توضيح ثلاثة خطوط ذات ضغط ثابت ( $p_1, p_2, p_3$ ).

i.e.) الخطوط ABCD، EFGH و JKLM تكون خطوط الضغط في منطقة عملياً متطابقة مع خط السائل المشبع (i.e. الأجزاء AB، EF، JK)، ويتم عادة تجاهل الفرق. يبقى الضغط ثابتاً مع درجة الحرارة عندما يتم إضافة الحرارة الكامنة، وبالتالي فإنَّ خطوط الضغط تكون متوازية في المنطقة الرطبة (i.e. الأجزاء BC، FG، GH، CL و LM). تقوس خطوط الضغط لأعلى في منطقة التحميص كما موضح (i.e. الأجزاء CD، KL و GH). هكذا فإنَّ درجة الحرارة ترتفع بِاستمرار التسخين بضغط ثابت.

هناك خط حجم ثابت واحد (موضح منقطاً سلسلياً) يتم رسمه في الشكل (3.9). تكون خطوط الحجم الثابت مقعرة لأسفل في المنطقة الرطبة ويميل لأعلى بِإنحدار أكثر عن خطوط الضغط في منطقة التحميص.

في جداول البخار فإنَّ القصور الحراري للسائل المشبَّع والبخار الجاف المشبَّع يتم تمثيلها بـ  $s_f$  و  $s_g$  على الترتيب. يتم أيضًا جدوله الفرق  $s_{fg} = s_g - s_f$ . يتم إعطاء القصور الحراري لبخار رطب بالقصور الحراري للماء في خليط زائدً القصور الحراري للبخار الجاف في الخليط.



شكل (3.9) مخطط  $T - s$  لبخار

لبخار رطب بكسر جفاف،  $x$ ، نحصل على ،

$$s = (1 - x)s_f + xs_g \quad (3.9)$$

$$\text{أو } s = s_f + x(s_g - s_f)$$

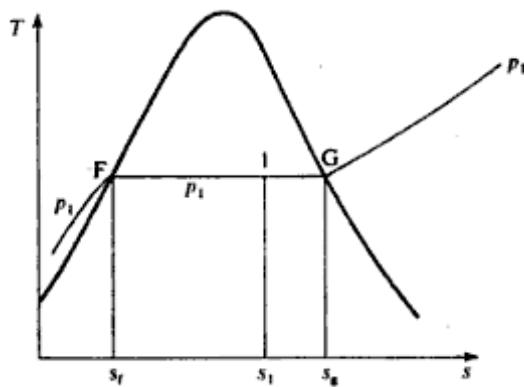
$$\text{i.e. } s = s_f + xs_{fg} \quad (3.10)$$

بالتالي، فإنَّ كسر الجفاف يُعطي بـ ،

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

يمكن الملاحظة من المعادلة (3.11)، أنَّ كسر الجفاف يكون متناسِبًا مع بعد نقطة الحالة من خط السائل على مخطط  $S - T$ . كمثال، للحالة 1 على الشكل (3.10) فإنَّ كسر الجفاف،

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



شكل (3.10) كسر الجفاف من المساحات على مخطط  $T - s$

تمثل المساحة تحت الخط FG الشكل (3.10) الحرارة الكامنة  $h_{fg}$  ، وتحت المخطى تحت الخط  $p_1$  بـ

$$\cdot x_1 h_{fg}$$

المحتوى الحراري للبخار الرطب يعطى بـ ،

$$h = h_f + xh_{fg}$$

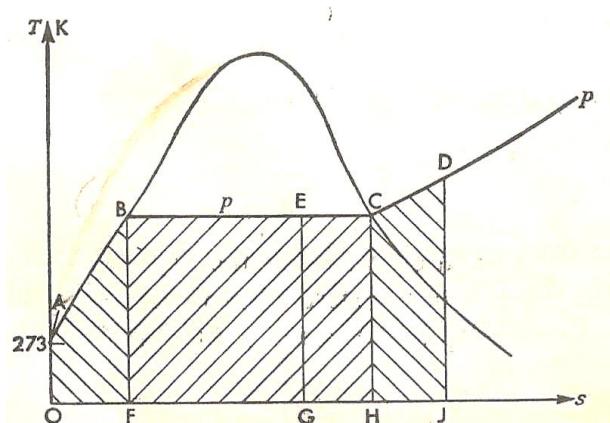
يمكن مخطط  $s - T$  من التعبير المخططي لهذه الحقيقة، بما أن المساحات على المخطط تمثل سريان الحرارة.

إفتراض أن خط الضغط في منطقة السائل يكون متطابقاً مع خط السائل المشبع، وبالتالي يمكن تمثيل المحتوى

الحراري على المخطط. بالرجوع للشكل (3.11)، عندما يكون هناك ماءاً عند أي ضغط  $p$  ، و عند  $0.01^{\circ}C$

يتم تسخينه بضغط ثابت فإنه يتبع بالتقريب الخط AB؛ تكون النقطة B عند درجة حرارة التشبع  $T$  التي يغلي

الماء عند الضغط  $p$ . من المعادلة (2.4)، بضغط ثابت،



شكل (3.11)

$$Q = h_B - h_A = h_B$$

(بما أنّ  $h_A$  عند  $0.01^\circ\text{C}$  هو تقريباً صفر).

نحصل على،

$$\text{عند ضغط } p, \quad ABFOA = h_B = h_f$$

عند النقطة B، إذا استمر التسخين فإنّ الماء يتغير تدريجياً إلى بخار حتى عند C التي يكون عندها البخار

بالضبط جافاً مشبعاً. عليه نحصل على،

$$\text{BCHFB} = h_C - h_B \quad \text{الحرارة الكامنة = المساحة}$$

بالنالي عند النقطة C، يعطي المحتوي الحراري بـ

$$h_C = ABFOA + BCHFB \quad \text{المساحة = } h_C - h_B$$

لبخار رطب عند النقطة E،

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

$$\text{i.e. } h_E = ABEGOA \quad \text{المساحة}$$

عندما يتم التسخين إضافياً لبخار جاف مشبع يُصبح محمضاً.

يتم إعطاء الحرارة المضافة من C إلى D بضغط ثابت p، بـ

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

بالنالي فإنّ المحتوي الحراري عند D يكون،

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

: مثال (3.1)

1kg من بخار، عند 7bar وقصور حراري  $6.5\text{ kJ/kgK}$ ، يتم تسخينه إنعكاسياً عند ضغط ثابت حتى تكون

درجة الحرارة مساوياً لـ  $250^\circ\text{C}$ . أحسب الحرارة المكتسبة، ووضح على مخطط S – T المساحة التي تمثل

سريان الحرارة.

عند  $T = 7\text{ bar}$  يكون البخار رطباً، بما أنّ القصور الحراري الفعلي،  $s$ ، يكون أقل من  $s_g = 6.709 \text{ kJ/kgK}$

$\cdot s_g$

الحل:

من المعادلة (3.11)،

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

بالتالي،

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

$$\text{i.e. } h_1 = 697 + 1975 = 2672 \text{ kJ/kg}$$

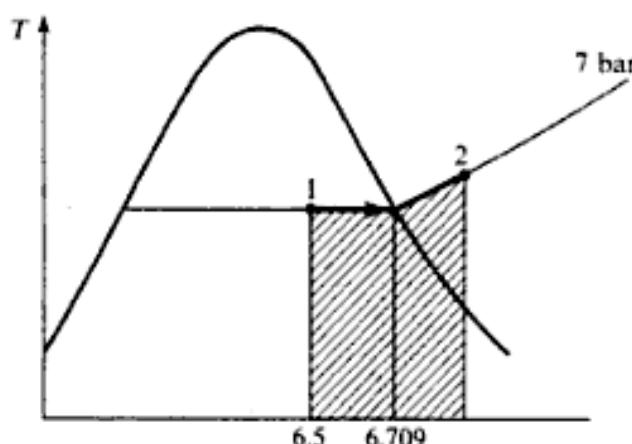
عند الحالة 2 يكون البخار عند  $T = 250^\circ\text{C}$  وعند  $P = 7\text{ bar}$ ، وعليه يكون محمّساً. من جداول التحميص

$$h_2 = 2955 \text{ kJ/kg}$$

عند ضغط ثابت من المعادلة (2.3)،

$$Q = h_2 - h_1 = 2955 - 2672 = 283 \text{ kJ/kg}$$

يُعطى الإجراء على مخطط  $T - S$  في الشكل (3.12)، تمثل المساحة المظللة سريان الحرارة.



شكل (3.12) مخطط  $T - s$

مثال (3.2) :

أسطوانة صلدة بحجم  $0.025\text{m}^3$  تحوى بخاراً عند  $80\text{bar}$  و  $350^\circ\text{C}$ . يتم تبريد الأسطوانة حتى يكون الضغط مساوياً لـ  $50\text{bar}$ . أحسب حالة البخار بعد التبريد ومقدار الحرارة المفروضة بواسطة البخار. وضح الإجراء على مخطط  $S - T$  مشيراً للمساحة التي تمثل سريان الحرارة

الحل:

البخار عند  $80\text{bar}$  و  $350^\circ\text{C}$  يكون محمضاً، ويكون الحجم النوعي من الجداول مساوياً لـ  $0.0299\text{m}^3/\text{kg}$ . وبالتالي فإن كتلة البخار في الأسطوانة تعطى بـ ،

$$m = \frac{0.025}{0.02994} = 0.835 \text{ kg}$$

لبخار محمص فوق  $80\text{bar}$  يتم إيجاد الطاقة الداخلية من المعادلة (1.7)،

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

$$\text{i.e. } u_1 = 2750.5 \text{ kJ/kg}$$

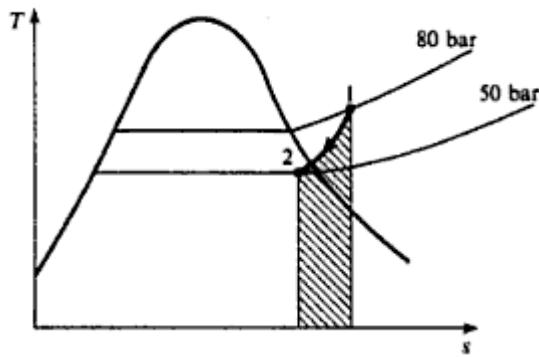
عند الحالة 2،  $v_2$  عليه يكون البخار رطباً، ويعطى كسر الجفاف بالمعادلة،

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

من المعادلة،

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

$$\text{i.e. } u_2 = 278 + 1969 = 2247 \text{ kJ/kg}$$



شكل (3.13) مخطط  $T - s$

بحجم ثابت من المعادلة (2.2)،

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

$$\text{i.e. } Q = -0.835 \times 503.5 = -420 \text{ kJ}$$

$$\text{i.e. } \text{الحرارة المفقودة} = 420 \text{ kJ}$$

الشكل (3.13) يوضح الإجراء مرسوماً على مخطط  $T - s$ ، تمثل المساحة المظللة الحرارة المفقودة بالنظام.

### (For a Perfect Gas) /b لغاز مثالي:

من المفيد رسم خطوط الضغط الثابت والحجم الثابت على مخطط  $T - s$  لغاز مثالي. بما أنَّ تغيرات

القصور الحراري تكون ذات تطبيق مباشر أكثر من القيمة المطلقة، فيمكن إختبار القصور الحراري الصفيي عند

أي مرجعية اعتباطية كدرجة الحرارة والضغط. في الشكل (3.14) فإنَّ الضغط  $p_1$  وخط الحجم  $v_1$  يتم رسمهما

ماران خلال النقطة 1. لاحظ أنَّ خط الضغط الثابت يميل بانحدار أقل 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،

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

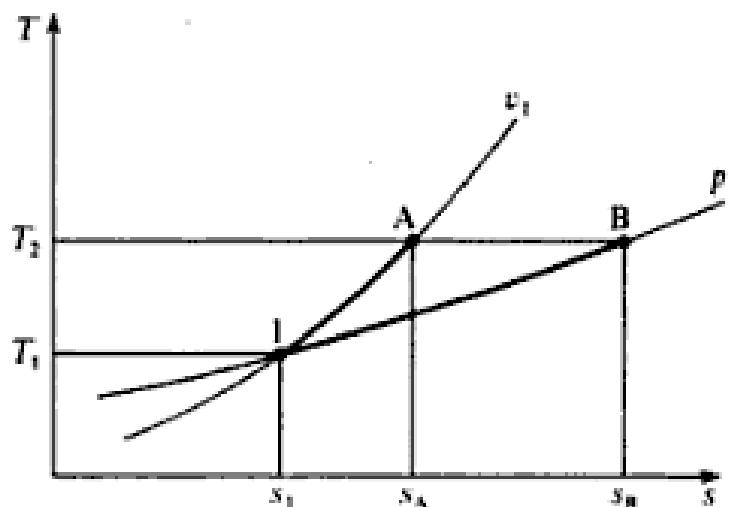
أيضاً لحجم ثابت لـ 1kg من الغاز من المعادلة

$$\therefore S_A - S_1 = \int_1^A \frac{C_v dT}{T} = C_v \log_e \frac{T_A}{T_1} = C_v \log_e \frac{T_2}{T_1}$$

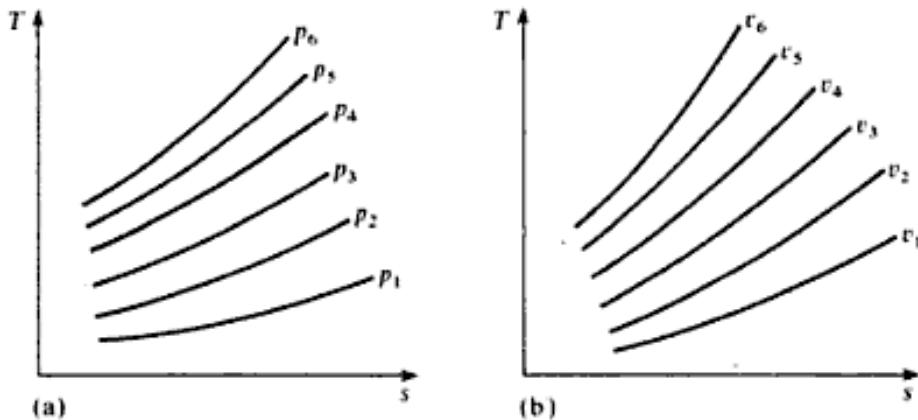
نفس الشيء، عند ضغط ثابت لـ 1kg من الغاز ،  $dQ = C_p dT$  ، وبالتالي،

$$\therefore S_B - S_1 = \int_1^B \frac{C_p dT}{T} = C_p \log_e \frac{T_B}{T_1} = C_p \log_e \frac{T_2}{T_1}$$

الآن بما أن  $C_p$  تكون أكبر من  $C_v$  لأي غاز مثالي، وبالتالي  $S_B - S_1$  يكون أكبر من  $S_A - S_1$ . عليه يجب أن تقع النقطة A يسار النقطة B على المخطط، وبالتالي فإن خط ثابت الضغط يميل بقيمة أقل عن خط الحجم الثابت. يوضح الشكل 3.15(a) متسلسلة خطوط ضغط ثابت على مخطط  $S - T$ ، ويوضح الشكل 3.15(b) متسلسلة خطوط حجم ثابت على مخطط  $S - T$ . لاحظ أنه في الشكل 3.15(a)  $p_6 > p_5 > p_4 > p_3$  etc. وفي الشكل 3.15(b)  $v_1 > v_2 > v_3$  etc. كلما يرتفع الضغط، ترتفع درجة الحرارة وينخفض الحجم؛ وبالعكس كلما هبط الضغط ودرجة الحرارة يزداد الحجم.



شكل (3.14) تغيرات القصور الحراري عند ضغط ثابت وحجم ثابت على مخطط  $v - p$



شكل (3.15) خطوط ثابت الضغط ثابت الحجم

مرسومة على مخطط  $T - S$  لغاز مثالي

:مثال (3.3)

هواء عند  $15^{\circ}\text{C}$  و  $1.05\text{bar}$  يحتل حجماً مقداره  $0.02\text{m}^3$ . يُسخن الهواء بحجم ثابت حتى يكون الضغط مساوياً لـ  $4.2\text{bar}$ ، ومن ثم يبرد بضغط ثابت إلى درجة الحرارة الأصلية. أحسب صافي سريان الحرارة إلى أو من الهواء وصافي التغير في القصور الحراري. أرسم الإجراء على مخطط  $T - S$ .

الحل:

يتم توضيح الإجراء على مخطط  $T - S$  كما في الشكل (3.16)،

لغاز مثالي،

$$m = \frac{pv}{RT} = \frac{1.05 \times 10^5 \times 0.02}{0.287 \times 10^3 \times 288} = 0.0254 \text{ kg}$$

.(حيث  $T_1 = 15 + 273 = 288\text{K}$ )

لغاز مثالي عند حجم ثابت،  $p_1/T_1 = p_2/T_2$ ، وبالتالي،

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

عند حجم ثابت،

$$Q = mc_v(T_2 - T_1) = 0.0254 \times 0.718(1152 - 288)$$

i.e.  $Q_{1-2} = 15.75 \text{ kJ}$

عند ضغط ثابت،

$$Q = mc_p(T_3 - T_2) = 0.0254 \times 1.005(288 - 1152)$$

i.e.  $Q_{2-3} = -22.05 \text{ kJ}$

$\therefore \text{صافي سريان الحرارة} = Q_{1-2} + Q_{2-3} = 15.75 - 22.05 = -6.3 \text{ kJ}$

i.e.  $= \text{الحرارة المفقودة} = 6.3 \text{ kJ}$

بالرجوع للشكل (3.16)،

$$\text{صافي النقصان في القصور الحراري} = s_1 + s_3 = (s_2 - s_3) - (s_2 - s_1)$$

عند ضغط ثابت،  $dQ = mc_p dT$ ، وبالتالي، مستخدماً المعادلة (3.7)،

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

$$= 0.0354 \text{ kJ/K}$$

عند حجم ثابت،  $dQ = mc_v dT$ ، وبالتالي، بإستخدام المعادلة (3.7)،

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

$$= 0.0253 \text{ kJ/K}$$

عليه،

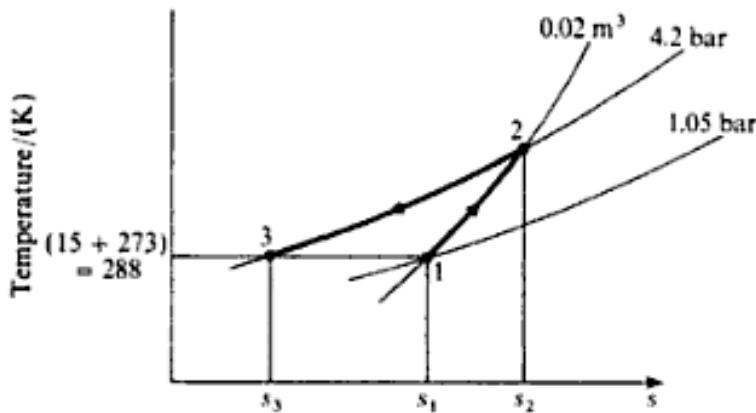
$$m(s_1 - s_3) = 0.0354 - 0.0253 = 0.0101 \text{ kJ/K}$$

i.e.  $= \text{النقصان في القصور الحراري} = 0.0101 \text{ kJ/K}$

لاحظ أنه بما أنَّ القصور الحراري هو عبارة عن خاصية، فإن النقصان في القصور الحراري في المثال (3.3)،

المعطى بـ  $(s_1 - s_3)$ ، يكون مستقلاً عن الإجراءات الخاضعة بين الحالات 1 و 3. يمكن أيضاً إيجاد  $(s_1 - s_3)$

بتخيل إجراءً ثابتاً لدرجة الحرارة إنعكاسياً يحدث بين 1 و 3.



شكل (3.16) إجراءات على مخطط  $T - s$

### 3.4 إجراءات إنعكاسية على مخطط $T - s$

#### (Reversible Process on The $T - s$ Diagram)

الإجراءات الإنعكاسية العديدة التي تم التعامل معها في الفصل 2 سيتم الآن اعتبارها بالعلاقة على

مخطط  $s - T$ . لقد تم تمثيل إجراءات الحجم الثابت والضغط الثابت على مخطط  $s - T$  في المقطع 3.3، وعليه سوف لن يتم مناقشتها مرة أخرى في هذا المقطع.

#### 1. إجراء ثابت درجة الحرارة إنعكاسي: (Reversible Isothermal Process )

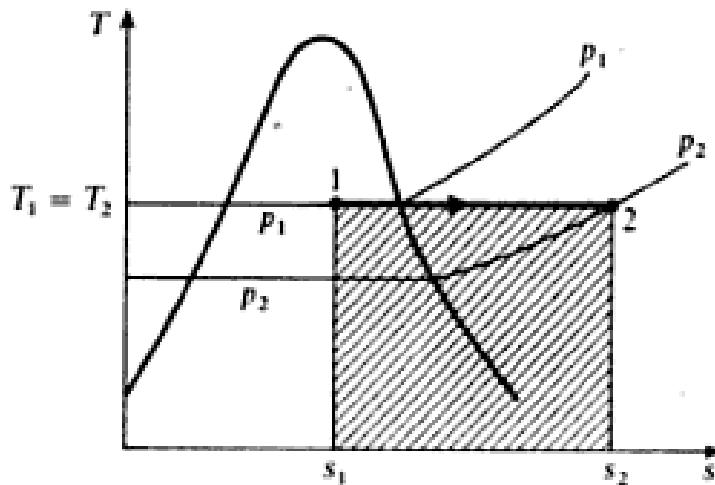
سيبيدو الإجراء ثابت الحرارة الإنعكاسي كخط مستقيم على مخطط  $s - T$ ، و تُمثل المساحة تحت الخط

سريان الحرارة أثناء الإجراء. كمثال، فإن الشكل (3.17) يوضح تمدد ثابت لدرجة الحرارة إنعكاسي لبخار رطب في منطقة التحميص. تمثل المساحة المظللة الحرارة المكتسبة أثناء الإجراء،

$$\text{i.e.} \quad \text{الحرارة المكتسبة} = T(s_2 - s_1)$$

لاحظ أنه يجب استخدام درجة الحرارة المطلقة. تكون درجة الحرارة المجدولة في جداول البخار هي  $t^{\circ}\text{C}$ ، ويجب تحويلها إلى  $\text{TK}$ .

عندما يتم اعتبار الإجراء ثابت درجة الحرارة لبخار في المقطع 2.1، لم يكن هنالك أسلوباً متاحاً لتقييم سريان الحرارة. يمكن إدخال مخطط  $s - T$  من إيجاد سريان الحرارة، كما موضح في المثال التالي.



شكل (3.17) إجراء ثابت درجة الحرارة إنعكاسي لبخار على مخطط  $T - s$

مثال (3.4) :

بخار جاف مشبع عند 100bar يتمدد بثبات درجة الحرارة وإنعكاسية إلى ضغط مقداره 10bar. أحسب الحرارة المكتسبة والشغل المبذول لكل kg من البخار أثناء الإجراء.

يتم توضيح الإجراء في الشكل (3.18)، حيث المساحة المظللة تمثل الحرارة المكتسبة.

الحل:

من الجداول عند 100bar، جاف مشبع،

$$s_1 = s_g = 5.615 \text{ kJ/kgK}, T_1 = 311^\circ\text{C}$$

عند 10bar و  $311^\circ\text{C}$  يكون البخار محمّصاً، وبالتالي بالاستكمال،

$$s_2 = 7.124 + \left( \frac{311 - 300}{350 - 300} \right) (7.301 - 7.124)$$

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

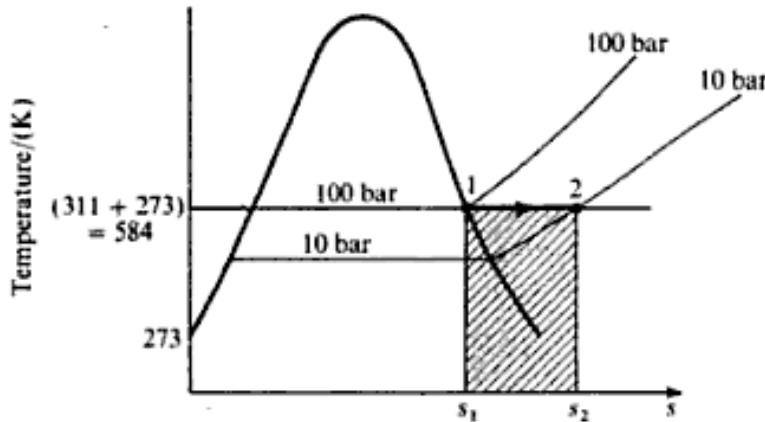
بالتالي نحصل على،

$$\text{المساحة المظللة} = T(s_2 - s_1) = \text{الحرارة المكتسبة}$$

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

.(حيث  $T = 311 + 273 = 584 \text{ K}$ )

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



شكل (3.18) إجراء على مخطط  $T - s$

لإيجاد الشغل المبذول من الضروري تطبيق معادلة طاقة اللاسربان،

$$\text{i.e. } Q = (u_2 - u_1) + W \quad \text{أو} \quad W = Q - (u_2 - u_1)$$

من الجداول، عند 100bar، جاف مشبع،

$$u_1 = u_g = 2545 \text{ kJ/kg}$$

عند  $311^\circ\text{C}$  و 10bar، بالاستكمال،

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

$$\therefore u_2 = 2794 + 17.8 = 2811.8 \text{ kJ/kg}$$

بالتالي،

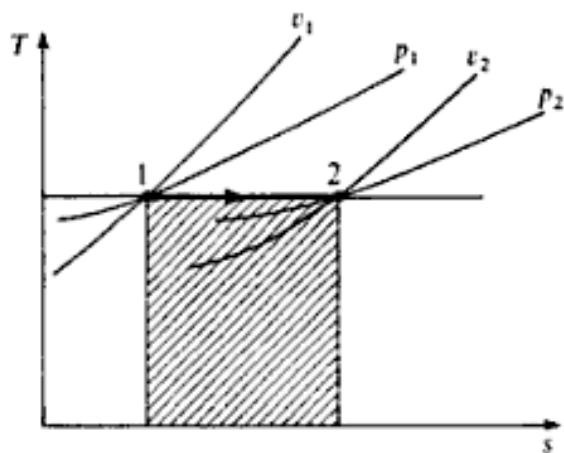
$$W = Q - (u_2 - u_1)$$

$$= 904 - (2811.8 - 2545)$$

$$= 904 - 266.8$$

$$\text{i.e. } W = 637.2 \text{ kJ/kg}$$

i.e. = الشغل المبذول بواسطة البخار 637.2 kJ/kg



شكل (3.19) إجراء ثابت درجة الحرارة إنعكاسي لغاز مثالي

يتم توضيح إجراء ثابت للحرارة إنعكاسي لغاز مثالي على مخطط  $T - s$  في الشكل (3.19). تمثل المساحة المظللة الحرارة المكتسبة أثناء الإجراء،

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

لغاز مثالي مؤدياً إجراءً ثابتاً درجة الحرارة من الممكن تقديره  $s_2 - s_1$ . من معادلة اللاسيان (1.4)، لإجراء إنعكاسيًّا، نحصل على،

$$dQ = du + pdv$$

i.e.  $dQ = c_v dT + pdv$ ، فانون جول،  
لإجراء ثابت درجة الحرارة،  $dT = 0$ ، وبالتالي،

$$dQ = pdv$$

بما أنّ  $pv = RT$ ، نحصل على،

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

الآن من المعادلة (3.7)،

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

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

عليه تُعطى الحرارة المكتسبة بـ،

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

لاحظ أنَّ هذه النتيجة هي نفس التي تم إستقامتها في المقطع 2.1،

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

مثال (3.5) :

0.03m<sup>3</sup> من نايتروجين (بكتلة جزيئية 28kg/kmol) محتوى في أسطوانة خلف كِبَاس، يكون إبتدائياً عند 15°C و 1.05bar. يتم إنضغاط الغاز بثبات درجة الحرارة وبإنعكاسية حتى يكون مساوياً لـ 4.2bar. أحسب التغير في القصور الحراري، سريان الحرارة، والشغل المبذول، وأرسم الإجراء على مخطط p - v و T - s.

الحل:

إفترض أن النايتروجين يعمل كغازاً مثالياً.

يُوضح الإجراء على مخطط p - v و T - s على الترتيب، ثمثل المساحات المظللة على الشكل (3.20)(a) شغل الدخل، بينما تمثل المساحة المظللة على الشكل (3.20)(b) الحرارة المفقودة.

$$R = \frac{R_{\circ}}{M} = \frac{8314}{28} = 297 \text{ N.m/kgK}$$

بالناتالي بما أنَّ  $pv = mRT$ ، نحصل على،

$$m = \frac{pv}{RT} = \frac{1.05 \times 10^5 \times 0.03}{297 \times 288} = 0.03368 \text{ kg}$$

.(حيث  $T = 15 + 273 = 288\text{K}$ )

بالتالي من المعادلة (3.12)، لـ  $m \text{ kg}$

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

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

∴ النقصان في القصور الحراري،

$$s_2 - s_1 = 0.01516 \text{ kJ/K}$$

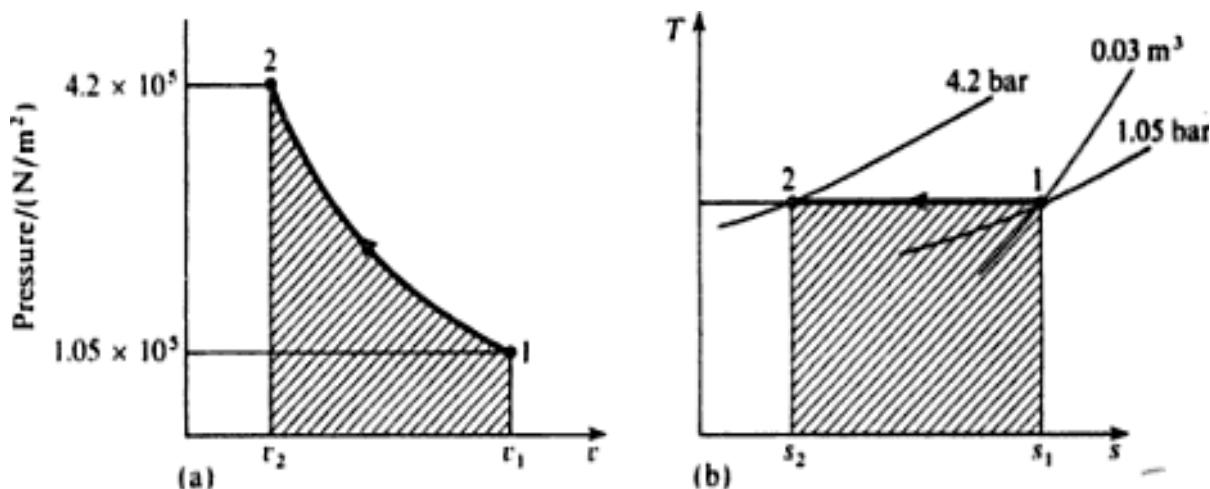
$= T(s_2 - s_1)$  = المساحة المظللة على الشكل (3.20(b)) = الحرارة المفقودة

$$= 288 \times 0.01516 = 4.37 \text{ kJ}$$

بالتالي لإجراء ثابت الحرارة لغاز مثالي، من المعادلة (2.12)،

$$W = Q = 4.37 \text{ kJ}$$

i.e. شغل الدخل = 4.37 kJ

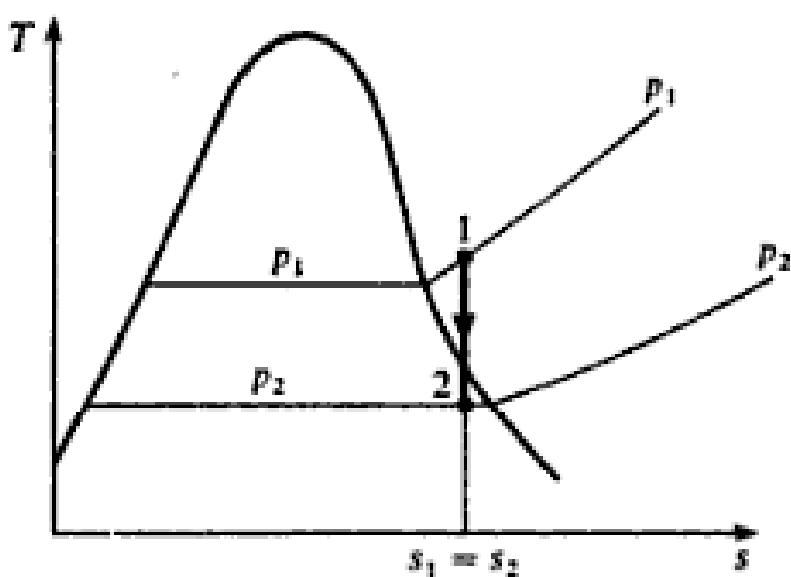


شكل (3.20) الإجراءات على مخطط  $p - v$  و  $T - s$

## 2. إجراء كاظم للحرارة إنعكاسي (أو إجراء ثابت القصور الحراري): (Reversible Adiabatic Process (or Isentropic Process))

لإجراء كاظم للحرارة إنعكاسي يبقى القصور الحراري ثابتاً، وبالتالي يُسمى ثابت القصور الحراري. لاحظ أنه لكي يكون الإجراء ثابت القصور الحراري فإنه لا يحتاج أن يكون كاظماً للحرارة أو إنعكاسياً، لكن سيبدو الإجراء دائماً خط رأسياً على مخطط  $s - T$ . الحالات التي لا يكون فيها الإجراء ثابت القصور الحراري كاظماً للحرارة أو إنعكاسياً تحدث قليلاً لذا سيتم تجاهلها طوال هذه المذكرات.

هناك إجراءاً ثابتاً للقصور الحراري لبخار محمص يتمدد في المنطقة الرطبة يُوضّح في الشكل (3.21). عندما تم اعتبار الإجراء الكاظم للحرارة إنعكاسي في المقطع 2.1، تم ذكر أنه ليس هناك 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.



شكل (3.21) إجراء ثابت القصور الحراري على مخطط  $T - s$

: (3.6) مثال

بخار عند 100bar و 375°C يتمدد بثبوت القصور الحراري في أسطوانة خلف كَبَاس إلى ضغط مقداره 10bar. أحسب الشغل المبذول لكل kg من البخار.

الحل:

من جداول التحميص، عند 100bar و 375°C، نحصل على،

$$s_2 = s_1 = \underline{6.091 \text{ kJ/kgK}}$$

عند 10bar و  $s_2 = 6.091$ ، فإن البخار يكون رطباً، وبالتالي، تكون  $s_2$  أقل من  $s_{g_2}$ . من المعادلة (3.11)،

$$x_2 = \frac{s_2 - s_{f_1}}{s_{fg_2}} = \frac{6.091 - 2.138}{4.448} = \underline{0.889}$$

بالتالي،

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

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

عند ضغط 100bar، ودرجة حرارة 375°C، نحصل من الجداول،

و  $v_1 = 3017 \text{ m}^3/\text{kg}$ . وبالتالي باستخدام المعادلة (1.7)،

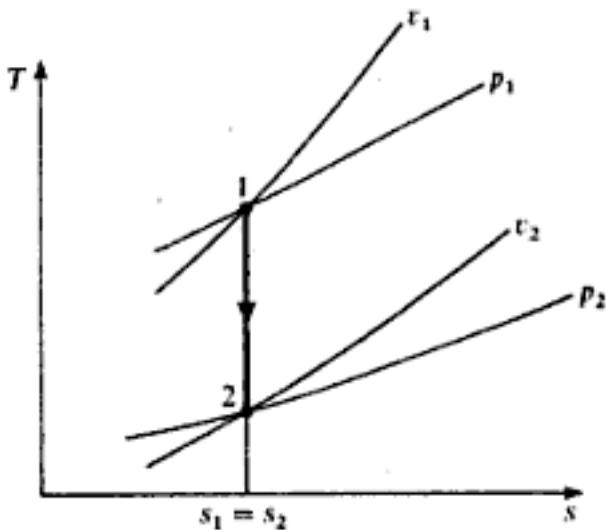
$$u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 3017 - \frac{100 \times 10^5 \times 0.02453}{10^3} = 3017 - 245.3$$

$$\text{i.e. } u_1 = \underline{2771.7 \text{ kJ/kg}}$$

لإجراء كاظم للحرارة من المعادلة (2.13)،

$$\text{i.e. } W = u_1 - u_2$$

$$\therefore \quad \text{الشغل المبذول بالبخار} = 2771.7 - 2381.6 = 390.1 \text{ kJ/kg}$$



شكل (3.22) إجراء ثابت القصور الحراري لغاز مثالي على مخطط  $T - s$

يتم توضيح إجراءً ثابتاً للقصور الحراري على مخطط  $s - T$  في الشكل (3.22) أعلاه. لقد تم التوضيح في المقطع 2.2 أنه لإجراء كاظم للحرارة إنعكاسي لغاز مثالي، وبالتالي فإن الإجراء ينبع القانون  $pv^\gamma = \text{const.}$  بما أن الإجراء كاظم الحرارة الإنعكاسي يحدث عند قصور حراري ثابت، ويُسمى بالإجراء ثابت القصور الحراري، فإن الأس  $\gamma$  يُعرف بالأوس ثابت القصور الحراري للغاز.

### 3. إجراء متعدد الإنتحاء: (Polytropic Process)

لإيجاد التغير في القصور الحراري في إجراءً متعدد الإنتحاء لبخار يتم تثبيت الحالات الطرفية باستخدام  $p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$ ، وبالتالي فإن قيم القصور الحراري عند الحالات الطرفية يمكن قراءتها مباشرة من الجدول.

#### مثال (3.7) :

في محرك بخار يكون البخار عند بداية إجراء التمدد عند 7bar، كسر جفاف 0.95، يتبع التمدد القانون  $pv^{1.1} = \text{const.}$ ، أسفل إلى ضغط مقداره 0.34bar. أحسب التغير في القصور الحراري لكل kg من البخار أشأء الإجراء.

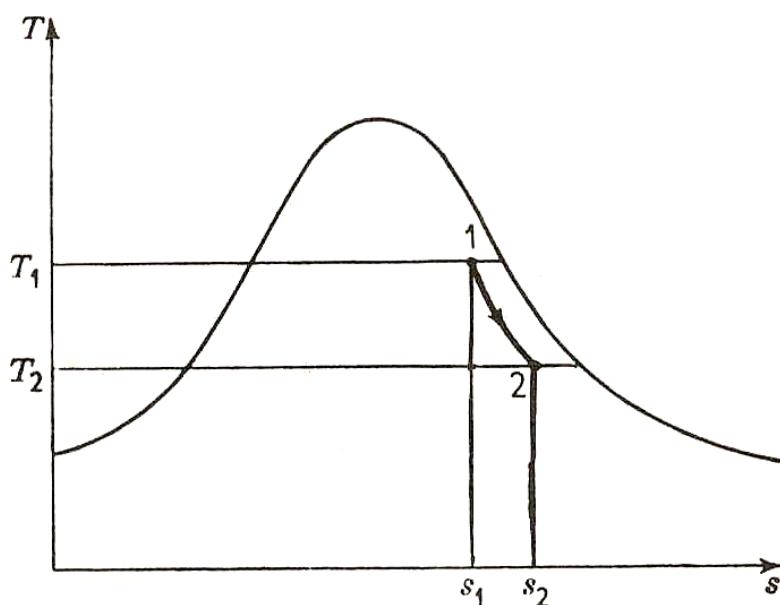
الحل:

(لاحظ أنَّ هذه البيانات هي بيانات المثال 2.6)

عند  $v_g = 0.2728 \text{ m}^3/\text{kg}$  ، 7bar ،  
بالناتي ،

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

بالناتي من المعادلة (2.25) ،



شكل (3.23)

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

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

عند 0.34bar ،  $v_g = 4.649$  ، يكون البخار رطباً ، بما أنَّ  $v_2 = 4.06 \text{ m}^3/\text{kg}$

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

بالناتي من المعادلة (3.10) ،

$$s_1 = s_{f_1} + x_1 s_{fg_1} = 1.992 + 0.95 \times 4.717 = \underline{6.472 \text{ kJ/kgK}}$$

$$s_2 = s_{f_2} + x_2 s_{fg_2} = 0.98 + 0.876 \times 6.745 = 6.889 \text{ kJ/kg K}$$

$$\therefore (s_2 - s_1) = 6.889 - 6.472 = \underline{0.417 \text{ kJ/kgK}}$$

يكون الإجراء موضحاً على مخطط  $s - T$  في الشكل (3.23).

لقد تم توضيح في المقطع 2.3 أنَّ الإجراء متعدد الإنتحاء هو الحالة العامة لغاز مثالي، لإيجاد التغير في القصور الحراري لغاز مثالي في الحالة العامة، إعتبر معادلة طاقة اللاسربيان لإجراء إنعكاسي، في المعادلة

،(1.4)

$$dQ = du + p dv$$

أيضاً لوحدة كتلة غاز مثالي من قانون جول  $pv = RT$ ، ومن المعادلة  $du = c_v dT$

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

بالتالي من المعادلة (3.6)،

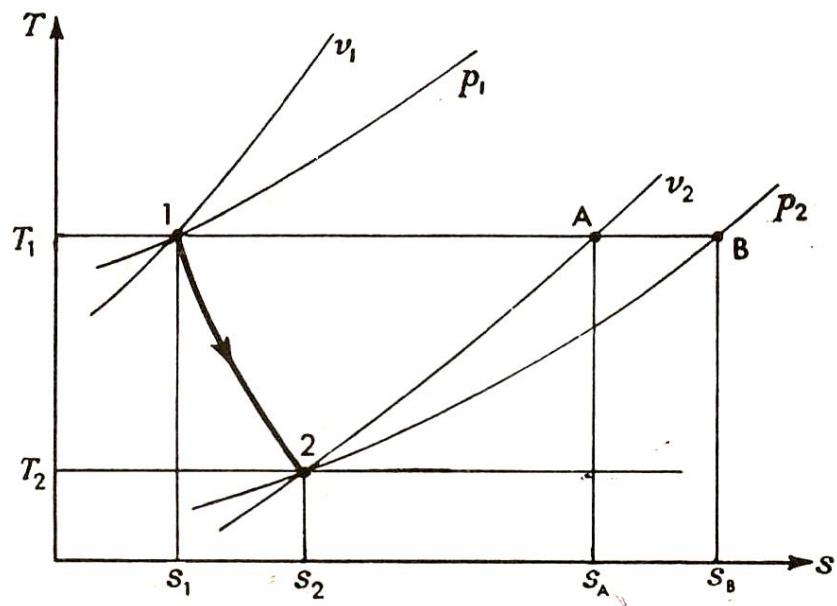
$$ds = \frac{dQ}{T} = \frac{c_v dT}{T} + \frac{R dv}{v}$$

بالتالي بين أي حالتين 1 و 2،

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

هذه يمكن توضيحيها على مخطط  $s - T$  كما في شكل (3.24). بما أنه في الإجراء في شكل (3.24)،

$T_2 > T_1$ ، بالتالي من الملائم أكثر كتابة،



شكل (3.24) إجراء متعدد الإنتحاء لغاز مثالي على مخطط  $T - s$

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

الجزء الأول من التعبير  $s_1 - s_2$  في المعادلة (3.14) هو التغير في القصور الحراري في إجراء ثابت درجة

الحرارة من  $v_1$  إلى  $v_2$  ،

من المعادلة (3.12) ،

$$s_A - s_1 = R \log_e \frac{v_2}{v_1}$$

أيضاً الجزء الثاني من التعبير  $s_1 - s_2$  في المعادلة (3.14) هو التغير في القصور الحراري في إجراء ثابت

الحجم من  $T_1$  إلى  $T_2$  .

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 في القصور الحراري في إجراء متعدد الإنتحاء من الحالة 1 إلى الحالة

2 تكون قد إستبدلنا الإجراء بإجرائين أبسط؛ من 1 إلى A ومن A إلى 2.

من الواضح من الشكل (3.24) أنَّ ،

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

يمكن اختيار أي إجرائين لإحلال إجراءً متعدد للإنتهاء لإيجاد التغيير في القصور الحراري.

كمثال من 1 إلى B ومن بعد من B إلى 2 كما في الشكل (3.24) نحصل على،

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

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

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

عند ضغط ثابت بين  $T_1$  و  $T_2$  نحصل على،

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

بالتالي،

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

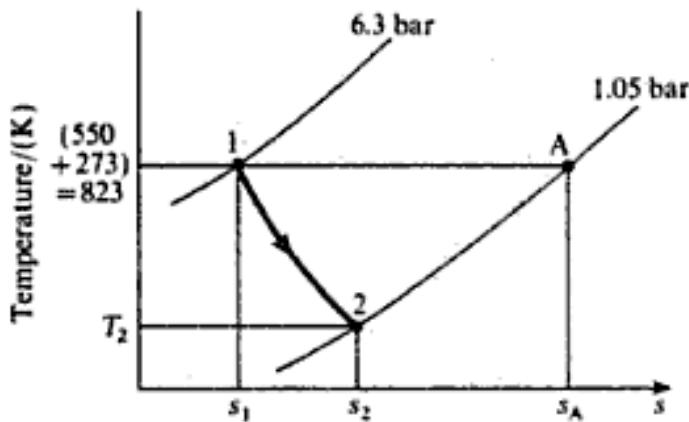
$$s_2 - s_1 = c_p \log_e \frac{T_2}{T_1} + R \log_e \frac{p_1}{p_2} \quad (3.15)$$

يمكن إشتقاق المعادلة (3.15) بسهولة من المعادلة (3.13). من الواضح أن هناك عدد كبير من المعادلات الممكنة للتغيير في القصور الحراري في إجراء متعدد للإنتهاء، ويتم التأكيد على أنه لا يجب عمل أي محاولة لذكر مثل هذه التعبيرات. يمكن التعامل مع كل مسألة برسم مخطط  $s - T$  وإستبدال الإجراء بإجرائين آخرين إنعكاسيين أبسط، كما في الشكل (3.24).

مثال (3.8):

أحسب التغيير في القصور الحراري لـ 1kg من هواء يتمدد بإنتهاء في أسطوانة خلف كباس من 6.3bar، يكون أَس التمدد مساوياً لـ 1.3.  $550^{\circ}\text{C}$

الحل:



شكل (2.25) الإجراء على مخطط  $T - s$

يتم توضيح الإجراء على مخطط  $T - s$  في الشكل (3.25). من المعادلة (2.29)،

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

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

$$.\quad (\text{حيث } T_1 = 550 + 273 = 823 \text{ K})$$

الآن إستبدل الإجراء 1 إلى 2 بإجرائين، 1 إلى A وإلي 2. وبالتالي عند درجة حرارة ثابتة من 1 إلى A، من

المعادلة (3.12)،

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

$$= 0.287 \times 1.792 = \underline{0.515} \text{ kJ/kgK}$$

عند ضغط ثابت من A إلى 2،

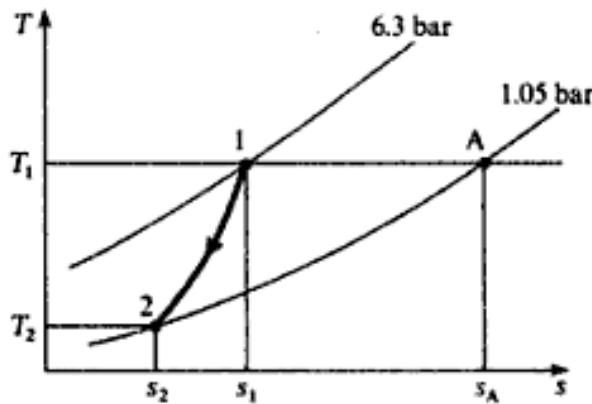
$$s_A - s_1 = c_p \log_e \frac{T_1}{T_2} = 1.005 \log_e \frac{823}{544}$$

$$= 1.005 \times 0.413 = \underline{0.415} \text{ kJ/kgK}$$

$$s_2 - s_1 = 0.515 - 0.415 = \underline{0.1} \text{ kJ/kgK} \quad \text{بالتالي،}$$

i.e.  $\Delta S = 0.1 \text{ kJ/kgK}$  = الزيادة في القصور الحراري

لاحظ في هذه المسألة أنه إذا حدث أن أصبحت قيمة  $S_A - S_2$  أكبر من  $S_A - S_1$  ، هذا يعني أن  $S_1$  تكون أكبر من  $S_2$ ، ويجب أن يبدو الإجراء كما في الشكل (3.26) أدناه.



شكل (3.26) مخطط  $T - S$  بديل

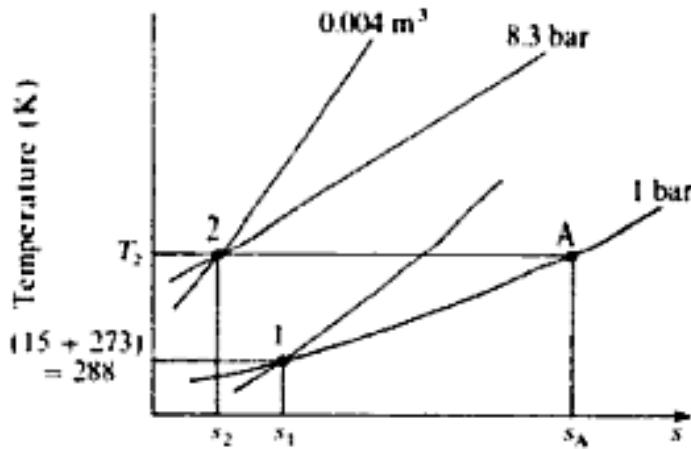
مثال (3.9):

كتلة مقدارها 0.05kg من ثاني أكسيد الكربون (بكتلة جزيئية 44kg/kmol) يتم إنضغاطه من  $15^\circ\text{C}$ ،  $1\text{bar}$  حتى يكون الضغط مساوياً لـ  $8.3\text{bar}$ ، ويكون عند الحجم  $0.004\text{m}^3$ . أحسب التغير في القصور الحراري. خذ  $c_p$  لثاني أكسيد الكربون كـ  $0.88 \text{ kJ/kgK}$ ، وأفترض أن ثاني أكسيد الكربون يكون غازاً مثالياً.

الحل:

يتم توضيح الحالتين الطرفيتين على مخطط  $T-S$  في الشكل (3.27). لم يتم تحديد الإجراء في المثال وليس هناك معلومات ضرورية حوله. يتم تثبيت الحالات 1 و 2 وبالتالي فإن  $S_1 - S_2$  تكون مثبتة. يمكن أن يكون الإجراء بين 1 و 2 إنعكاسياً أو لا إنعكاسياً؛ يكون التغير في القصور الحراري هو نفسه بين الحالات الطرفية المعطاة.

بالرجوع للشكل (3.27)، لإيجاد  $S_1 - S_2$ ، يمكن أولاً إيجاد  $S_A - S_2$  ومن بعد طرح  $S_A - S_1$  منها. أولاً وقبل كل شيء من الضروري إيجاد  $R$  ومن ثم  $T_2$ .



شكل (3.27) مخطط  $T - s$

من المعادلة،

$$R = \frac{R_{\circ}}{M} = \frac{8314}{44} = 189 \text{ N.m / kgK}$$

من المعادلة،  $pV = m R T$ ، عليه،

$$T_2 = \frac{p_2 V_2}{Rm} = \frac{8.3 \times 10^5 \times 0.004}{0.05 \times 189} = 315 \text{ K}$$

بالتالي من المعادلة (3.12)،

$$s_A - s_2 = R \log_e \frac{p_2}{p_A} = 0.189 \log_e \frac{8.3}{1} = 0.4 \text{ kJ/kgK}$$

أيضاً عند ضغط ثابت من 1 إلى A

$$s_A - s_1 = c_p \log_e \frac{T_2}{T_1} = 0.88 \log_e \frac{351}{288} = 0.174 \text{ kJ/kgK}$$

. (حيث  $T_1 = 15 + 273 = 288 \text{ K}$ )

بالتالي،

$$s_1 - s_2 = 0.4 - 0.174 = 0.226 \text{ kJ/kgK}$$

بالتالي لـ 0.05kg من ثاني أكسيد الكربون،

$$\text{النقصان في القصور الحراري.} = 0.05 \times 0.226 = 0.0113 \text{ kJ / K}$$

### 3.5 القصور الحراري واللانعكاسية: (Entropy and Irreversibility)

لقد تمت الإشارة في المقطع السابق إلى أنَّه، بما أنَّ القصور الحراري هو خاصية، فإنَّ التغير في القصور الحراري يعتمد فقط على الحالات الظرفية وليس على الإجراء بين الحالات الظرفية. عليه فإنَّ إجراءً لا إنجعكاسياً معطى يعطي معلومات كافية لتبسيط الحالات الظرفية وبالتالي يمكن إيجاد التغير في القصور الحراري.

هذه يمكن توضيحها بصورة أفضل ببعض الأمثلة.

**مثال (3.10):**

بخار عند 7bar، كسر جاف 0.96، يتم خنقه أسفل إلى 3.5bar. أحسب التغير في القصور الحراري لكل kg من البخار.

**الحل:**

عند 7bar، كسر جاف 0.96، مستخدماً المعادلة (3.10) نحصل على،

$$s_1 = s_{f_1} + x_1 s_{fg_1} = 1.992 + 0.96 \times 4.717$$

$$\text{i.e. } s_1 = \underline{6.522 \text{ kJ/kgK}}$$

في المقطع 2.4، لقد تم التوضيح أنَّه لإجراء الخنق،  $h_2 = h_1$

من المعادلة ،

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

عند 3.5bar يكون البخار لا يزال رطباً، بما أنَّ  $h_2 > h_{g2}$ . من المعادلة،

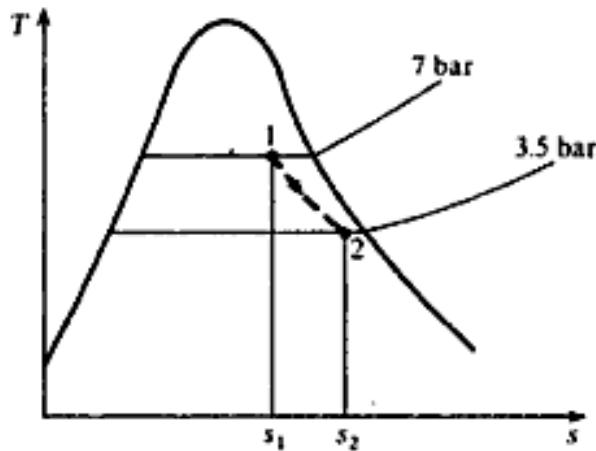
$$h_2 = h_1 = x_1 h_{fg_1} \text{، عليه،}$$

$$x_2 = \frac{h_2 - h_{f_2}}{h_{fg_2}} = \frac{2682 - 584}{2148} = \underline{0.977}$$

بالتالي،

$$6.817 - 6.522 = \underline{0.295 \text{ kJ/kgK}} = \text{الزيادة في القصور الحراري.}$$

يتم توضيح ذلك على مخطط  $T - s$ . لاحظ أن الإجراء يُوضح منقطاً، ولا تمثل المساحة تحت الخط سريان الحرارة؛ يفترض إجراء الخنق أنه ليس هناك سريان حرارة، بل يكون هناك تغيراً في القصور الحراري لأن الإجراء يكون إنعكاسياً.



شكل (3.28) إجراء الخنق على مخطط  $T - s$

:مثال (3.11)

وعاءان بحجم متساوٍ يتم توصيلهما بمسورة قصيرة الطول تحتوي على صمام؛ كلا الوعائين يكونان معزولان حرارياً. أحد الوعائين يحتوي على هواء والآخر يكون مفرغاً تماماً. أحسب التغير في القصور الحراري لكل kg من الهواء في النظام عندما يسمح الصمام للهباء بملء الوعائين.

الحل:

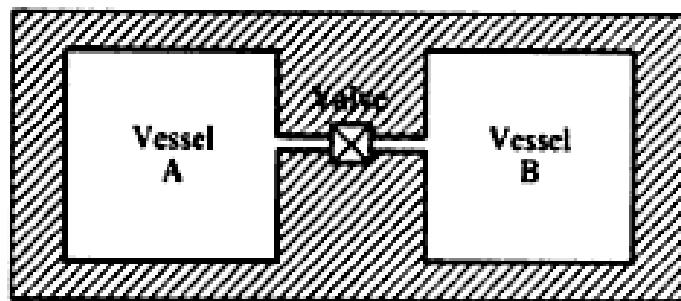
بداية يكون الوعاء A حاوياً لهواء ويكون الوعاء B مفرغاً تماماً، كما في الشكل (3.29)؛ أخيراً يحتل الهباء الوعائين A و B. في المقطع 2.4 لقد تم توضيح أنه في تمدد غير مقاوم (Unresisted expansion) لغاز مثالي، تكون درجات الحرارة الإبتدائية والنهائية متساوية. في هذه الحالة يكون الحجم الإبتدائي  $V_A$  والحجم النهائي  $V_A + V_B = 2V_A$ . يمكن توضيح الحالات الطرفية على مخطط  $s - T$  كما موضح في الشكل (3.30) يكون الإجراء 1 إلى 2 لا إنعكاسياً ويجب رسمه منقطاً. يكون التغير في القصور الحراري هو  $s_2 - s_1$ .

بدون النظر لمرور الإجراء بين 1 و 2 بالتالي، لحساب التغير في القصور الحراري، تخيل أنَّ الإجراء يتم إستبداله بإجراءً ثابتاً لدرجة الحرارة إنعكاسياً بين الحالات 1 و 2. بالتالي من المعادلة (3.12)،

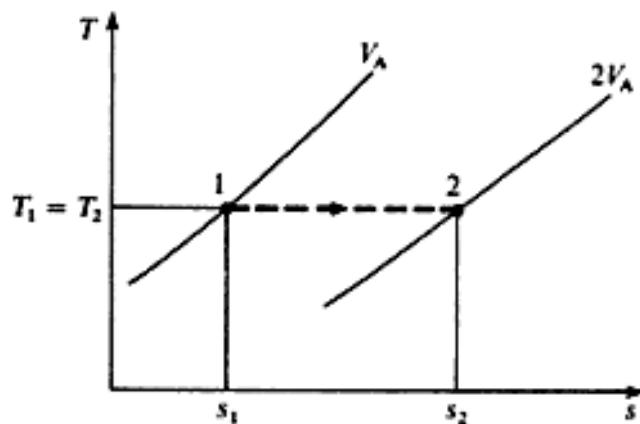
$$(s_2 - s_1) = R \log_e \frac{v_2}{v_1} = 0.287 \log_e \frac{2v_A}{v_A}$$

$$= 0.287 \log_e 2 = \underline{0.119 \text{ kJ/kgK}}$$

i.e. الزيادة في القصور الحراري = 0.119 kJ/kgK



شكل (3.29) وعاءان موصلان بینیاً ومعزولان جيًداً



شكل (3.30) الإجراء على مخطط T – s

لاحظ أنَّ الإجراء يتم رسمه منقطاً في الشكل (3.30)، وتكون الساحة تحت الخط ليست ذات أهمية؛ يكون الإجراء كاظماً للحرارة ويكون هنالك تغيراً في القصور الحراري بما أنَّ الإجراء يكون لا إنعكاسياً.

من المهم التذكرة بأن المعادلة (3.6)،  $ds=dQ/T$ ، تكون صحيحة فقط لإجراءات الإنعكاسية. بنفس الطريقة فإن المعادلة  $dv=dW/p$  أو  $dW=pdv$  تكون صحيحة فقط لإجراءات الإنعكاسية. في المثال (3.11) يزداد حجم الهواء من  $V_A$  إلى  $2V_A$ ، ولا يكون هنالك شغلاً مبذولاً بالهواء خلال الإجراء،

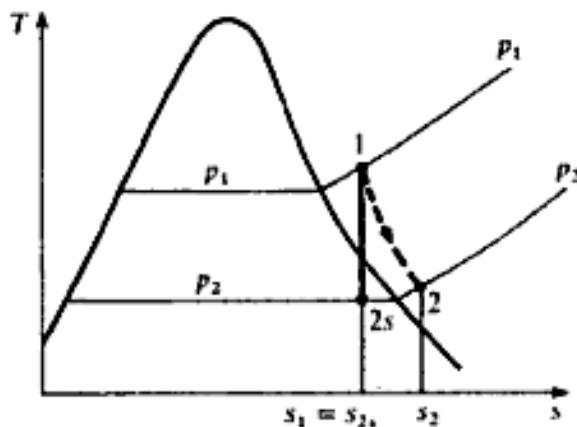
$$\text{i.e. } dW = 0 \text{ و } v_2 - v_1 = 2V_A - V_A = V_A$$

بالتالي في الإجراء الإنعكاسي للمثال (3.11)  $dW/p \neq dv$ . نفس الشيء، فإن المحتوى الحراري في المثال (3.11) يزداد بـ  $0.199\text{kJ/kgK}$  ويكون سريان الحرارة صفرًا، i.e.  $dQ/T \neq ds$ . لا يجب أن يكون هنالك إلتباساً إذا تم رسم مخطط  $s-T$  أو  $v-p$  لكل مسألة وتحديد نقاط الحالة في مواضعها الصحيحة. بالتالي، عندما يكون هنالك إجراءً إنعكاسياً بين الـ  $s-T$  والـ  $v-p$  يمكن رسم الخطوط التي تمثل الإجراء بخطوط متصلة، وتمثل الحرارة تحت خط سريان الحرارة على مخطط  $s-T$  والشغل المبذول على مخطط  $v-p$ .

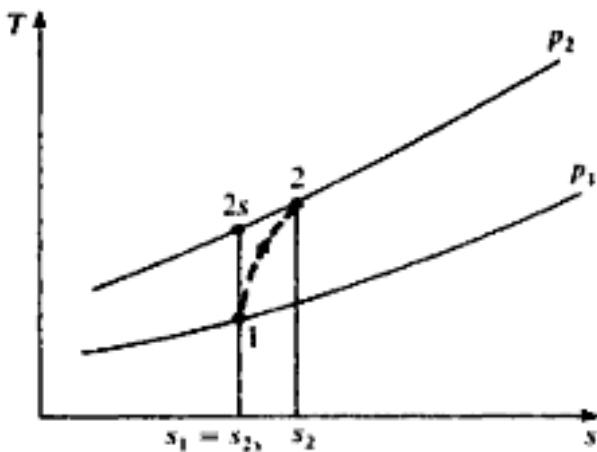
عندما يكون الإجراء بين الـ  $s-T$  والـ  $v-p$  لا إنعكاسياً، يجب رسم الخط منقطاً، ولا تكون المساحة تحت الخط أي أهمية على أي من المخططات.

يمكن التوضيح من القانون الثاني أن القصور الحراري لنظام معزول حرارياً يجب إما أن يزيد أو يبقى كما هو، كمثال، فإن إجراءً كاظماً للحرارة سوف يكون معزولاً من بيئته المحيطة ، بما أنه لا يوجد سريان للحرارة إلى أو من النظام. لقد لاحظنا أنه في إجراء كاظم للحرارة إنعكاسي فإن القصور الحراري يبقى كما هو. في إجراء كاظم للحرارة لا إنعكاسي يجب أن يزيد القصور الحراري دائماً، ويكون الكسب في القصور الحراري هو قياس للإنعكاسية للإجراء. توضح الإجراءات في الأمثلة (3.10) و (3.11) هذه الحقيقة. كمثال آخر، اعتبر تمدداً كاظماً للحرارة لا إنعكاسياً في توربينة بخار كما موضح في الشكل (3.31). بالإجراء 1 إلى 2 كما في الشكل (3.31) الزيادة في القصور الحراري،  $s_2 - s_1 = s_2' - s_1'$  هي قياساً للإنعكاسية للإجراء. نفس الشيء فإن

الشكل (3.32)، يوضح إنضغاطاً كاظماً للحرارة لا إنعكاسياً في ضاغط دوار بالإجراء 1 إلى 2. يتم تمثيل إجراءً كاظماً للحرارة إنعكاسياً بين نفس الضغوط بالإجراء 1 إلى 2. توضح الزيادة في القصور الحراري لا إنعكاسية للإجراء.



شكل (3.31) إجراء أديباتي لا إنعكاسي لبخار على مخطط  $T - s$



شكل (3.32) إنضغاط أديباتي لا إنعكاسي لغاز مثالي على مخطط  $T - s$

:مثال (3.12)

في توربينة هواء يتمدد الهواء من  $6.8\text{bar}$  و  $150^\circ\text{C}$  إلى  $1.013\text{bar}$  و  $430^\circ\text{C}$ . يمكن إفتراض أن الفقد الحراري من التوربينة يكون متغيراً بحيث يتم تجاهله. وضح أنَّ الإجراء يكون لا إنعكاسياً، وأحسب التغيير في القصور الحراري لكل  $\text{kg}$  من الهواء.

الحل:

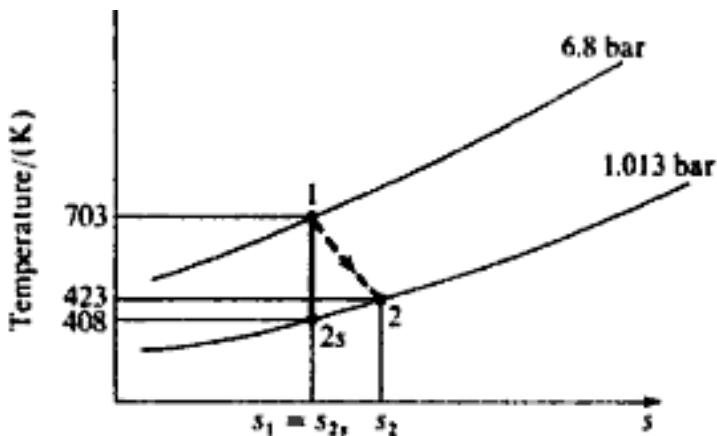
بما أنَّه تم تجاهل الفقد الحراري، فإنَّ الإجراء يكون كاظماً للحرارة. لإجراء كاظم للحرارة إنعكاسي لغاز مثالي، باستخدام المعادلة (2.21)،

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

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

. (حيث  $T_1 = 430 + 273 = 703\text{K}$ )

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



شكل (3.33) مخطط  $T - s$

لكن درجة الحرارة الفعلية تكون مساوية لـ  $150^\circ\text{C}$  عند الضغط  $1.013\text{bar}$ ، وبالتالي يكون الإجراء لا إنعكاسياً.

يُوضح الإجراء بـ 1 إلى 2 في الشكل (3.33)؛ يتم أيضاً توضيح الإجراء ثابت القصور الحراري بـ 1 إلى 2.

من غير الممكن أن يكون الإجراء 1 إلى 2 إنعكاسياً، لأنَّه في تلك الحالة ستمثل المساحة تحت الخط 1 – 2' سريان الحرارة ويبكون كاظماً للحرارة.

يمكن إيجاد التغير في القصور الحراري،  $s_2 - s_1$  باعتبار إجراءً ثابتاً للضغط إنعكاسياً بين 2 و 2'. وبالتالي

من المعادلة (3.6)،  $dQ = c_p dT$  وعند ضغط ثابت لـ  $1\text{kg}$  من غاز مثالي نحصل على  $ds = dQ / T$

وعليه،

$$s_2 - s_1 = \int_2^2 \frac{c_p dT}{T} + R \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = c_p \log_e \frac{T_2}{T_1}$$

$$= 1.005 \log_e \frac{423}{408} = 0.0355 \text{ kJ/kgK}$$

i.e.  $s'_2 - s_1 = 0.0355 \text{ kJ/kgK}$  = الزيادة في القصور الحراري

الآن إعتبر حالة عندما يكون هنالك نظاماً غير معزول حرارياً من بيئته المحيطة. يمكن للقصور الحراري لمثل هذا النظام أن يزيد، ينقص أو يبقى كما هو، إعتماداً على الحرارة العابرة للحد. على أي حال، إذا إستطال الحد ليشمل مصدر أو غاطس الحرارة الذي يكون معه النظام في حالة إتصال، وبالتالي فإنَّ القصور الحراري لهذا النظام الجديد إما أن يزيد أو يظل على حالته. لتوضيح هذا إعتبر مستودعاً ساخناً عند  $T_1$  ومستودعاً بادراً عند  $T_2$ ، وإفترض أنَّ المستودعان معزولان حرارياً من البيئة المحيطة كما في الشكل (3.34). إجعل  $Q$  تكون سريان الحرارة من المستودع الساخن إلى البارد. يكون هنالك إنداراً مستمراً لدرجة الحرارة من  $T_1$  إلى  $T_2$  بين النقطتين  $A$  و  $B$ ، ويمكن إفتراض أنَّ الحرارة تتنقل بإنعاكسية من المستودع الساخن إلى النقطة  $A$ ، ومن النقطة  $B$  إلى المستودع البارد. سيتم إفتراض أن درجة الحرارة لكل مستودع تبقى ثابتة. وبالتالي نحصل على،

$$+Q = \text{الحرارة المكتسبة للمستودع الساخن}$$

بالتالي من المعادلة (3.7)،

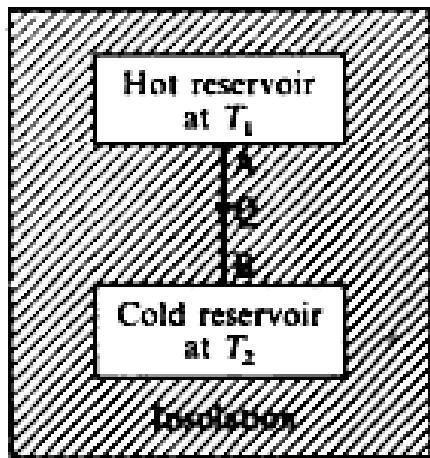
$$+ \frac{Q}{T_2} = \text{الزيادة في القصور الحراري للمستودع البارد}$$

أيضاً،

$$-Q = \text{الحرارة المكتسبة للمستودع الساخن}$$

$$- \frac{Q}{T_1} = \text{الزيادة في القصور الحراري للمستودع البارد . .}$$

i.e.  $\Delta s = \left( \frac{Q}{T_2} - \frac{Q}{T_1} \right)$  ، صافي الزيادة في القصور الحراري



شكل (3.34) وعاءان معزولان حرارياً وموصلان بيّانياً

بما أن  $T_2 > T_1$ , يُلاحظ أن  $\Delta s$  تكون موجبة، وبالتالي يجب أن يزيد القصور الحراري للنظام. في الحد عندما يكون الفرق في درجة الحرارة صغيراً جداً، وبالتالي  $\Delta s = 0$ . هذا يؤكد مبدأ أن القصور الحراري لنظام معزول يجب إما أن يزيد أو يبقى كما هو.

أحد أحكام الإنعكاسية يقول:

يجب أن يكون فرق درجة الحرارة بين النظام وبينه المحيطة صغيراً جداً أثناء الإجراء الإنعكاسي.

في المثال عاليه، عندما  $T_2 > T_1$ , فإن سريان الحرارة بين الوعائين يكون لا إنعكاسياً طبقاً للحكم أعلاه. هكذا يزيد القصور الحراري للنظام عندما يكون إجراء سريان الحرارة لا إنعكاسياً بينما يبقى كما هو عليه عندما يكون الإجراء إنعكاسياً. الزيادة في القصور الحراري هو مقياس الإنعكاسية. يمكن رسم الإجراءات في المثال السابق على مخطط  $s - T$  كما موضح في الشكل (3.35). لقد تم تراكب الإجراءان على نفس المخطط. يمثل الإجراء

$P - R$  إنتقال وحدات  $Q$  للحرارة من المستودع الساخن، وتكون المساحة تحت  $R - P$  مساوية  $L$ . ويمثل

الإجراء  $Y - X$  إنتقال وحدات  $Q$  للحرارة إلى المستودع البارد، وتكون المساحة تحت  $Y - X$  مساوية  $L$ .

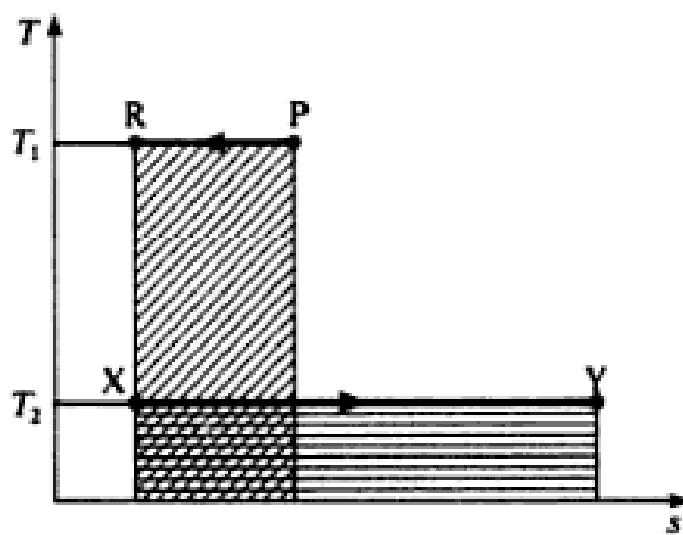
تكون المساحة تحت  $R - P$  مساوية لمساحة تحت  $Y - X$ ، وبالتالي يمكن الملاحظة من المخطط أن القصور

الحراري للوعاء البارد يجب دائماً أن يزيد بصورة أكبر من النقصان في المحتوى الحراري للمستودع الساخن.

عليه فإن يكون القصور الحراري المتعدد يجب أن يزيد. لاحظ، بما أنه في المثال السابق يكون كل من

الإجراءان R - P و Y - X هما إنعكاسيان، وبالتالي تحدث الإنعكاسية بين A و B. متى ما تم إنتقال للحرارة خلال فرق درجة حرارة كبير، فإن الإجراء يكون لا إنعكاسياً وتكون هنالك زيادة في القصور الحراري للنظام وببيئته المحيطة.

في حالات معينة (إجراءات معينة) يمكن أن تحدث الإنعكاسية في البيئة المحيطة، وبالتالي فإن الإجراء يكون إنعكاسياً داخلياً، وتكون المساحات على مخطوطات  $v$  - p و  $s$  - T قريبة جداً من الشغل المبذول وسريان الحرارة على الترتيب.



شكل (3.35) الإجراءات للوعاء الساخن والبارد على مخطط  $S - T$

في معظم المسائل عندما يتم إفتراض إجراءً إنعكاسياً يكون المفهوم الضمني هو الإنعكاسية الداخلية. عكس ذلك، فإن معظم الإجراءات العملية التي يُقال أنها لا إنعكاسية، هي لا إنعكاسية داخلية نتيجة لتدويم مائع التشغيل كما في المثال (3.12).

بالرجوع للشكل (3.34)، إذا تم وضع محرك حرارة بينياً بين المستودعين الساخن والبارد، فإنه يمكن توليد بعض الشغل. يذكر القانون الثاني أن الحرارة لا يمكن أن تسرى بدون مساعدة من مستودع بارد إلى مستودع ساخن، عليه لتوليد شغل من كمية الطاقة Q، بعد أن يتم إنتقالها إلى المستودع البارد، سيكون من الضروري وجود مستودع ثالث عند درجة حرارة أدنى من المستودع البارد. من الواضح أنه عندما يتم إنتقال حرارة خلال

فرق درجة حرارة كبير، فإن فائدتها تصبح أقل، وفي الحد عندما يتم إنتقال الحرارة لمستودع درجة الحرارة الأدنى الموجود وبالتالي لا يمكن توليد أي شغل إضافي. عليه فإن الإنعكاسية لديها تأثير سيء على الطاقة المتاحة، ويمكن اعتبار القصور الحراري ليس كقياس فقط للإنعكاسية بل أيضاً لانحلال الطاقة. لاحظ أنه، بمبدأ بقاء الطاقة، فإن الطاقة لا يمكن تحطيمها؛ بالقانون الثاني للديناميكا الحرارية، يمكن فقط للطاقة أن تصبح أقل فائدة. تمثل النظم طبيعياً حالات ذات رتبة طاقة أدنى؛ عليه فإن أي نظام يتحرك لحالة ذات رتبة أعلى بدون إمداد خارجي للطاقة سيخرج القانون الثاني.

يمكن الملاحظة أن القانون الثاني 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 استنتاج أنه، لمستودع بارد معطي (e.g الجو)، كلما تكون درجة حرارة المستودع الساخن عالية، ستكون الكفاءة الحرارية لمحرك عالية.

### 3.6 الإتاحة: (Availability)

المقدار الأقصى النظري للشغل الذي يمكن الحصول عليه من نظام عند حالة  $p_1$  و  $T_1$  عندما يعمل مع مستودع عند درجة حرارة وضغط ثابتين  $T_0$  و  $p_0$  يُسمى بالإتاحة.

#### a/ نظم اللاسريان: (Non – Flow Systems)

اعتبر نظاماً مكوناً من مائع في أسطوانة خلف كباس، حيث يتمدد المائع إنعكاسياً من الشروط الأولية  $p_1$  و  $T_1$  إلى الشروط الجوية النهائية  $T_0$  و  $p_0$ . تخيل أيضاً أنَّ النظام يعمل بالإقتران مع محرك حراري إنعكاسي يستقبل الحرارة بإنعكاسية من المائع في الأسطوانة بحيث أنَّ مادة التشغيل لمحرك الحرارة يتبع الدورة O1AO كما موضح في الأشكال (a) 3.36 و (b) 3.36، حيث  $s_A = s_1$  و  $T_0 = T_A$ . يعطي الشغل المبذول بهذا المحرك

: بـ

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

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

تكون الحرارة المكتسبة إلى المحرك مساوية للحرارة المفقودة بالمائع الذي يؤدي الإجراء 1 إلى صفر، وبالتالي

نحصل على،

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

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

عليه جمع المعادلين،

$$W_{\text{Fluid}} + W_{\text{Engine}} = (u_1 - u_o) - T_o(s_1 - s_o)$$

يكون الشغل المبذول بالمائع على الكباس أقلً من الشغل المبذول الكلي بالمائع، بما أنَّ هنالك شغلاً مبذولاً

على الجو عند الضغط  $p_o$

$$\text{i.e. } \text{الشغل المبذول على الجو} = p_o(v_o - v_1)$$

بالتالي،

$$= (u_1 - u_o) - T_o(s_1 - s_o) - p_o(v_o - v_1) = \text{الشغل المتاح الأقصى}$$

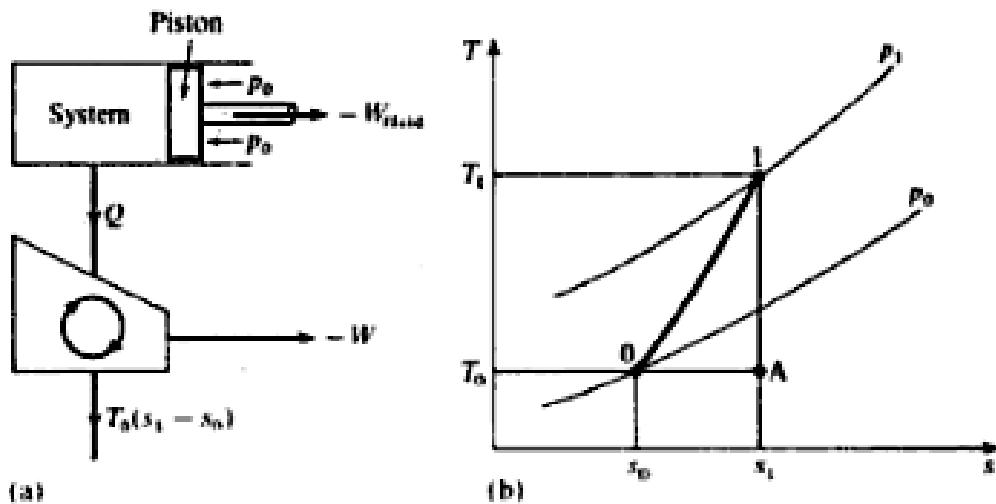
(ملحوظة: عندما يؤدي مائعاً دورة كاملة فإنَّ صافي الشغل المبذول على الجو يكون صفرًا).

$$W_{\max} = (u_1 + p_o v_1 - T_o s_1) - (u_o + p_o - T_o s_1)$$

$$\therefore W_{\max} = a_1 - a_o$$

تُسمى الخاصة  $a = u - p_o v - T_o s$  بالدالة المتاحة للاسريان.

(non – flow availability function)



شكل (3.36) توضيح الطاقة المتاحة لنظام

### b/نظم السريان المستقر (Steady Flow Systems):

إجعل مائعاً يسرى بسرعة  $C_1$  من مستودع يكون فيه الضغط ودرجة الحرارة ثابتين عند  $p_1$  و  $T_1$  خلال جهاز لضغط جوي مقداره  $p_o$ . إجعل المستودع يكون عند إرتفاع  $z_1$  من خط المرجعية، الذي يمكن أخذه عند مخرج الجهاز،  $z_o = 0$  i.e. للحصول على أقصى شغل من الجهاز فإن سرعة المخرج  $C_o$ ، يجب أن تكون صفرأً. يمكن التوضيح كما في الشكل (a) عاليه أن محركاً حرارياً إنعكاسياً يشتغل بين الحدود سيرفض مقداراً من الحرارة يعادل  $(T_o - T_1)(s_1 - s_o)$  وحدة، حيث  $T_o$  هي درجة الحرارة الجوية.

عليه نحصل على،

$$W_{\max} = (h_1 - C_1^2 / 2 + z_1 g) - h_o - T_o(s_1 - s_o)$$

في نظم عديدة للديناميكا الحرارية يتم تجاهل عناصر طاقة الحركة والوضع.

$$W_{\max} = (h_1 - T_o s_1) - (h_o - T_o s_o) = b_1 - b_o$$

يُسمى الخاصية  $b = h - T_o s$  بالدالة المتاحة للسريان المستقر

(steady flow availability function)

## (Effectiveness: الفاعلية) c

بدلاً من مقارنة إجراء بإجراء مثالي تخيلي، كما يُعمل في حالة الكفاءة ثابتة القصور الحراري كمثال، من القياس الأفضل لفائدة من الإجراء هو مقارنة الخرج المستفاد من الإجراء بفقد الإنتاجية لنظام. يعطي الخرج المستفاد من نظام بزيادة الإنتاجية للبيئة المحيطة.

$$\text{الفاعلية} = \frac{\text{زيادة الإنتاجية للبيئة المحيطة}}{\text{فقد الإنتاجية لنظام}}.$$

$$= \frac{\text{زيادة الإنتاجية لنظام}}{\text{فقد الإنتاجية للبيئة المحيطة}}$$

مثال (3.13) :

بخار يتمدد بإجراء كاظم الحرارة في توربينة من 20bar و 400°C إلى 4bar و 250°C. أحسب: a/ كفاءة ثابت القصور الحراري للإجراء؛

b/ فقد الإنتاجية لنظام بإفتراض درجة حرارية جوية مقدارها 15°C؛

c/ فاعلية الإجراء.

تجاهل التغيرات في طاقة الحركة والوضع.

الحل:

a/ بداية يكون البخار محمضاً عند 20 bar و 400°C وبالتالي من الجداول،

$$s_1 = 7.126 \text{ kJ/kgK} \quad h_1 = 3248 \text{ kJ/kg}$$

أخيراً يكون البخار محمضاً عند 4bar و 250°C، وبالتالي من الجدول،

$$s'_2 = 7.379 \text{ kJ/kgK} \quad h'_2 = 2965 \text{ kJ/kg}$$

يُوضح الإجراء ك 1 إلى 2 كما في الشكل (3.37)،

$$s_1 = s_2 = 7.126 \text{ kJ/kgK}$$

بالتالي بالاستكمال،

$$h_2 = 2753 + \left( \frac{7.126 - 6.929}{7.172 - 6.929} \right) (2862 - 2753) = 1841.4 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{\text{شغل الخرج الفعلي}}{\text{شغل ثابت القصور الحراري}} = \text{كفاءة ثابت القصور الحراري}$$

$$\frac{h_1 - h'_2}{h_1 - h_2} = \frac{3248 - 2965}{3248 - 2841.4} = \frac{283}{406.6} = 69.6\%$$

/b فقد الإنتاجية،

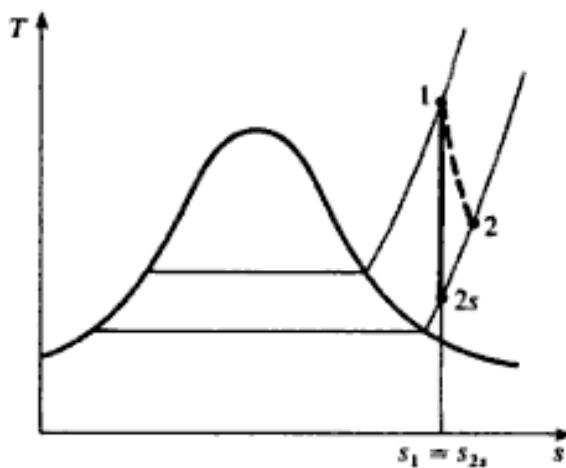
$$= b_1 - b'_2 = h_1 - h_{2'} + T_o(s_{2'} - s_1)$$

$$= 283 + 288(7.379 - 7.126) = 355.9 \text{ kJ/kg}$$

/c الفاعلية، ،

$$\epsilon = \frac{W}{b_1 - b_{2'}} = \frac{h_1 - h_{2'}}{b_1 - b_{2'}}$$

$$\text{i.e. } \epsilon = \frac{283}{355.9} = 79.6\%$$



شكل (3.37) مخطط T-s

مثال (3.14):

هواء عند  $15^{\circ}\text{C}$  يتم تسخينه إلى  $40^{\circ}\text{C}$  بخلطه في سريان مستقر مع كمية من هواء عند  $90^{\circ}\text{C}$ . مفترضاً أن إجراء الخلط يكون كاظماً للحرارة ومتجاهاً للتغييرات في طاقة الحركة والوضع، أحسب نسبة سريان الكتلة لهواء يكون بداية عند  $90^{\circ}\text{C}$  إلى تلك التي تكون بداية عند  $15^{\circ}\text{C}$ . أحسب أيضاً فاعلية إجراء التسخين، إذا كانت درجة الحرارة الجوية تساوي  $15^{\circ}\text{C}$ .

الحل:

إجعل نسبة سريان الكتلة المخلوطة تكون  $y$ ; إجعل الهواء عند  $15^{\circ}\text{C}$  يكون الجدول 1، و الهواء  $90^{\circ}\text{C}$  يكون الجدول 2، وجدول الهواء المخلوط عند  $40^{\circ}\text{C}$  يكون الجدول 3.

بالتالي،

$$c_p T_1 + y c_p T_2 = (1+y) c_p T_3$$

$$\text{أو } y c_p (T_2 - T_1) = c_p (T_3 - T_1)$$

$$\text{i.e. } y(90 - 40) = 40 - 15$$

$$\therefore y = \frac{25}{50} = \underline{0.5}$$

إجعل النظام المعتبر يكون جدولًا من الهواء لوحدة الكتلة، يتم تسخينه من  $15^{\circ}\text{C}$  إلى  $40^{\circ}\text{C}$ .

$$b_3 - b_1 = (h_3 - h_1) - T_o(s_3 - s_1) = \text{زيادة الإاتحية للنظام}$$

$$1.005(40 - 15) - 288(s_3 - s_1)$$

$$s_3 - s_1 = c_p \log_e \frac{T_3}{T_1} = 1.005 \log_e \frac{313}{288} = \underline{0.0831 \text{ kJ/kgK}}$$

$$\therefore \text{زيادة الإاتحية للنظام} = 1.005 \times 25 - 288 \times 0.0831 = \underline{1.195 \text{ kJ/kg}}$$

النظام، الذي هو الهواء المراد تسخينه، يكون محاطاً بجدول الهواء المراد تبريدته. عليه، فإنَّ فقد الإاتحية للبيئة المحيطة يُعطى بـ،

$$y(b_2 - b_1)$$

i.e.  $y(b_2 - b_1) = 0.5 \{ (h_2 - h_3) - T_o(s_2 - s_3) \}$

$$= 0.5 \left( 1.005(90 - 40) - 288 \times 1.005 \times \log_e \frac{363}{313} \right) = 3.65 \text{ kJ/kg}$$

عليه،

$$\text{الفعالية} = \frac{1.195}{3.65} = 0.327 \quad \text{أو} \quad 32.7\%$$

يكون الرقم الصغير للفاعلية مؤشراً للطبيعة اللاإنعكاسية لإجراء الخلط.

: (3.15) مثال

سائل بحرارة نوعية  $6.3 \text{ kJ/kgK}$  يتم تسخينه عند ضغط ثابت تقرباً من  $15^\circ\text{C}$  إلى  $70^\circ\text{C}$  بتمريره خلال أنابيب مغمورة في فرن. تكون درجة حرارة الفرن ثابتة عند  $1400^\circ\text{C}$ . أحسب الفاعلية لإجراء التسخين عندما تكون درجة الحرارة الجوية مساوية لـ  $10^\circ\text{C}$ .

الحل:

زيادة الإاتاحية للسائل،

$$= b_2 - b_1 = (h_2 - h_1) - T_o(s_2 - s_1)$$

$$b_2 - b_1 = 6.3(70 - 15) - 288 \times \log_e \frac{343}{288} = 34.7 \text{ kJ/kg}$$

الآن درجة الحرارة الملفوظة بواسطة الفرن تكون مساوية للحرارة المكتسبة للسائل،  $(h_2 - h_1)$ . إذا تم إمداد هذه الكمية من الحرارة إلى محرك يشغل على دورة كارنوت فستكون كفاءته الحرارية  $\left( 1 - \frac{T_o}{1400 + 273} \right)$ . عليه فإنَّ

الشغل الذي يمكن الحصول عليه من محرك حرارة سيعطي بحاصل ضرب الكفاءة الحرارية والحرارة المكتسبة،

$$(h_2 - h_1) \left( 1 - \frac{283}{1673} \right)$$

الشغل الممكн من محرك حرارة هو قياس لقد الإاتاحية للفرن.

$$\text{i.e.} \quad \text{فقدان الإاتاحية للبيئة المحيطة} = 6.3(70 - 15) \left( 1 - \frac{283}{1673} \right)$$

$$= 288 \text{ kJ/kg}$$

بالتالي،

$$\frac{34.7}{288} = 0.121 \quad \text{أو} \quad 12.1\%$$

تعكس القيمة المنخفضة جداً للفاعلية الإنعكاسية لإنقال الحرارة خلال فرق درجات حرارة كبير. إذا كانت

درجة حرارة الفرن أصغر بكثير فسيكون الإجراء أكثر فاعلية بالرغم من أن الحرارة المنتقلة للسائل ستبقى نفسها.

### 3.7 مسائل: (Problems)

1- من بخار عند 20bar، وكسر جفاف 0.9، يتم تسخينه إنعكاسياً بضغط ثابت إلى درجة حرارة  $300^{\circ}\text{C}$ . أحسب الحرارة المكتسبة، التغير في القصور الحراري، ووضح الإجراء على مخطط  $s - T$ ، مشيراً للمساحة التي تمثل سريان الحرارة.

Ans. (415 kJ/kg; 0.8173 kJ/kgK)

2- بخار عند  $100^{\circ}\text{C}$ , 0.05bar يتم تكثيفه بالكامل بإجراء إنعكاسي ثابت الضغط. أحسب الحرارة التي يتم إزالتها لكل kg من البخار، والتغير في القصور الحراري. أرسم الإجراء على مخطط  $s - T$  وظلل المساحة التي تمثل سريان الحرارة.

Ans. (2550 kJ/kg; 8.292 kJ/kgK)

3- من بخار عند 10bar، كسر جفاف 0.84، يتم تسخينه إنعكاسياً في وعاء صلد حتى يكون الضغط مساوياً لـ 20bar. أحسب التغير في القصور الحراري و الحرارة المكتسبة. وضح المساحة التي تمثل الحرارة المكتسبة على مخطط  $s - T$ .

Ans. (0.0704 kJ/kgK; 36.85 kJ)

4- أسطوانة صلدة تحوى  $0.006\text{m}^3$  من نايتروجين (بكتلة جزيئية  $28\text{kg/kmol}$ ) عند  $15^\circ\text{C}$ ،  $1.04\text{bar}$ . يتم تسخينه إنعكاسياً حتى تصل درجة الحرارة إلى  $90^\circ\text{C}$ . أحسب التغير في القصور الحراري والحرارة المكتسبة. أرسم الإجراء على مخطط  $s - T$ . خذ الأس ثابت القصور الحراري،  $\gamma$ ، للنايتروجين كـ  $1.4$ ، وأفترض أنَّ النايتروجين يكون غازاً مثاليًا.

Ans.  $(0.00125 \text{ kJ/K}; 0.407 \text{ kJ})$

5-  $1\text{m}^3$  من هواء يتم تسخينه إنعكاسياً بضغط ثابت من  $15^\circ\text{C}$  إلى  $300^\circ\text{C}$ ، ومن بعد يتم تبريده إنعكاسياً بحجم ثابت إلى درجة حرارته الإبتدائية. يكون الضغط الإبتدائي مساوياً لـ  $1.03\text{bar}$ . أحسب صافي سريان الحرارة والتغير في القصور الحراري، وأرسم الإجراءات على مخطط  $s - T$ .

Ans.  $(101.5 \text{ kJ}; 0.246 \text{ kJ/K})$

6-  $1 \text{ kg}$  من بخار يؤدي إجراءً إنعكاسياً بثبات درجة الحرارة من  $20 \text{ bar}$ ،  $250^\circ\text{C}$  إلى ضغط  $30 \text{ bar}$ . أحسب سريان الحرارة، ذاكراً ما إذا كانت مكسباً أم فقداً، وأرسم الإجراء على مخطط  $s - T$ .

Ans.  $(-135 \text{ kJ/kg})$

## الفصل الرابع

### دورة المحرك الحراري

#### (The Heat Engine Cycle)

في هذا الفصل يتم مناقشة دورة المحرك الحراري بالتفصيل، وأيضاً اعتبار دورات قدرة الغاز. يمكن ملاحظة أن هنالك دورة نظرية مثالية بكافأة أكبر مما نتخيل؛ تسمى هذه الدورة بدورة كارنو (Carnot Cycle). وتكون الكفاءة الحرارية القصوى الممكنة لمحرك حراري في الواقع العملي هي فقط حوالي نصف تلك الدورة كارنو، النظرية المثالية بين نفس حدود درجات الحرارة. هذه تكون نتيجة للإإنعكاسية في الدورة الفعلية، ولل انحراف عن الدورة المثالية التي يتم عملها لأسباب متعددة. يتم اختبار محطة القدرة عملياً بالتوافق بين الكفاءة الحرارية وعوامل عديدة مثل حجم المحطة لمتطلبات قدرة معطاة، التعقيدات الميكانيكية، تكلفة التشغيل، والتكلفة الرأسمالية.

#### 4.1 دورة كارنو: (The Carnot Cycle)

يمكن التوضيح من القانون الثاني للديناميكا الحرارية أنه ليس هنالك محرك حراري يمكن أن يكون أكثر كفاءة من محرك حراري إنعكاسي يعمل بين نفس حدود درجة الحرارة. كارنو هو مهندس فرنسي، أوضح في ورقة كُتبت في العام 1824م أن الدورة الممكنة الأكثر كفاءة هي تلك التي يتم فيها إمداد جميع الحرارة المكتسبة عند درجة حرارة مفردة ثابتة، ويتم فيها رفض جميع الحرارة المفقودة عند درجة حرارة دنيا ثابتة. وبالتالي فإن الدورة تتراكم من إجرائين ثابتي درجة الحرارة موصلان بإجراءين كاظمي للحرارة. بما أن جميع الإجراءات تكون إنعكاسية، وبالتالي فإن الإجراءات الكاظمة للحرارة في الدورة تكون أيضاً ثابتة القصور الحراري. من الأكثر ملائمة تمثيل الدورة على مخطط  $s - T$  كما موضح في الشكل (4.1) أدناه.

الإجراء 1 إلى 2 تمدداً ثابتاً للقصور الحراري من  $T_1$  إلى  $T_2$ .

الإجراء 2 إلى 3 فقداً للحرارة بثبات درجة الحرارة.

الإجراء 3 إلى 4 يكون إضغاطاً ثابتاً لقصور الحراري من  $T_2$  إلى  $T_1$ .

الإجراء من 4 إلى 1 يكون إمداداً للحرارة بثبات درجة الحرارة.

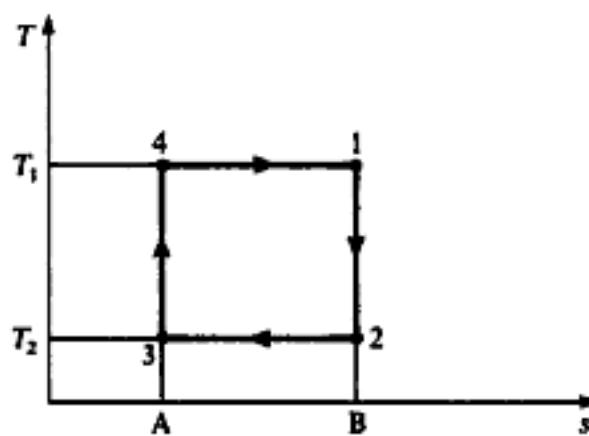
تكون الدورة مستقلة تماماً عن مادة التشغيل المستخدمة.

الكفاءة الحرارية لمحرك حراري المعرفة في المقطع 3.1، أعطيت بالمعادلة (3.1)،

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

في دورة كارنوت بالرجوع للشكل (4.1)، يمكن ملاحظة أن الحرارة المكتسبة  $Q_1$ ، تُعطى بالمساحة 41BA4.

$$\text{i.e. } Q_1 = \text{ المساحة 41BA4} = T_1(S_B - S_A)$$



شكل (4.1) دورة كارنوت على مخطط  $T - s$

بالمثل فإنَّ الحرارة المفقودة،  $Q_2$ ، تُعطى بالمساحة 23AB2.

$$\text{i.e. } Q_2 = \text{ المساحة 23AB2} = T_2(S_B - S_A)$$

بالتالي نحصل على،

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_2(S_B - S_A)}{T_1(S_B - S_A)}$$

$$\text{i.e. } \eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (4.1)$$

إذا كان هناك غاطساً متوفراً لفقد الحراري عند درجة حرارة مثبتة  $T_2$  (e.g. إمداد ضخم لماء التبريد)، وبالتالي  $T_2/T_1$  ستقل كلما تزيد درجة حرارة المصدر  $T_1$ . من المعادلة (4.1) يمكن ملاحظة أنه كلما قلت  $T_2/T_1$ ، تزيد وبالتالي الكفاءة الحرارية. وبالتالي لدرجة حرارة أدنى مثبتة لفقد الحرارة، فإن درجة الحرارة العليا التي يتم عندها إمداد الحرارة يجب عملها أكبر ما يمكن. الكفاءة الحرارية الممكنة القصوى بين أي درجتي حرارة هي تلك لدورة كارنوت.

يمكن إيجاد شغل الخرج لدورة كارنوت ببساطة من مخطط  $s - T$ . من القانون الأول،

$$\sum Q = \sum W$$

عليه، فإن شغل الخرج للدورة يعطى بـ ،

$$W = Q_1 - Q_2$$

بالتالي لدورة كارنوت، بالرجوع للشكل (4.1)

$$\text{i.e. } W_{\text{Carnot}} = 12341 \text{ المساحة} = (T_1 - T_2)(S_B - S_A)$$

مثال (4.1) :

ما هي الكفاءة النظرية الممكنة القصوى لمحرك حراري التي تعمل مع مستودع ساخن لغازات فرن عند  $2000^{\circ}\text{C}$  عندما يكون ما التبريد متاحاً عند  $10^{\circ}\text{C}$

الحل:

من المعادلة (4.1)،

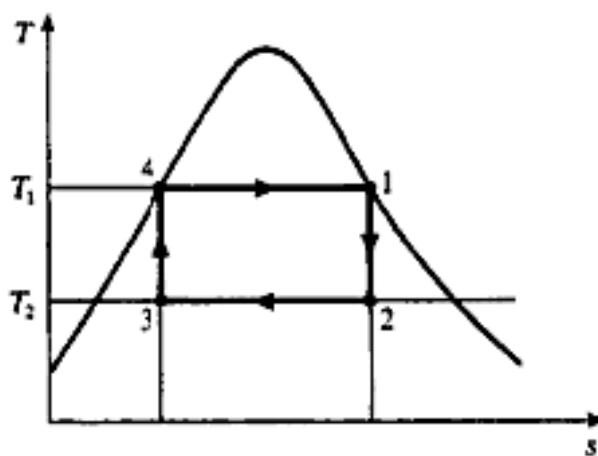
$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{10 + 273}{2000 + 273} = 1 - \frac{283}{2273}$$

$$\text{i.e. } \eta_{\text{Carnot}} = 1 - 0.1246 = 0.8754$$

$$\text{أو } 87.54 \%$$

يمكن ملاحظة أنَّ نظاماً عملياً يعمل بين نفس درجات الحرارة (e.g. محطة توليد بخار) سيمتلك كفاءة حرارية بحوالي 30%. يكون هذا الفرق الكبير نتيجة للفقدان الناجمة من الانعكاسية في المحطة الفعلية، وأيضاً بسبب الإلترافات عن دورة كارنوت المثالية التي تعمل لأسباب عملية متعددة.

من الصعوبة بمكان عملياً عمل نظام يستقبل ويفقد الحرارة عند درجة حرارة ثابتة. البخار الرطب هو مادة التشغيل الوحيدة التي يمكن أن تؤدي هذا بملائمة، بما أنَّه لبخار رطب فإنَّ درجة الحرارة والضغط يظلا ثابتين كلما يتم إمداد أو فقط الحرارة الكامنة. دورة كارنوت لبخار رطب تكون موضحة في الشكل (4.2). بالرغم من أنَّ هذه الدورة هي الأكفاء الممكنة لبخار، فإنَّها لا تستخدم في محطة البخار. تعرف الدورة النظرية والتي يتم عليها تأسيس دورات البخار بدورة رانكن.



شكل (4.2) دورة كارنوت لبخار رطب على مخطط T - s

#### 4.2 مقياس درجة الحرارة المطلقة: (Absolute Temperature Scale)

في الفصول السابقة لقد تم إفتراض مقياساً لدرجة الحرارة مؤسساً على ثيرموميتر الغاز المثالي. بإستخدام القانون الثاني للدينамиكا الحرارية من الممكن تأسيس مقياساً لدرجة الحرارة يكون مستقلاً عن مادة التشغيل. لأي محرك حراري من المعادلة (3.3)،

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (4.2)$$

أيضاً فإن الكفاءة لمحرك يشتغل على دورة كارنوت تعتمد فقط على درجة الحرارة للمستودعين الساخن والبارد.

بترميز درجة الحرارة على أساس اعتراضي بـ  $X$ , نحصل على،

$$\eta = \phi(X_1, X_2) \quad (4.3)$$

(حيث  $\phi$  هي دالة و  $X_1$  و  $X_2$  هما درجتا الحرارة للمستودعين البارد والساخن)

بتوحيد المعادلتين نحصل على،

$$\frac{Q_2}{Q_1} = F(X_1, X_2)$$

(حيث  $F$  دالة جديدة)

هناك عدد ضخم ممكن لمقاييس درجة الحرارة يكون مستقلاً عن مادة التشغيل. يمكن اختيار أي مقياس تشغيل بالإضافة إلى اختيار المناسب لقيمة الدالة  $F$ . يمكن اختيار الدالة بحيث أنَّ،

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{X_2}{X_1} \quad (4.4)$$

أيضاً من المعادلة (4.1)، نحصل على،

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

بالتالي باستخدام المعادلة (4.2)،

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

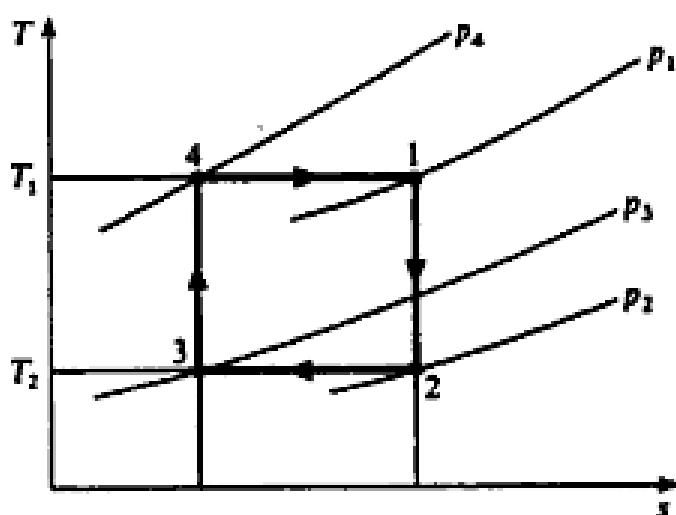
$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (4.5)$$

بمقارنة المعادلات (4.4) و (4.5) يمكن الملاحظة أن درجة الحرارة  $X$  تكون مكافئة لدرجة الحرارة  $T$ . عليه بالإضافة إلى اختيار المناسب للدالة  $F$ , يتم جعل مقياس درجة الحرارة المثالي مكافئاً للمقياس المؤسس على ثيرموميتر الغاز المثالي.

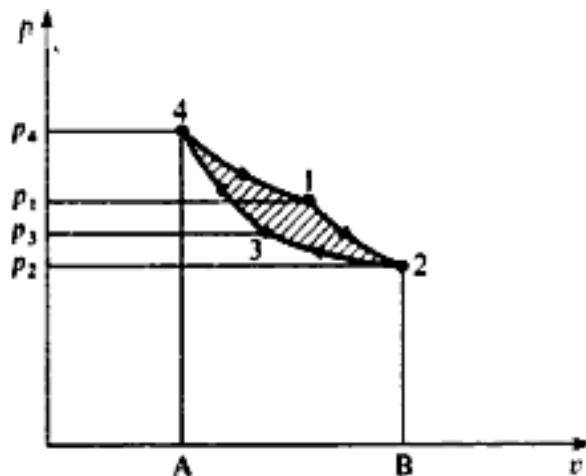
### 4.3 دورة كارنوت لغاز مثالي: (The Carnot Cycle for Perfect Gas)

يتم توضيح دورة كارنوت على مخطط  $s - T$  في الشكل (4.3) لاحظ أنَّ ضغط الغاز يتغير بِإستمرار من  $p_4$  إلى  $p_1$  أثناء إمداد الحرارة بثبات درجة الحرارة، ومن  $p_2$  إلى  $p_3$  أثناء فقد الحرارة بثبات درجة الحرارة.

من الملائم أكثر عملياً تسخين غاز بضغط ثابت تقريباً أو بحجم ثابت، وبالتالي من الصعوبة بمكان محاولة تشغيل محرك حراري فعلي على دورة كارنوت عملياً بِاستخدام غاز كمادة تشغيل. هنالك سبب هام آخر لعدم محاولة إستخدام دورة كارنوت عملياً يُوضح برسم الدورة على مخطط  $v - p$ ، كما في الشكل (4.4). يُعطي صافي الشغل للدورة بالمساحة 12341. تكون هذه كمية صغيرة مقارنة بإجمالي الشغل لإجراءات التمدد للدورة المعطاة بالمساحة 41BA4. شغل إجراءات الإنضغاط (i.e. الشغل المبذول على الغاز) يُعطي بالمساحة 234AB2. تُسمى نسبة صافي شغل الخرج إلى إجمالي شغل الخرج بنسبة الشغل (work ratio). بالرغم من الكفاءة الحرارية العالية لدورة كارنوت، فإنها تمتلك نسبة شغل منخفضة.



شكل (4.3) دورة كارنوت لغاز مثالي على مخطط  $T - s$



شكل (4.4) دورة كارنوت على مخطط  $P - v$

مثال (4.2)

إذا كان هنالك مستودع ساخن عند درجة حرارة مقدارها  $800^{\circ}\text{C}$  ومستودع بارد عند درجة حرارة  $15^{\circ}\text{C}$ .

أحسب الكفاءة الحرارية ونسبة الشغل لدورة كارنوت باستخدام الهواء للتشغيل، إذا كانت الضغوط القصوى في

الدورة هما  $210\text{bar}$  و  $1\text{bar}$ .

الحل:

يتم توضيح الدورة على مخطط  $T - s$  و  $p - v$  في الأشكال (4.5(a) و (b) على

الترتيب.

باستخدام المعادلة (4.1)،

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{15 + 273}{300 + 273} = 1 - 0.268 = 0.732$$

أو 73.2 %

لكي يتم إيجاد شغل الخرج ونسبة الشغل الكلى من الضروري إيجاد التغير في القصور الحراري،

$$\cdot (s_1 - s_4)$$

لإجراء ثابت درجة الحرارة من 4 إلى A، مستخدماً المعادلة (3.12)،

$$(s_A - s_4) = R \log_e \frac{P_4}{P_2} = 0.287 \log_e \frac{210}{1} = 1.535 \text{ kJ/kgK}$$

عند ضغط ثابت من A إلى 2، نحصل على،

$$(s_A - s_2) = c_p \log_e \frac{T_1}{T_2} = 1.005 \log_e \frac{1073}{288} = 1.321 \text{ kJ/kgK}$$

$$\therefore s_1 - s_4 = 1.535 - 1.321 = 0.214 \text{ kJ/kgK}$$

بالتالي،

$$12341 \text{ المساحة} = (T_1 - T_2)(s_1 - s_2) = \text{صافي شغل الخرج}$$

$$= (1073 - 288) \times 0.214 = 168 \text{ kJ/kgK}$$

صافي شغل التمدد = الشغل المبذول 4 إلى 1 + الشغل المبذول 1 إلى 2

من المعادلة (2.12)، لإجراء ثابت درجة الحرارة،  $Q = W$

المساحة تحت الخط 1 - 4 على الشكل (a)

$$= (s_1 - s_4) \times T_1 = 0.214 \times 1073$$

$$= 229.6 \text{ kJ/kg}$$

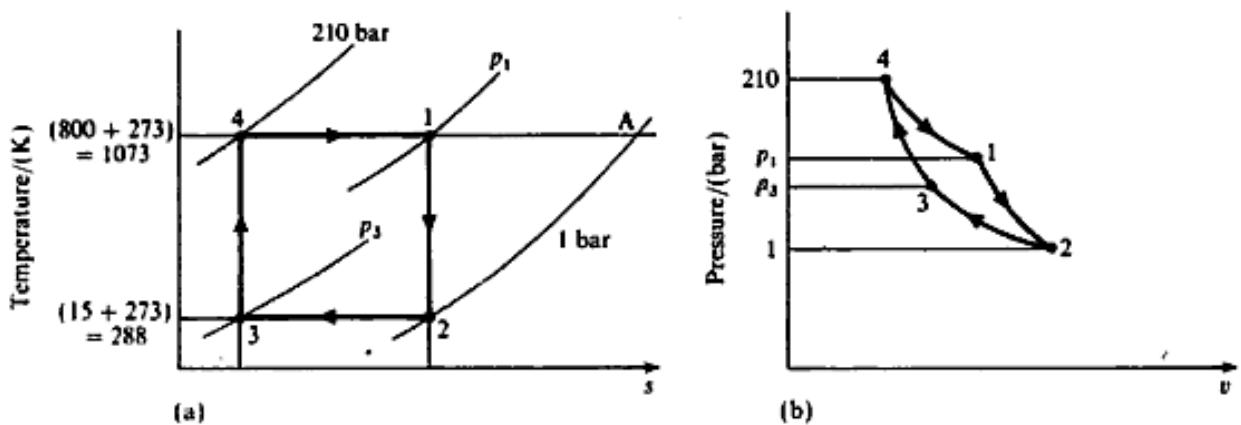
لإجراء ثابت القصور الحراري من 1 إلى 2، من المعادلة (2.13)،

$$W_{1-2} = c_v (T_1 - T_2)$$

$$= 0.718 (1073 - 288) = 563.6 \text{ kJ/kg}$$

$$\therefore \text{إجمالي الشغل} = 229.6 + 563.6 = 793.2 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{i.e. } \frac{\text{صافي الشغل}}{\text{إجمالي الشغل}} = \frac{168}{793.2} = 0.212$$



شكل (4.5) دورة كارنوت على مخطط  $T - s$  و  $p - v$

#### 4.4 دورة الضغط الثابت: (The Constant Pressure Cycle)

في هذه الدورة فإن إجراءات إمداد الحرارة وفقد الحرارة تحدث إنعكاسياً بضغط ثابت. وتكون إجراءات التمدد والانضغاط ثابتة القصور الحراري. تم توضيح الدورة على مخطط  $T - s$  و  $p - v$  في الأشكال 4.6(a) و 4.6(b). استخدمت هذه الدورة في إحدى الأوقات كأساس مثالي لمحرك ترددی لهواء ساخن، وسمی بدورة جول أو بريتون (Joule or Brayton Cycle). في أيامنا الحاضرة، فإن هذه الدورة هي الدورة المثالية لوحدة توربينة غاز مغلقة الحلقة. هناك مخطط بسيطاً للمحطة موضحاً في الشكل (4.7)، بأرقام مناظرة لتلك الموجودة في الأشكال 4.6(a) و 4.6(b). تكون مادة التشغيل هي الهواء الذي ينساب بسريان مستقر حول الدورة، وبالتالي، بتجاهل تغييرات السرعة، وبنطبيق معادلة طاقة السريان لكل جزء من الدورة، نحصل على،

$$\text{شغل الدخل إلى الضاغط} = (h_2 - h_1) = c_p(T_2 - T_1)$$

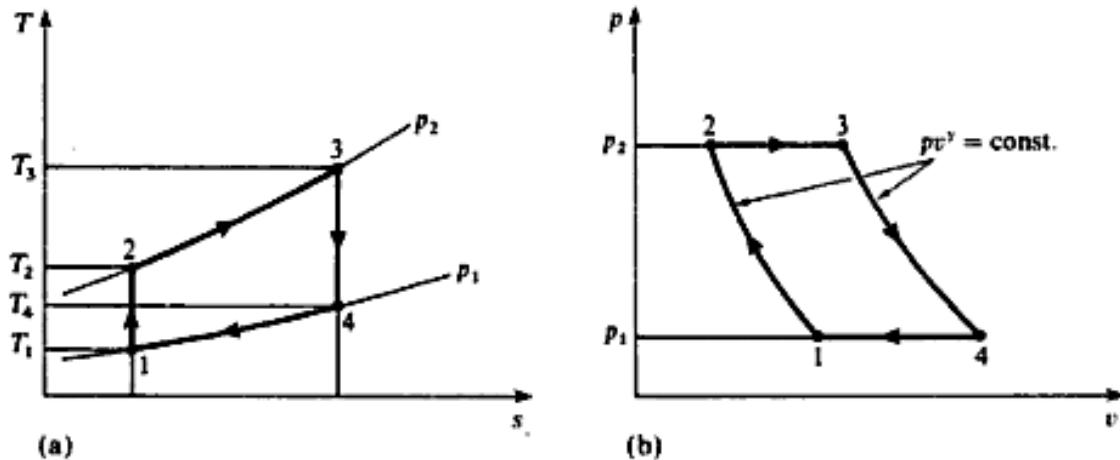
$$\text{شغل الخرج من التوربينة} = (h_3 - h_4) = c_p(T_3 - T_4)$$

$$Q_1, \text{ الحرارة المكتسبة في السخان} = (h_3 - h_2) = c_p(T_3 - T_2)$$

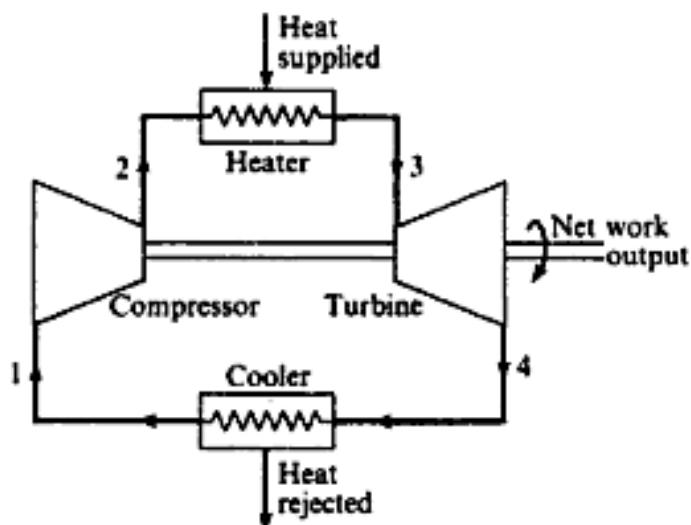
$$Q_2, \text{ الحرارة المفقودة من التوربينة} = (h_4 - h_1) = c_p(T_4 - T_1)$$

بالتالي من المعادلة (3.3)،

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$



شكل (4.6) دورة الضغط الثابت على مخططات  $T - s$  و  $p - v$



شكل (4.7) دورة مغلقة لوحدة توربين غازي

الآن بما أن الإجراءات 1 إلى 2 و 3 إلى 4 هما ثابتان القصور الحراري 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  $r_p$  هي نسبة الضغط  $\frac{p_2}{p_1}$ )

بالتالي،

$$T_3 = T_4 r_p^{(\gamma-1)/\gamma} \quad \text{و} \quad T_2 = T_1 r_p^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$T_3 - T_2 = r_p^{(\gamma-1)/\gamma} (T_4 - T_1)$$

بالتالي بالتعويض في تعبير الكفاءة،

$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{(T_4 - T_1)r_p^{(\gamma-1)/\gamma}} = 1 - \frac{1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}} \quad (4.6)$$

عليه لدورة الضغط الثابت، تعتمد الكفاءة الحرارية فقط على نسبة الضغط. في الحالة المثالية فإنَّ قيمة  $\gamma$  للهواء تكون ثابتة ومساوية لـ 1.4. عملياً، ونتيجة لتدويم الهواء كلما يسري خلال الضاغط والتوربينة اللذان هما مركبات دوار، فإنَّ الكفاءة الحرارية الفعلية ستتحفظ كثيراً مقارنة بتلك المعطاة بالمعادلة (4.6).

نسبة الشغل لدورة الضغط الثابت يمكن إيجادها كما يلي،

$$\begin{aligned} \text{نسبة الشغل} &= \frac{c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T_3 - T_4)} \\ &= 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} \end{aligned}$$

الآن كما في سابقه،

$$\frac{T_2}{T_1} = r_p^{(\gamma-1)/\gamma} = \frac{T_3}{T_4}$$

$$\therefore T_2 = T_1 r_p^{(\gamma-1)/\gamma} \quad \text{and} \quad T_4 = \frac{T_3}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}}$$

بالتالي بالتعويض،

$$\text{نسبة الشغل} = 1 - \frac{T_1(r_p^{(\gamma-1)/\gamma} - 1)}{T_3[1 - (1/r_p^{(\gamma-1)/\gamma})]}$$

$$= 1 - \frac{T_1}{T_3} \left( \frac{r_p^{(\gamma-1)/\gamma} - 1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma} - 1} \right) r_p^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$\text{i.e. } \eta = 1 - \frac{T_1}{T_3} r_p^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (4.7)$$

يمكن الملاحظة من المعادلة (4.7) أن نسبة الشغل لا تعتمد فقط على نسبة الضغط بل أيضاً على نسبة درجات الحرارة الدنيا والقصوى. لدرجة حرارة مدخل معطاة،  $T_1$ ، فإنَّ درجة الحرارة القصوى،  $T_3$ ، يجب جعلها أكبر ما يمكن للحصول على نسبة شغل عالية.

لوحدة توربينة غاز مفتوحة الحلقة فإنَّ الدورة الفعلية لا تكون تقريب جيد لدورة الضغط الثابت المثالية، بما أنَّ الوقود يتم حرقه بالهواء، ويتم سحب شحنة طارحة بإستمرار في الضاغط. بالرغم من ذلك تُعطي الدورة المثالية أساساً جيداً للمقارنة وفي حسابات كثيرة لتوربينة غاز ذات حلقة مفتوحة مثالية يتم تجاهل تأثيرات كتلة الوقود والتغير في مائع التشغيل.

**مثال (4.3):**

في وحدة توربينة غاز يتم سحب الهواء عند ضغط 1.02bar و  $15^{\circ}\text{C}$ ، ويتم إنضغاطه إلى 6.12bar. أحسب الكفاءة الحرارية ونسبة الشغل لدورة الضغط الثابت المثالية، عندما تكون درجة الحرارة القصوى محدودة بـ  $800^{\circ}\text{C}$ .

**الحل:**

يتم توضيح الدورة المثالية على مخطط  $s - T$  في الشكل (4.8). من المعادلة (4.6)،

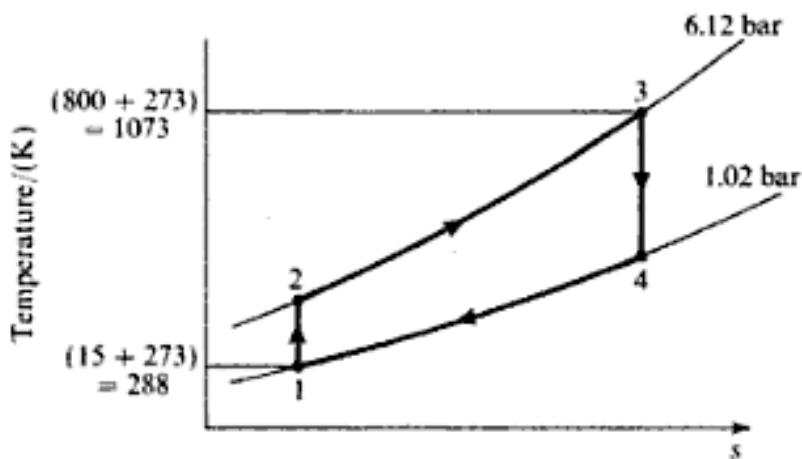
$$\eta = 1 - \frac{1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}}, \text{ الكفاءة الحرارية}$$

$$\text{i.e. } \eta = 1 - \frac{1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}} = 1 - \left( \frac{1.02}{6.12} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} = 1 - \frac{1}{6^{0.286}} = 1 - 0.598$$

$$\therefore \underline{0.402} \text{ أو } \underline{40.2\%} = \text{الكفاءة الحرارية}$$

يعطي صافي الشغل للدورة بالشغل المبذول بالتوربينة ناقصاً الشغل المبذول على الهواء في الضاغط.

$$\text{i.e. } \text{صافي الشغل} = c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1)$$



شكل (4.8) مخطط  $T - s$

من المعادلة (2.21)،

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(y-1)/y} = \frac{T_3}{T_4} = \left( \frac{6.12}{1.02} \right)^{(y-1)/y} = 6^{0.286} = 1.67$$

$$\therefore T_2 = 1.67 \times T_1 = 1.67 \times 288 = \underline{481} \text{ K}$$

. (حيث  $T_1 = 15+273=288 \text{ K}$ )

$$T_4 = \frac{T_3}{1.67} = \frac{1073}{1.67} = \underline{643} \text{ K}$$

. (حيث  $T_3 = 800+273=1073 \text{ K}$ )

$$\therefore \text{صافي الشغل} = 1.005(1073 - 643) - 1.005(481 - 288)$$

$$= (1.005 \times 430 - 1.005 \times 193) = \underline{288 \text{ kJ/kg}}$$

$$\text{شغل التوربينة} = c_p(T_3 - T_4) = \text{أجمالي الشغل}$$

$$= 1.005(1073 - 643) = \underline{432 \text{ kJ/kg}}$$

بالتالي،

$$\text{نسبة الشغل} = \frac{288}{432} = \underline{0.65}$$

## 4.5 دورة الهواء القياسيّة: (The Air Standard Cycle)

لقد تَمَّت الإشارة في المقطع 3.1 أنَّ الدورات التي يتم فيها حرق الوقود مباشرةً في مائع التشغيل هي ليست محركات حرارية بالمعنى الصحيح للمصطلح. عملياً فإنَّ مثل هذه الدورات تستخدم تكراراً وُسُمي بدورات الإحتراق الداخلي. يتم حرق الوقود مباشرةً في مائع التشغيل، الذي هو عادةً الهواء. تكون الميزة الرئيسية لمثل وحدات القدرة هذه هي إمكانية الحصول على درجات حرارة عالية للماء، بما أنَّه لا يتم إنتقالها خلال جدران المعدن إلى الماء. يتم الملاحظة من المعادلة (4.1)  $\eta = 1 - \left( \frac{T_2}{T_1} \right)$  ، أنَّه لغاطس مُعطى لفقد الحرارة عند  $T_2$  فإنَّ درجة حرارة المصدر  $T_1$ ، يجب أن تكون أكبر ما يمكن. هذا ينطبق على جميع محركات الحرارة. بإمداد وقود إلى داخل الأسطوانة كما في محرك الإحتراق الداخلي، يمكن الحصول على درجات حرارة عالية لماء التشغيل. تكون درجة الحرارة القصوى لجميع الدورات محدودة بالحد الميتالورجي (metallurgical limit) للمواد المستخدمة (e.g. في توربينات الغاز تكون درجة الحرارة محدودة بحوالي  $800^{\circ}\text{C}$ ). يمكن للماء في محرك الإحتراق الداخلي أنَّ يصل إلى درجة حرارة مساوية لـ  $2750^{\circ}\text{C}$ . هذا يكون ممكناً بتبريد الأسطوانة خارجياً بما أو هواء؛ أيضاً، نتيجة للطبيعة المتقطعة للدورة فإنَّ ماء التشغيل يصل لدرجة حرارته القصوى فقط للحظة أثناء كل دورة.

من أمثلة دورات الإحتراق الداخلي هي وحدة توربينة الغاز مفتوحة الحلقة، محرك البترول، محرك дизيل أو محرك الزيت، محرك الغاز. وحدة توربينة الغاز مفتوحة الحلقة، رغم أنها دورة إحتراق داخلي، تكون بالرغم من ذلك ذات تصنيف مختلف عن محركات الإحتراق الداخلي الأخرى. لقد تم ذكر الدورة في المقطع 3.1 وتم توضيح مخططاً للمحطة في الشكل (3.4). يمكن الملاحظة أنَّ الدورة تكون ذات سريان مستقر ينساب فيها ماء التشغيل من أحد المكونات إلى المكون الآخر حول الدورة. عليه سيتم إفتراض أنَّ وحدة توربينة الغاز إذا ما تم تشغيلها على دورة مفتوحة أو مغلقة، يمكن مقارنتها مع دورة الضغط الثابت المثالية التي تم التعامل معها في

### المقطع 4.4

في محرك البترول يتم سحب خليطاً من الهواء والبترول إلى الأسطوانة، حيث يتم إنضغاطه بالكباس، ومن بعد إشعاله بشرارة كهربائية. تتمدد الغازات الساخنة دافعة الكباس للوراء ومن بعد تكسح للخارج إلى العادم. وتعاد الدورة بسحب شحنة طازجة من البترول والهباء. في محرك дизل أو الزيت يتم رش زيت تحت ضغط في الهباء المنضغط عند نهاية شوط الإنضغاط، ويكون الاحتراق تلقائياً نتيجة لدرجة الحرارة العالية للهباء بعد الإنضغاط.

في محرك غاز فإن خليطاً من الغاز والهباء يتم سحبه في الأسطوانة، إنضغاطه، ومن بعد إشعاله كما في محرك البترول بشرارة كهربائية. لإعطاء أساس للمقارنة لمحرك الاحتراق الداخلي الفعلي يتم تعريف دورة الهباء القياسية.

في دورة هباء قياسية يتم إفتراض أنَّ مادة التشغيل تكون هباء طوال الدورة، يتم إفتراض أن جميع الإجراءات تكون إنعكاسية، ويتم إفتراض أن مصدر إمداد الحرارة وغاطس فقد الحرارة يكونان خارجيان بالنسبة للهباء. يتم تمثيل الدورة على مخطط للخواص، وعادة ما يتم رسمه على مخطط  $p - v$ ، بما أنَّ هذه تسمح بمقارنته مباشرةً يتم عملها مع دورة المحرك الفعلي التي يمكن الحصول عليها من مخطط بياني. يجب التأكيد على أنَّ دورة هباء قياسية على مخطط  $v - p$  تكون عبارة عن دورة ديناميكية حرارية صحيحة، بينما يكون مخطط البيان المأخوذ من محرك فعلي هو سجلاً لتفاوتات الضغط في الأسطوانة ضد إزاحة الكباس.

#### 4.6 دورة أوتو: (The Otto Cycle)

دورة أوتو هي دورة الهباء القياسية المثالية لمحرك البترول، مmotor الغاز، ومحرك الزيت ذو السرعات العالية.

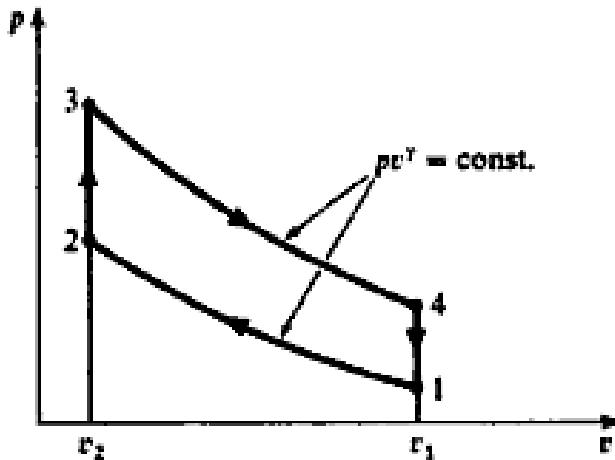
يتم توضيح دورة أوتو في مخطط  $v - p$  في الشكل (4.9).

الإجراء من 1 إلى 2 هو إنضغاط ثابت القصور الحراري.

الإجراء من 2 إلى 3 هو تسخين ثابت الحجم إنعكاسي.

الإجراء من 3 إلى 4 هو تمدد ثابت القصور الحراري.

الإجراء من 4 إلى 1 هو تبريد إنعكاسي ثابت الحجم.



شكل (4.9) دورة أوتو على مخطط  $p - v$

لإعطاء مقارنة مباشرة بالمحرك الفعلي فإنَّ نسبة الحجوم النوعية  $v_1/v_2$  يتمَّ أخذها كنفس نسبة الإنضغاط للمحرك الفعلي،

$$\text{i.e. } r_v, \text{ نسبة الإنضغاط} = \frac{V_1}{V_2}$$

$$\frac{\text{حجم المكتسح}}{\text{حجم الخلوص}} = \frac{\text{حجم الخلوص + الحجم}}{\text{حجم الخلوص}} \quad (4.8)$$

يمكن إيجاد الكفاءة الحرارية لدورة أوتو بإستخدام المعادلة (3.3)،

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2}$$

يتمَّ إعطاء الحرارة المكتسبة،  $Q_1$ ، بحجم ثابت بين  $T_2$  و  $T_3$  تُعطى بالمعادلة (3.13)، لكل kg من الهواء،

$$Q_1 = c_v(T_3 - T_2)$$

بالمثل، فإنَّ الحرارة المفقودة،  $Q_2$ ، بحجم ثابت بين  $T_4$  و  $T_1$  تُعطى بالمعادلة التالية، لكل kg من الهواء،

$$Q_2 = c_v(T_4 - T_1)$$

تكون الإجراءات 1 إلى 2 و 3 إلى 4 هي ثابتة القصور الحراري وعليه لا يكون هناك سريان حرارة أثناء هذا الإجراءات.

$$\therefore \eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)} = 1 - \left( \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \right)$$

الآن بما أن الإجراءات من 1 إلى 2 و 3 إلى 4 هي ثابتة القصور الحراري، وبالتالي بإستخدام المعادلة

(2.21)

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = \left( \frac{V_4}{V_3} \right)^{\gamma-1} = \frac{T_2}{T_1} = r_v^{\gamma-1}$$

(حيث  $r_v$  هي نسبة الإنضغاط من المعادلة (4.8)).

بالتالي،

$$T_3 = T_4 r_v^{\gamma-1}, \quad T_2 = T_1 r_v^{\gamma-1}$$

بالتالي بالتعويض،

$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{(T_4 - T_1)r_v^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{r_v^{\gamma-1}} \quad (4.9)$$

يمكن الملاحظة من المعادلة (4.9) أن الكفاءة الحرارية لدورة أ Otto تعتمد فقط على نسبة الإنضغاط  $r_v$ .

: مثال (4.5)

أحسب الكفاءة الحرارية لدورة الهواء القياسية المثالية المؤسسة على دورة أ Otto لمحرك بتروول بقطر داخلي

لالأسطوانة مقداره 50mm وشوط مقداره 75mm، وحجم خلوص مقداره  $21.3\text{cm}^3$

الحل:

حجم الإكتساح،

$$\text{حجم الإكتساح} = \frac{\pi}{4} \times 50^2 \times 75 = 147200\text{cm}^3$$

$$\therefore \text{حجم الأسطوانة الكلية} = 147.2 + 21.3 = 168.5\text{cm}^3$$

$$\text{i.e. } r_v, \text{ نسبة الإنضغاط} = \frac{168.5}{21.3} = 7.92 / 1$$

بالتالي بإستخدام المعادلة (4.9)،

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_v^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{7.92^{0.4}} = 1 - 0.437 = 0.563 \text{ or } 56.3\%$$

#### 4.7 دورة ديزل: (The Diesel Cycle)

المحركات المستخدمة هذه الأيام والتي تسمى بمحركات дизل إبتعدت كثيراً عن المحرك الأصلي الذي اخترعه ديزل في العام 1892م. عمل ديزل على فكرة الإشتعال التلقائي لبودرة الفحم، التي يتم تفجيرها في أسطوانة بهواء منضغط. أصبح الزيت هو الوقود المقبول الذي يستخدم في محركات الإشتعال بالانضغاط، وقد تم تصييلاً تفجير الزيت في الأسطوانة بنفس الطريقة التي قصدها ديزل برش بودرة الفحم. هذه أعطت دورة تشغيل لديها رصيفتها المثالية التي هي دورة الهواء القياسية لدiesel الموضحة في الشكل (4.10).

كما في سابقه، فإنَّ نسبة الانضغاط  $r_v$ ، تُعطى بالنسبة  $v_1/v_2$ .

الإجراء من 1 إلى 2 هو انضغاط ثابت القصور الحراري.

الإجراء من 2 إلى 3 هو تسخين إنعكاسي ثابت الحجم.

الإجراء من 3 إلى 4 هو تمدد ثابت القصور الحراري.

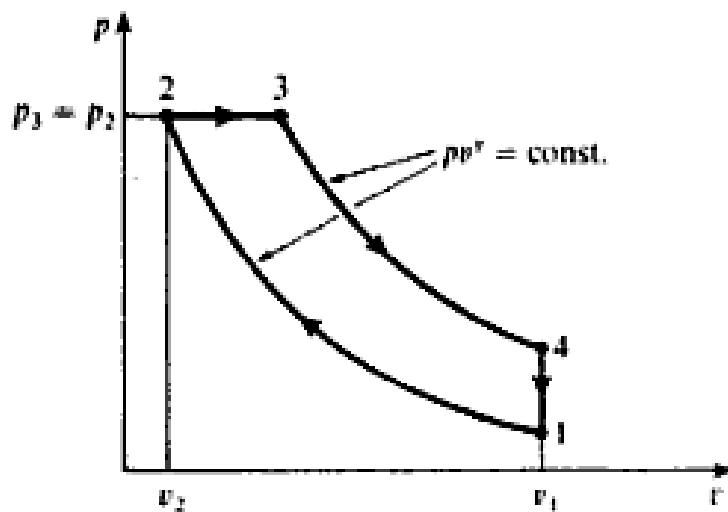
الإجراء من 4 إلى 1 هو تبريد إنعكاسي ثابت الحجم.

من المعادلة (3.3)،

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2}$$

عند ضغط ثابت من المعادلة التالية، لكل kg من الهواء،

$$Q_1 = c_p (T_3 - T_2)$$



شكل (4.10) دورة ديزل على مخطط  $P - v$

أيضاً عند حجم ثابت من المعادلة التالية، لكل kg من الهواء،

$$Q_2 = c_p (T_4 - T_1)$$

لا يكون هنالك سريان حرارة في الإجراءات 1 إلى 2 و 3 إلى 4 بما أنَّ هذه الإجراءات تكون ثابتة القصور الحراري. وبالتالي بالتعويض له  $Q_1$  و  $Q_2$  في تعبير الكفاءة الحرارية يمكن إشتقاق المعادلة التالية،

$$\eta = 1 - \frac{\beta^\gamma - 1}{(\beta - 1)r_v^{\gamma-1} \gamma} \quad (4.10)$$

(حيث نسبة إنقطاع الوقود =  $v_3 / v_2$ )

تُوضح المعادلة (4.10) أنَّ الكفاءة الحرارية لا تعتمد على نسبة الإنضغاط بل تعتمد أيضاً على الحرارة المكتسبة بين 2 و 3، التي تُثبت النسبة،  $v_3/v_2$ . يتم إشتقاق المعادلة (4.10) بالتعبير عن كل درجة حرارة بدللات  $T_1$  و  $r_v$  أو  $\beta$ . لا يتم إعطاء الإشتقاق هنا، لأنَّه يعتقد أنَّ الأسلوب الأفضل لإشتقاق الكفاءة الحرارية يكون بحساب كل درجة حرارة على إنفراد حول الدورة، وبالتالي تطبيق المعادلة (3.3)،  $\eta = 1 - (Q_2 / Q_1)$ . هذه يتم توضيحها في المثال التالي.

: مثال (4.5)

محرك ديزل بدرجة حرارة مدخل وضغط مقدارهما  $15^{\circ}\text{C}$  و 1bar على الترتيب. تكون نسبة الانضغاط هي 12/1 ودرجة حرارة الدورة القصوى هي  $1100^{\circ}\text{C}$ . أحسب الكفاءة الحرارية لدورة الهواء القياسية المؤسسة على دورة ديزل.

الحل:

بالرجوع للشكل (4.11)،

$$T_3 = 1100 + 273 = 1373 \text{ K}, \quad T_1 = 15 + 273 = 288 \text{ K}$$

من المعادلة (2.20)،

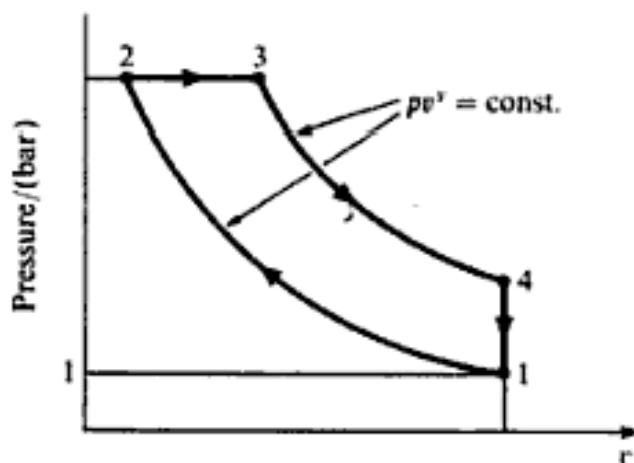
$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = r_v^{\gamma-1} = 12^{0.4} = 2.7$$

$$\text{i.e. } T_2 = 2.7 \times 288 = \underline{778} \text{ K}$$

عند ضغط ثابت من 2 إلى 3، بما أنَّ  $pV = RT$ ، لغاز مثالي، وبالتالي،

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2}$$

$$\text{i.e. } \frac{V_3}{V_2} = \frac{1373}{778} = \underline{1.765}$$



شكل (4.11) دورة ديزل على مخطط  $p - v$

عليه،

$$\frac{V_4}{V_3} = \frac{V_4}{V_2} \frac{V_2}{V_3} = \frac{V_1}{V_2} \frac{V_2}{V_3} = 12 \times \frac{1}{1.765} = 6.8$$

بالتالي بإستخدام المعادلة (2.20)،

$$\frac{T_3}{T_4} = \left( \frac{V_4}{V_3} \right)^{\gamma-1} = 6.8^{0.4} = 2.153$$

$$\text{i.e. } T_4 = \frac{1373}{2.153} = 638 \text{ K}$$

بالتالي من المعادلة التالية، لكل kg من الهواء،

$$Q_1 = c_p (T_3 - T_2) = 1.005 (1373 - 778) = 598 \text{ kJ/kg}$$

أيضاً من المعادلة التالية، لكل kg من الهواء،

$$Q_2 = c_v (T_4 - T_1) = 0.718 (638 - 288) = 251 \text{ kJ/kg}$$

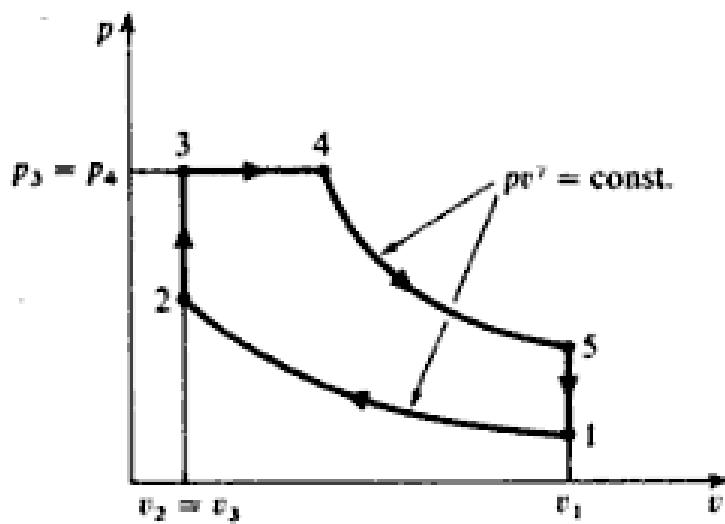
عليه من المعادلة (3.3)،

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{251}{598} = 0.58 \text{ or } 58\%$$

#### 4.8 دورة الإحتراق الثنائي : (The Dual Combustion Cycle)

بالرغم من أنَّ محركات الزيت الحديثة ما يزال يُطلق عليها محركات ديزل إلا أنَّها إشتقت بقارب أكثر

من محرك تم إختراعه بواسطة Achroyd – Stuart في العام 1888. تستخدم جميع محركات الزيت اليوم حقناً مصمتاً للوقود؛ حيث يتم حقن الوقود بواسطة حاقن محمول بنابض، ويتم تشغيل مضخة الوقود بواسطة حبة ثُدار من العمود المرفقي للمحرك. الدورة المثلالية المستخدمة كأساس للمقارنة تُسمى بدورة الإحتراق الثنائي أو الدورة الممزوجة (mixed cycle)، ويتم توضيحها على مخطط p – v في الشكل (4.12).



شكل (4.12) دورة الاحتراق الثاني على مخطط  $P - v$

الإجراء من 1 إلى 2 هو إضغاط ثابت القصور الحراري.

الإجراء من 2 إلى 3 هو تسخين إنعكاسي ثابت الحجم.

الإجراء من 3 إلى 4 هو تسخين إنعكاسي ثابت الضغط.

الإجراء من 4 إلى 5 تمدد ثابت القصور الحراري.

الإجراء من 5 إلى 1 هو تبريد إنعكاسي ثابت الحجم.

يتم إمداد الحرارة في جزئين، الجزء الأول عند حجم ثابت والمتبقي عند ضغط ثابت، ومن هنا جاء إسم إحتراق

ثائي. لكي يتم تثبيت الكفاءة الحرارية مطلقاً هنالك ثلاث عوامل ضرورية هي نسبة الانضغاط  $r_v = v_1/v_2$

؛ نسبة الضغوط،  $k = p_3/p_2$ ؛ ونسبة الحجوم،  $\beta = v_4/v_3$ .

بالتالي يمكن توضيح أنَّ،

$$\eta = 1 - \frac{k\beta^\gamma - 1}{[(k-1) + \gamma k(\beta-1)]r_v^{\gamma-1}} \quad (4.11)$$

لاحظ أَنَّه عندما  $k = 1$  (i.e.  $p_3 = p_2$ )، تنخفض بالتالي المعادلة (4.11) إلى الكفاءة الحرارية لدورة ديزل

المعطاة بالمعادلة (4.10). لا تعتمد كفاءة دورة الاحتراق الثاني فقط على نسبة الإنضغاط بل تعتمد أيضاً على

المقادير النسبية للحرارة المكتسبة بحجم ثابت وبضغط ثابت. يكون من المرهق جداً استخدام المعادلة (4.11)،

ويكون الأسلوب الأفضل لحساب الكفاءة الحرارية هو تقييم كل درجة حرارة حول الدورة وبالتالي استخدام المعادلة  $\eta = 1 - \left( Q_2 / Q_1 \right)$ . يتم إيجاد الحرارة المكتسبة،  $Q_1$ ، باستخدام المعادلة التالية للحرارة المضافة بحجم ثابت وضغط ثابت على الترتيب.

$$Q_1 = c_v (T_3 - T_2) + c_p (T_4 - T_3)$$

تعطى الحرارة المفقودة،  $Q_2$ ، بـ،

$$Q_2 = c_v (T_4 - T_1)$$

مثال (4.6) :

محرك زيت يسحب هواء عند  $20^{\circ}\text{C}$ ،  $1.01\text{bar}$  ويكون ضغط الدورة الأقصى مساوياً لـ  $69\text{bar}$ . تكون نسبة الإنضغاط  $18/1$ . أحسب الكفاءة الحرارية لدورة الهواء القياسية المؤسسة على دورة الاحتراق الثنائي. إفترض أن الحرارة المضافة بحجم ثابت تكون متساوية للحرارة المضافة بضغط ثابت.

الحل:

يتم توضيح الدورة على خط p-v في الشكل (4.13). مستخدماً المعادلة (2.20)،

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = 18^{0.4} = 3.18$$

$$\text{i.e. } T_2 = 3.18 \times T_1 = 3.18 \times 293 = 931 \text{ K}$$

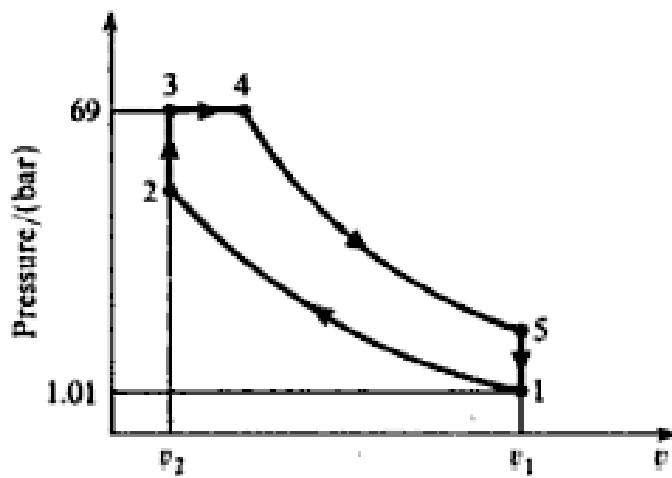
$$(\text{حيث } T_1 = 20 + 273 = 293 \text{ K})$$

من 2 إلى 3 يكون الإجراء بحجم ثابت، وبالتالي،

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

$$\cdot \left( \frac{P_3 V_3}{T_3} = \frac{P_2 V_2}{T_2}, \quad V_3 = V_2 \right) \text{(بما أن)} \quad (4.13)$$

$$T_3 = \frac{P_3}{P_2} \times T_2 = \frac{69 \times 931}{P_2}$$



شكل (4.13) دورة الاحتراق الثنائي

لإيجاد  $p_2$ ، إستخدم المعادلة (2.19)،

$$\text{i.e. } \frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^\gamma = 18^{1.4} = 57.2$$

$$\text{i.e. } p_2 = 57.2 \times 1.01 = \underline{57.8} \text{ bar}$$

بالتالي بالتعويض،

$$T_3 = \frac{69 \times 931}{57.8} = \underline{1112} \text{ K}$$

الآن الحرارة المضافة بحجم ثابت تكون متساوية للحرارة المضافة بضغط ثابت في هذا المثال. عليه،

$$c_v(T_3 - T_2) = c_p(T_4 - T_3)$$

$$\text{i.e. } 0.718(1112 - 931) = 1.005(T_4 - 1112)$$

$$\therefore T_4 = \frac{0.718 \times 181}{1.005} + 1112 = \underline{1241.4} \text{ K}$$

$$\text{i.e. } T_4 = \underline{1241.4} \text{ K}$$

لإيجاد  $T_5$  من الضروري معرفة قيمة نسبة الحجم  $v_5/v_4$ . عند ضغط ثابت من 3 إلى 4،

$$\frac{v_4}{v_3} = \frac{T_4}{T_3} = \frac{1241.4}{1112} = \underline{1.116}$$

عليه،

$$\frac{V_5}{V_4} = \frac{V_1}{V_4} = \frac{V_1}{V_2} \frac{V_3}{V_4} = 18 \times \frac{1}{1.116} = \underline{16.14}$$

بالتالي بإستخدام المعادلة (2.20)،

$$\frac{T_4}{T_5} = \left( \frac{V_5}{V_4} \right)^{\gamma-1} = 16.14^{0.4} = \underline{3.04}$$

$$\text{i.e. } T_5 = \frac{1241.1}{3.04} = \underline{408} \text{ K}$$

الآن فإن الحرارة المكتسبة،  $Q_1$  تُعطى بـ،

$$Q_1 = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3) \quad \text{أو} \quad Q_1 = 2c_v(T_3 - T_2)$$

(بما أنه في هذا المثال تكون الحرارة المضافة بحجم ثابت مساوية للحرارة المضافة بضغط ثابت).

$$\therefore Q_1 = 2 \times 0.718 \times (1112 - 931) = \underline{260} \text{ kJ/kg}$$

تُعطى الحرارة المفقودة،  $Q_2$  بـ ،

$$Q_2 = c_v(T_5 - T_1) = 0.718(408 - 293) = \underline{82.6} \text{ kJ/kg}$$

بالتالي من المعادلة (3.3)،

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{82.6}{260} = 1 - 0.318 = \underline{0.682} \quad \text{or} \quad \underline{68.2\%}$$

هذا يجب ذكر أن محرك الزيت الحديث ذو السرعة العالية يشتغل على دورة بحيث أن دورة أ Otto تكون الأساس الأفضل للمقارنة. أيضاً، بما أن حساب الكفاءة الحرارية لدورة Otto يكون أبسط بكثير عن ذلك لدورة الاحتراق الثنائي، وبالتالي فإن هذا يكون سبباً آخر لإستخدام دورة Otto كمعيار للمقارنة.

#### 4.9 متوسط الضغط الفعال: (Mean Effective Pressure)

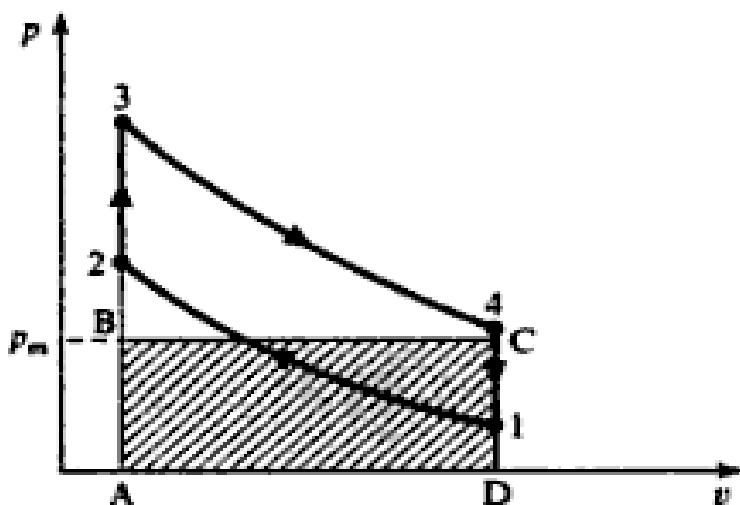
لقد تم تعريف مصطلح نسبة الشغل في المقطع 4.3، وهذا قد تم توضيحه ليكون قاعدة مفيدة لمحطات قدرة عملية. لمحركات الاحتراق، لا يكون مصطلح نسبة الشغل مفهوماً مفيدةً، بما أن الشغل المبذول على أو بمائع التشغيل يحدث داخل إحدى الأسطوانات. لكي يتم مقارنة المحركات الترددية يتم تعريف مصطلح آخر

يعرف بمتوسط الضغط الفعال. يتم تعريف متوسط الضغط الفعال كارتفاع لمستطيل بنفس الطول والمساحة كما في الدورة المرسومة على مخطط  $v - p$ . يتم توضيح هذه لدورة أوتو في الشكل (4.14).

يكون المستطيل ABCDA بنفس الطول كما في الدورة 12341، وتكون المساحة ABCDA متساوية للمساحة 12341. وبالتالي فإن متوسط الضغط الفعال  $p_m$ ، يكون الإرتفاع AB للمستطيل. عليه يمكن كتابة الشغل المبذول لكل kg من الهواء،

$$W = \text{المساحة} \quad ABCDA = p_m(v_1 - v_2) \quad (4.12)$$

يكون العنصر  $(v_1 - v_2)$  متناسباً مع الحجم المكتسح للأسطوانة، وبالتالي يمكن الملاحظة من المعادلة (4.12) أن متوسط الضغط الفعال يعطي قياساً لشغال الخرج لكل حجم مكتسح. عليه يمكن استخدامه لمقارنة محركات مشابهة بحجم (بمقاييس) مختلف. يكون متوسط الضغط الفعال الذي تمت مناقشته في هذا المقطع خاصاً بدورة الهواء القياسية. سيتم التوضيح لاحقاً أن متوسط الضغط الفعال البياني لمحرك فعلى يمكن قياسه من مخطط بيان ويستخدم لنقديم الشغل البياني المبذول بالمحرك.



شكل (4.14) متوسط الضغط الفعال على مخطط  $v - p$

مثال (4.7) :

أحسب متوسط الضغط الفعال للدورة في المثال (4.6).

الحل:

في المثال (4.6) وجد أن الحرارة المكتسبة،  $Q_1$ ، والكفاءة الحرارية يكونان  $260 \text{ kJ/kg}$  و  $68.2\%$  على الترتيب. من المعادلة (3.5)،

$$\eta = \frac{W}{Q_1}$$

عليه،

$$W = \eta Q_1 = 0.682 \times 260 = 177 \text{ kJ/kg}$$

الآن من تعريف متوسط الضغط الفعال، والمعادلة (4.12) نحصل على،

$$W = p_m (v_1 - v_2)$$

مستخدماً المعادلة التالية  $r_v = v_1/v_1 = 18$ ، والمعادلة (4.8)  $pv = RT$

بالتالي،

$$v_1 - v_2 = \left( v_1 - \frac{v_1}{18} \right) = \frac{17}{18} v_1 = \frac{17}{18} \frac{RT_1}{p_1} = \frac{17 \times 287 \times 293}{18 \times 1.01 \times 10^3}$$

$$\text{i.e. } v_1 - v_2 = 0.786 \text{ m}^3/\text{kg}$$

بالتالي بالتعويض،

$$W = p_m \times 0.786 \quad \text{أو} \quad p_m = W / 0.786 \text{ kJ/m}^3$$

$$\text{i.e. } \frac{177 \times 10^3}{10^3 \times 0.786} = \underline{2.25} \text{ bar}$$

#### 4.10 دورات إستيرلينق و إريكسون: (The Stirling and Ericsson Cycle )

لقد تم التوضيح أنه لا يمكن لدورة أن تمتلك كفاءة أكبر من تلك لدورة كارنوت التي تعمل بين حدي درجة الحرارة  $T_1$  و  $T_2$ . الدورات التي يكون لديها كفاءة حرارية مساوية لتلك لدورة كارنوت قد تم تعريفها

وتسميتها بدورات إستيرلينق وإريكسون وهما متفوقتان على دورة كارنوت في أنهما يملكان نسبة شغل أعلى.

يتم توضيح دورة إستيرلينق في مخطط  $p - v$  في الشكل 4.15(b) ويتم تمثيلها خططياً في الشكل (a).

يجب التأكيد على أنَّه ليس ذلك وصفاً فيزيائياً لمحرك إستيرلينق بل هو إحدى الطرق التي يمكن أن تُعطى فهماً

ل النوع العلاقة التي تربط الإجراءات المكونة للدورة.

يتم إمداد الحرارة لمائع التشغيل، الذي هو عادة الهيدروجين أو الهيليوم، من مصدر خارجي، الإجراء 3-2،

كلما يتمدد الغاز بثبات الحرارة ( $T_2 = T_3$ )، وتفقد الحرارة إلى غاطس خارجي، الإجراء 4-1، كلما يتم إنضغاط

الغاز بثبات درجة الحرارة ( $T_4 = T_1$ ). يتم توصيل الإجراءين ثابتتي درجة الحرارة بإجراءين إنكاسيين ثابتتي الحجم

1-2 و 4-3 يكون خلالها تغييرات درجة الحرارة مكافئة لـ ( $T_2 = T_1$ ). يتم استخدام الحرارة المفقودة أثناء الإجراء

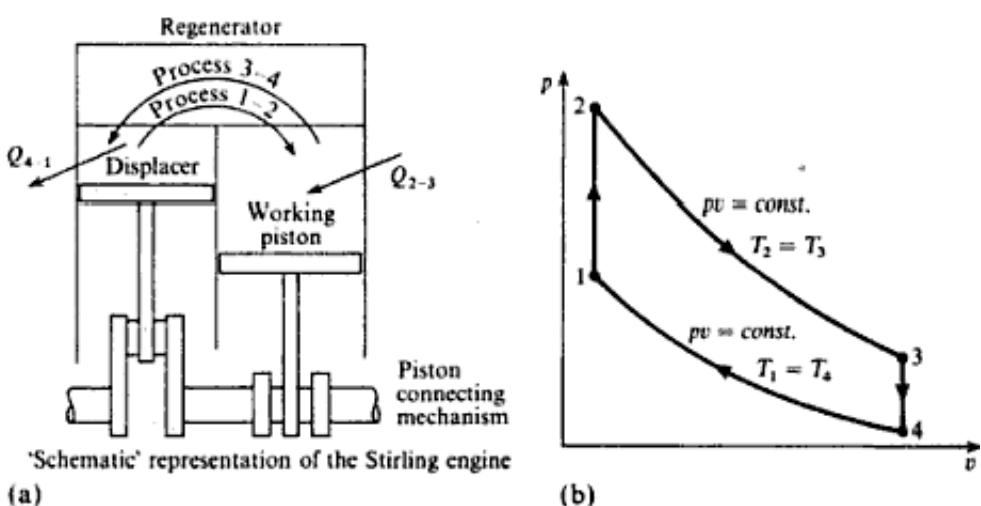
3-4،  $Q_{1-2} = c_v(T_2 - T_1) = Q_{3-4}$  i.e. وهذا

يفترض أن يحدث مثاليًا وإنعكاسياً في مولد تجديدي (regenerator). يتطلب المولد التجديدي مصفوفة من

مادة تقوم بفصل غازات التسخين والتبريد لكنه يسمح لدرجات الحرارة بالتغيير تدريجياً مقادير صغيرة جداً

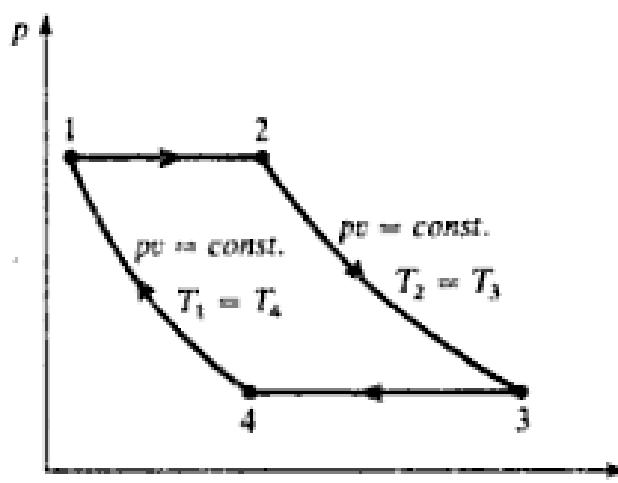
ومناظرة خلال الإجراءات. يحدث إجراء إعادة التجديد هذا (regenerative process) عند حجم ثابت ويكون

داخلياً في الدورة.



شكل (4.15) محرك إستيرلينق ودورة إستيرلينق

تكون درجة إريسكون مشابهة لدورة إستيرلينق بِإِسْتِثْنَاءِ أَنَّ الْإِجْرَاءَنِ ثَابِتَيْ درجة الحرارة يتم توصيلهما بِإِجْرَائِينِ ثَابِتَيْ الضُّغْطِ، كَمَا مُوضَحٌ فِي الشَّكْلِ (4.16).



شكل (4.16) دورة إركسون على مخطط  $P - v$

يتم الحصول على كفاءة دورة إستيرلينق بِاعتبار إنْتِقالاتِ الحرارة بين النَّظَامِ والأجسامِ الْخَارِجِيَّةِ، i.e. إِمْدادِ حرارة بدرجة حرارة عاليَّة، وغاطس بدرجة حرارة منخفضة يتم عندَهُ فقدُ الحرارة. الحرارة المكتسبة من المُصْدِرِ الساخنِ، مستخدماً المعادلات (2.11) و(2.12)،

$$Q_{2-3} = W_{2-3} = RT_2 \log_e \frac{p_2}{p_3} \quad \text{لكل وحدة كتلة غاز،}$$

بالمثل الحرارة المفقودة إلى الغاطس البارد،

$$Q_{4-1} = W_{4-1} = RT_1 \log_e \frac{p_1}{p_4}$$

وللنظام الكامل،

صافي الحرارة المكتسبة = صافي الشغل المبذول

$$W = Q_{2-3} - Q_{4-1}$$

وبيما أنَّ كفاءة الدورة،

$$\eta = \frac{W}{Q_{2-3}}$$

$$\therefore \eta = \frac{Q_{2-3} - Q_{4-1}}{Q_{2-3}} = 1 - \frac{Q_{4-1}}{Q_{2-3}}$$

$$= 1 - \frac{\frac{RT_1 \log_e \frac{P_2}{P_3}}{RT_2 \log_e \frac{P_1}{P_4}}}{}$$

لإجراء ثابت الحجم 1-2،

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

وللإجراء 3-4،

$$\frac{P_3}{P_4} = \frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\therefore \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}, \quad \frac{P_2}{P_3} = \frac{P_1}{T_4}$$

$$\therefore \eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

(يمكن إستنباط هذه النتيجة بدون برهان رسمي بما أن إجراءات إمداد الحرارة وقدد الحرارة تحدث عند درجات

حرارة ثابتة).

$$\frac{W_{2-3} - W_{4-1}}{W_{2-3}} = 1 - \frac{W_{4-1}}{W_{2-3}} = 1 - \frac{Q_{4-1}}{Q_{2-3}} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

وتكون مساوية في القيمة لكافأة الدورة.

القسير العملي للدورة المثالية سوف لن يتم وصفه بالتفصيل وينصح القارئ بإستشارة ما كتبه الإختصاصيين عن الترتيبات الميكانيكية المستخدمة وتقويمات الإداء. يعطي الشكل (b) 4.15 تمثيلاً مبسطاً للمحرك ويوضح الضرورة لكباسين، كباس تشغيل وكباس إزاحة، الذي هو حقيقة يعمل في أجزاء مختلفة لنفس الأسطوانة وليس كما تم تمثيله. من الضروري للدورة المثالية لكباسات أن تتحرك باستمرارية وهذه فقط قد تم تقريبها بالآلات

المستخدمة. تكون النتيجة هي أنه لا يتم تحقيق إجراءات الدورة المثالية ويكون هنالك إنحرافاً معتبراً عن مخطّط p-v المثالي بما أنَّ إجراءات التشغيل والتبريد تندمج لتبعد عن مفهوم التسخين ثابت الحجم. لقد كانت المحاوالت الأولى لبناء محرك إستيرلينق غير ناضجة وجعلته الإنجازات المتتسارعة لمحرك الاحتراق الداخلي غير مواكباً. منذ عام 1938 عندما بدأ Philips من Eindhoven تطوير الدورة زادت الرغبة في الإمكانيّة العملية لمحرك إستيرلينق. لقد كان الجانب لهذه الدورة هو أنها يمكن أن تستفيد من أي شكل للحرارة من الوقود التقليدي أو البلدي، مصادر الطاقة الشمسيّة أو النووية، بمعلوميّة أن درجة الحرارة التي يتم خلقها تكون عالية بما يكفي. تكون المحركات هادئة، وبفاءة مساوية أو أفضل من محركات الاحتراق الداخلي الأفضل وباحتراز قليل نتيجة لطبيعة الإدراة المطلوبة لإعطاء حركة تفاضلية (فرقيّة) بين كباسي التشغيل والإزاحة. يكون مدى التطبيق الممكن لمحركات إستيرلينق واسعاً ليشمل الإستخدامات البحريّة، توليد الكهرباء لأحمال عالية وكوحدات إسعافية (stand-by units)، لأغراض المحركات خصيصاً عند المقارنة بمحركات дизيل، أو في موقف يمكن أو يجب إستخدام وقوفات غير تقليدية أو أيّ مصادر للحرارة. لقد تم اعتبار محرك إستيرلينق للاستخدام في الفضاء بإستعمال الطاقة من الشمس، وللغاوصات اللانووية والطوربيدات. وقد كانت معظم التطبيقات الهامة حتى الآن كمحركات الهواء وكالثلاجات تستخدم دورة إستيرلينق. من الممكن الوصول لدرجات حرارة منخفضة لمناطق حرارية شديدة الإنخفاض (cryogenic regions). لقد تم بناء ماكينات واستخدامها لتسييل الغازات (liquefaction of gases)، ومنذ سنة 1958 فقد بنت هيئة المحركات العامة الأمريكية وإختبرت محركات إستيرلينق لأغراض المحركات وقد تم الحصول على خبرة تقويمية معتبرة.

#### 4.11 مسائل: (Problems)

- 1- م هي الكفاءة الحرارية الممكنة لمحرك حراري يشتغل بين  $800^{\circ}\text{C}$  و  $15^{\circ}\text{C}$ .
- Ans. (73.2%)
- 2- محركان حراريان إنعكاسيان يشتعلان في توالي بين مصدر عند  $527^{\circ}\text{C}$  وغاطس عند  $17^{\circ}\text{C}$ . إذا كان للمحركان كفاءات متساوية ويلفظ الأول إلى الثاني  $400\text{kJ}$ . أحسب:-

- A. درجة الحرارة التي يتم عندها إمداد حرارة إلى المحرك الثاني.
- B. الحرارة المأخوذة من المصدر.
- C. الشغل المبذول لكل محرك.

إفترض أن كل محرك يشتغل على دورة كارنوت.

Ans. (209°C; 664kj; 264 kj; 159.4 kj)

- 3- في دورة كارنوت تشتعل بين  $307^{\circ}\text{C}$  و  $17^{\circ}\text{C}$  يكون الضغطان الأقصى والأدنى هما 62.4bar و 1.04bar. أحسب الكفاءة الحرارية ونسبة التشغيل. إفترض أن مائع التشغيل هو الهواء.

Ans. (50%; 0.287)

- 4- وحدة توربينة غاز مغلقة الحلقة تعمل بين درجتي حرارة قصوى ودنيا مقدارهما  $760^{\circ}\text{C}$  و  $20^{\circ}\text{C}$  ، لها نسبة ضغط 7/1. أحسب الكفاءة الحرارية المثالية ونسبة التشغيل.

Ans. (42.7%; 0.503)

- 5- في دورة قياسية مؤسسة على دورة أوتو تكون درجتا الحرارة القصوى والدنيا هما  $1400^{\circ}\text{C}$  و  $15^{\circ}\text{C}$ . تكون الحرارة المكتسبة لكل kg من الهواء هي 800 kj. أحسب نسبة الإنضغاط والكفاءة الحرارية. أحسب أيضاً نسبة الضغط الأقصى إلى الضغط الأدنى في الدورة.

Ans. (5.26/1; 48.6%; 30.5/1)

- 6- محرك بترولي ذو أربع أسطوانات بحجم مكتسح مقداره  $2000\text{cm}^3$ ، وبحجم خلوصي في كل أسطوانة مقداره  $60\text{cm}^3$ . أحسب الكفاءة الحرارية لدورة الهواء القياسية. إذا كانت أحوال السحب هي 1bar و  $24^{\circ}\text{C}$ . ودرجة الحرارة القصوى للدورة هي  $1400^{\circ}\text{C}$ ، أحسب متوسط الضغط الفعال المؤسس على دورة الهواء القياسية.

Ans. (59 %; 5.27 bar)

## الكتب والمراجع

### الكتب والمراجع العربية:

1. أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات انتقال الحرارة الجزء الأول، الثاني والثالث" ، جامعة وادي نيل ، كلية الهندسة والتكنولوجيا ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2000م).
2. أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات انتقال الكتلة بالانتشار والحمل الجزء الأول، الثاني" ، جامعة وادي نيل ، كلية الهندسة والتكنولوجيا ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2005م).
3. أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات ديناميكا حرارية(1) و ديناميكا حرارية(2)" ، جامعة وادي نيل ، كلية الهندسة والتكنولوجيا ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2007م).
4. برهان محمود العلي ، أحمد نجم الصبحة ، بهجت مجید مصطفى ، " ترجمة كتاب أساسيات انتقال الحرارة" ، مديرية دار الكتب للطباعة والنشر ، جامعة لموصل ، الجمهورية العراقية ، (1988م).

### الكتب والمراجع الإنجليزية

1. T. D. Eastop and A. McConkey, "Applied Thermodynamics for Engineers and Technologists", Longman Singapore Publishers, 1994.
2. Eastop T. D. and Craft D. R., "Energy Efficiency", Longman, 1990.
3. Douglas J. F., Gasiorek J. M. and Swaffield J. A., "Fluid Mechanics", 2<sup>nd</sup> Edition, Longman, 1986.
4. Rogers G. F. C. and Mayhew Y. R., "Engineering Thermodynamics, Work and Heat Transfer", 4<sup>th</sup> Edition, Longman, 1992.
5. National Engineering Laboratory, "Steam Tables", HMSO, 1964.
6. Haywood R. W., "Analysis of Engineering Cycles", Pergamon, 1991.
7. Walker G., "Stirling Engines", Oxford University Press, 1980.
8. Harker J. H. and Bachurst J. R., "Fuel and Energy", Academic Press, 1981.
9. Hickson D. C. and Taylor F. R., "Enthalpy – Entropy Diagram for Steam", Basil Blackwell, 1980.

10. Eastop T. D. and Watson W. E., "Mechanical Services for Buildings", Longman, 1992.
11. Cohen H., Rogers G. F. C. and Saravanamuttoo H. I. H., "Gas Turbine Theory", 3<sup>rd</sup> Edition, Longman, 1987.
12. Shapiro A. H., "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Flow", Volumes 1 and 2, Kreiger, 1983.
13. Dixon S. L., "Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery", 3<sup>rd</sup> Edition, Pergamon, 1978.
14. Kearton W. J., "Steam Turbine Theory and Practice", Pitman, 1960.
15. Heywood J. B., "Thermal Combustion Engines Fundamentals", McGraw-Hill, 1988.
16. Taylor C. F., "The Internal Combustion Engine in Theory and Practice", Volumes 1 and 2, MIT Press, 1977.
17. Watson N. and Janota M. S., "Turbo charging the IC Engines", Macmillan, 1984.
18. Dossat R. J., "Principles of Refrigeration", 2<sup>nd</sup> Edition, Wiley, 1990.
19. Reay D. A. and Macmichael D. B. A., "Heat Pumps", 2<sup>nd</sup> Edition, Pergamon, 1987.
20. Rogers G. F. C. and Mayhew Y. R., "Thermodynamics and Transport Properties of Fluids", 4<sup>th</sup> Edition, Basil Blackwell, 1987.
21. Kemp D. D., "Global Environmental Issues", Routledge, 1990.
22. Threlkeld J. L., "Thermal Environmental Engineering", 2<sup>nd</sup> Edition, Prentice, 1970.
23. Jones W. P., "Air Conditioning Engineering", 3<sup>rd</sup> Edition, Edward Arnold, 1985.
24. Welty J. R., "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer", 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley, 1984.
25. Craft D. R. and Lilley D. G., "Heat Transfer Calculations Using Finite Difference Equations", Pavic Publications, 1986.

- 26.Incropera F. P. and De Witt D. P., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley, 1990.
- 27.Eckert E. R. and Drake R. M., "Analysis of Heat and Mass Transfer", Taylor and Francis, 1971.
- 28.Kern D. Q., "Process Heat Transfer", McGraw – Hill, 1950.
- 29.Walker G., "Industrial Heat Exchangers", 2<sup>nd</sup> Edition, McGraw – Hill, 1990.
- 30.Kays W. M. and London A. L., "Compact Heat Exchangers", 3<sup>rd</sup> Edition, McGraw – Hill, 1984.
- 31.McAdams W. H., "Heat Transmission", 3<sup>rd</sup> Edition, McGraw – Hill, 1954.
- 32.Dunn P. D., "Renewable Energies: Sources, Conversion, and Applications", Peter Peregrines, 1986.
- 33.Culp(jr) A. R., "Principles of Energy Conversion", McGraw – Hill, 1980.
- 34.Mohammed Elmardi Osama, "Solution of Problems in Heat Transfer, Transient Conduction or Unsteady Conduction", Lambert Academic Publishing, 2017.
- 35.Mohammed Elmardi Osama, "Further Experimental research work on water Current Turbines, Case Study On Atbara Water Turbine", Lambert Academic Publishers, 2015.

## نبذة عن المؤلف:



أسامي محمد المرضي سليمان ولد بمدينة عطبرة بالسودان في العام 1966م.

حاصل على دبلوم هندسة ميكانيكية من كلية الهندسة الميكانيكية - عطبرة في العام 1990م. تحصل أيضاً على درجة البكالوريوس في الهندسة الميكانيكية من جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا - الخرطوم في العام 1998م ، كما حاز على درجة الماجستير في تخصص ميكانيكا المواد من جامعة وادي النيل - عطبرة في العام 2003م ودرجة الدكتوراه من جامعة وادي النيل في العام

2017م. قام بالتدريس في العديد من الجامعات داخل السودان، بالإضافة لتأليفه لأكثر من ثلاثة كتب باللغة العربية ولعشرة كتب باللغة الإنجليزية بالإضافة لخمسين ورقة علمية منشورة في دور نشر ومجلات عالمية إلى جانب إشرافه على أكثر من ثلاثة بحث تخرج لكل من طلاب الماجستير، الدبلوم العالي، البكالوريوس، والدبلوم العام. يشغل الآن وظيفة أستاذ مساعد بقسم الميكانيكا بكلية الهندسة والتكنولوجيا - جامعة وادي النيل. بالإضافة لعمله كمستشار لبعض الورش الهندسية بالمنطقة الصناعية عطبرة. هذا بجانب عمله كمدير فني لمجموعة ورش الكمالى الهندسية لخراطة أعمدة المرافق واسطوانات السيارات والخراطة العامة وكبس خراطيش الهيدروليكي.