أسامة محمد المرضي سليمان

كتاب ديناميكا حرارية الجزء الأول

ديناميكا حرارية

محمد المرضي سليمان

كتاب ديناميكا حرارية الجزء الأول

إنَّ مؤِّلف 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 الهندسةِ الميكانيكية ، هندسة الإنتاج او التصنيع ، الهندسة الكهربائية والهندسة المدنية حيثٍ يُغطى مناهج نظرية ومختبرية في الديناميكا الحرارية وتطبيقاتها. يتفق هذا الكتاب لغوياً مع القاموس الهندسي الموحَّد السوداني ، ويُعد الكتاب مرجعاً في مجاله حيث يمكن أن يستفيد منه الطالب والمهندس والباحث. هذاٍ الكتاب مقتبس من مُذكرات مؤلفه في تدريسه لهذا المُقرر لفترة لاٍ تقل عنٍ خمس وٍعشرون عاماً. يهدف هذا الكتاب لتأكيد أهمية دراسة الديناميكا الحرارية نظرياً ، عملياً ومُختبرياً . 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 والمُختبرية.

أسامة محمد المرضي سليمان وُلِدَ بمدينة عطبرة بالسودان في العام 1966م. حاز على دبلوم هندسة ميكانيكية من كلية الهندسة الميكانيكية – عطبرة في العام 1990م. تحصَّل 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 – عطبر

NOOR PUBLISHING
978-620-2-35617-6

أسامة محمد المرضي سليمان

كتاب ديناميكا حرارية الجزء الأول

أسامة محمد المرضي سليمان

كتاب ديناميكا حرارية الجزء الأول

Noor Publishing

Imprint
Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this work is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: www.ingimage.com

Publisher:
Noor Publishing
is a trademark of
International Book Market Service Ltd., member of OmniScriptum Publishing Group
17 Meldrum Street, Beau Bassin 71504, Mauritius

Printed at: see last page
ISBN: 978-620-2-35617-6

كتاب ديناميكا حرارية

الجـزء الأول

تأليف

أسـامة محـمد المرضـي سـليمان

قسم الهندسة الميكانيكية

كلية الهندسة والتقنية

جامعة وادي النيل

عطبرة ، السودان

الطبعة الأولى فبراير 1995م

الطبعة الثانية أكتوبر 2018 م

شكر وعرفان

الشكر والعرفان لله والتبريكات والصلوات على رسوله وخادمه محمد وعلى آله وصحابته وجميع من تبعه وتَقفِّى أثره إلى يوم القيامة.

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

الشكر والتقدير 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.

وأُعبر عن شُكري 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 وتعالي أن يتقبل هذا العمل المتواضع والذي آمل أن يكون ذا فائدة للقارئ.

مقدمة

إنَّ مؤلِف 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 ، هندسة الإنتاج او التصنيع ، الهندسة الكهربائية والهندسة المدنية حيث يُغطِّي مناهج نظرية ومختبرية في الديناميكا الحرارية وتطبيقاتها. يتفق هذا الكتاب لغوياً مع القاموس الهندسي الموحَّد السوداني ، ويُعد الكتاب مرجعاً في مجاله حيث يمكن أن يستفيد منه الطالب والمهندس والباحث. هذا الكتاب مقتبس من مُذكرات مؤلفه في تدريسه لهذا المُقرر لفترة لا تقل عن خمس وعشرون عاماً.

يهدف هذا الكتاب لتأكيد أهمية دراسة الديناميكا الحرارية نظرياً ، عملياً ومُختبرياً . 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 والمُختبرية.

يشتمل هذا الكتاب على أربعة فصول. يناقش الفصل الأول القانون الأول للديناميكا الحرارية من وجهات نظر قانون بقاء الطاقة ، معادلة اللاسريان ، معادلة السريان المستقر من خلال العديد من الأمثلة والمسائل المحلولة بالإضافة لمسائل إضافية في نهاية الفصل .

أما الفصل الثاني فيستعرض الإجراءات الإنعكاسية واللاإنعكاسية في الأنظمة الحرارية كإجراء الحجم الثابت ، الإجراء ثابت، درجة الحرارة، والإجراء متعدد الإنتحاء. يناقش هذا الفصل بعض الحالات الهامة لإجراءات لا يمكن إفتراض أنها إنعكاسية داخلياً مثل التمرد الحر ، الخنق ، الخلطة الاديباتية ، 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 T – s ، القصور الحراري واللاإنعكاسية ، والإتاحية بالإضافة لعدد من الأمثلة والمسائل المحلولة وغير المحلولة التي نرجو أن تُبسِّط على القارئ هضم وفهم هذا الكتاب.

أما الفصل الرابع والأخير دورة المحرك الحراري المتمثِّلة في دورة كارنوت المثالية ، مقياس 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 هنالك ثَمَّة أخطاء حتى يستطيع الكاتب تصويبها في الطبعة التالية للكتاب.

والله الموفق

المؤلف

أكتوبر 2018م

المحتويات

الفصل الأول

القانون الأول للديناميكا الحرارية

(The First Law of Thermodynamics)

1.1 بقاء الطاقة: (Conservation of Energy)

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 ليؤدى دورة كاملة فإن صافي الشغل يُبذل على أو بالنظام. إعتبر دورة يكون فيها صافى 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 الحقيقية لا تتغير، وبالتالي فإنَّ الطاقة الميكانيكية لم يتم توفيرها بالنظام نفسه.

الطاقة الوحيدة الأخرى المشتركة في الدورة هي الحرارة التي يتم إكتسابها وفقدها في الإجراءات المختلفة. بالتالي، بمبدأ بقاء الطاقة، فإنَّ صافي الشغل المبذول بواسطة النظام يساوى صافى الحرارة المكتسبة إلي النظام. القانون الأول للديناميكا الحرارية يمكن بيانه كما يلي:

عندما يؤدي نظاماً دورة حرارية فإنَّ صافي الحرارة المكتسبة إلي النظام من بيئته المحيطة تعادل صافي الشغل المبذول بواسطة النظام على بيئته المحيطة.

بالرموز،

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

حيـث $\sum$ تمثل المجموع لدورة كاملة.

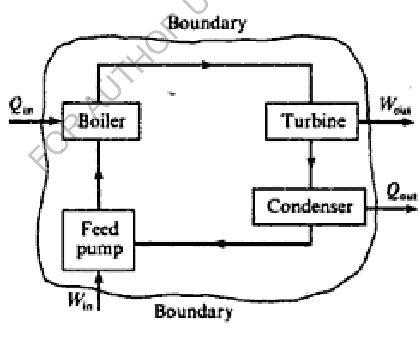
مثال (1.1):

في محطـة بخـار معينـة ينـتج التـوربين 1000kW. والحـرارة التـي يـتم إمـدادها إلـي البخـار فـي الغلايـة تعادل 2800kj/kg، والحرارة التي يفقدها (يطردها) النظـام إلـي مـاء التبريـد فـي المكثِّف تسـاوى 2100kj/kg وشغل مضخة التغذية المطلوب لضخ البخار المكثَّف إلي الغلاية يساوي 5kW. أحسب معدل إنسياب البخار خلال الدورة بالـ kg/s. يتم توضيح الدورة تخطيطياً في الشكل رقم (1.1)، ويتم توضيح حد النظام الذي يطوِّق المحطة بأكملها.

بصرامة، فإنَّ حد النظام هذا يجب التفكير في أنَّه يطوق فقط مائع التشغيل.

الحل:

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



شكل (1.1) محطة قدرة بخارية

إجعل معدَّل إنسياب البخار $\dot{m}$ بالـ kg/s ،

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

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

بالتالي في المعادلة (1.1) ،

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

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

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

1.2 معادلة اللاإنسياب (اللاسريان): (The Non – Flow Equation)

لقد تمَّ التوضيح في المقطع السابق أنه عندما يؤدي نظاماً يمتلك طاقة حقيقية معينة دورة بتحويل الحرارة والشغل، فإنَّ صافى الحرارة المكتسبة يكون مساوياً لصافي شغل الخرج. هذا يكون صحيحاً لدورة كاملة عندما تكون الطاقة الحقيقية للنظام مساوية لقيمته الحقيقية الإبتدائية. إعتبر الآن إجراءاً تكون فيه الطاقة الحقيقية للنظام أخيراً أكبر من الطاقة الحقيقية الإبتدائية. الفرق بين صافي الحرارة المكتسبة وصافي شغل الخرج سيزيد الطاقة الحقيقية للنظام،

الكسب في الطاقة الحقيقية = صافي الحرارة المكتسبة – صافى شغل الخرج

عندما يكون صافي التأثير هو إنتقال طاقة من النظام، بالتالي سيكون هنالك فقداً في الطاقة الحقيقية للنظام.

عندما يكون هنالك مائعاً ليس في حركة فإنَّ طاقته الحقيقية 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 كـ U، i.e. $mu = U$. وحدات الطاقة الداخلية، U تكتب عادة كـ kj.

بما أن الطاقة الداخلية خاصية فإنَّ الكسب في الطاقة الداخلية في التغير من الحالة 1 إلي الحالة 2 يمكن كتابتها كـ $U_1 - U_2$.

أيضاً، الكسب في الطاقة الداخلية = صافي الحرارة المكتسبة – 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 أنَّه ليس هنالك سريان للمائع إلي أو من النظام. في أي إجراء لا سرياني سيكون هنالك إما حرارة مكتسبة أو حرارة مفقودة، لكن

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

$$U_2 - U_1 = Q - W$$

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

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

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

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

مثال (1.2):

في شوط الإنضغاط لمحرك إحتراق داخلي، تكون الحرارة المفقودة لماء التبريد مساوية لـ 45kj/kg وشغل الدخل مساوياً لـ 90kj/kg. أحسب التغير في الطاقة الداخلية النوعية لمائع التشغيل ذاكراً ما إذا كان كسباً أم فقداً.

الحل:

$Q = - 45kj/kg$ (بما أنَّ الحرارة مفقودة -ve)

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

مستخدماً المعادلة (1.2)،

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

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

$$\therefore u_2 - u_1 = +90 - 45 = \underline{45}\, kj/kg$$

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

مثال (1.3):

في أسطوانة محرك هواء فإنَّ الهواء المنضغط لـه طاقة داخلية نوعية مقدارها 240kj/kg عند بداية التمدد وطاقة داخلية مقدراها 200kj/kg بعد التمدد. أحسب سريان الحرارة إلي أو من الأسطوانة عندما يكون الشغل المبذول بواسطة الهواء أثناء التمدد مساوياً لـ 100kj/kg.

الحل:

من المعادلة (1.2)،

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

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

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

من المهم ملاحظة أنَّ 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 سنمتلك من المعادلة (1.1)،

$$W = \int_1^2 pdv$$

أو لكميات صغيرة، $dW = p\ dv$

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

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

أو بالتعويض في المعادلة (1.2)،

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

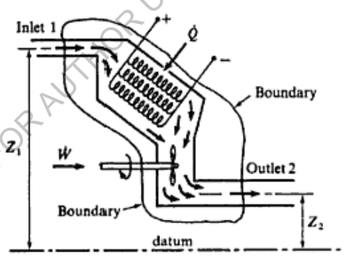
المعادلات (1.4)، (1.5) يمكن استخدامهما فقط لإجراءات لا سريانية إنعكاسية مثالية.

1.3 معادلة السريان المستقر: (The Steady Flow Equation)

في المقطع (1.2)، قيل أن الطاقة الداخلية لمائع تكون هي الطاقة الحقيقية للمائع نتيجة لخواصه الديناميكية الحرارية. عندما يكون هنالك مائع كتلته 1kg بطاقة داخلية نوعية، u، يتحرك بسرعة C ويكون عند إرتفاع z فوق مستوي المرجعية، بالتالي فإنَّه يمتلك طاقة كلية مقدراها $u+\left(C^2/2\right)+zg$، حيث $C^2/2$ هي طاقة الحركة لـ 1kg من مائع و zg هي طاقة الوضع لـ 1kg من المائع.

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

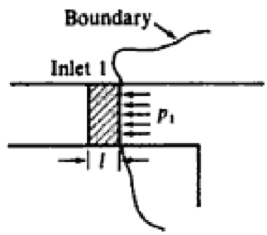
إعتبر 1kg من مائع ينساب بسريان مستقر خلال قطعة من الجهاز شكل (1.2). هذا يشكل نظام مفتوح كما تم تعريفه في المقطع (1.2). يتم توضيح الحد قاطعاً ماسورة المدخل عند 1 والمخرج عند المقطع 2. يسمي هذا الحد في بعض الأحيان بسطح التحكم، والنظام المطوق بحجم التحكم.



شكل (1.2) نظام مفتوح لسريان مستقر

إفترض أنَّه يتم إمداد سريان مستقر لحرارة بمقدار Q وحدة لكل kg من المائع، وأنَّ كل kg من المائع يؤدى W وحدة من الشغل كلما يمر خلال الجهاز. والآن لكي يتم إدخال 1kg من المائع عبر الحد يتطلب ذلك إنفاقاً للطاقة؛ نفس الشئ لكي يتم دفع 1kg من المائع عبر الحد عند المخرج، فإنَّه يتطلب أيضاً إنفاقاً للطاقة.

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



شكل (1.3) مقطع عند مدخل النظام

إعتبر عنصراً من مائع بطول L، وإجعل مساحة المقطع العرضي لماسورة المدخل A_1. بالتالي سنحصل على،

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

(حجم عنصر المائع) × p_1 =

عليه ،

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

(حيث v_1 هو الحجم النوعي للمائع عند المقطع 1)

نفس الشيء ، يمكن توضيح أنَّ ،

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

إعتبر الآن الطاقة الداخلة والمغادرة للنظام. الطاقة الداخلة للنظام تتكون من طاقة المائع المنساب عند المدخل $\left(u_1 + \frac{C_1^2}{2} + z_2 g\right)$.

مصطلح الطاقة p_1v_1، الحرارة المكتسبة Q والشغل المبذول بواسطة المائع W. بما أنَّ هنالك سريان مستقر للمائع إلي أو من النظام، ستكون هنالك سريانات مستقرة للحرارة والشغل، بالتالي الطاقة المدخلة يجب أن تساوى بالضبط الطاقة المغادرة.

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

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).

$$\text{i.e.}\quad \text{المحتوي الحراري النوعي}\ ،\ h = u + pv \qquad (1.7)$$

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 كـ H $(mh = H)$. وحدات h هي نفسها كتلك للطاقة الداخلية.

معوضاً المعادلة (1.7) في المعادلة (1.6)،

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

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

$$\text{معدَّل سريان الكتلة}\ ،\ \dot{m} = \frac{CA}{v} = \rho CA \qquad (1.9)$$

(حيث v = الحجم النوعي عند المقطع؛ ρ 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):

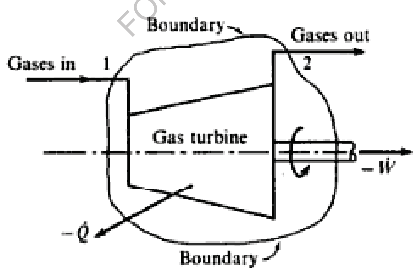
في توربينـة وحدة توربينية غازيـة تنساب الغـازات خـلال التوربين عنـد 17kg/s وتكون القدرة المتولـدة بواسـطة التوربينة مساوياً لـ 14,000 kW. وتكون المحتويات الحرارية للغازات عند المدخل والمخرج هما 1200kj/kg و 360kj/kg علـى الترتيب، والسرعات للغازات عند المدخل والمخرج هما 60m/s و 150m/s علـى الترتيـب. أحسب المعدَّل الذي تفقد به الحرارة من التوربينة. أوجد أيضاً مساحة ماسورة المدخل بمعلومية أن الحجم النوعي للغازات عند المدخل $0.5m^3/kg$.

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

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

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

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

$2.5^2 \times 1.8 = \underline{11.25}$ kj/kg (بما أن $C_2 = 2.5C_2$)

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

بالتعويض في المعادلة (1.8)،

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

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

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

لإيجاد مساحة المدخل، استخدم المعادلة (1.9)،

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

$\therefore$ مساحة المدخل، $A_1 = \frac{17 \times 0.5}{60} = \underline{0.142}\ m^2$

مثال (1.5):

ينساب هواء بإستقرار بمعدَّل 0.4kg/s خلال ضاغط هواء، حيث يدخل بسرعة 6m/s، بضغط 1bar وبحجم نوعي $0.85m^3/kg$، ويغادر بسرعة 4.5m/s، وبضغط 6.9bar وحجم نوعي $1.6m^3/kg$. وتكون الطاقة الداخلية النوعية للهواء المغادر أكبر من تلك للهواء الداخل بمقدار 88kj/kg. ماء التبريد الموجود في تجاويف محيطة بالأسطوانة يمتص الحرارة من الهواء بمعدَّل 59kj/s. أحسب القدرة المطلوبة لإدارة الضاغط ومساحة المقطع العرضي لمدخل ومخرج الماسورة.

الحل:

في هذه المسألة من الملائم أكثر كتابة معدَّل السريان كما في المعادلة (1.6)، بحذف العناصر z.

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

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

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

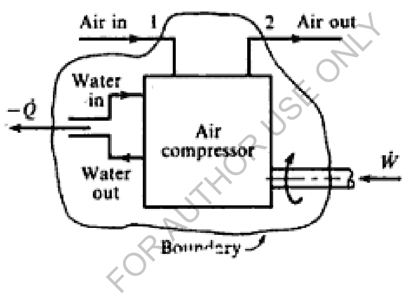
$$\frac{C_1^2}{2} = \frac{6 \times 6}{2}\ j/kg \quad = \underline{18}\ J/kg$$

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

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

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

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



شكل (1.5) تمثيل تخطيطي للضاغط

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

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

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

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

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

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

من المعادلة (1.9)،

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

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

i.e. مساحة المقطع العرضي لماسورة المدخل = $\underline{0.057}$ m^2

نفس الشيء ،

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

i.e. مساحة المقطع العرضي لماسورة المخرج = $\underline{0.014}$ 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 إستخدام معادلة السريان المستقر لأنَّ دورة الإجراءات تحدث مرات عديدة في الدقيقة، بالتالي فإنَّ التأثير المتوسط يكون سريان مستقر لهواء خلال الماكينة.

1.4 مسائل: (Problems)

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

Ans. (50kj/kg)

2- في شوط الإنضغاط لتوربينة غاز فإنَّ الشغل المبذول على الغاز بواسطة الكباس يساوي 70kj/kg والحرارة المفقودة لماء التبريد تعادل 42kj/kg. أوجد التغير في الطاقة الداخلية، ذاكراً ما إذا كانت كسباً أم فقداً.

Ans. (28 kj/kg ، كسب)

3- كتلة غاز بطاقة داخلية مقدارها 1500 kj تكون محتواة في أسطوانة ذات عزل حراري مثالي. يُسمح للغاز بالتمدد خلف الكباس حتى تكون طاقته الداخلية مساوية لـ 1400 kj. أحسب الشغل المبذول بالغاز. إذا كان

التمَّدد يتبـع القـانون $pv^2 = constant$، الضـغط والحجـم الابتـدائيان للغـاز هما 28bar و $0.06m^3$ علـى الترتيب، أحسب الضغط والحجم النهائيان.

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

4- للغـازات فـي أسـطوانة محـرك إحتـراق داخلـي طاقـة داخليـة مقـدارها 800kj/kg وحجـم نـوعي مقـداره $0.06m^3/kg$ عند بداية التمدد، تمدد الغازات يمكن إفتراض حدوثه طبقاً للقانون الانعكاسي $pv^{1.5}=constant$، من 55bar إلي 1.4bar. وتكون الطاقة الداخلية بعد التمدد مساوياً لـ 230kj/kg. أحسب الحرارة المفقودة إلي أسطوانة ماء التبريد لكل kg من الغازات أثناء شوط التمدد.

Ans. (104 kj/kg)

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

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

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

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

6- بخار ذو سريان مستقر يدخل مكثَّفاً بمحتوى حراري مقداره 2300kj/kg وبسرعة 350m/s. يغادر البخار المتكاثف المكثِّف بمحتوى حراري مقداره 160kj/kg وبسرعة مقدارها 70m/s. أوجد الحرارة المنتقلة لمائع التبريد لكل kg من البخار المُكثَّف.

Ans. (- 2199 kj/kg)

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

المحيطة بمعدَّل 0.25kj/s. إذا كان معدَّل سريان البخار يساوي 0.38kj/s، ما هي القدرة المتولدة بواسطة التوربينة.

Ans. (102.8 kW)

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

أ- أحسب السرعة عند مخرج الفوهة.

ب- إذا كانت مساحة المدخل تساوي $0.1m^2$ والحجم النوعي عند المدخل يساوي $0.19m^3/kg$، أوجد معدَّل سريان المائع.

ج- إذا كان الحجم النوعي عند مخرج الفوهة يساوي $0.5m^3/kg$، أوجد مساحة المخرج للفوهة.

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

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 واللاإنعكاسية، ومناقشة خواص البخار والغازات المثالية. الغرض من هذا الفصل هو إعتبار 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)، بالتالي فإن حدود النظام تكون غير قابلة للحركة و لا يمكن أن يكون هنالك شغلاً مبذولاً على أو بالنظام، غير شغل دخل عجلة التحريك. سيتم إفتراض أن الحجم الثابت يتضمن شغلاً صغيراً صفرياً ما لم يُذكر غير ذلك.

من معادلة طاقة اللا سريان (1.2)،

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

بما أنَّه ليس هنالك شغلاً مبذولاً، عليه نحصل على،

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

أو لكتلة، m، من مادة التشغيل،

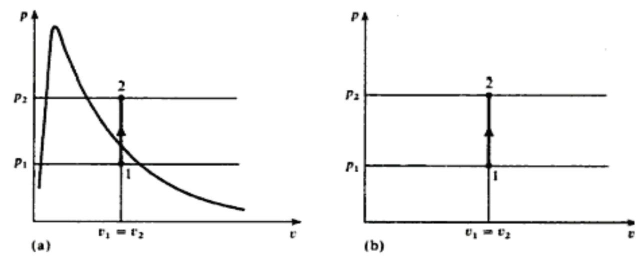
$$Q = U_2 - U_1 \qquad (2.2)$$

تستخدم جميع الحرارة المكتسبة في إجراء الحجم الثابت في زيادة الطاقة الداخلية.

يتم توضيح إجراء حجم ثابت لبخار على مخطط p – v في الشكل رقم ((2.1(a)). ولقد تم إختيار الحالات الأولية و النهائية لتكون 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. بالتالي 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، بالتالي فإنَّ الشغل يكون مبذولاً على بيئته المحيطة.

من المعادلة لأي إجراءاً 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، $h = u + pv$، بالتالي،

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

أو لكتلة، m، لمائع،

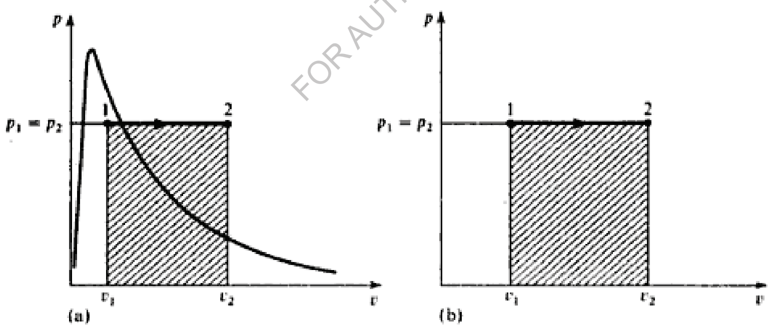
$$Q=H_2-H_1 \qquad (2.4)$$

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

لقد تم إختيار 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 اللاسريان الإنعكاسي عند ضغط ثابت على ،

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



شكل (2.2) إجراء ثابت الضغط لبخار ولغاز مثالي

لاحظ أنَّه في الأشكال ((2.2(a) و ((2.2(b) أن المساحات المظللّة تمثل الشغل المبذول بواسطة المائع $p(v_2-v_1)$.

مثال (2.1):

كتلة مقدارها 0.05kg من مائع يتم تسخينها بضغط ثابت مقداره 2bar حتى يكون الحجم المحتل مساوياً لـ $0.0658m^3$. أحسب الحرارة المكتسبة والشغل المبذول:

a/ عندما يكون المائع بخاراً، إبتدائياً جافاً مشبعاً.

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

الحل:

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

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

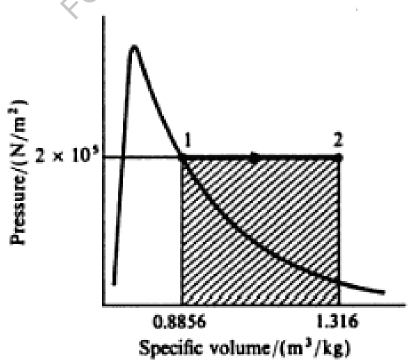
نهائياً يكون المائع عند 2 bar ويعطي الحجم النوعي بـ

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

بالتالي 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

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

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

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

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

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

$$= \underline{4.034}\ kj$$

b/ مستخدماً المعادلة،

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{mR} = \frac{2\times10^5\times0.0658}{0.05\times0.287\times10^3} = \underline{917}K$$

لغازاً مثالياً يؤدي إجراءاً ثابت الحجم،

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

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

(حيث $T_1 = 130 + 273 = 403K$)

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

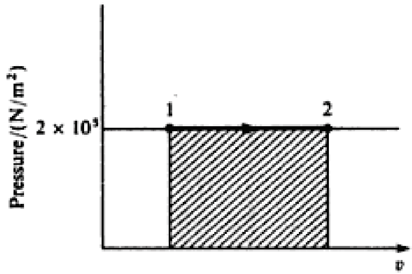
يتم توضيح الإجراء على مخطط p – v في الشكل (2.4). يتم إعطاء الشغل المبذول بالمساحة المظلّلة، .i.e

$W = p(v_2 - v_1) N.m/kg$ من المعادلة $pv = RT$

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

i.e. الطاقة المبذولة بكتلة الغاز الموجودة $= 0.05\times287\times514$

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



شكل (2.4) إجراء لغاز مثالي

3.الإجراء ثابت درجة الحرارة:

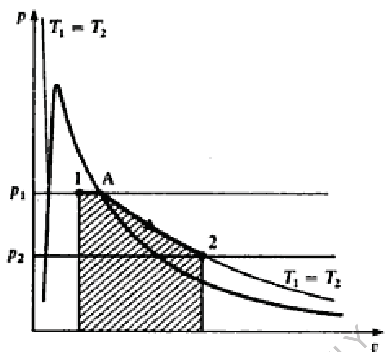
(Constant Temperature Process or Isothermal Process)

الإجراء عند درجة حرارة ثابتة يسمي بإجراء ثابت درجة الحرارة. عندما يتمدد مائع في أسطوانة خلف كباس من ضغط عالٍ إلي ضغط منخفض يكون هنالك ميلاً لهبوط درجة الحرارة. في التمدّد ثابت درجة الحرارة فإن الحرارة يجب أن تضاف بإستمرار لكي تحافظ على درجة الحرارة عند القيمة الإبتدائية. نفس الشئ في انضغاط ثابت درجة الحرارة فإن الحرارة يجب إزالتها من المائع باستمرار خلال الإجراء. يتم توضيح إجراء ثابت درجة الحرارة على مخطط $p - v$ كما في الشكل (2.5). لقد تم إختيار الحالات الإبتدائية والنهائية في المنطقة الرطبة والمنطقة المحمصة على الترتيب.

من الحالة 1 إلي الحالة A يبقي الضغط عند p_1، بما أنَّه في المنطقة الرطبة فإنَّ الضغط و درجة الحرارة هما قيمتا التشبع المناظرة. عليه يمكن الملاحظة أنَّ 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 إلي الحالة A لكل kg من البخار تساوي $(h_A - h_1)$). في المنطقة المحمصة يهبط الضغط إلي p_2 كما موضح في الشكل (2.5). لا يكون الإجراء بسيطاً. عندما يتم تثبيت الحالات 1 و2 فإنَّه يمكن الحصول على الطاقات الداخلية u_1 و u_2 من الجدول. يُعطي الشغل المبذول بالمساحة المظلَّلة في الشكل (2.5). هذا يمكن تقييمه فقط برسم الإجراء وقياس المساحة مخططياً. على أي حال، عندما يتم تقديم خاصية القصور الحراري، s ، فسوف يتم

توضيح طريقة ملائمة لحساب الحرارة المكتسبة. عندما يتم حساب سريان الحرارة فإنَّه 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 إلي ضغط 1.5bar. أحسب التغير في الطاقة الداخلية والتغير في المحتوى الحراري لكل kg من البخار. وُجِد أنَّ الحرارة المكتسبة أثناء الإجراء تكون مساوية لـ574kj/kg، أحسب الشغل المبذول لكل kg من البخار.

الحل:

يتم توضيح الإجراء في الشكل (2.6). تكون درجة حرارة التشبع المناظرة لـ 7bar هي 165°C. عليه فإنَّ البخار يكون محمصاً عند الحالة 2. الطاقة الداخلية عند الحالة 1 يتم إيجادها من المعادلة،

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

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

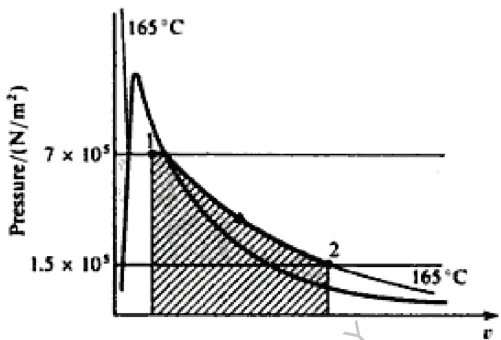
بالاستكمال من جداول التحميص عند 1.5bar و 165°C، نحصل على،

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

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

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

$= \underline{217.5}$ kj/kg



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

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

$$\therefore h_1 = 697 + 1860.3 = \underline{25573}\,kj/kg$$

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

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

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

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

من معادلة اللاسريان (1.2)،

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

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

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

(الشغل المبذول يُعطي أيضاً بالمعادلة من الشكل (2.6)، $W = \int_{v_1}^{v_2} p\ dv$ ؛ 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 بعلاقات p، v، و T، و الطاقة الداخلية u سنحصل على،

$$p\,v = R\,T$$

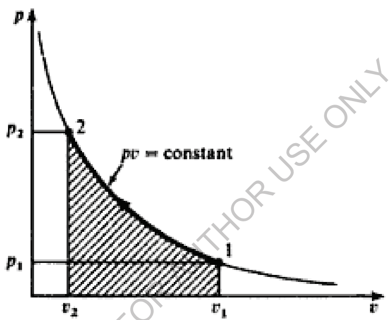
الآن عندما تكون درجة الحرارة ثابتة كما في إجراء ثابت درجة الحرارة بالتالي نحصل على

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

عليه لإجراء ثابت درجة الحرارة لغاز مثالي.

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

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



شكل (2.7) إجراء ثابت درجة الحرارة لغاز مثالي

في الشكل (2.7) يتم توضيح إجراء ثابت الحرارة لغاز مثالي على مخطط p – v. تكون المعادلة للإجراء هي pv = constant والتي هي معادلة قطع زائد.

يجب التأكيد بأنَّ الإجراء ثابت درجة الحرارة يكون فقط في الصورة p v = constant لغاز مثالي ، لأنه 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 إلي الحالة 2 بثبوت درجة الحرارة وبإنعكاسية ويُعطي بالمساحة المظلَّلة على الشكل (2.7).

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

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

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

الثابت C يمكن كتابته كـ p_1v_1 أو p_2v_2 بما أن $p_1v_1=p_2v_2 = constant$

$$\text{i.e. } W = p_1v_1 \log_e \frac{v_2}{v_1} \qquad (2.6)$$ لكل وحدة من كتلة الغاز

أو $W = p_2v_2 \log_e \frac{v_2}{v_1}$ لكل وحدة من كتلة الغاز

لكتلة، m، للغاز،

$$W = p_1v_1 \log_e \frac{v_2}{v_1} \qquad (2.7)$$

أيضاً بما أنَّ $p_1v_1 = p_2v_2$، بالتالي،

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

بالتالي بالتعويض في المعادلة (2.6)،

$$W = p_1v_1 \log_e \frac{p_1}{p_2} \qquad (2.8)$$ لكل وحدة من الغاز

أو لكتلة، m، من الغاز،

$$W = p_1V_1 \log_e \frac{p_1}{p_2} \qquad (2.9)$$

مستخدماً المعادلة،

$$p_1v_1 = RT$$

بالتالي بالتعويض في المعادلة (2.8)،

$$W = RT \log_e \frac{p_1}{p_2} \qquad (2.10)$$ لكل وحدة كتلة من الغاز

أو لكتلة، m، من الغاز،

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

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

لغاز مثالي من قانون جول،

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

بالتالي لإجراء ثابت درجة الحرارة لغاز مثالي، بما أنَّ $T_2 = T_1$، فإنَّ،

$$U_2 - U_1 = 0$$

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

من معادلة اللاسريان (1.2)،

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

بما أنَّ $u_2 = u_1$، فإنَّ،

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

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 يُلاحظ أنَّه، بالرغم من أنَّ الإجراء يكون ثابت درجة الحرارة، فإنَّ التغير في الطاقة الداخلية يكون مساوياً لـ 217.5 kj/kg، ولا تكون الحرارة المكتسبة مكافئة للشغل المبذول.

مثال (2.3):-

كتلة مقدارها 1kg من النيتروجين (كتلته الجزيئية 28kg/kmol) يتم إنضغاطه بإنعكاسية وبثبوت درجة الحرارة

مـن 1.01bar، 20°C إلـي 4.2bar. أحسـب الشـغل المبـذول وسـريان الحـرارة أثنـاء الإجـراء. إفتـرض أن النيتروجين يكون غازاً مثالياً.

الحل:-

للنيتروجين،

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

يكون الإجراء موضحاً على مخطط p – v كما في الشكل (2.8). لقد تمت الإشارة إلي أنَّ الإجراء يحدث من اليمين إلي اليسار على مخطط p – v بالتالي فإنَّ الشغل المبذول بواسطة المائع يكون سالباً. أي أن الشغل يكون مبذولاً على المائع.

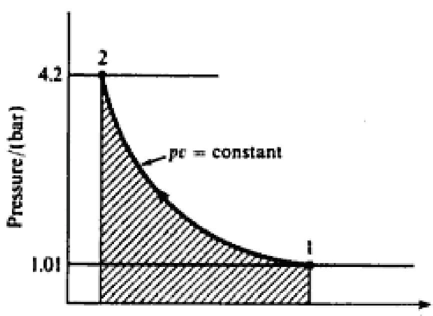
من المعادلة (2.10)،

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

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

(حيث $T = 20 + 273 = 293K$)

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



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

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

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

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

2.2 الإجراء اللاسرياني كاظم الحرارة الإنعكاسي:

(Reversible Adiabatic Non-Flow Process)

الإجراء كاظم الحرارة هو ذلك الإجراء الذي لا تنتقل فيه الحرارة إلي أو من المائع أثناء الإجراء. مثل هذا الإجراء يمكن أنَّ يكون إنعكاسياً أو لا إنعكاسياً. سيتم إعتبار الإجراء اللاسرياني كاظم الحرارة الإنعكاسي في هذا المقطع.

من معادلة اللاسريان (1.2)،

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

ولإجراء كاظم الحرارة، $\quad Q = 0$

عليه نحصل على،

(2.13) لأي إجراء كاظم للحرارة $\quad Q = u_2 - u_1$، لإجراء كاظم الحرارة

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

لبخار يؤدي إجراء كاظم للحرارة إنعكاسياً فإنَّ 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 القصور الحراري، s، سيتم توضيح أن إجراءاً كاظم للحرارة إنعكاسياً يحدث قصور حراري ثابت، وهذه الحقيقة يمكن أن تستخدم 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 تفاضلي. من المعادلة (2.2)،

$$d\,Q = du + dW$$

أيضاً لأجراء إنعكاسي dW=p dv، بالتالي لإجراء كاظم الحرارة،

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

بما أنَّ

$$h = u + pv$$

فإنَّ،

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

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

وبالتالي،

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

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،

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

$T = (pv)/R$ ، 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،

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

معوضاً في المعادلة (2.16)،

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

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

أيضاً $v = (RT)/p$؛ بالتالي بالتعويض في المعادلة (2.16)،

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

عليه ،

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

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

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

من المعادلة (2.17)،

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

من المعادلة (2.18)،

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

من المعادلة (2.13) فإنَّ الشغل المبذول في إجراء كاظم الحرارة لكل kg من الغاز يُعطي بـ $W = u_2 - u_1$.

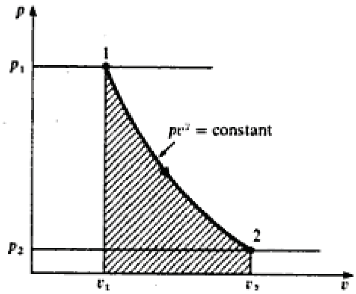
ويُعطي الكسب في الطاقة الداخلية لغاز مثالي بالمعادلة،

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

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

أيضاً،

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



شكل (2.9) إجراء إنعكاسي كاظم للحرارة لغاز مثالي

بالتالي بالتعويض،

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

مستخدماً المعادلة $pv = RT$،

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

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

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

عليه بما أنَّ $pv^{\gamma} = \text{constant}$، 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 كـ $p_1 v_1^{\gamma}$ أو كـ $p_2 v_2^{\gamma}$.

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 إنعكاسياً في أسطوانة معزولة جيِّداً حرارياً خلف كباس حتى يكون الضغط 38bar ويكون الغاز من بعد جافاً مشبعاً. أحسب الشغل المبذول بواسطة البخار.

الحل:

من جداول التحميص عند عند 100bar و 375°C،

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

مستخدماً المعادلة (1.7)،

$$u = h - pv$$

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

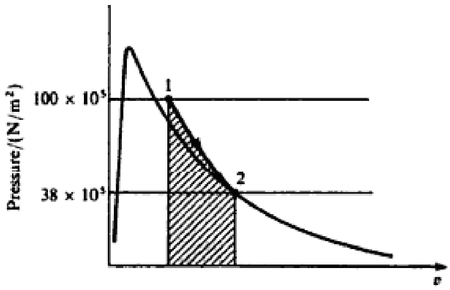
أيضاً، $u_2 = u_g \text{ at } 38bar = \underline{2602}\, kj/kg$

بما أنَّ الأسطوانة معزولة جيِّداً حرارياً بالتالي لا يكون هنالك سريان حرارة إلي أو من البخار أثناء التمدد، بالتالي يكون الإجراء كاظم الحرارة. مستخدماً المعادلة (2.13)،

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

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

يتم توضيح الإجراء على مخطط p – v كما في الشكل (2.10)، المساحة المظلَّلة تمثل الشغل المبذول.



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

مثال (2.5):

هواء عند ضغط 1.02bar، 22°C، يكون إبتدائياً محتلاً حجماً لأسطوانة مقداره $0.015m^3$، يتم إنضغاطه إنعكاسياً وبإجراء كاظم للحرارة بكباس إلي ضغط مقداره 6.8bar. أحسب درجة الحرارة النهائية، الحجم النهائي، والشغل المبذول على كتلة الهواء في الأسطوانة.

الحل:

من المعادلة (2.21)،

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

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

(حيث $T_2 = 22 + 273 = 295K$، γ للهواء = 1.4)،

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

من المعادلة (2.19)،

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

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

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

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

من المعادلة (2.13) لإجراء كاظم الحرارة،

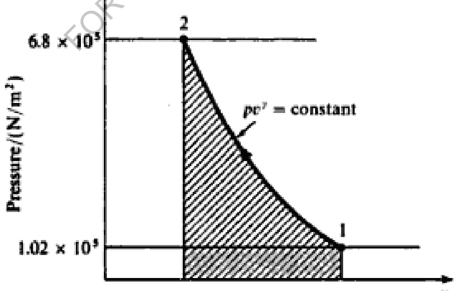
$$W = u_1 - u_2$$

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

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

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

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



شكل (2.11) إجراء إنعكاسي كاظم للحرارة لهواء على مخطط p – v.

كتلة الهواء يمكن إيجادها بإستخدام المعادلة $pv = m\,RT$،

$$\therefore m = \frac{p_1 v_1}{RT_1} = \frac{1.02 \times 10^5 \times 0.015}{0.287 \times 10^3 \times 295} = \underline{0.0181}\ kg$$

i.e. الشغل المبذول الكلي $= 0.0181 \times 152.8 = \underline{2.76}\,\text{kj}$

يتم توضيح الإجراء على مخطط $p - v$ في الشكل (2.11)، تمثل المساحة المظلَّلة 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 تُطيع بتقارب 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.

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

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

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

(بما أنَّ الثابت، c، يمكن كتابته كـ $p_1 v_1^n$ أو كـ $p_2 v_2^n$).

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

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

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

مثال (2.6):

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

الحل:

عند 7bar، $v_g = 0.2728 m^3/kg$

عليه باستخدام المعادلة،

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

بالتالي من المعادلة (2.25)،

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

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

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

من المعادلة (2.24)،

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

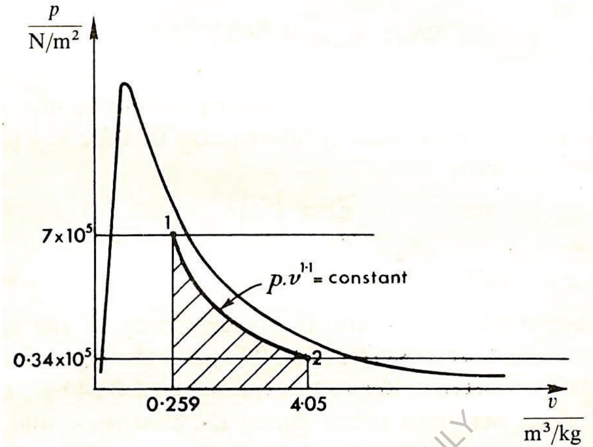
$$\text{i.e.} \quad W = \frac{10^5}{0.1}(1.813 - 1.377) = \frac{10^5 \times 0.436}{0.1}\ N.m/kg$$

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

عند 0.34bar، $v_g = 4.6499 m^3/kg$،

عليه يكون البخار رطباً عند الحالة 2،

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



شكل (2.12)

يتم توضيح التمدد على مخطط p – v كما في الشكل (2.12)، المساحة المظلَّلة تحت 2−1 تُمثل الشغل المبذول لكل kg من البخار.

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

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

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

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

من معادلة طاقة اللاسريان (1.2)،

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

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

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

إعتبر الآن إجراء الإنتحاء لغاز مثالي،

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

بالتالي في المعادلة $pv^n = constant$، نحصل على،

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

أيضاً بكتابة $v = (RT)/p$، نحصل على،

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

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 بالأس n، مساوٍ لـ γ.

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

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

و

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

لاحظ أنَّ المعادلات (2.26)، (2.27)، (2.28)، و (2.29) لا تُطبَّق على بخار لا يؤدي إجراء إنتحائياً بما أنَّ خاصية معادلة $pv = RT$، التي تم إستخدامها في إشتقاق المعادلات، يتم تطبيقها فقط على غاز مثالي. لغاز مثالي يتمدد إنتحائياً، من الأكثر ملائمة في بعض الأحيان التعبير عن الشغل المبذول بدلالات درجات الحرارة عند الحالات الطرفية (end states).

من المعادلة (2.24) ، $W = (p_1 v_1 - p_2 v_2)/(n-1)$ ، بالتالي،

$p_1 v_1 = RT_1$ أو $p_2 v_2 = RT_2$. بالتالي،

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

أو لكتلة، m،

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

باستخدام معادلة طاقة اللاسريان (1.2)، يمكن إيجاد سريان الحرارة أثناء الإجراء،

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

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

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

بالتالي بالتعويض،

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

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

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

الآن من المعادلة، $W = (p_1v_1 - p_2v_2)/(n-1)$ لكل وحدة من الغاز،

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

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) أنَّه عندما يكون أس الإنتحاء n أقل من γ، في تمدد، بالتالي فإنَّ الطرف الأيمن للمعادلة يكون موجباً (.i.e يتم إمداد الحرارة أثناء الإجراء). عكس ذلك، عندما تكون n أكبر من γ في تمدد بالتالي فإنَّ الحرارة يتم فقدها

بالغاز. نفس الشئ، فإنَّ الشغل المبذول في إجراء إنضغاط يكون سالباً، عليه عندما تكون n أقل من γ في إنضغاط، فإنَّ الحرارة يجب إمدادها إلي الغاز أثناء الإجراء. لقد تمَّ التوضيح أنَّ لـ γ لجميع الغازات المثالية قيمة أكبر من وحدة.

مثال (2.7):

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

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

b/ عندما يكون الغاز أرجون (الكتلة الجزيئية 40kg/kmol)، الذي له c_p=0.520kj/kgK.

الحل:

من المعادلة (2.29)، لكل من الإيثان والأرجون،

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

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

(حيث $T_1 = 27 + 273 = 300K$).

$R = R_o/M$، عليه، للإيثان،

$$R = \frac{8.314}{30} = \underline{0.277}\,kj/kg$$

$$c_p - c_v = R$$

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

(حيث $c_p = 1.75$kj/kg للإيثان).

بالتالي،

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

من المعادلة (2.30)،

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

بالتالي من المعادلة (3.32)،

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

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

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

b/ بإستخدام نفس الأسلوب للأرجون نحصل على،

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

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

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

بالتالي الشغل المبذول يُعطي بـ،

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

بالتالي،

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

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

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

فـي إجـراء متعـدد الإنتحـاء فـإنَّ الأس n يعتمـد فقـط علـى كميـات الحـرارة والشـغل أثنـاء الإجـراء . الإجـراءات المتنوعة التي يتم إعتبارها في المقاطع (2.1) و (2.2) هي حالات خاصة للإجراء متعدد الإنتحاء لغاز مثالي.

كمثال،

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

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

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

(بما أنَّ $pv/T = constant$ لغاز مثالي).

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

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

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

الحالة 1 إلي الحالة B هي إنضغاط ثابت درجة الحرارة ($n = 1$)؛

الحالة 1 إلي C هي إنضغاط كاظم الحرارة إنعكاسي ($n = \gamma$)؛

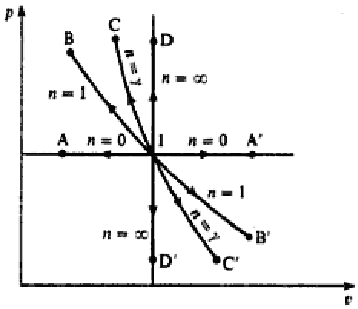
الحالة 1 إلي D هي تسخين ثابت الحجم ($n = \infty$؛

نفس الشئ، 1 إلي 'A هي تسخين ثابت الضغط؛ 1 إلي 'B هي تمدد ثابت الحرارة؛ 1 إلي 'C هي تمدد كاظم الحرارة إنعكاسي؛ 1 إلي 'D هي تبريد ثابت الحجم. لاحظ أنَّه، بما أنَّ γ تكون دائماً أكبر من وحدة، بالتالي فإن الإجراء 1 إلي C يجب أن يقع بين الإجراءات 1 إلي B و 1 إلي D؛ نفس الشئ، فإنَّ الإجراء 1 إلي 'C يجب أن يقع بين 1 إلي 'B و 1 إلي 'D.

لبخار فإنَّ تعميماً مثل عاليه لا يكون ممكناً.

هنالك إجراءاً واحداً هاماً لبخار يجب ذكره هنا. البخار يمكن أن يؤدي إجراءاً طبقاً لقانون $pv=constant$. في هذه الحالة، بما أنَّ معادلة الخاصية $pv = RT$، لا يتم تطبيقها إلي بخار، فإنَّ الإجراء لا يكون ثابت درجة

الحرارة. يجب إستخدام جداول لإيجاد الخواص عند الحالات الطرفية، بالإستفادة من الحقيقة التي تقول أنَّ $p_1v_1 = p_2v_2$.



شكل (2.13) إجراءات متعددة الإنتحاء عامة مرسومة على مخطط p – v

مثال (2.8):

في أسطوانة محرك بخار يتمّدد البخار من 5.5bar إلي 0.75bar طبقاً لقانون قطع زائد pv=constant. إذا كان البخار إبتدائياً جافاً مشبعاً، أحسب الشغل المبذول لكل kg من البخار، وسريان الحرارة إلي أو من جدران الأسطوانة.

الحل:

عند 5.5bar،

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

بالتالي،

$$p_1v_1 = p_2v_2$$

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

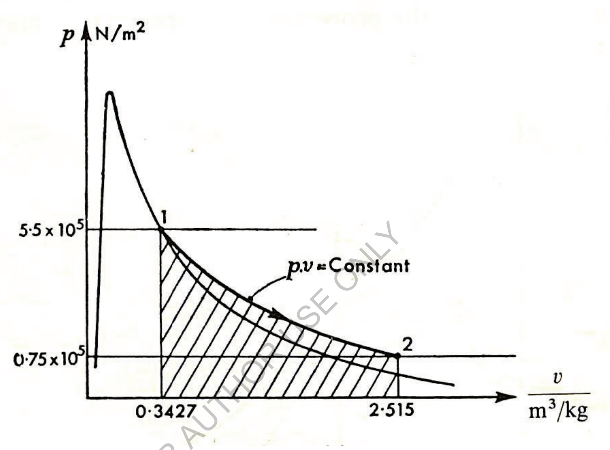
عند 0.75bar، $v_g = \underline{2.217}\ m^3/kg$، بالتالي يكون البخار محمصاً عند الحالة 2.

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)

لبخار مشبَّع عند ضغط 5.5bar،

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

بالتالي،

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

يتم توضيح الإجراء على مخطط p – v كما في الشكل (2.14)، حيث أنَّ المساحة المظلَّلة تُمثل 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_1v_1 أو p_2v_2،

$$\text{i.e. } W = 5.5\times10^5 \times 0.3427 \times \log_e \frac{v_2}{v_1} = 5.5\times10^5 \times 0.3427 \times \log_e \frac{p_1}{p_2}$$

$$\therefore W = 5.5\times10^5 \times 0.3427 \times \log_e \frac{5.5}{0.75} = \underline{375{,}500} \text{ N.m/kg}$$

من معادلة طاقة اللاسريان، (1.2)،

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

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

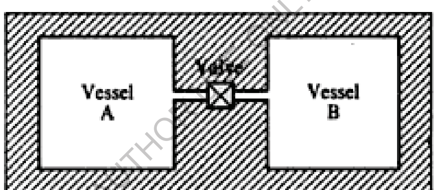
2.4 الإجراءات اللاإنعكاسية: (Irreversible Processes)

يمكن استخدام معادلات المقاطع 2.1، 2.2و 2.3 فقط عندما يطيع الإجراء أحكاماً معينة بتقريب جيد. في إجراءات يكون فيها المائع محاطاً بأسطوانة خلف كباس، يمكن إفتراض أنَّ تأثيرات الإحتكاك يتم تجاهلها. على أي حال، لكي يتم تحقيق أحكام الإنعكاسية يجب أن لا يكون هنالك إنتقال للحرارة إلي أو من النظام خلال فرق درجة حرارة محدد (كبير). فقط يمكن تخيل هذا في إجراء ثابت درجة الحرارة، بما أنَّه في جميع الإجراءات الأخرى تكون درجة حرارة النظام متغيرة بإستمرار أثناء الإجراء؛ لكي يتم تحقيق أحكام الإنعكاسية فإنَّ درجة حرارة وسيط التبريد أو التسخين خارج النظام سيتطلب تغييرها تبعاً لذلك. مثالياً يمكن تخيل طريقة ما لتحقيق الإنعكاسية، لكن في الواقع العملي لا يمكن حتى قبولها كتقريب. بالرغم من ذلك، إذا قبلنا بلاإنعكاسية مؤكدة في البيئة المحيطة تؤدي تغييراً لا إنعكاسياً . معظم الإجراءات التي تحدث في أسطوانة خلف كباس يمكن إفتراض أنها تكون إنعكاسية داخلياً كتقريب جيّد، ويمكن إستخدام المعادلات للمقاطع 2.1، 2.2، 2.3 حيثما يمكن تطبيقها. بعض الإجراءات لا يمكن إفتراض أنها إنعكاسية داخلياً، وسيتم الآن بإختصار مناقشة الحالات الهامة.

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

لقد تم ذكر هذا الإجراء مسبقاً ولكي يتم توضيح أنَّه في أيَّ إجراءاً لا إنعكاسياً فإنَّ الشغل المبذول لا يُعطي بالمعادلة $W = \int p\,dv$. إعتبر وعاءان A و B، يتم توصيلهما بينياً بماسورة قصيرة بصمَّام X، وعزلهما حرارياً بمثالية (أنظر الشكل (2.15)). إبتدائياً إجعل الوعاء A يكون مملوءاً بمائع عند ضغط معين، وإجعل B يكون مفرغاً كليَّاً . عندما يتم فتح الصمام X فإنَّ 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 إنعاكسياً، بما أن شغلاً خارجياً يجب أداءه لإرجاع المائع إلي حالته الإبتدائية.

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



شكل (2.15) وعاءان معزولان جيِّداً وموصلان بينياً

الآن في هذا الإجراء لا يكون هنالك شغلاً مبذولاً على أو بالمائع، بما أن حد النظام لا يتحرك لا يكون هنالك إنسياب حرارة إلي أو من المائع بما أنَّ النظام معزول جيَّداً بالتالي فإنَّ الإجراء يكون كاظم للحرارة، لكن لا إنعكاسياً.

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

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

لغاز مثالي، من المعادلة،

$$u = c_v T$$

عليه لتمدَّد حر لغازاً مثالياً،

$$c_v T_1 = c_v T_2$$

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

عليه لغاز مثالي يؤدي تمدداً حراً، فإنَّ درجة الحرارة الإبتدائية تكون مكافئة لدرجة الحرارة النهائية.

مثال (2.9):

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

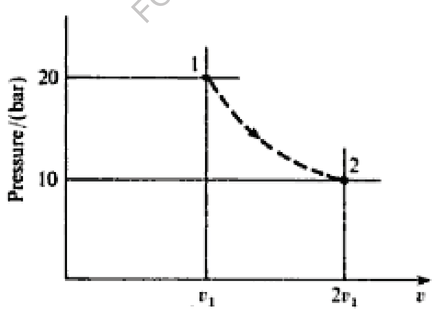
الحل:

لغاز مثالي بتمدَّد حر $T_1 = T_2$. أيضاً من المعادلة، $pv = m\,RT$،

بالتالي، $p_1v_1 = p_2v_2$.

الآن فإنَّ الحجم V_2 هو الحجم المتحد للوعاءان A وB،

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



شكل (2.16) إجراء لا إنعكاسي على مخطَّط 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 $= \underline{10}$ bar

يتم توضيح الإجراء على مخطَّط $p - v$ في الشكل (2.16). يتم تثبيت الحالة 1 عند 20bar و $1m^3$ بمعلومية كتلة الغاز؛ يتم تثبيت الحالة 2 عند 10bar و $2m^3$ لنفس كتلة 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 تسميته إجراء ثابت درجة الحرارة، بما أنَّ درجات الحرارة الوسطية لا تكون هي نفسها خلال الإجراء. لا يكون هنالك شغلاً مبذولاً خلال الإجراء، ولا تُمثل المساحة المظلَّلة تحت الخط المتقطع الشغل المبذول.

2. الخنق: (Throttling)

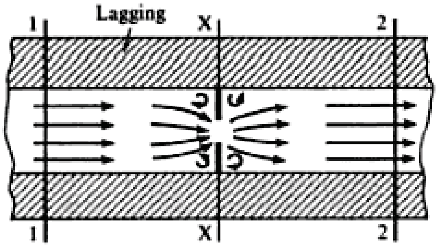
يُوصف سريان المائع بالمنخنق عندما يكون هنالك بعض التقييد للسريان، عندما تكون السرعات قبل وبعد التقييد إما متساويتان أو صغيرتان بحيث يمكن تجاهلهما، وعندما يكون هنالك فقد حرارة إلي البيئة المحيطة يمكن تجاهله. التقييد للسريان يمكن أن يكون فتح جزئي لصمام، ثقب، أو أي خفض مفاجئ آخر في مساحة المقطع العرضي للسريان.

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

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

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

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



شكل (2.17) إجراء الخنق

عندما تكون السرعتان c_1 و c_2 صغيرتان، أو عندما تكون c_1 تقريباً مساوية لـ c_2، بالتالي 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).

بالتالي، $h_1 = h_2$

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

لغاز مثالي $h = c_pT$، عليه،

$$c_pT_1 = c_pT_2 \text{ أو } T_1 = T_2$$

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

مثال (2.10):

بخار عند 19bar يتم خنقه إلي 1bar ووُجد أن درجة الحرارة بعد الخنق تساوي 150°C. أحسب كسر الجفاف الإبتدائي للبخار.

الحل:

من جداول التحميص 1bar و150°C نحصل على $h_2 = 2777kj/kg$. بالتالي للخنق،

$h_1 = h_2 = 2777$ kj/kg

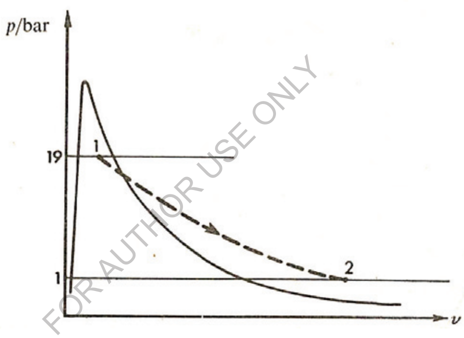
مستخدماً المعادلة،

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

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

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

i.e. كسر الجفاف الإبتدائي =0.989



شكل (2.18)

يتم توضيح الإجراء على مخطط p – v في الشكل (2.18). يتم تثبيت الحالات 1 و2، لكن لا يتم تحديد الحالات الوسطية، يجب رسم الإجراء متقطعاً كما موضح. لا يكون هنالك شغلاً مبذولاً خلال الإجراء، والمساحة تحت الخط 2 – 1 لا تكون مساوية للشغل المبذول. لبخار يمكن استخدام الخنق كوسيلة لإيجاد كسر الجفاف للبخار الرطب، كما في المثال (2.10).

3. الخلطة الإديباتية: (Adiabatic Mixing)

خلط جدولين من مائع يكون عادياً إلي حد بعيد في التطبيقات الهندسية، وعادة يمكن إفتراض حدوثه أديباتياً (كاظم للحرارة). إعتبر جدولين من خليط لمائع كما موضح في الشكل (2.19). إجعل للجدولين

معادلات إنسياب كتلة $\dot{m}_1$ و $\dot{m}_2$، ودرجات حرارة T_1 وT_2. إجعل للجدول المخلوط الناتج درجة حرارة T_3. لا يكون هنالك سريان حرارة إلي أو من المائع، ولا يكون هنالك شغلاً مبذولاً، بالتالي من معادلة السريان، وبتجاهل التغييرات في طاقة الحركة نحصل على،

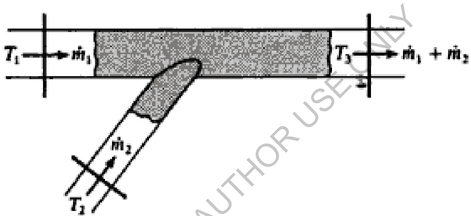
$$H_1 + H_2 = H_3 \text{ و } \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_3 \qquad (2.33)$$

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

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

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

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 اللاإنعكاسية في الواقع العملي، من الملائم في بعض الأحيان إفتراض أنَّ إجراء السريان يكون إنعكاسياً وذلك لكي يتم إعطاء مقارنة مثالية. المُشاهد المتنقل مع سريان المائع سيلاحظ تغيراً في الخواص الديناميكية الحرارية كما في حالة إجراء اللاسريان. كمثال في إجراء كاظم الحرارة إنعكاسي لغاز مثالي، فإنَّ المشاهد المتنقل مع الغاز سيلاحظ حدوث الإجراء $pv^{\gamma} = \text{const.}$، لكن الشغل المبذول بالغاز سوف يُعطي بالمعادلة $\int pdv$، أو بتغير 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 أنَّ $Q = 0$،

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

أيضاً بما أنَّ الإجراء يتم إفتراضه إنعكاسياً وعليه ولغاز مثالي $pv^\gamma = const.$.

هذه المعادلة يمكن استخدامها لتثبيت الحالات الطرفية.

ملحوظة: حتى لو كانت عناصر الطاقات الحركية صغيرة بحيث يمكن تجاهلها، فإنَّ 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 (.i.e $W = (u_2 - u_1)$ كما في المعادلة (2.13)).

مثال (2.11):

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

الحل:

مستخدماً معادلة السريان ولإجراء كاظم الحرارة،

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

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

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

لإيجاد T_2 نستخدم المعادلة (2.21)،

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

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

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

.($T_1 = 650+273=923K$ خذ)

بالتالي بالتعويض،

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

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

لاحظ أنَّ تغير طاقة الحركة يكون صغيراً مقارنة بتغير المحتوي 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 هنالك الكثير من الحالات التي يكون فيها معدَّل سريان الكتلة العابر لحد نظام عند المدخل مساوٍ لمعدَّل سريان الكتلة عند المخرج. أيضاً، فإنَّ المعدَّل الذي يُبذل به الشغل على أو بالمائع، والمعدَّل الذي تنتقل به الحرارة إلي أو بالنظام لا يكونا ثابتان مع الزمن. في مثل هذه الحالة فإنَّ الطاقة الكلية لا تبقي 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. أثناء فترة زمنية صغيرة، إجعل الكتلة المدخلة للنظام δ_{m1}، وإجعل الكتلة المغادرة للنظام تكون δ_{m2}؛ إجعل الحرارة المنتقلة والشغل المبذول خلال نفس الزمن يكونا δQ و δW على الترتيب. إعتبر نظاماً مماثلاً للموضَّح في الشكل (1.2)، يتم أداء شغل عند المدخل والمخرج في إدخال وإخراج الكتلة عبر حدود النظام.

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

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

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

بالتالي، الطاقة الداخلة للنظام،

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

والطاقة المغادرة للنظام،

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

بتطبيق القانون الأول:

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

$$\begin{aligned}&\delta Q + \delta m_1\left(u_1 + c_1^2/2 + z_1 g + p_1 v_1\right)\\&\qquad - \delta W - \delta m_2\left(u_2 + c_2^2/2 + z_1 g + p_2 v_2\right) = \delta E\end{aligned}$$

خلال زمن كبير فإنَّ الحرارة المنتقلة الكلية تُعطي بـ $\sum \delta Q = Q$

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

إجعل الكتلة الإبتدائية خلال حدود النظام تكون مساوية لـ m'، والطاقة الداخلة الابتدائية تكون u' ، والكتلة عند نهاية الفترة الزمنية تكون m''، والطاقة الداخلية النهائية تكون u'،

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

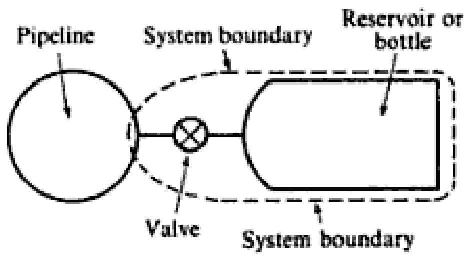
عليه نحصل على،

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

أيضاً من إجراء إستمرارية الكتلة،

الكتلة الداخلة – الكتلة المغادرة = زيادة الكتلة خلال حد النظام

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



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 الملء. في هذه الحالة لا يكون هنالك شغلاً مبذولاً على حد النظام؛ أيضاً لا تكون هنالك كتلة مغادرة للنظام أثناء الإجراء، بالتالي، $\delta m_2 = 0$.

بتطبيق المعادلة (2.35)، وبعمل إفتراض إضافي أن التغييرات في طاقة الوضع تكون صغيرة، وأنَّ طاقة الحركة $c_1^2 / 2$، تكون صغيرة بالمقارنة مع المحتوي 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 ،

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

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

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

أو بالكلمات: المحتوي الحراري للكتلة الذي يدخل إلي الزجاجة = زيادة الطاقة الداخلية للنظام.

مثال (2.12):

وعاء صلد (غير مرن) بحجم $10m^3$ يحوى بخاراً عند ضغط 2.1bar وكسر جفاف 0.9، يتم توصيله إلي خط أنابيب ويُسمح بالسريان من خط المواسير إلي الوعاء حتى يكون الضغط ودرجة الحرارة في الوعاء مساوٍ لـ 6bar و 200°C على الترتيب. يكون البخار في خط المواسير عند 10bar و 250°C طوال الإجراء. أحسب إنتقال الحرارة إلي أو من الوعاء أثناء الإجراء.

الحل:

كسر الجفاف = كتلة البخار في 1kg من الخليط.

بإستخدام الترميز الذي تم تقديمه سابقاً نحصل على،

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

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

أيضاً،

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

أخيراً يتم تحميص البخار عند 6bar و 200°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 10bar و 250°C، بالتالي،

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

بالتالي مستخدماً المعادلة (72.3)،

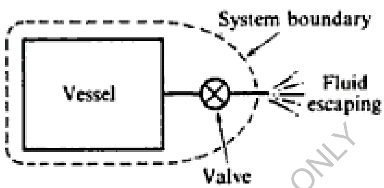
$$Q + 2944(28.4 - 13.3) = (28.4 \times 2640) - (13.3 \times 2329)$$

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

i.e. الحرارة المطرودة من الوعاء = <u>550</u> kj

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

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



شكل (2.21) تفريغ مائع من وعاء

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

مثال (2.13):

مُستقبل هواء بحجم $6m^3$ يحوي هواءاً عند 15bar و 40.5°C. يتم فتح صمَّام ويُسمح لبعض الهواء بالخروج إلي الجو. يهبط ضغط الهواء في المُستقبِل بسرعة إلي 12barعندها يتم غلق الصمَّام. أحسب كتلة الهواء الخارجة من المُستقبِل.

الحل:

إبتداءاً،

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

مفترضاً أنَّ الكتلة في المُستقبِل تؤدي إجراءاً كاظم للحرارة إنعكاسياً، بالتالي مستخدماً المعادلة (2.21)،

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

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

بالتالي،

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

عليه،

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

في حالة بخار يؤدي تمدَّداً كاظم للحرارة إنعكاسياً لا تكون هنالك معادلة صحيحة مثل المعادلة (2.21) المستخدمة عاليه. من الضروري الإستفادة من خاصية القصور الحراري (entropy)، s، التي يمكن التوضيح بأنَّها تبقي 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 بترول ذو نسبة إنضغاط مقدارها 8/1، يكون حجم الخلوص محتلاً بمتبقي غاز عند درجة حرارة 840°C وضغط 1.013bar . حجم الخليط أثناء الشوط ، مقاساً عند أحوال جوية 1.013bar و15°C، يكون مساوياً لـ 0.75 من الحجم المكتسح للأسطوانة.

يكون الضغط ودرجة الحرارة المتوسطان في مجمع السحب (induction manifold) أثناء السحب مساويان 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 إجراءاً كاظماً للحرارة. أحسب أيضاً الضغط النهائي في الأسطوانة.

للخليط خذ $c_v = 0.718$ kjk و $R = 0.2871$ kj/kgK ؛ ولمتبقي الغاز خذ $c_v = 0.84$ kj/kgK و $R = 0.296$ kj/kgK

الحل:

إجعل الحجم المكتسح يكون V_s وحجم الخلوص يكون V_c، بالتالي،

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

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

إبتدائياً فإنَّ متبقي الغاز يحتل الحجم ، $V_c = V_s/7$

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

(حيث $T' = 840 + 273 = 1113K$).

أيضاً مستخدماً المعادلة (2.36) ،

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

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

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

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

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

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

أيضاً، فإنَّ درجة حرارة الخليط في مجمع السحب تكون ثابتة طول الشوط، .i.e $h_1=c_pT_1=constant$.

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

الشغل المبذول يُعطي بـ،

الحجم المكتسح × متوسط الضغط في الأسطوانة أثناء السحب = W

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

i.e.

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

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

(حيث للخليط المسحوب ، $c_p = c_v + R = 0.718 + 0.2871 = 1.0051$ kj/kgK).

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

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

بالتالي،

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

i.e الضغط النهائي = 0.827bar

2.7 مسائل: (Problems)

1/ كتلة مقدارها 1kg من هواء موجود في حاوية صلدة تكون بداية عند 4.8bar و 150°C. يتم تسخين الحاوية حتى تكون درجة الحرارة مساوية لـ 200°C. أحسب الضغط النهائي للهواء والحرارة المكتسبة أثناء الإجراء.

Ans. (5.37 bar; 35.9 kj/kg)

2/ وعاء صلد بحجم $1m^3$ يحوى بخاراً عند 20bar و 400°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 جزئية 32kg/kmol) يتمدَّد بإنعكاسية في أسطوانة خلف كباس بضغط مقداره 3bar. يكون الحجم إبتدائياً مساوياً لـ $0.01m^3$ ونهائياً مساوياً لـ $0.03m^3$، تكون درجة الحرارة الإبتدائية مساوية لـ 17°C. أحسب الشغل المبذول بالأكسجين وسريان الحرارة إلي أو من جدران الأسطوانة أثناء التمدَّد. إفترض أن الأكسجين يكون غازاً مثالياً وخذ c_p=0.917 kj/kgK.

Ans. (6 kj; 21.16 kj)

4/ بخار عند ضغط 7bar، كسر جفاف 0.9، يتمدَّد بإنعكاسية بضغط ثابت حتى تكون درجة الحرارة مساوية لـ 200°C. أحسب الشغل المبذول والحرارة المكتسبة لكل kg من البخار أثناء الإجراء.

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

5/ حجم مقداره $0.05m^3$ من غاز مثالي عند 6.3bar يؤدي إجراءاً إنعكاسياً ثابت درجة الحرارة إلي ضغط 1.05bar. أحسب سريان الحرارة إلي أو من الغاز.

Ans. (56.4 kj)

6/ بخار جاف مشبع عند ضغط 7bar يتمدَّد بإنعكاسية في أسطوانة خلف كباس حتى يكون الضغط مساوياً لـ 0.1bar. إذا تم إمداد الحرارة بإستمرار 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 بإجراء ثابت درجة الحرارة وبإنعكاسية من 1bar إلي 5bar. أحسب الشغل المبذول على الهواء وسريان الحرارة إلي 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 إلي 4bar. أحسب درجة الحرارة النهائية والشغل المبذول على الهواء.

Ans. (155°C; 100.5 kj/kg)

9/ نايتروجين (بكتلة جزيئية 28 kg/kmol) يتمدَّد إنعكاسياً في أسطوانة معزولة جيّداً حرارياً من 3.5bar، 200°C إلي حجم مقداره $0.09m^3$. إذا كان الحجم الإبتدائي المحتمل مساوياً لـ $0.03m^3$، أحسب الشغل المبذول أثناء التمدَّد. إفترض أن النايتروجين يكون غازاً مثالياً و خذ $c_v = 0.741$ kj/kgK.

Ans. (9.31 kj)

الفصل الثالث

القانون الثاني للديناميكا الحرارية

(The Second Law of Thermodynamics)

في الفصل الأول تم توضيح أنَّه طبقاً للقانون الأول للديناميكا الحرارية، عندما يؤدي نظاماً دورة كاملة فإنَّ صافي الحرارة المكتسبة يكون مساوياً لصافى 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 إلي أنَّه، بالرغم من أنَّ صافى الحرارة المكتسبة في دورة يكون مساوياً لصافى الشغل المبذول، فإنَّ إجمالي الحرارة المكتسبة يجب أن يكون أكبر من صافى الشغل المبذول، وذلك لأنَّ بعض الحرارة يتم فقدها دائماً من النظام.

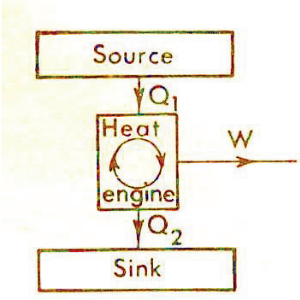
3.1 المحرك أو الآلة الحرارية: (The Heat Engine)

المحرك الحراري هو نظام يعمل في دورة كاملة وينتج صافى 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،

صافى الحرارة المكتسبة = صافي الشغل المبذول

بالتالي من المعادلة (1.1)،

$$\sum dQ = \sum dW$$



شكل (3.1)

بالرجوع للشكل (3.1)،

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

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

$$Q_1 > W$$

يتم تعريف الكفاءة الحرارية (thermal efficiency) لمحرك حراري كنسبة صافى الشغل المبذول في الدورة إلي إجمالي الحرارة المكتسبة في الدورة. ومن المعتاد التعبير عنها كنسبة مئوية. بالرجوع للشكل (3.1)،

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

بالتعويض في المعادلة (3.1)،

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

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

من تعريف الحرارة، فإنَّ فرقاً في درجة الحرارة يكون ضرورياً لسريان الحرارة. يتبع ذلك أنَّ 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.

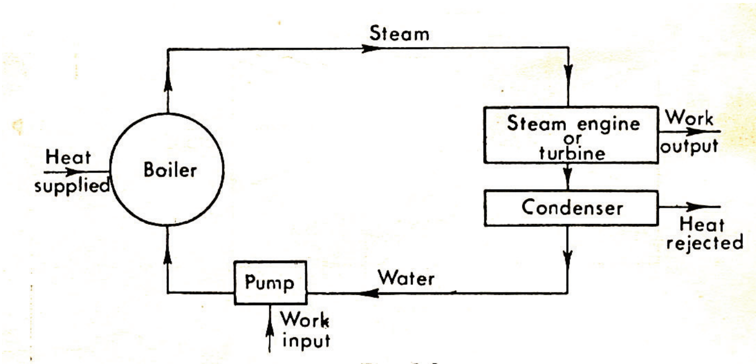
هذا يقود لبيان القانون الثاني كالآتي:

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

التقييد 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 إلي أنَّ الطاقة الداخلية للبحر لا يمكن تحويلها إلي شغل ميكانيكي بأسلوب مستمر. يُمثل البحر مقداراً ضخماً للطاقة بملايين 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 ذُكر عاليه، يُلاحظ أنَّ مستودعاً ثابتاً للطاقة عند درجة حرارة أدني يكون أساسياً قبل أن يمكن إنتاج شغل.

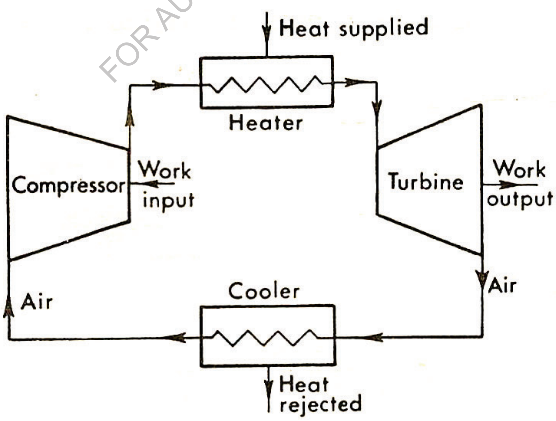
إحدى الأمثلة العملية لمحرك حراري هو دورة البخار البسيطة. لقد تم إستخدام هذا الدورة مسبقاً لشرح القانون الأول.

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



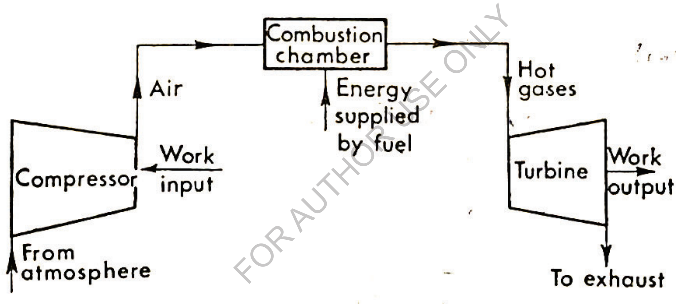
شكل (3.2)

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 إلي الهواء بالغازات الساخنة في مبادل حراري، يتم إنتاج شغل بواسطة التوربينة. يتم فقد الحرارة لماء التبريد في مبرِّد، ويتم بذل شغل على الهواء في ضاغط. المستودع الساخن هو الغاز الساخن الدائر حول الهواء في المبادل الحراري؛ المستودع البارد هو ماء التبريد الدائر في المبرِّد.



شكل (3.3)

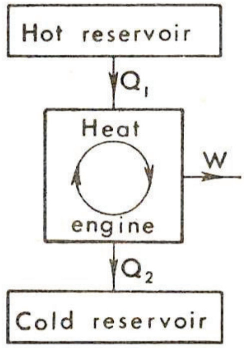
في محطة توربينة غاز مفتوحة الدورة يتم إمداد الطاقة برش الوقود في جدول من الهواء في غرفة إحتراق؛ تتمدَّد الغازات الناتجة في التوربينة ومن بعد تُخرج إلي الجو، (أنظر الشكل(3.4)). لا تكون هذه الدورة هي دورة محرك حرارة طبقاً للتعريف المُعطى، بما أنَّ النظام لا يسترجع لحالته الأصلية، وحقيقة يتعرض لتغيير كيميائي بالاحتراق. نفس الشئ في محرك إحتراق داخلي ترددي يتم خلط الهواء مع وقود ويُحرق في الأسطوانة، وتستنفد الغازات الناتجة بعد التمدَّد إلي 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 الطاقة المفقودة إذا تم تبريد العادم إلي أحوال المدخل ومن بعد إعادة تدويرها).



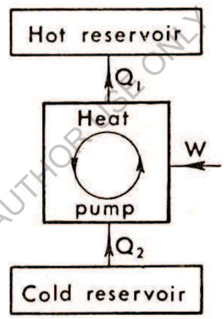
شكل (3.4)

يتم تطبيق القانون الأول والثاني لدورات تشتغل في الإتجاه المعكوس لتلك للمحرك الحراري. في حالة دورة معكوسة، فإنَّ صافي الشغل يُبذل على النظام ويساوي صافي الحرارة المفقودة بواسطة النظام. مثل هذه الدورات تحدث في مضخات الحرارة والثلاجات.

المخططات المكافئة لمحرك الحرارة ومضخة الحرارة (أو الثلاجة) يتم توضيحهما 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 إلي المستودع الساخن. بالقانون الأول نحصل على،

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

بالقانون الثاني يمكن القول بأنَّ شغل الدخل يكون أساساً لكي يكون هنالك إنتقال للحرارة من المستودع البارد إلي المستودع الساخن،

i.e. $W > 0$

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

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

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

من الملاحظ أنَّ الحرارة لا تسرى من جسم بارد إلي جسم ساخن؛ تتطلب الثلاجة مدخلاً للطاقة لكي تستخلص الحرارة من الغرفة الباردة وتطردها عند درجة حرارة أعلى.

عندما يتم إعتبار بيانا القانون الثاني، تبدو حقيقة هامة. بالرجوع للشكل ((3.5(a)) والبيان الأول للقانون الثاني يتضح أنَّ Q_2 لا يمكن أن تكون صفراً، بمعنى آخر، من المستحيل تحويل إمداد حرارة بالكامل إلي شغل ميكانيكي.

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

3.2 القصور الحراري: (Entropy)

وُجِد أن 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.

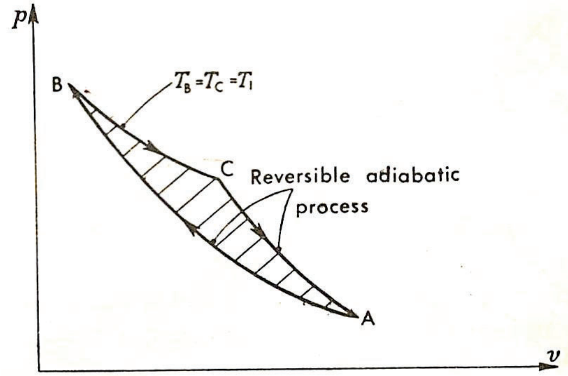
إعتبر إجراءاً كاظماً للحرارة إنعكاسياً لأي نظام على مخطط $p - v$. هذا يُمثل بالخط AB على الشكل (3.6). دعنا نفترض أنَّه من الممكن للنظام أن يؤدي إجراءاً ثابت للحرارة إنعكاسي عند درجة حرارة T_1 من B إلي C ومن بعد يتم إسترجاعه لحالته الأولى بإجراء ثانٍ كاظم للحرارة إنعكاسي من C إلي A. الآن بالتعريف فإنَّ الإجراء الكاظم للحرارة هو أحد الإجراءات التي لا يكون فيها سريان للحرارة إلي أو من النظام. بالتالي فإنَّ

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

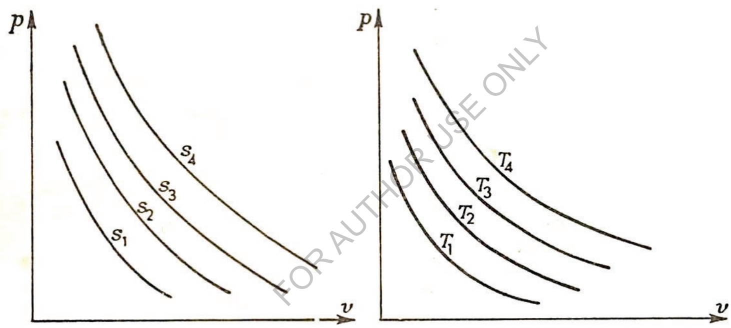
الآن، فإنَّ إحدى الخصائص (المميزات) لخاصية نظام هي أنَّه هنالك خطاً وحيداً يمثل قيمة للخاصية على مخطط الخواص. (كمثال، فإنَّ الخط BC على الشكل (3.6) يمثل ثابت الحرارة عند T_1). بالتالي يجب أن يكون هنالك خاصية تُمثَّل بإجراء كاظم للحرارة إنعكاسي. تسمي هذه الخاصية بالقصور الحراري، s.

يتبع ذلك أنَّه ليس هنالك تغييراً للقصور الحراري في إجراء كاظم للحرارة. على مخطط $p - v$ هنالك سلسلة من الإجراءات كاظمة للحرارة إنعكاسية كما موضح في الشكل 3.7(a) ، يكون كل خط ممثلاً لقيمة واحدة من القصور الحراري. هذه تكون مشابهة للشكل 3.7(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 إستخدام أسلوباً صارماً.

في المقطع 2.2 لقد تم توضيح إجراءاً كاظماً للحرارة إنعكاسياً لغاز مثالي يتبع القانون pv^γ=constant. الآن فإن القانون pv^γ = constant هو خطاً وحيداً على مخطط $p - v$، بحيث أن البرهان المُعطي في المقطع 2.2 لغاز مثالي هو برهان مشابه لذلك المُعطي عاليه (i.e. برهان أنَّ هنالك إجراءاً كاظماً للحرارة إنعكاسياً يحتل خطاً وحيداً على مخطط الخواص). البرهان المعطي عاليه يعتمد على القانون الثاني ولقد استخدم لتقديم القصور الحراري كخاصية. يتبع ذلك أن البرهان لـ pv^γ=constant في المقطع 2.2 يجب أن يتضمن حقيقة أنَّ القصور الحراري لا يتغير أثناء إجراءاً كاظماً للحرارة إنعكاسياً.



شكل (3.6) الدورة الإفتراضية على مخطط p – v.



(a) **(b)**

شكل (3.7) متسلسلة من خطوط ثابت القصور الحراري

وثابت درجة الحرارة على مخطط p – v

بالرجوع إلي البرهان في المقطع 2.2، بدءاً بمعادلة اللاسريان لإجراءاً إنعكاسياً،

$$dQ = du + pdv$$

ولغاز مثالي،

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

هذه المعادلة يمكن تكاملها بقسمة طرفي المعادلة على T،

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

أيضاً لإجراء كاظم للحرارة، $dQ = 0$،

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

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

يمكن توضيح أنَّ هذه النتيجة تنطبق على جميع المواد التشغيلية.

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

(حيث s هو القصور الحراري).

لاحظ بما أنَّ المعادلة (3.5) تكون لإجراءاً إنعكاسياً، فإنَّ dQ في المعادلة (3.6) هي الحرارة المضافة بإنعكاسية.

يكون التغير في القصور الحراري أكثر أهمية من قيمته المطلقة، ويمكن إختيار القصور الحراري الصفري على نحو إعتباطي. كمثال، في جداول البخار يُوضع القصور الحراري مساوياً لصفر عند 0.01°C؛ في جداول سوائل التبريد فإنَّ القصور الحراري يُوضع مساوياً لصفر عند −40°C.

بتكامل المعادلة (3.6) يُعطي،

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

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

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

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

بإعادة كتابة المعادلة (3.6) نحصل على،

$$dQ = T\ ds$$

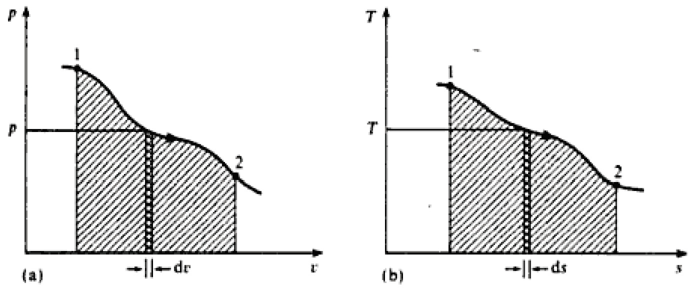
أو لأي إجراء إنعكاسي،

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

تكون هذه المعادلة مناظرة لأي إجراء إنعكاسي،

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

هكذا، كما يكون هنالك مخططاً يُمثَّل عليه المساحات كشغلاً مبذولاً في إجراءاً إنعكاسياً، يكون هنالك أيضاً مخططاً يُمثل عليه المساحات كسريان للحرارة في إجراء إنعكاسي. تكون هذه المخططات هي مخططات $p - v$ و $T - s$ على الترتيب، كما موضح في الأشكال 3.8(a) و 3.8(b). لإجراءاً إنعكاسياً 2 − 1 في الشكل 3.8(a)، فإنَّ المساحة المظلَّلة $W = \int_1^2 p\, dv$ ، تُمثل الشغل المبذول؛ ولإجراءاً إنعكاسياً 2 − 1 في الشكل3.8(b)، فإنَّ المساحة المظلَّلة $W = \int_1^2 T\ ds$ ، تُمثل سريان الحرارة. عليه فإنَّ إحدى الفوائد لخاصية القصور الحراري هي التمكين من رسم مخطط تكون عليه المساحات مُمثلة لسريان الحرارة في إجراء إنعكاسي.



شكل (3.8) المساحة تحت إجراء إنعكاسي على مخطط p – v
وعلى مخطط T – s

3.3 مخطط T – S: (The T – S Diagram)

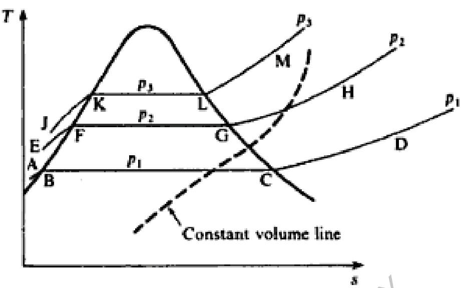
a/ لبخار: (For Vapor)

كما ذُكر سابقاً، فإنَّ الصفر للقصور الحراري يُؤخذ كـ 0.01°C لبخار و كـ 40°C- لسوائل التبريد. سيتم هنا فقط إعتبار مخطط T – S للبخار؛ ويكون المخطط لمواد التبريد مشابهاً بالضبط بإستثناء صفر القصور الحراري. يتم توضيح مخطط T – S للبخار في الشكل (3.9). يتم توضيح ثلاث خطوط ذات ضغط ثابت (p_1، p_2، و p_3).

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

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

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



شكل (3.9) مخطَّط T – s لبخار

لبخار رطب بكسر جفاف، x، نحصل على،

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

أو $s = s_f + x(s_g - s_f)$

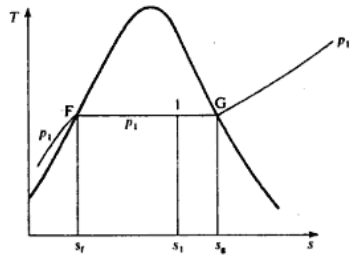
$$\text{i.e.} \quad s = s_f + xs_{fg} \qquad (3.10)$$

بالتالي، فإنَّ كسر الجفاف يُعطي بـ ،

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

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

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



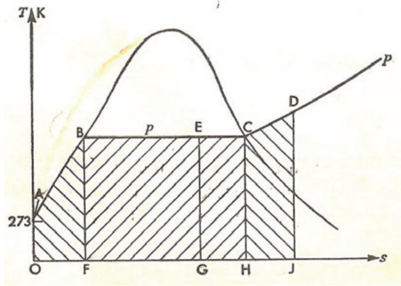
شكل (3.10) كسر الجفاف من المساحات على مخطَّط T – s

تُمثل المساحة تحت الخط FG الشكل (3.10) الحرارة الكامنة h_{fg} ، وتُعطى المساحة تحت الخط F1 بـ x_1h_{fg} .

المحتوى الحراري للبخار الرطب يُعطى بـ ،

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

يُمكِّن مخطط T – S من التعبير المخططي لهذه الحقيقة، بما أنَّ المساحات على المخطط تُمثل سريان الحرارة. بإفتراض أن خط الضغط في منطقة السائل يكون متطابقاً مع خط السائل المشبَّع، بالتالي يمكن تمثيل المحتوي الحراري على المخطط. بالرجوع للشكل (3.11)، عندما يكون هنالك ماءاً عند أي ضغط p ، و عند 0.01°C، يتم تسخينه بضغط ثابت فإنَّه 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 أنَّ h_A عند $0.01°C$ هو تقريباً صفر).

نحصل على،

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

عند النقطة B، إذا استمر التسخين فإنَّ الماء يتغير تدريجياً إلي بخار حتى عند C التي يكون عندها البخار بالضبط جافاً مشبعاً. عليه نحصل على،

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

بالتالي عند النقطة C، يُعطي المحتوي الحراري بـ

عند ضغط p و المساحة BCHFB + المساحة ABFOA = h_C

لبخار رطب عند النقطة E،

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

i.e. $\quad h_E$ = المساحة ABEGOA

عندما يتم التسخين إضافياً لبخار جاف مشبع يُصبح محمصاً.

يتم إعطاء الحرارة المُضافة من C إلي D بضغط ثابت p، بـ

$Q = h_D - h_C$ = المساحة CDJHC

بالتالي فإنَّ المحتوي الحراري عند D يكون،

$h_D = h_C$ + المساحة CDJHC = المساحة ABCDJOA

مثال (3.1):

1kg من بخار، عند 7bar وقصور حراري 6.5kj/kgK، يتم تسخينه إنعكاسياً عند ضغط ثابت حتى تكون درجة الحرارة مساوياً لـ 250°C. أحسب الحرارة المكتسبة، ووضِّح على مخطط T – S المساحة التي تُمثل سريان الحرارة.

عند 7bar s_g=6.709kj/kgK، بالتالي يكون البخار رطباً، بما أنَّ القصور الحراري الفعلي، s، يكون أقل من s_g.

الحل:

من المعادلة (3.11)،

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

بالتالي،

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

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

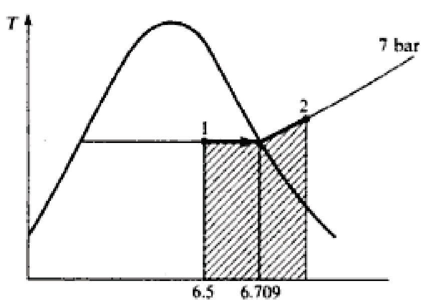
عنـد الحالـة 2 يكـون البخـار عنـد 250°C وعنـد 7bar، وعليـه يكـون محمَّصـاً. مـن جـداول التحمـيص

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

عند ضغط ثابت من المعادلة (2.3)،

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

يُعطي الإجراء على مخطَّط T – S في الشكل (3.12)، تُمثل المساحة المظلَّلة سريان الحرارة.



شكل (3.12) مخطَّط T – s

مثال (3.2):

أسطوانة صلدة بحجم $0.025m^3$ تحوى بخاراً عند 80bar و 350°C. يتم تبريد الأسطوانة حتى يكون الضغط مساوياً لـ 50bar. أحسب حالة البخار بعد التبريد ومقدار الحرارة المرفوضة بواسطة البخار. وضِّح الإجراء على مخطط T – S مشيراً للمساحة التي تُمثل سريان الحرارة

الحل:

البخار عند 80bar و 350°C يكون محمصاً، ويكون الحجم النوعي من الجداول مساوياً لـ $0.0299m^3/kg$.

بالتالي فإنَّ كتلة البخار في الأسطوانة تُعطي بـ ،

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

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

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

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

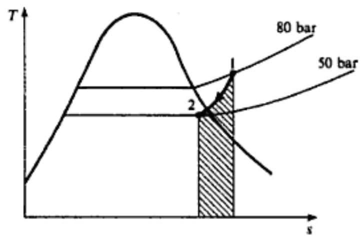
عند الحالة 2، $p_2 = 50bar$ و $v_2 = 0.02994m^3kg$ عليه يكون البخار رطباً، ويُعطي كسر الجفاف بالمعادلة،

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

من المعادلة،

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

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



شكل (3.13) مخطَّط $T - s$

بحجم ثابت من المعادلة (2.2)،

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

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

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

الشكل (3.13) يُوضح الإجراء مرسوماً على مخطط $T - s$، تُمثل المساحة المظلَّلة الحرارة المفقودة بالنظام.

b/ لغاز مثالي: (For a Perfect Gas)

من المفيد رسم خطوط الضغط الثابت والحجم الثابت على مخطَّط $T - s$ لغاز مثالي. بما أنَّ تغييرات القصور الحراري تكون ذات تطبيق مباشر أكثر من القيمة المطلقة، فيمكن إختبار القصور الحراري الصفري عند أي مرجعية إعتباطية 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 موضَّح. الآن بين 1 و A من المعادلة (3.7) نحصل على،

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

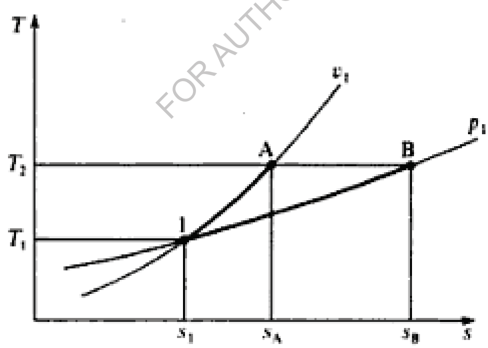
أيضاً لحجم ثابت لـ 1kg من الغاز من المعادلة $dQ = c_v\, dT$

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

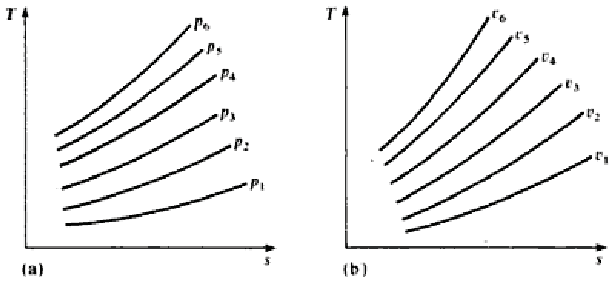
نفس الشئ، عند ضغط ثابت لـ 1kg من الغاز، $dQ = c_p\, dT$، بالتالي،

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

الآن بما أنَّ c_p تكون أكبر من c_v لأي غاز مثالي، بالتالي $s_B - s_1$ يكون أكبر من $s_A - s_1$. عليه يجب أن تقع النقطة A يسار النقطة B على المخطَّط، بالتالي فإنَّ خط ثابت الضغط يميل بقيمة أقل عن خط الحجم الثابت. يُوضح الشكل (3.15(a متسلسلة خطوط ضغط ثابت على مخطط T – S، ويُوضِّح الشكل (3.15(b متسلسلة خطوط حجم ثابت على مخطط T – S. لاحظ أنَّه 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 p – v



شكل (3.15) خطوط ثابت الضغط ثابت الحجم

مرسومة على مخطَّط T – S لغاز مثالي

مثال (3.3):

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

الحل:

يتم توضيح الإجراء على مخطَّط T – S كما في الشكل (3.16)،

لغاز مثالي،

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

(حيث $T_1 = 15+273=288K$).

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

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

عند حجم ثابت،

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

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

عند ضغط ثابت،

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

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

$\therefore$ صافي سريان الحرارة $= Q_{1-2} + Q_{2-3} = 15.75 - 22.05 = \underline{-6.3}\,kj$

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

بالرجوع للشكل (3.16)،

صافي النقصان في القصور الحراري $= s_1 + s_3 = (s_2 - s_3) - (s_2 - s_1)$

عند ضغط ثابت، $dQ = mc_p\,dT$، بالتالي، مستخدماً المعادلة (3.7)،

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

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

عند حجم ثابت، $dQ = mc_v\,dT$، بالتالي، بإستخدام المعادلة (3.7)،

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

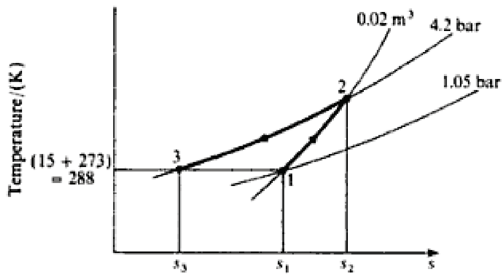
$$= \underline{0.0253}\,kj/K$$

عليه،

$$m(s_1 - s_3) = 0.0354 - 0.0253 = \underline{0.0101}\,kj/K$$

i.e. النقصان في القصور الحراري $= \underline{0.0101}\,kj/K$

لاحظ أنَّه بما أنَّ القصور الحراري هو عبارة عن خاصية، فإن النقصان في القصور الحراري في المثال (3.3)، المُعطى بـ (s_1-s_3)، يكون مستقلاً عن الإجراءات الخاضعة بين الحالات 1 و3. يمكن أيضاً إيجاد (s_1-s_3) بتخيل إجراءاً ثابتاً لدرجة الحرارة إنعكاسياً يحدث بين 1 و3.



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

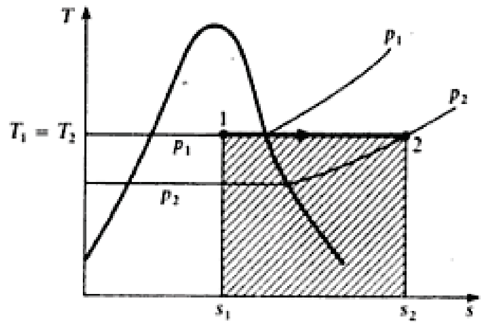
1. إجراء ثابت درجة الحرارة إنعكاسي: (Reversible Isothermal Process)

سيبدو الإجراء ثابت الحرارة الإنعكاسي كخط مستقيم على مخطط T – s، و تُمثل المساحة تحت الخط سريان الحرارة أثناء الإجراء. كمثال، فإن الشكل (3.17) يُوضح تمدُّد ثابت لدرجة الحرارة إنعكاسي لبخار رطب في منطقة التحميص. تُمثِّل المساحة المظلَّلة الحرارة المكتسبة أثناء الإجراء،

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

لاحظ أنَّه يجب إستخدام درجة الحرارة المطلقة. تكون درجة الحرارة المجدولة في جداول البخار هي t°C، ويجب تحويلها إلي TK.

عندما يتم إعتبار الإجراء ثابت درجة الحرارة لبخار في المقطع 2.1، لم يكن هنالك أسلوباً متاحاً لتقييم سريان الحرارة. يُمكِّن إدخال مخطط T – s من إيجاد سريان الحرارة، كما موضَّح في المثال التالي.



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

مثال (3.4):

بخار جاف مشبَّع عند 100bar يتمدَّد بثبات درجة الحرارة وبإنعكاسية إلي ضغط مقداره 10bar. أحسب الحرارة المكتسبة والشغل المبذول لكل kg من البخار أثناء الإجراء.

يتم توضيح الإجراء في الشكل (3.18)، حيث المساحة المظلَّلة تُمثل الحرارة المكتسبة.

الحل:

من الجداول عند 100bar، جاف مشبَّع،

$$s_1 = s_g = 5.615\ \mathrm{kj/kgK},\ T_1 = 311\,°\mathrm{C}$$

عند 10bar و311°C يكون البخار محمَّصاً، بالتالي بالإستكمال،

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

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

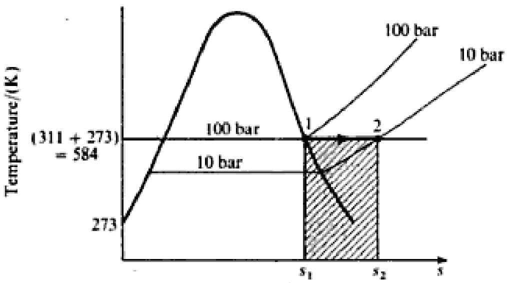
بالتالي نحصل على،

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

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

.(حيث $T = 311 + 273 = 584\ K$)

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



شكل (3.18) إجراء على مخطط T – s

لإيجاد الشغل المبذول من الضروري تطبيق معادلة طاقة اللاسريان،

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

من الجداول، عند 100bar، جاف مشبَّع،

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

عند 10bar و311°C، بالإستكمال،

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

$$\therefore u_2 = 2794 + 17.8 = \underline{2811.8}\ kj/kg$$

بالتالي،

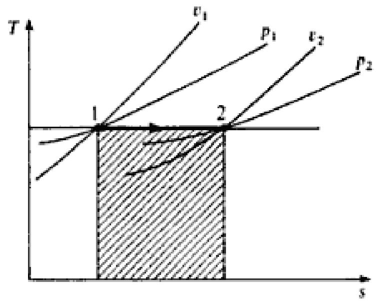
$$W = Q - (u_2 - u_1)$$

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

$$= 904 - 266.8$$

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

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 مخطَّط T − s في الشكل (3.19). تُمثل المساحة المظلَّلة الحرارة المكتسبة أثناء الإجراء،

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

لغاز مثالي مؤدياً إجراءاً ثابتاً درجة الحرارة من الممكن تقييم $s_2 - s_1$. من معادلة اللاسريان (1.4)، لإجراء إنعكاسياً، نحصل على،

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

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

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

$$dQ = p\,dv$$

بما أنَّ $pv = RT$، نحصل على،

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

الآن من المعادلة (3.7)،

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

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

عليه تُعطي 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 إشتقاقها في المقطع 2.1،

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

مثال (3.5):

$0.03m^3$ من نايتروجين (بكتلة جزيئية 28kg/kmol) محتوى في أسطوانة خلف كبَّاس، يكون إبتدائياً عند 1.05bar و 15°C. 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 $T - s$ في الأشكال 3.20(a) و 3.20(b) على الترتيب، تُمثل المساحات المظلَّلة على الشكل 3.20(a) شغل الدخل، بينما تُمثل المساحة المظلَّلة على الشكل 3.20(b) الحرارة المفقودة.

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

بالتالي بما أنَّ $pv = m\,RT$، نحصل على،

$$m = \frac{pv}{RT} = \frac{1.05\times10^5\times0.03}{297\times288} = \underline{0.03368}\ \text{kg}$$

(حيث $T = 15 + 273 = 288K$).

بالتالي من المعادلة (3.12)، لـ m kg،

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

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

∴ النقصان في القصور الحراري،

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

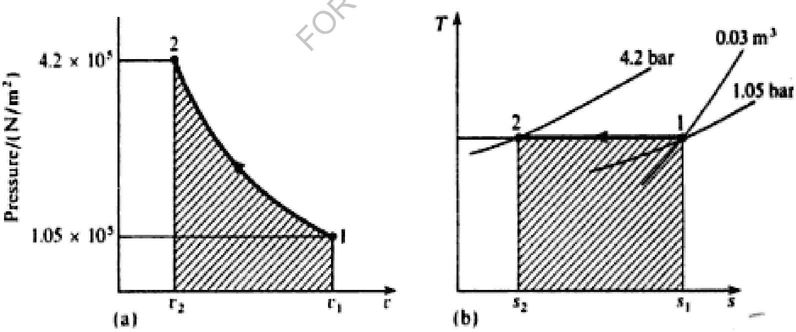
الحرارة المفقودة = المساحة المظلَّلة على الشكل 3.20(b) = $T(s_2 - s_1)$

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

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

$$W = Q = 4.37\ kj$$

i.e. شغل الدخل = 4.37 kj



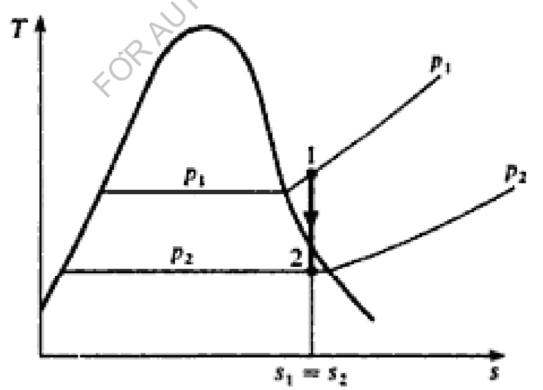
شكل (3.20) الإجراءات على مخطط p – v و T – s

2. إجراء كاظم للحرارة إنعكاسي (أو إجراء ثابت القصور الحراري):

(Reversible Adiabatic Process (or Isentropic Process))

لإجراء كاظم للحرارة إنعكاسي يبقي القصور الحراري ثابتاً، وبالتالي يُسمي ثابت القصور الحراري. لاحظ أنَّه لكي يكون الإجراء ثابت القصور الحراري فإنَّه لا يحتاج أن يكون كاظماً للحرارة أو إنعكاسياً، لكن سيبدو الإجراء دائماً كخط رأسي على مخطط T – s. الحالات التي لا يكون فيها الإجراء ثابت القصور الحراري كاظماً للحرارة أو إنعكاسياً تحدث قليلاً لذا سيتم تجاهلها طوال هذه المذكرات.

هنالك إجراءاً ثابتاً للقصور الحراري لبخار محمَّص يتمدَّد في المنطقة الرطبة يُوضِّح في الشكل (3.21). عندما تم إعتبار الإجراء الكاظم للحرارة إنعكاسي في المقطع 2.1، تم ذكر أنَّه ليس هناك أسلوباً متاحاً لتثبيت الحالات الطرفية. الآن بإستخدام حقيقة أن القصور الحراري يبقي ثابتاً، فإنَّ الحالات الطرفية يمكن إيجادها بسهولة من الجداول. هذه تُوضح في المثال التالي.



شكل (3.21) إجراء ثابت القصور الحراري على مخطَّط T – s

مثال (3.6):

بخار عند 100bar و 375°C يتمدَّد بثبوت القصور الحراري في أسطوانة خلف كبَّاس إلي ضغط مقداره 10bar. أحسب الشغل المبذول لكل kg من البخار.

الحل:

من جداول التحميص، عند 100bar و 375°C، نحصل على،

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

عند 10bar و $s_2 = 6.091$، فإنَّ البخار يكون رطباً، بالتالي، تكون s_2 أقل من s_{g2} . 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،

$$u_2 = (1 - x_2)u_{f2} + x_2 u_{g_2} = (0.111 \times 762) + (0.88 \times 2584)$$

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

عند ضغط 100bar، ودرجة حرارة 375°C، نحصل من الجداول، $h_1 = 3017$ kj/kg

و $v_1 = 3017 m^3/kg$. بالتالي بإستخدام المعادلة (1.7)،

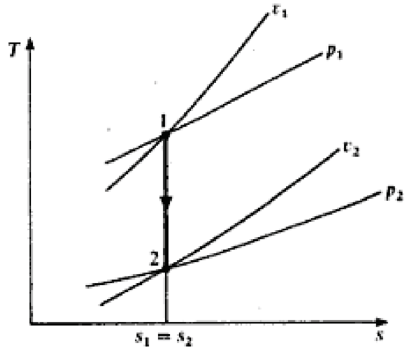
$$u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 3017 - \frac{100 \times 10^5 \times 0.02453}{10^3} = 3017 - 245.3$$

$$\text{i.e.} \quad u_1 = \underline{2771.7}\, kj/kg$$

لإجراء كاظم للحرارة من المعادلة (2.13)،

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

$$\therefore \quad \text{الشغل المبذول بالبخار} = 2771.7 - 2381.6 = 390.1\, kj/kg$$



شكل (3.22) إجراء ثابت القصور الحراري لغاز مثالي على مخطَّط T – s

يتم توضيح إجراءاً ثابتاً للقصور الحراري على مخطط T – s في الشكل (3.22) أعلاه. لقد تم التوضيح في المقطع 2.2 أنَّه لإجراء كاظم للحرارة إنعكاسي لغاز مثالي، بالتالي فإنَّ الإجراء يتبع القانون $pv^{\gamma} = const.$ بما أنَّ الإجراء كاظم الحرارة الإنعكاسي يحدث عند قصور حراري ثابت، ويُسمي بالإجراء ثابت القصور الحراري، فإنَّ الأس γ يُعرف بالأس ثابت القصور الحراري للغاز.

3. إجراء متعدِّد الإنتحاء: (Polytropic Process)

لإيجاد التغير في القصور الحراري في إجراءاً متعدِّد الإنتحاء لبخار يتم تثبيت الحالات الطرفية باستخدام $p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$، بالتالي فإنَّ 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 $pv^{1.1} = const.$، أسفل إلي ضغط مقداره 0.34bar. أحسب التغير في القصور الحراري لكل kg من البخار أثناء الإجراء.

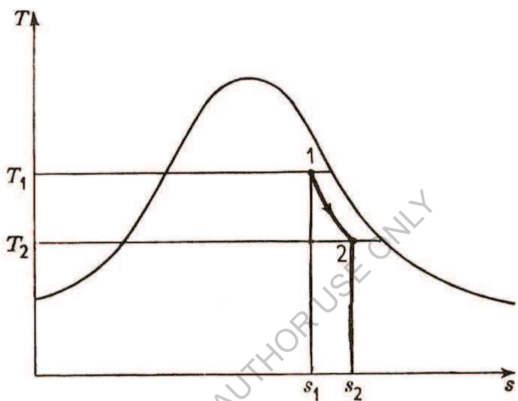
الحل:

(لاحظ أنَّ هذه البيانات هي بيانات المثال 2.6)

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

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

بالتالي من المعادلة (2.25)،



شكل (3.23)

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

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

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

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

بالتالي من المعادلة (3.10)،

$$s_1 = s_{f_1} + x_1 s_{fg_1} = 1.992 + 0.95 \times 4.717 = \underline{6.472}\ kj/kgK$$

$$s_2 = s_{f_2} + x_2\, s_{fg_2} = 0.98 + 0.876 \times 6.745 = 6.889 kj/kg\ K$$

$\therefore$ الزيادة في القصور الحراري $(s_2 - s_1) = 6.889 - 6.472 = \underline{0.417}\ \mathrm{kj/kgK}$

يكون الإجراء موضحاً على مخطط T – s 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 اللاسريان لإجراء إنعكاسي، في المعادلة (1.4)،

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

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

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

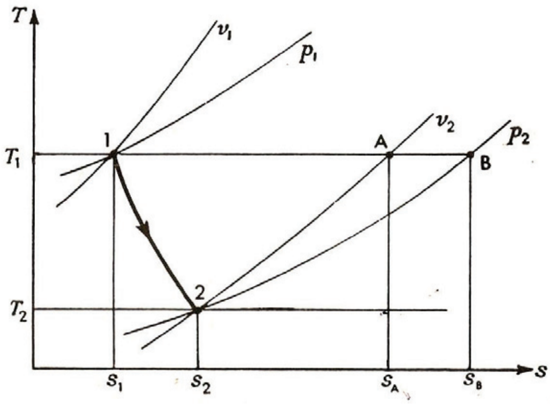
بالتالي من المعادلة (3.6)،

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

بالتالي بين أي حالتين 1 و2،

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

هذه يمكن توضيحها على مخطط T – s كما في شكل (3.24). بما أنَّه في الإجراء في شكل (3.24)، $T_2 > T_1$، بالتالي من الملائم أكثر كتابة،



شكل (3.24) إجراء متعدِّد الإنتحاء لغاز مثالي على مخطط T – s

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

الجزء الأول من التعبير لـ $s_2 - s_1$ في المعادلة (3.14) هو التغير في القصور الحراري في إجراء ثابت درجة الحرارة من v_1 إلي v_2،

من المعادلة (3.12) ،

$$s_A - s_1 = R\, log_e\ \frac{v_2}{v_1}$$

أيضاً الجزء الثاني من التعبير لـ $s_2 - s_1$ 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 أنَّه بحساب التغير في القصور الحراري في إجراء متعدِّد الإنتحاء من الحالة 1 إلي الحالة 2 نكون قد إستبدلنا الإجراء بإجرائين أبسط؛ من 1 إلي A ومن A إلي 2.

من الواضح من الشكل (3.24) أنَّ،

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

يمكن إختيار أي إجرائين لإحلال إجراءاً متعدد الإنتحاء لإيجاد التغير في القصور الحراري.

كمثال من 1 إلي B ومن بعد من B إلي 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،

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

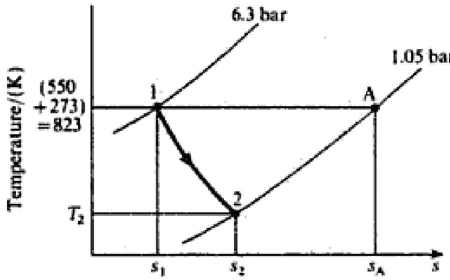
أو $$s_2 - s_1 = c_p \log_e \frac{T_2}{T_1} + R \log_e \frac{p_1}{p_2} \qquad (3.15)$$

يمكن إشتقاق المعادلة (3.15) بسهولة من المعادلة (3.13). من الواضح أنَّ هنالك عدد كبير من المعادلات الممكنة للتغير في القصور الحراري في إجراء متعدَّد الإنتحاء، ويتم التأكيد على أنَّه لا يجب عمل أي محاولة لتذكر مثل هذه التعبيرات. يمكن التعامل مع كل مسألة برسم مخطط $T - s$ وإستبدال الإجراء بإجرائين آخرين إنعكاسيين أبسط، كما في الشكل (3.24).

مثال (3.8):

أحسب التغير في القصور الحراري لـ 1kg من هواء يتمدَّد بإنتحاء في أسطوانة خلف كبَّاس من 6.3bar، 550°C إلي 1.05bar. يكون أس التمدَّد مساوياً لـ 1.3.

الحل:



شكل (2.25) الإجراء على مخطَّط T – s

يتم توضيح الإجراء على مخطَّط T – s في الشكل (3.25). من المعادلة (2.29)،

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

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

(حيث $T_1 = 550+273=823$ K).

الآن إستبدل الإجراء 1 إلي 2 بإجرائين، 1 إلي A و A إلي 2. بالتالي عند درجة حرارة ثابتة من 1 إلي A، من المعادلة (3.12)،

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

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

عند ضغط ثابت من A إلي 2،

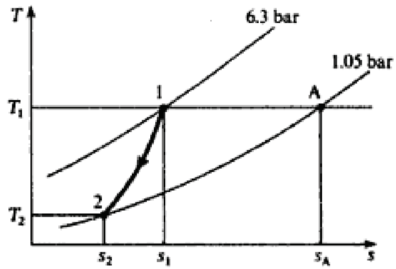
$$s_A - s_1 = c_p \log_e \frac{T_1}{T_2} = 1.005 \log_e \frac{823}{544}$$

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

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

i.e. الزيادة في القصور الحراري = $\underline{0.1}$ kj/kgK

لاحظ في هذه المسألة أنه إذا حدث أن أصبحت قيمة $s_A - s_2$ أكبر من $s_A - s_1$ ، هذا يعني أنَّ s_1 تكون أكبر من s_2، ويجب أن يبدو الإجراء كما في الشكل (3.26) أدناه.



شكل (3.26) مخطَّط T – s بديل

مثال (3.9):

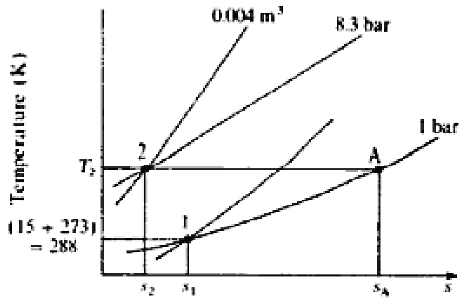
كتلة مقدارها 0.05kg من ثاني أكسيد كربون (بكتلة جزيئية 44kg/kmol) يتم إنضغاطه من 1bar، 15°C، حتى يكون الضغط مساوياً لـ 8.3bar، ويكون عند الحجم $0.004m^3$. أحسب التغير في القصور الحراري. خذ c_p لثاني أكسيد الكربون كـ 0.88 kj/kgK، وأفترض أن ثاني أكسيد الكربون يكون غازاً مثالياً.

الحل:

يتم توضيح الحالتين الطرفيتين على مخطَّط T–s في الشكل (3.27). لم يتم تحديد الإجراء في المثال وليس هنالك معلومات ضرورية حوله. يتم تثبيت الحالات 1 و 2 وبالتالي فإنَّ $s_1 - s_2$ 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 ثمَّ T_2.



شكل (3.27) مخطَّط T – s

من المعادلة،

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

من المعادلة، $pv = m R T$، عليه،

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

بالتالي من المعادلة (3.12)،

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

أيضاً عند ضغط ثابت من 1 إلي A

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

(حيث $T_1 = 15 + 273 = 288$ K).

بالتالي،

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

بالتالي لـ 0.05kg من ثاني أكسيد الكربون،

النقصان في القصور الحراري. $= 0.05 \times 0.226 = \underline{0.0113}$ kj/K

3.5 القصور الحراري واللاانعكاسية: (Entropy and Irreversibility)

لقد تمت الإشارة في المقطع السابق إلي أنَّه، بما أنَّ القصور الحراري هو خاصية، فإنَّ التغير في القصور الحراري يعتمد فقط على الحالات الطرفية وليس على الإجراء بين الحالات الطرفية. عليه فإنَّ إجراءاً لا إنعكاسياً معطي يعطي معلومات كافية لتثبيت الحالات الطرفية بالتالي يمكن إيجاد التغير في القصور الحراري. هذه يمكن توضيحها بصورة أفضل ببعض الأمثلة.

مثال (3.10):

بخار عند 7bar، كسر جفاف 0.96، يتم خنقه أسفل إلي 3.5bar. أحسب التغير في القصور الحراري لكل kg من البخار.

الحل:

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

$$s_1 = s_{f_1} + x_1 s_{fg_1} = 1.992 + 0.96 \times 4.717$$

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

في المقطع 2.4، لقد تم التوضيح أنَّه لإجراء الخنق، $h_2 = h_1$.

من المعادلة ،

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

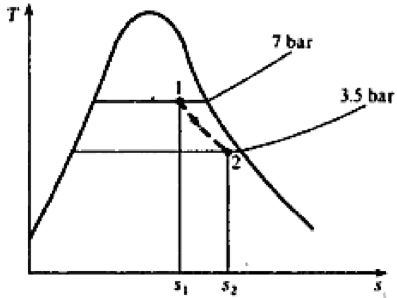
عند 3.5bar و $h_2 = 2682$ kj/kg يكون البخار لا يزال رطباً، بما أنَّ $h_{g2} > h_2$. من المعادلة، $h_2 = h_1 = x_1 h_{fg_1}$، عليه،

$$x_2 = \frac{h_2 - h_{f_2}}{h_{fg_2}} = \frac{2682 - 584}{2148} = \underline{0.977}$$

بالتالي،

الزيادة في القصور الحراري $= 6.817 - 6.522 = \underline{0.295}\ \text{kj/kgK}$.

يتم توضيح ذلك على مخطَّط T – s في الشكل (3.28). لاحظ أنَّ الإجراء يُوضَّح منقطاً، ولا تمثل المساحة تحت الخط سريان الحرارة؛ يفترض إجراء الخنق أنَّه ليس هنالك سريان حرارة، بل يكون هنالك تغيراً في القصور الحراري لأن الإجراء يكون إنعكاسياً.



شكل (3.28) إجراء الخنق على مخطَّط T – s

مثال (3.11):

وعاءان بحجم متساوٍ يتم توصيلهما بماسورة قصيرة الطول تحتوي على صمَّام؛ 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 الصمَّام للهواء بملء الوعائين.

الحل:

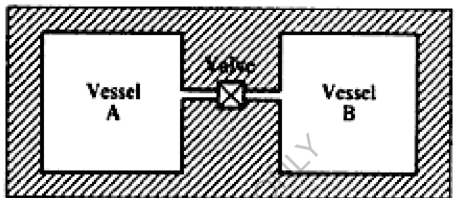
بداية يكون الوعاء A حاوياً لهواء ويكون الوعاء B مفرَّغاً تماماً، كما في الشكل (3.29)؛ أخيراً يحتل الهواء الوعائين A و B. في المقطع 2.4 لقد تم توضيح أنَّه في تمدُّد غير مقاوم (Unresisted expansion) لغاز مثالي، تكون درجات الحرارة الإبتدائية والنهائية متساوية. في هذه الحالة يكون الحجم الإبتدائي V_A والحجم النهائي $V_A + V_B = 2V_A$. يمكن توضيح الحالات الطرفية على مخطط T – s كما موضح في الشكل (3.30) يكون الإجراء 1 إلي 2 لا إنعكاسياً ويجب رسمه منقطاً. يكون التغير في القصور الحراري هو $s_2 - s_1$،

بدون النظر لممر الإجراء بين 1 و2 بالتالي، لحساب التغير في القصور الحراري، تخيل أنَّ الإجراء يتم إستبداله بإجراءاً ثابتاً لدرجة الحرارة إنعكاسياً بين الحالات 1 و2. بالتالي من المعادلة (3.12)،

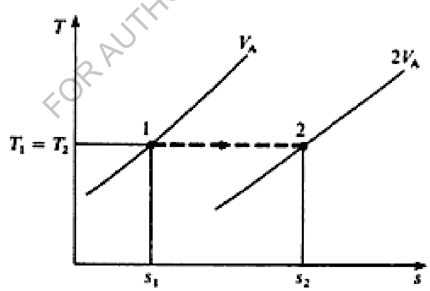
$$(s_2 - s_1) = R \log_e \frac{v_2}{v_1} = 0.287 \log_e \frac{2v_A}{v_A}$$

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

i.e. الزيادة في القصور الحراري $= \underline{0.119}$ kj/kgK



شكل (3.29) وعاءان موصلان بينياً ومعزولان جيَّداً



شكل (3.30) الإجراء على مخطَّط 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.

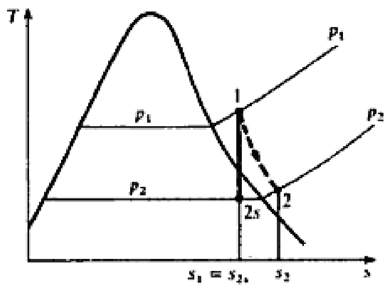
من المهم التذكر بأنَّ المعادلة (3.6)، ds=dQ/T، تكون صحيحة فقط لإجراءات لاإنعكاسية. بنفس الطريقة فإنَّ المعادلة dW=pdv أو dv=dW/p، تكون صحيحة فقط لإجراءات إنعكاسية. في المثال (3.11) يزداد حجم الهواء من V_A إلي $2V_A$، و لا يكون هنالك شغلاً مبذولاً بالهواء خلال الإجراء،

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

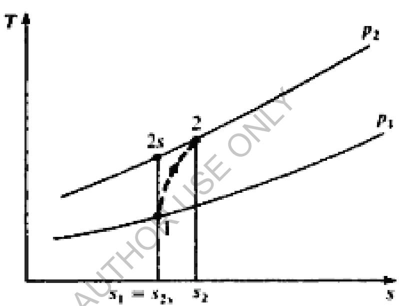
بالتالي في الإجراء اللاإنعكاسي للمثال (3.11) $dv \neq dW/p$. نفس الشئ، فإنَّ المحتوي الحراري في المثال (3.11) يزداد بـ 0.199kj/kgK ويكون سريان الحرارة صفراً، .i.e، $ds \neq dQ/T$. لا يجب أن يكون هنالك إلتباساً إذا تم رسم مخطط $T - s$ أو $p - v$ لكل مسألة وتحديد نقاط الحالة في مواضعها الصحيحة. بالتالي، عندما يكون هنالك إجراءاً إنعكاسياً بين حالتين، يمكن رسم الخطوط التي تمثل الإجراء بخطوط متصلة، وتمثل الحرارة تحت خط سريان الحرارة على مخطط $T - s$ والشغل المبذول على مخطط $p - v$.

عندما يكون الإجراء بين الحالتين لا إنعكاسياً، يجب رسم الخط منقطاً، ولا تكون للمساحة تحت الخط أي أهمية على أي من المخططات.

يمكن التوضيح من القانون الثاني أن القصور الحراري لنظام معزول حرارياً يجب إما أن يزيد أو يبقي كما هو، كمثال، فإنَّ إجراءاً كاظماً للحرارة سوف يكون معزولاً من بيئته المحيطة ، بما أنَّه لا يوجد سريان للحرارة إلي أو من النظام. لقد لاحظنا أنَّه في إجراء كاظم للحرارة إنعكاسي فإنَّ القصور الحراري يبقي كما هو. في إجراء كاظم للحرارة لا إنعكاسي يجب أن يزيد القصور الحراري دائماً، ويكون الكسب في القصور الحراري هو قياس للاإنعكاسية الإجراء. تَوضح الإجراءات في الأمثلة (3.10) و (3.11) هذه الحقيقة. كمثال آخر، إعتبر تمدَّداً كاظماً للحرارة لا إنعكاسياً في توربينة بخار كما موضح في الشكل (3.31). بالإجراء 1 إلي '2 كما في الشكل (3.31) الزيادة في القصور الحراري، $s'_2 - s_1 = s_{2'} - s_2$ هي قياساً للاإنعكاسية الإجراء. نفس الشيء فإن الشكل (3.32)، يوضَّح إنضغاطاً كاظماً للحرارة لا إنعكاسياً في ضاغط دوار بالإجراء 1 إلي '2. يتم تمثيل إجراءاً كاظماً للحرارة إنعكاسياً بين نفس الضغوط بالإجراء 1إلي 2. كما من قبل. تُوضح الزيادة في القصور الحراري لا إنعكاسية الإجراء.



شكل (3.31) إجراء أديباتي لا إنعكاسي لبخار على مخطط T – s



شكل (3.32) إنضغاط أديباتي لا إنعكاسي لغاز مثالي على مخطَّط T – s

مثال (3.12):

في توربينة هواء يتمدَّد الهواء من 6.8bar و 430°C إلي 1.013bar و 150°C. يمكن إفتراض أن الفقد الحراري من التوربينة يكون متغيراً بحيث يتم تجاهله. وضِّح أنَّ الأجراء يكون لا إنعكاسياً، وأحسب التغير في القصور الحراري لكل kg من الهواء.

الحل:

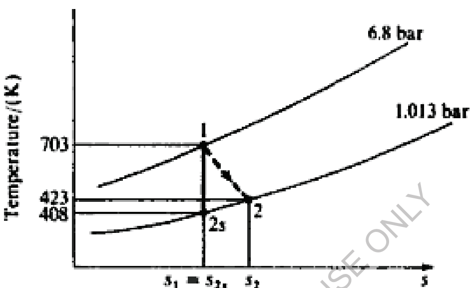
بما أنَّه تم تجاهل الفقد الحراري، فإنَّ الإجراء يكون كاظماً للحرارة. لإجراء كاظم للحرارة إنعكاسي لغاز مثالي، باستخدام المعادلة (2.21)،

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

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

(حيث $T_1 = 430 + 273 = 703K$).

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



شكل (3.33) مخطَّط T – s

لكن درجة الحرارة الفعلية تكون مساوية لـ 150°C عند الضغط 1.013bar، بالتالي يكون الإجراء لا إنعكاسياً.

يُوضَّح الإجراء بـ 1 إلي '2 في الشكل (3.33)؛ يتم أيضاً توضيح الإجراء ثابت القصور الحراري بـ 1 إلي 2.

من غير الممكن أن يكون الإجراء 1 إلي '2 إنعكاسياً، لأنَّه في تلك الحالة ستُمثل المساحة تحت الخط 1 – '2 سريان الحرارة ويكون كاظماً للحرارة.

يمكن إيجاد التغير في القصور الحراري، $s_2 - s_1$ بإعتبار إجراءاً ثابتاً للضغط إنعكاسياً بين 2 و '2. بالتالي من المعادلة (3.6) $ds = dQ/T$ وعند ضغط ثابت لـ 1kg من غاز مثالي نحصل على $dQ = c_p dT$، وعليه،

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

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

i.e. الزيادة في القصور الحراري = $s'_2 - s_1 = \underline{0.0355}\ \text{kj/kgK}$

الآن إعتبر حالة عندما يكون هنالك نظاماً غير معزول حرارياً من بيئته المحيطة. يمكن للقصور الحراري لمثل هذا النظام أن يزيد، ينقص أو يبقي 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، بالتالي 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 إلي البارد. يكون هنالك إنحداراً مستمراً لدرجة الحرارة من T_1 إلي T_2 بين النقطتين A وB، ويمكن إفتراض أنَّ الحرارة تنتقل بإنعكاسية من المستودع الساخن إلي النقطة A، ومن النقطة B إلي المستودع البارد. سيتم إفتراض أن درجة الحرارة لكل مستودع تبقي ثابتة. بالتالي نحصل على،

الحرارة المكتسبة للمستودع الساخن = +Q

بالتالي من المعادلة (3.7)،

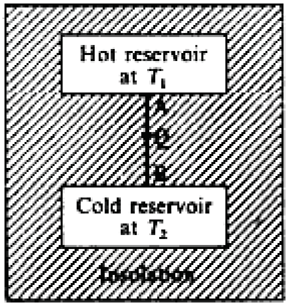
الزيادة في القصور الحراري للمستودع البارد $= +\frac{Q}{T_2}$

أيضاً،

الحرارة المكتسبة للمستودع الساخن = - Q

$\therefore$ الزيادة في القصور الحراري للمستودع البارد $= -\frac{Q}{T_1}$

i.e. صافي الزيادة في القصور الحراري ، $\Delta s = \left(\frac{Q}{T_2} - \frac{Q}{T_1}\right)$



شكل (3.34) وعاءان معزولان حرارياً وموصلان بينياً

بما أنَّ $T_1 > T_2$، يُلاحظ أن Δs تكون موجبة، وبالتالي يجب أن يزيد القصور الحراري للنظام. في الحد عندما يكون الفرق في درجة الحرارة صغيراً جداً، بالتالي $\Delta s = 0$. هذا يؤكد مبدأ أنَّ القصور الحراري لنظام معزول يجب إما أن يزيد أو يبقي كما هو.

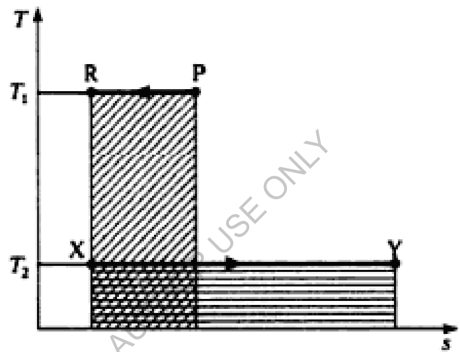
أحد أحكام اللاإنعكاسية يقول:

يجب أن يكون فرق درجة الحرارة بين النظام وبيئته المحيطة صغيراً جداً أثناء الإجراء الإنعكاسي.

في المثال عاليه، عندما $T_1 > T_2$، فإنَّ سريان الحرارة بين الوعائين يكون لا إنعكاسياً طبقاً للحكم أعلاه. هكذا يزيد القصور الحراري للنظام عندما يكون إجراء سريان الحرارة لا إنعكاسياً بينما يبقي كما هو عليه عندما يكون الإجراء إنعكاسياً. الزيادة في القصور الحراري هو مقياس اللاإنعكاسية. يمكن رسم الإجراءات في المثال السابق على مخطَّط $T - s$ كما موضَّح في الشكل (3.35). لقد تم تراكب الإجراءان على نفس المخطَّط. يُمثل الإجراء $P - R$ إنتقال وحدات Q للحرارة من المستودع الساخن، وتكون المساحة تحت $P - R$ مساوية لـQ. ويُمثل الإجراء $X - Y$ إنتقال وحدات Q للحرارة إلي المستودع البارد، وتكون المساحة تحت $X - Y$ مساوية لـ Q. تكون المساحة تحت $P - R$ مساوية للمساحة تحت $X - Y$، بالتالي يمكن الملاحظة من المخطط أنَّ القصور الحراري للوعاء البارد يجب دائماً أن يزيد بصورة أكبر من النقصان في المحتوي الحراري للمستودع الساخن. عليه فإنَّ يكون القصور الحراري المتحد يجب أن يزيد. لاحظ، بما أنَّه في المثال السابق يكون كل من

الإجراءان P – R و X – Y هما إنعكاسيان، بالتالي تحدث اللاإنعكاسية بين A و B. متى ما تمَّ إنتقال للحرارة خلال فرق درجة حرارة كبير، فإنَّ الإجراء يكون لا إنعكاسياً وتكون هنالك زيادة في القصور الحراري للنظام وبيئته المحيطة.

في حالات معينة (إجراءات معينة) يمكن أن تحدث اللاإنعكاسية في البيئة المحيطة، بالتالي فإنَّ الإجراء يكون إنعكاسياً داخلياً، وتكون المساحات على مخططات p – v و T – s قريبة جداً من الشغل المبذول وسريان الحرارة على الترتيب.



شكل (3.35) الإجراءات للوعاء الساخن والبارد على مخطَّط T – s

في معظم المسائل عندما يتم إفتراض إجراءاً إنعكاسياً يكون المفهوم الضمني هو الإنعكاسية الداخلية. عكس ذلك، فإنَّ معظم الإجراءات العملية التي يُقال أنَّها لا إنعكاسية، هي لا إنعكاسية داخلية نتيجة لتدويم مائع التشغيل كما في المثال (3.12).

بالرجوع للشكل (3.34)، إذا تمَّ وضع محرك حرارة بينياً بين المستودعين الساخن والبارد، فإنَّه يمكن توليد بعض الشغل. يذكر القانون الثاني أنَّ الحرارة لا يمكن أن تسري بدون مساعدة من مستودع بارد إلي مستودع ساخن، عليه لتوليد شغل من كمية الطاقة Q، بعد أن يتم إنتقالها إلي المستودع البارد، سيكون من الضروري وجود مستودع ثالث عند درجة حرارة أدنى من المستودع البارد. من الواضح أنَّه عندما يتم إنتقال حرارة خلال

فرق درجة حرارة كبير، فإن فائدتها تصبح أقل، وفي الحد عندما يتم إنتقال الحرارة لمستودع درجة الحرارة الأدنى الموجود بالتالي لا يمكن توليد أي شغل إضافي. عليه فإنَّ اللاإنعكاسية لديها تأثير سيئ على الطاقة المتاحة، ويمكن إعتبار القصور الحراري ليس كقياس فقط للاإنعكاسية بل أيضاً لإنحلال الطاقة. لاحظ أنَّه، بمبدأ بقاء الطاقة، فإنَّ الطاقة لا يمكن تحطيمها؛ بالقانون الثاني للديناميكا الحرارية، يمكن فقط للطاقة أن تصبح أقل فائدة. تميل النظم طبيعياً لحالات ذات رتبة طاقة أدنى؛ عليه فإنَّ أي نظام يتحرك لحالة ذات رتبة أعلى بدون إمداد خارجي للطاقة سيخرق 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 إستنتاج أنَّه، لمستودع بارد معطي (e.g. الجو)، كلما تكون درجة حرارة المستودع الساخن عالية، ستكون الكفاءة الحرارية للمحرك عالية.

3.6 الإتاحية: (Availability)

المقدار الأقصى النظري للشغل الذي يمكن الحصول عليه من نظام عند حالة p_1 وT_1 عندما يعمل مع مستودع عند درجة حرارة وضغط ثابتين T_o وp_o يُسمي بالإتاحة.

a/ نظم اللاسريان: (Non – Flow Systems)

إعتبر نظاماً مكوناً من مائع في أسطوانة خلف كباس، حيث يتمدَّد المائع إنعكاسياً من الشروط الأولية p_1 وT_1 إلي الشروط الجوية النهائية T_o وp_o. 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 موضَّح في الأشكال 3.36(a) و 3.36(b)، حيث $s_1 = s_A$ و $T_o = T_A$. يُعطي الشغل المبذول بهذا المحرك بـ:

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

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

تكون الحرارة المكتسبة إلي المحرك مساوية للحرارة المفقودة بالمائع الذي يؤدي الإجراء 1 إلي صفر، بالتالي نحصل على،

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

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

عليه بجمع المعادلتين،

$$W_{Fluid} + W_{Engine} = (u_1 - u_o) - T_o(s_1 - s_o)$$

يكون الشغل المبذول بالمائع على الكبَّاس أقلَّ من الشغل المبذول الكلي بالمائع، بما أنَّ هنالك شغلاً مبذولاً على الجو عند الضغط p_o،

$$\text{i.e.} \quad \text{الشغل المبذول على الجو} = p_o(v_o - v_1)$$

بالتالي،

$$\text{الشغل المتاح الأقصى} = (u_1 - u_o) - T_o(s_1 - s_o) - p_o(v_o - v_1)$$

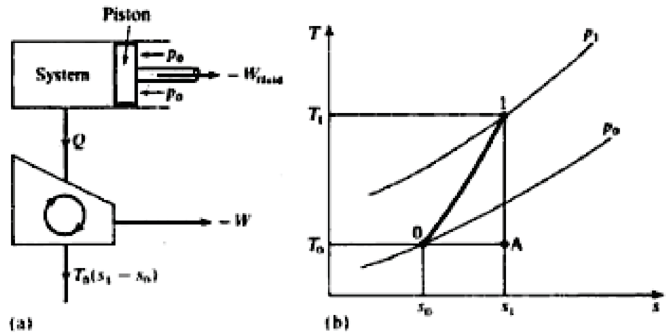
(ملحوظة: عندما يؤدي مائعاً دورة كاملة فإنَّ صافي الشغل المبذول على الجو يكون صفراً).

$$W_{max} = (u_1 + p_o v_1 - T_o s_1) - (u_o + p_o \quad - T_o s_1)$$

$$\therefore W_{max} = a_1 - a_o$$

تُسمي 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، i.e. $z_o = 0$. للحصول على أقصى شغل من الجهاز فإنَّ سرعة المخرج C_o، يجب أن تكون صفراً. يمكن التوضيح كما في الشكل 3.36(a) عاليه أن محركاً حرارياً إنعكاسياً يشتغل بين الحدود سيرفض مقداراً من الحرارة يعادل $T_o\,(s_1 - s_o)$ وحدة، حيث T_o هي درجة الحرارة الجوية.

عليه نحصل على،

$$W_{max} = \left(h_1 - C_1^2/2 + z_1 g\right) - h_o - T_o\left(s_1 - s_o\right)$$

في نظم عديدة للديناميكا الحرارية يتم تجاهل عناصر طاقة الحركة والوضع.

$$W_{max} = \left(h_1 - T_o s_1\right) - \left(h_o - T_o s_o\right) = b_1 - b_o$$

تُسمي الخاصية $b = h - T_o s$ بالدالة المتاحة للسريان المستقر

(steady flow availability function)

c/ الفاعلية: (Effectiveness)

بدلاً من مقارنة إجراء بإجراء مثالي تخيلي، كما يُعمل في حالة الكفاءة ثابتة القصور الحراري كمثال، من القياس الأفضل للفائدة من الإجراء هو مقارنة الخرج المستفاد من الإجراء بفقد الإتاحية لنظام. يُعطي الخرج المستفاد من نظام بزيادة الإتاحية للبيئة المحيطة.

$$\in = \frac{\text{زيادة الإتاحية للبيئة المحيطة}}{\text{فقد الإتاحية للنظام}}$$ ، الفاعلية.

لإجراء إنضغاط أو تسخين تُصبح الفاعلية،

$$\in = \frac{\text{زيادة الإتاحية للنظام}}{\text{فقد الإتاحية للبيئة المحيطة}}$$

مثال (3.13):

بخار يتمدَّد بإجراء كاظم الحرارة في توربينة من 20bar و 400°C، إلي 4bar و 250°C. أحسب: a/ كفاءة ثابت القصور الحراري للإجراء؛

b/ فقد الإتاحية للنظام بإفتراض درجة حرارية جوية مقدارها 15°C؛

c/ فاعلية الإجراء.

تجاهل التغييرات في طاقة الحركة والوضع.

الحل:

a/ بداية يكون البخار محمصاً عند 20 bar و 400°C بالتالي من الجداول،

$s_1 = 7.126$ kj/kgK و $h_1 = 3248$ kj/kg

أخيراً يكون البخار محمصاً عند 4bar و 250°C، بالتالي من الجدول،

$s'_2 = 7.379$ kj/kgK و $h'_2 = 2965$ kj/kg

يُوضح الإجراء كـ 1 إلي '2 كما في الشكل (3.37)،

$$s_1 = s_2 = 7.126 \text{ kj/kgK}$$

بالتالي بالإستكمال،

$$h_2 = 2753 + \left(\frac{7.126 - 6.929}{7.172 - 6.929}\right)(2862 - 2753) = \underline{1841.4} \text{ kj/kg}$$

$$\text{كفاءة ثابت القصور الحراري} = \frac{\text{شغل الخرج الفعلي}}{\text{شغل ثابت القصور الحراري}}$$

$$\frac{h_1 - h'_2}{h_1 - h_2} = \frac{3248 - 2965}{3248 - 2841.4} = \frac{283}{406.6} = \underline{69.6}\%$$

b/ فقد الإتاحية،

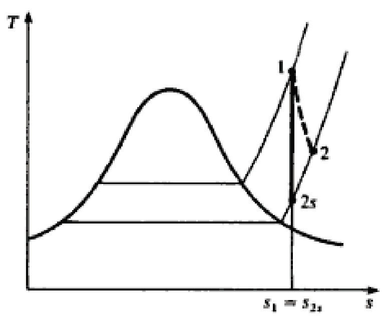
$$= b_1 - b'_2 = h_1 - h_{2'} + T_o\left(s_{2'} - s_1\right)$$

$$= 283 + 288(7.379 - 7.126) = \underline{355.9} kj/kg$$

c/ الفاعلية، $\in$،

$$\in = \frac{W}{b_1 - b_{2'}} = \frac{h_1 - h_{2'}}{b_1 - b_{2'}}$$

$$\text{i.e.} \quad \in = \frac{283}{355.9} = \underline{79.6}\%$$



شكل (3.37) مخطَّط T – s

مثال (3.14):

هواء عند 15°C يتم تسخينه إلي 40°C بخلطه في سريان مستقر مع كمية من هواء عند 90°C. مفترضاً أنَّ إجراء الخلط يكون كاظماً للحرارة ومتجاهلاً التغييرات في طاقة الحركة والوضع، أحسب نسبة سريان الكتلة لهواء يكون بداية عند 90°C إلي تلك التي تكون بداية عند 15°C. أحسب أيضاً فاعلية إجراء التسخين، إذا كانت درجة الحرارة الجوية تساوي 15°C.

الحل:

إجعل نسبة سريان الكتلة المحلوبة تكون y؛ إجعل الهواء عند 15°Cيكون الجدول 1، و الهواء 90°C يكون الجدول 2، وجدول الهواء المخلوط عند 40°C يكون الجدول 3.

بالتالي،

$$c_p T_1 + y c_p T_2 = (1 + y) c_p T_3$$

$$\text{أو} \quad y c_p (T_2 - T_1) = c_p (T_3 - T_1)$$

$$\text{i.e.} \quad y(90 - 40) = 40 - 15$$

$$\therefore y = \frac{25}{50} = \underline{0.5}$$

إجعل النظام المعتبر يكون جدولاً من الهواء لوحدة الكتلة، يتم تسخينه من 15°C إلي 40°C.

$$\text{زيادة الإتاحية للنظام} = b_3 - b_1 = (h_3 - h_1) - T_o (s_3 - s_1)$$

$$1.005(40 - 15) - 288(s_3 - s_1)$$

$$s_3 - s_1 = c_p \log_e \frac{T_3}{T_1} = 1.005 \log_e \frac{313}{288} = \underline{0.0831} \text{ kj/kgK}$$

$$\therefore \quad \text{زيادة الإتاحية للنظام} = 1.005 \times 25 - 288 \times 0.0831 = \underline{1.195} \text{ kj/kg}$$

النظام، الذي هو الهواء المراد تسخينه، يكون محاطاً بجدول الهواء المراد تبريده. عليه، فإنَّ فقد الإتاحية للبيئة المحيطة يُعطي ب،

$$y(b_2 - b_1)$$

$$\text{i.e.}\quad \text{فقد الإتاحية للبيئة المحيطة} = 0.5\{(h_2 - h_3) - T_o(s_2 - s_3)\}$$

$$= 0.5\left(1.005(90-40) - 288 \times 1.005 \times \log_e \frac{363}{313}\right) = \underline{3.65}\ kj/kg$$

عليه،

$$\text{الفاعلية} = \frac{1.195}{3.65} = 0.327 \quad \text{أو} \quad 32.7\%$$

يكون الرقم الصغير للفاعلية مؤشراً للطبيعة اللاإنعكاسية لإجراء الخلط.

مثال (3.15):

سائل بحرارة نوعية 6.3kj/kgK يتم تسخينه عند ضغط ثابت تقريباً من 15°C إلي 70°C بتمريره خلال أنابيب مغمورة في فرن. تكون درجة حرارة الفرن ثابتة عند 1400°C. أحسب الفاعلية لإجراء التسخين عندما تكون درجة الحرارة الجوية مساويةً لـ 10°C.

الحل:

زيادة الإتاحية للسائل،

$$= b_2 - b_1 = (h_2 - h_1) - T_o(s_2 - s_1)$$

$$b_2 - b_1 = 6.3(70-15) - 288 \times \log_e \frac{343}{288} = \underline{34.7}\ kj/kg$$

الآن درجة الحرارة الملفوظة بواسطة الفرن تكون مساوية للحرارة المكتسبة للسائل، $(h_2 - h_1)$. إذا تم إمداد هذه الكمية من الحرارة إلي محرك يشتغل 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،

$$(h_1 - h_2)\left(1 - \frac{283}{1673}\right)$$

الشغل الممكن من محرك حرارة هو قياس لفقد الإتاحية للفرن.

$$\text{i.e.}\quad \text{فقدان الإتاحية للبيئة المحيطة} = 6.3(70-15)\left(1-\frac{283}{1673}\right)$$

$$= \underline{288}\ \text{kj/kg}$$

بالتالي،

$$\text{الفاعلية} = \frac{34.7}{288} = 0.121 \quad \text{أو} \quad \underline{12.1}\%$$

تعكس القيمة المنخفضة جداً للفاعلية اللاإنعكاسية لإنتقال الحرارة خلال فرق درجات حرارة كبير. إذا كانت درجة حرارة الفرن أصغر بكثير فسيكون الإجراء أكثر فاعلية بالرغم من أنَّ الحرارة المنتقلة للسائل ستبقي نفسها.

3.7 مسائل: (Problems)

1- 1kg من بخار عند 20bar، وكسر جفاف 0.9، يتم تسخينه إنعكاسياً بضغط ثابت إلي درجة حرارة 300°C. أحسب الحرارة المكتسبة، التغير في القصور الحراري، ووضِّح الإجراء على مخطَّط T – s، مشيراً للمساحة التي تُمثل سريان الحرارة.

Ans. (415 kj/kg; 0.8173 kj/kgK)

2- بخار عند 0.05bar، 100°C يتم تكثيفه بالكامل بإجراء إنعكاسي ثابت الضغط. أحسب الحرارة التي يتم إزالتها لكل kg من البخار، والتغير في القصور الحراري. أرسم الإجراء على مخطط T – s وظلِّل المساحة التي تُمثل سريان الحرارة.

Ans. (2550 kj/kg; 8.292 kj/kgK)

3- 0.005kg 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. وضِّح المساحة التي تُمثل الحرارة المكتسبة على مخطَّط T – s.

Ans. (0.0704 kj/kgK; 36.85 kj)

4- أسطوانة صلدة تحوى $0.006m^3$ من نـايتروجين (بكتلـة جزيئيـة 28kg/kmol) عنـد 1.04bar، 15°C، يـتم تسـخينه إنعكاسـياً حتـى تصـل درجـة الحـرارة إلـي 90°C. أحسـب التغيـر فـي القصـور الحـراري والحـرارة المكتسبة. أرسم الإجراء علـى مخطَّـط T – s. خذ الأس ثابـت القصـور الحـراري، γ، للنـايتروجين كـ 1.4، وأفترض أنَّ النايتروجين يكون غازاً مثالياً.

Ans. (0.00125 kj/K; 0.407 kj)

5- $1m^3$ من هواء يتم تسخينه إنعكاسياً بضغط ثابت من 15°C إلي 300°C، ومن بعد يتم تبريده إنعكاسياً بحجم ثابت إلـي درجـة حرارتـه الإبتدائيـة. يكون الضـغط الإبتدائي مسـاوياً لـ 1.03bar. أحسب صـافي سريان الحرارة والتغير في القصور الحراري، وأرسم الإجراءات على مخطَّط T – s.

Ans. (101.5 kj; 0.246 kj/K)

6- 1 kg من بخار يؤدي إجراءاً إنعكاسياً بثبات درجة الحرارة من 20 bar، 250°C إلي ضغط 30 bar. أحسب سريان الحرارة، ذاكراً ما إذا كانت مكسباً أم فقداً، وأرسم الإجراء على مخطَّط T – s.

Ans. (- 135 kj/kg)

الفصل الرابع

دورة المحرك الحراري

(The Heat Engine Cycle)

في هذا الفصل يتم مناقشة دورة المحرك الحراري بالتفصيل، وأيضاً إعتبار دورات قدرة الغاز. يمكن ملاحظة أن هنالك دورة نظرية مثالية بكفاءة أكبر مما نتخيل؛ تسمي هذه الدورة بدورة كارنوت (Carnot Cycle). وتكون الكفاءة الحرارية القصوى الممكنة لمحرك حراري في الواقع العملي هي فقط حوالي نصف تلك لدورة كارنوت النظرية المثالية بين نفس حدود درجات الحرارة. هذه تكون نتيجة للاإنعكاسية في الدورة الفعلية، وللانحراف عن الدورة المثالية التي يتم عملها لأسباب متنوعة. يتم إختبار محطة القدرة عملياً بالتوافق بين الكفاءة الحرارية وعوامل عديدة مثل حجم المحطة لمتطلبات قدرة معطاة، التعقيدات الميكانيكية، تكلفة التشغيل، والتكلفة الرأسمالية.

4.1 دورة كارنوت: (The Carnot Cycle)

يمكن التوضيح من القانون الثاني للديناميكا الحرارية أنَّه ليس هنالك محرك حراري يمكن أن يكون أكبر كفاءة من محرك حراري إنعكاسي يعمل بين نفس حدود درجة الحرارة. كارنوت 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 مُثبَّتة، ويتم فيها رفض جميع الحرارة المفقودة عند درجة حرارة دنيا مثبتة. بالتالي فإنَّ الدورة تتراكب من إجرائين ثابتي درجة الحرارة موصلان بإجراءين كاظمي للحرارة. بما أنَّ جميع الإجراءات تكون إنعكاسية، بالتالي فإنَّ الإجراءات الكاظمة للحرارة في الدورة تكون أيضاً ثابتة القصور الحراري. من الأكثر ملائمة تمثيل الدورة على مخطَّط $T - s$ كما موضح في الشكل (4.1) أدناه.

الإجراء 1 إلي 2 تمدداً ثابتاً للقصور الحراري من T_1 إلي T_2.

الإجراء 2 إلي 3 فقداً للحرارة بثبات درجة الحرارة.

الإجراء 3 إلي 4 يكون إنضغاطاً ثابتاً للقصور الحراري من T_2 إلي T_1.

الإجراء من 4 إلي 1 يكون إمداداً للحرارة بثبات درجة الحرارة.

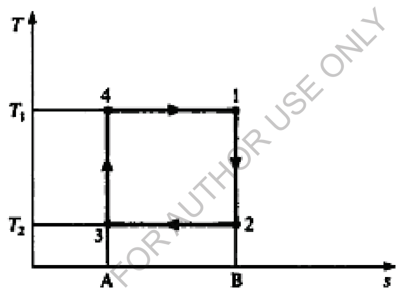
تكون الدورة مستقلة تماماً عن مادة التشغيل المستخدمة.

الكفاءة الحرارية لمحرك حراري المُعرَّفة 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، تُعطي بالمساحة 41BA4.

i.e. $Q_1 =$ المساحة 41BA4 $= T_1(S_B - S_A)$



شكل (4.1) دورة كارنوت على مخطَّط T – s

بالمثل فإنَّ الحرارة المفقودة، Q_2، تُعطي بالمساحة 23AB2 .

i.e. $Q_2 =$ المساحة 23AB2 $= T_2(S_B - S_A)$

بالتالي نحصل على،

الكفاءة الحرارية لدورة كارنوت، $\eta_{Camot} = 1 - \frac{T_2(s_B - s_A)}{T_1(s_B - s_A)}$

i.e. $$\eta_{Camot} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \qquad (4.1)$$

إذا كان هنالك غاطساً متوفراً للفقد الحراري عند درجة حرارة مثبتة T_2 (e.g. إمداد ضخم لماء التبريد)، بالتالي T_2/T_1 ستقل كلما تزيد درجة حرارة المصدر T_1. من المعادلة (4.1) يمكن ملاحظة أنَّه كلما قلَّت T_2/T_1، تزيد بالتالي الكفاءة الحرارية. بالتالي لدرجة حرارة أدني مثبتة لفقد الحرارة، فإنَّ درجة الحرارة العليا التي يتم عندها إمداد الحرارة يجب عملها أكبر ما يمكن. الكفاءة الحرارية الممكنة القصوى بين أيِّ درجتي حرارة هي تلك لدورة كارنوت.

يمكن إيجاد شغل الخرج لدورة كارنوت ببساطة من مخطَّط $T - s$. من القانون الأول،

$$\sum Q = \sum W$$

عليه، فإنَّ شغل الخرج للدورة يُعطي بـ ،

$$W = Q_1 - Q_2$$

بالتالي لدورة كارنوت، بالرجوع للشكل (4.1) ،

$$\text{i.e.} \quad W_{Carnot} = \text{المساحة } 12341 \quad = (T_1 - T_2)(S_B - S_A)$$

مثال (4.1):

ما هي الكفاءة النظرية الممكنة القصوى لمحرك حراري التي تعمل مع مستودع ساخن لغازات فرن عند 2000°C عندما يكون ما التبريد متاحاً عند 10°C؟

الحل:

من المعادلة (4.1)،

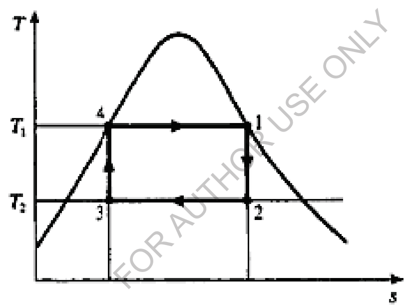
$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{10 + 273}{2000 + 273} = 1 - \frac{283}{2273}$$

$$\text{i.e. الكفاءة القصوى الممكنة} = 1 - 0.1246 = \underline{0.8754}$$

$$\text{أو} \quad \underline{87.54}\ \%$$

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 للفقودات الناجمة من اللاإنعكاسية في المحطة الفعلية، وأيضاً بسبب الإنحرافات عن دورة كارنوت المثالية التي تُعمل لأسباب عملية متنوعة.

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 الأكفأ 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 مخطَّط 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 للديناميكا الحرارية من الممكن تأسيس مقياساً لدرجة الحرارة يكون مستقلاً عن مادة التشغيل.

لأي محرك حراري من المعادلة (3.3)،

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \qquad (4.2)$$

أيضاً فإنَّ الكفاءة لمحرك يشتغل على دورة كارنوت تعتمد فقط على درجة الحرارة للمستودعين الساخن والبارد.

بترميز درجة الحرارة على أساس إعتباطي بـ X، نحصل على،

$$\eta = \phi(X_1, X_2) \qquad (4.3)$$

(حيث ϕ 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)

هنالك عدد ضخم ممكن لمقاييس درجة الحرارة يكون مستقلاً عن مادة التشغيل. يمكن إختيار أي مقياس تشغيل بالإختيار المناسب لقيمة الدالة F. يمكن إختيار الدالة بحيث أنَّ،

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{X_2}{X_1} \qquad (4.4)$$

أيضاً من المعادلة (4.1)، نحصل على،

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

بالتالي باستخدام المعادلة (4.2)،

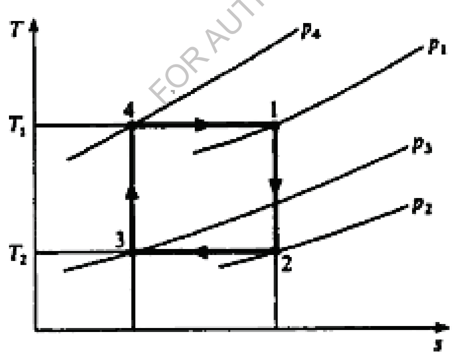
$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

أو $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$ (4.5)

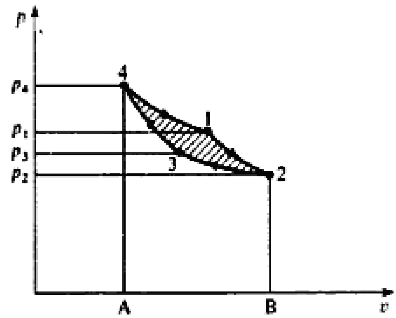
بمقارنة المعادلات (4.4) و (4.5) يمكن الملاحظة أن درجة الحرارة X تكون مكافئة لدرجة الحرارة T. عليه بالاختيار المناسب للدالة F، يتم جعل مقياس درجة الحرارة المثالي مكافئاً للمقياس المؤسس على ثيرموميتر الغاز المثالي.

4.3 دورة كارنوت لغاز مثالي: (The Carnot Cycle for Perfect Gas)

يتم توضيح دورة كارنوت على مخطَّط T – s في الشكل (4.3) لاحظ أنَّ ضغط الغاز يتغير بإستمرار من p_4 إلي p_1 أثناء إمداد الحرارة بثبات درجة الحرارة، ومن p_2 إلي p_3 أثناء فقد الحرارة بثبات درجة الحرارة. من الملائم أكثر عملياً تسخين غاز بضغط ثابت تقريباً أو بحجم ثابت، بالتالي من الصعوبة بمكان محاولة تشغيل محرك حراري فعلي على دورة كارنوت عملياً بإستخدام غاز كمادة تشغيل. هنالك سبب هام آخر لعدم محاولة إستخدام دورة كارنوت عملياً يُوضح برسم الدورة على مخطَّط p – v، كما في الشكل (4.4). يُعطي صافي الشغل للدورة بالمساحة 12341. تكون هذه كمية صغيرة مقارنة بإجمالي الشغل لإجراءات التمدَّد للدورة المعطاة بالمساحة 41BA4. شغل إجراءات الإنضغاط (.i.e الشغل المبذول على الغاز) يُعطي بالمساحة 234AB2. تُسمي نسبة صافي شغل الخرج إلي 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 مخطَّط T – s



شكل (4.4) دورة كارنوت على مخطط p – v

مثال (4.2):

إذا كـان هنالـك مسـتودع سـاخن عنـد درجـة حـرارة مقدارها 800°C ومسـتودع بـارد عنـد درجـة حـرارة 15°C. أحسب الكفاءة الحرارية ونسبة الشغل لدورة كارنوت باستخدام الهواء للتشغيل، إذا كانت الضغوط القصوى في الدورة هما 210bar و 1bar.

الحل:

يتم توضيح الدورة على مخطَّط T – s و p – v في الأشكال 4.5(a) و 4.5(b) على الترتيب.

بإستخدام المعادلة (4.1)،

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{15+273}{300+273} = 1 - 0.268 = \underline{0.732}$$

أو $\underline{73.2}$ %

لكـي يـتم إيجـاد شـغل الخـرج ونسـبة الشـغل الكلـي مـن الضـروري إيجـاد التغيـر فـي القصـور الحـراري، $(s_1 - s_4)$.

لإجراء ثابت درجة الحرارة من 4 إلي A، مستخدماً المعادلة (3.12)،

$$\left(s_A - s_4\right) = R\log_e \frac{p_4}{p_2} = 0.287\log_e \frac{210}{1} = \underline{1.535}\, kj/kgK$$

عند ضغط ثابت من A إلي 2، نحصل على،

$$\left(s_A - s_2\right) = c_p \log_e \frac{T_1}{T_2} = 1.005\log_e \frac{1073}{288} = \underline{1.321}\, kj/kgK$$

$$\therefore \mathrm{s}_1 - \mathrm{s}_4 = 1.535 - 1.321 = \underline{0.214}\ \mathrm{kj/kgK}$$

بالتالي،

صافي شغل الخرج $= (T_1 - T_2)(s_1 - s_2) =$ المساحة 12341

$$= (1073 - 288)\times 0.214 = \underline{168}\, kj/kgK$$

صافي شغل التمدد = الشغل المبذول 4 إلي 1 + الشغل المبذول 1 إلي 2

من المعادلة (2.12)، لإجراء ثابت درجة الحرارة، Q = W

i.e. $W_{4\text{-}1} = Q_{4\text{-}1}$ = المساحة تحت الخط 1 – 4 على الشكل 4.5(a)

$$= (\mathrm{s}_1 - \mathrm{s}_4)\times \mathrm{T}_1 = 0.214 \times 1073$$

$$= \underline{229.6}\, kj/kg$$

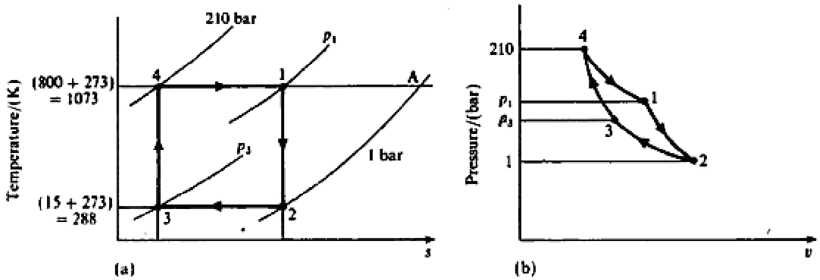
لإجراء ثابت القصور الحراري من 1 إلي 2، من المعادلة (2.13)، $\mathrm{W} = (\mathrm{u}_1 - \mathrm{u}_2)$

$$\mathrm{W}_{1-2} = \mathrm{c}_\mathrm{v}(\mathrm{T}_1 - \mathrm{T}_2)$$

$$= 0.718(1073 - 288) = \underline{563.6}\ \mathrm{kj/kg}$$

$\therefore$ إجمالي الشغل $= 229.6 + 563.6 = \underline{793.2}\,\mathrm{kj/kg}$

i.e. نسبة الشغل $= \dfrac{\text{صافي الشغل}}{\text{إجمالي الشغل}} = \dfrac{168}{793.2} = \underline{0.212}$



شكل (4.5) دورة كارنوت على مخطَّط p – v و T – s

4.4 دورة الضغط الثابت: (The Constant Pressure Cycle)

في هذه الدورة فإنَّ إجراءات إمداد الحرارة وفقد الحرارة تحدث إنعكاسياً بضغط ثابت. وتكون إجراءات التمدد والإنضغاط ثابتة القصور الحراري. تم توضيح الدورة على مخطَّط T – s و p – v في الأشكال 4.6(a) و 4.6(b). استخدمت هذه الدورة في إحدى الأوقات كأساس مثالي لمحرك ترددي لهواء ساخن، وتُسمي بدورة جول أو بريتون (Joule or Brayton Cycle). في أيامنا الحاضرة، فإنَّ هذه الدورة هي الدورة المثالية لوحدة توربينة غاز مغلقة الحلقة. هنالك مخطَّطاً 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، بالتالي، بتجاهل تغييرات السرعة، وبتطبيق معادلة طاقة السريان لكل جزء من الدورة، نحصل على،

$$\text{شغل الدخل إلي الضاغط} = (h_2 - h_1) = c_p(T_2 - T_1)$$

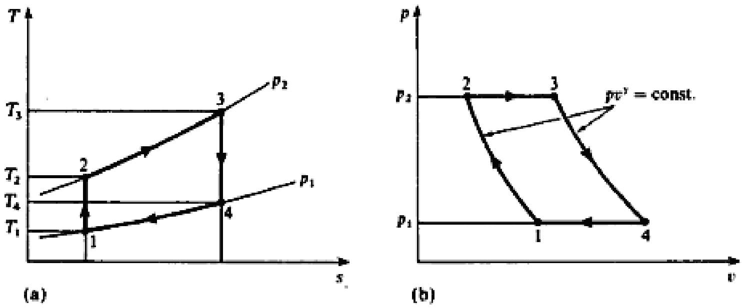
$$\text{شغل الخرج من التوربينة} = (h_3 - h_4) = c_p(T_3 - T_4)$$

$$\text{الحرارة المكتسبة في السخان}\text{، } Q_1 = (h_3 - h_2) = c_p(T_3 - T_2)$$

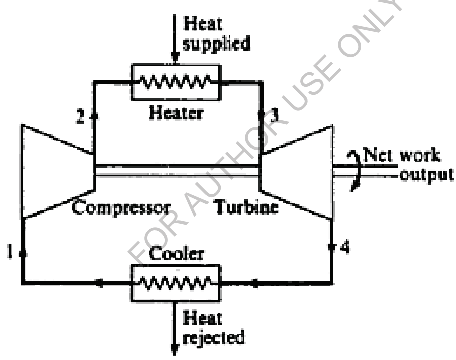
$$\text{الحرارة المفقودة من التوربينة}\text{، } Q_2 = (h_4 - h_1) = c_p(T_4 - T_1)$$

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 مخططي p – v و T – s



شكل (4.7) دورة مغلقة لوحدة توربين غازي

الآن بما أنَّ الإجراءات 1 إلي 2 و 3 إلي 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،

$$T_3 = T_4 r_p^{(\gamma-1)/\gamma} \quad \text{و} \quad T_2 = T_1 r_p^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$T_3 - T_2 = r_p^{(\gamma-1)/\gamma}\left(T_4 - T_1\right)$$

بالتالي بالتعويض في تعبير الكفاءة،

$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{\left(T_4 - T_1\right) r_p^{(\gamma-1)/\gamma}} = 1 - \frac{1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}} \qquad (4.6)$$

عليه لدورة الضغط الثابت، تعتمد الكفاءة الحرارية فقط على نسبة الضغط. في الحالة المثالية فإنَّ قيمة γ للهواء تكون ثابتة ومساوية لـ 1.4. عملياً، ونتيجة لتدويم الهواء كلما يسري خلال الضاغط والتوربينة اللذان هما ماكينات دوَّارة، فإنَّ الكفاءة الحرارية الفعلية ستنخفض كثيراً مقارنة بتلك المعطاة بالمعادلة (4.6).

نسبة الشغل لدورة الضغط الثابت يمكن إيجادها كما يلي،

$$\text{نسبة الشغل} = \frac{c_p\left(T_3 - T_4\right) - c_p\left(T_2 - T_1\right)}{c_p\left(T_3 - T_4\right)}$$

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

الآن كما في سابقه،

$$\frac{T_2}{T_1} = r_p^{(\gamma-1)/\gamma} = \frac{T_3}{T_4}$$

$$\therefore T_2 = T_1 r_p^{(\gamma-1)/\gamma} \quad and \; T_4 = \frac{T_3}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}}$$

بالتالي بالتعويض،

$$\text{نسبة الشغل} = 1 - \frac{T_1\left(r_p^{(\gamma-1)/\gamma} - 1\right)}{T_3\left[1 - \left(1 / r_p^{(\gamma-1)/\gamma}\right)\right]}$$

$$= 1 - \frac{T_1}{T_3}\left(\frac{r_p^{(\gamma-1)/\gamma} - 1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma} - 1}\right) r_p^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$\text{i.e.} \quad \text{نسبة الشغل} = 1 - \frac{T_1}{T_3} r_p^{(\gamma-1)/\gamma} \qquad (4.7)$$

يمكن الملاحظة من المعادلة (4.7) أن نسبة الشغل لا تعتمد فقط على نسبة 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 جيِّد لدورة الضغط الثابت المثالية، بما أنَّ الوقود يتم حرقه بالهواء، ويتم سحب شحنة طازجة بإستمرار في الضاغط. بالرغم من ذلك تُعطي الدورة المثالية أساساً جيِّداً 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°C، ويتم إنضغاطه إلي 6.12bar. أحسب الكفاءة الحرارية ونسبة الشغل لدورة الضغط الثابت المثالية، عندما تكون درجة الحرارة القصوى محدودة بـ 800°C.

الحل:

يتم توضيح الدورة المثالية على مخطَّط T – s في الشكل (4.8). من المعادلة (4.6)،

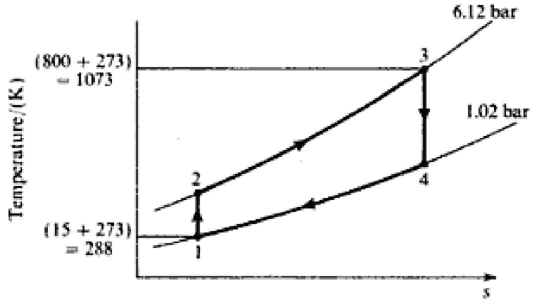
$$\text{الكفاءة الحرارية}،\ \eta = 1 - \frac{1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}}$$

$$\text{i.e.} \quad \eta = 1 - \frac{1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}} = 1 - \left(\frac{1.02}{6.12}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} = 1 - \frac{1}{6^{0.286}} = 1 - 0.598$$

$$\therefore \text{ الكفاءة الحرارية} = \underline{0.402} \quad \text{أو} \quad \underline{40.2}\,\%$$

يُعطي صافي الشغل للدورة بالشغل المبذول بالتوربينة ناقصاً الشغل المبذول على الهواء في الضاغط.

$$\text{i.e.} \qquad \text{صافي الشغل} = c_p\left(T_3 - T_4\right) - c_p\left(T_2 - T_1\right)$$



شكل (4.8) مخطَّط T – s

من المعادلة (2.21)،

$$\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}=\frac{T_3}{T_4}=\left(\frac{6.12}{1.02}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}=6^{0.286}=\underline{1.67}$$

$$\therefore T_2=1.67\times T_1=1.67\times 288=\underline{481}\,\mathrm{K}$$

(حيث $T_1 = 15+273=288$ K).

$$T_4=\frac{T_3}{1.67}=\frac{1073}{1.67}=\underline{643}\,\mathrm{K}$$

(حيث $T_3 = 800+273=1073$ K).

$\therefore$ صافي الشغل $=1.005(1073-643)-1.005(481-288)$

$$=(1.005\times 430-1.005\times 193)=\underline{288}\ \mathrm{kj/kg}$$

أجمالي الشغل = شغل التوربينة $= c_p(T_3-T_4)$

$$=1.005(1073-643)=\underline{432}\ \mathrm{kj/kg}$$

بالتالي،

نسبة الشغل $=\dfrac{288}{432}=\underline{0.55}$

4.5 دورة الهواء القياسية: (The Air Standard Cycle)

لقد تمَّت الإشارة في المقطع 3.1 أنَّ الدورات التي يتم فيها حرق الوقود مباشرة في مائع التشغيل هي ليست محركات حرارية بالمعني الصحيح للمصطلح. عملياً فإنَّ مثل هذه الدورات تستخدم تكراراً وتُسمي بدورات الإحتراق الداخلي. يتم حرق الوقود مباشرة في مائع التشغيل، الذي هو عادة الهواء. تكون الميزة الرئيسية لمثل وحدات القدرة هذه هي إمكانية الحصول على درجات حرارة عالية للمائع، بما أنَّه لا يتم إنتقالها خلال جدران المعدن إلي المائع. يتم الملاحظة من المعادلة (4.1) $\eta = 1-(T_2/T_1)$، 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 إلي داخل الأسطوانة كما في محرك الإحتراق الداخلي، يمكن الحصول على درجات حرارة عالية لمائع التشغيل. تكون درجة الحرارة القصــوى لجمـــيع الدورات محـدودة بالحـد الميتالورجي (metallurgical limit) للمـواد المستخدمة (.e.g في توربينات الغاز تكون درجة الحرارة محدودة بحوالي 800°C). يمكن للمائع في محرك الإحتراق الداخلي أنَّ يصل إلي درجة حرارة مساوية لـ 2750°C. هذا يكون ممكناً بتبريد الأسطوانة خارجياً بما أو هواء؛ أيضاً، نتيجة للطبيعة المتقطعة للدورة فإن مائع التشغيل يصل لدرجة حرارته القصوى فقط للحظة أثناء كل دورة.

من أمثلة دورات الإحتراق الداخلي هي وحدة توربينة الغاز مفتوحة الحلقة، محرك البترول، محرك الديزل 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 مائع التشغيل من أحد المكونات إلي 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 إلي الأسطوانة، حيث يتم إنضغاطه بالكباس، ومن بعد إشعاله بشرارة كهربائية. تتمدَّد الغازات الساخنة دافعة الكباس للوراء ومن بعد تُكسح للخارج إلي العادم. وتُعاد الدورة بسحب شحنة طازجة من البترول والهواء. في محرك الديزل أو الزيت يتم رش زيت تحت ضغط في الهواء المنضغط عند نهاية شوط الإنضغاط، ويكون الإحتراق تلقائياً نتيجة لدرجة الحرارة العالية للهواء بعد الإنضغاط. في محرك غاز فإنَّ خليطاً من الغاز والهواء يتم سحبه في الأسطوانة، إنضغاطه، ومن بعد إشعاله كما في محرك البترول بشرارة كهربائية. لإعطاء أساس للمقارنة لمحرك الإحتراق الداخلي الفعلي يتم تعريف دورة الهواء القياسية.

في دورة هواء قياسية يتم إفتراض أنَّ مادة التشغيل تكون هواء طوال الدورة، يتم إفتراض أن جميع الإجراءات تكون إنعكاسية، ويتم إفتراض أن مصدر إمداد الحرارة وغاطس فقد الحرارة يكونان خارجيان بالنسبة للهواء. يتم تمثيل الدورة على مخطط للخواص، وعادة ما يتم رسمه على مخطَّط $p - v$، بما أنَّ هذه تسمح بمقارنة مباشرة يتم عملها مع دورة المحرك الفعلي التي يمكن الحصول عليها من مخطَّط بياني. يجب التأكيد على أنَّ دورة هواء قياسية على مخطَّط $p - v$ تكون عبارة عن دورة ديناميكية حرارية صحيحة، بينما يكون مخطَّط 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 الهواء القياسية المثالية لمحرك البترول، محرك الغاز، ومحرك الزيت ذو السرعات العالية.

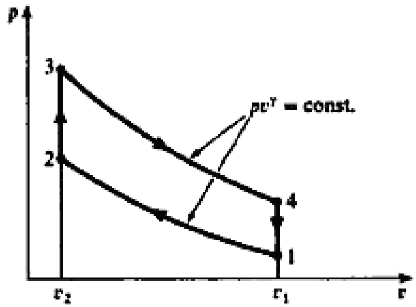
يتم توضيح دورة أوتو في مخطَّط $p - v$ في الشكل (4.9).

الإجراء من 1 إلي 2 هو إنضغاط ثابت القصور الحراري.

الإجراء من 2 إلي 3 هو تسخين ثابت الحجم إنعكاسي.

الإجراء من 3 إلي 4 هو تمدَّد ثابت القصور الحراري.

الإجراء من 4 إلي 1 هو تبريد إنعكاسي ثابت الحجم.



شكل (4.9) دورة أوتو على مخطَّط p – v

لإعطـاء مقارنـة مباشـرة بـالمحرك الفعلـي فـإنَّ نسـبة الحجـوم النوعيـة v_1/v_2 يـتم أخـذها كـنفس نسـبة الإنضـغاط للمحرك الفعلي،

$$\text{i.e.} \quad \text{نسبة الإنضغاط، } r_v = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\text{نسبة الانضغاط} = \frac{\text{حجم الخلوص} + \text{الحجم المكتسح}}{\text{حجم الخلوص}} \quad (4.8)$$

يمكن إيجاد الكفاءة الحرارية لدورة أوتو بإستخدام المعادلة (3.3)،

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2}$$

يتم إعطاء الحرارة المكتسبة، Q_1، بحجم ثابت بين T_2 و T_3 تُعطى بالمعادلة (3.13)، لكل kg من الهواء،

$$Q_1 = c_v\left(T_3 - T_2\right)$$

بالمثل، فإنَّ الحرارة المفقودة، Q_2، بحجم ثابت بين T_4 و T_1 تُعطى بالمعادلة التالية، لكل kg من الهواء،

$$Q_2 = c_v\left(T_4 - T_1\right)$$

تكون الإجراءات 1 إلي 2 و 3 إلي 4 هي ثابتة القصور الحراري وعليه لا يكون هنالك 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 إلي 2 و 3 إلي 4 هي ثابتة القصور الحراري، بالتالي 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،

$$T_3 = T_4 r_v^{\ \gamma-1} \quad , \quad T_2 = T_1 r_v^{\ \gamma-1}$$

بالتالي بالتعويض،

$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{(T_4 - T_1) r_v^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{r_v^{\gamma-1}} \qquad (4.9)$$

يمكن الملاحظة من المعادلة (4.9) أنَّ الكفاءة الحرارية لدورة أوتو تعتمد فقط على نسبة الإنضغاط r_v.

مثال (4.5):

أحسب الكفاءة الحرارية لدورة الهواء القياسية المثالية المؤسسة على دورة أوتو لمحرك بترول بقطر داخلي للأسطوانة مقداره 50mm وشوط مقداره 75mm، وحجم خلوص مقداره $21.3cm^3$.

الحل:

حجم الإكتساح،

$$\text{حجم الإكتساح} = \frac{\pi}{4} \times 50^2 \times 75 = \underline{147200}\, cm^3$$

$$\therefore\ \text{حجم الأسطوانة الكلي} = 147.2 + 21.3 = \underline{168.5}\, cm^3$$

$$\text{i.e.}\quad \text{نسبة الإنضغاط}،\ r_v = \frac{168.5}{21.3} = 7.92/1$$

بالتالي بإستخدام المعادلة (4.9)،

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_v^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{7.92^{0.4}} = 1 - 0.437 = \underline{0.563} \quad \text{or} \quad \underline{56.3}\%$$

4.7 دورة ديزل: (The Diesel Cycle)

المحركات المستخدمة هذه الأيام والتي تسمي بمحركات الديزل إبتعدت كثيراً عن المحرك الأصلي الذي إخترعه 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 بالإنضغاط، وقد تم تأصيلاً تفجير الزيت في الأسطوانة بنفس الطريقة التي قصدها ديزل برش بودرة الفحم. هذه أعطت دورة تشغيل لديها رصيفتها المثالية التي هي دورة الهواء القياسية لديزل الموضحة في الشكل (4.10).

كما في سابقه، فإنَّ نسبة الانضغاط r_v، تُعطي بالنسبة v_1/v_2.

الإجراء من 1 إلي 2 هو إنضغاط ثابت القصور الحراري.

الإجراء من 2 إلي 3 هو تسخين إنعكاسي ثابت الحجم.

الإجراء من 3 إلي 4 هو تمدّد ثابت القصور الحراري.

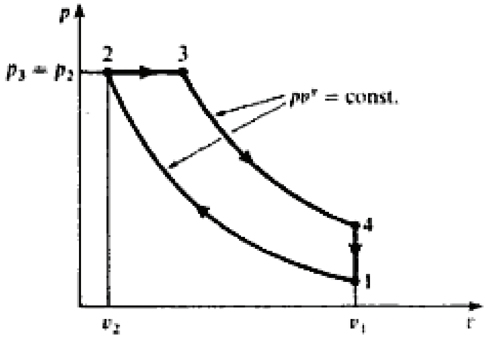
الإجراء من 4 إلي 1 هو تبريد إنعكاسي ثابت الحجم.

من المعادلة (3.3)،

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2}$$

عند ضغط ثابت من المعادلة التالية، لكل kg من الهواء،

$$Q_1 = c_p\left(T_3 - T_2\right)$$



شكل (4.10) دورة ديزل على مخطَّط 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 إلي 2 و 3 إلي 4 بما أنَّ هذه الإجراءات تكون ثابتة القصور الحراري. بالتالي بالتعويض لـ Q_1 و Q_2 في تعبير الكفاءة الحرارية يمكن إشتقاق المعادلة التالية،

$$\eta = 1 - \frac{\beta^\gamma - 1}{(\beta - 1) r_v^{\gamma-1} \gamma} \qquad (4.10)$$

(حيث نسبة إنقطاع الوقود = $\beta = v_3 / v_2$)

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 بدلالات T_1 و r_v أو β. لا يتم إعطاء الإشتقاق هنا، لأنَّه يُعتقد 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°C و 1bar على الترتيب. تكون نسبة الإنضغاط هي 12/1 ودرجة حرارة الدورة القصوى هي 1100°C. أحسب الكفاءة الحرارية لدورة الهواء القياسية المؤسسة على دورة ديزل.

الحل:

بالرجوع للشكل (4.11)،

$$T_3 = 1100 + 273 = 1373\ \text{K},\ \ T_1 = 15 + 273 = 288\ \text{K}$$

من المعادلة (2.20)،

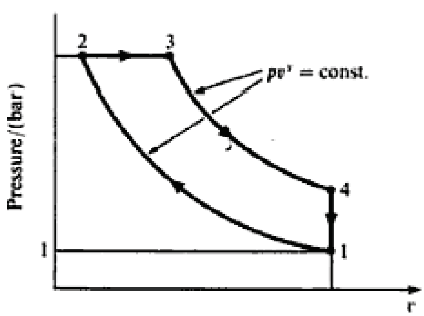
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1} = r_v^{\gamma-1} = 12^{0.4} = 2.7$$

$$\text{i.e.}\quad T_2 = 2.7 \times 288 = \underline{778}\ \text{K}$$

عند ضغط ثابت من 2 إلي 3، بما أنَّ pv=RT، لغاز مثالي، بالتالي،

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{v_3}{v_2}$$

$$\text{i.e.}\quad \frac{v_3}{v_2} = \frac{1373}{778} = \underline{1.765}$$



شكل (4.11) دورة ديزل على مخطَّط 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)،

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^{\gamma-1} = 6.8^{0.4} = \underline{2.153}$$

$$\text{i.e.} \quad T_4 = \frac{1373}{2.153} = \underline{638}\,\text{K}$$

بالتالي من المعادلة التالية، لكل kg من الهواء،

$$Q_1 = c_p(T_3 - T_2) = 1.005(1373 - 778) = \underline{598}\,\text{kj/kg}$$

أيضاً من المعادلة التالية، لكل kg من الهواء،

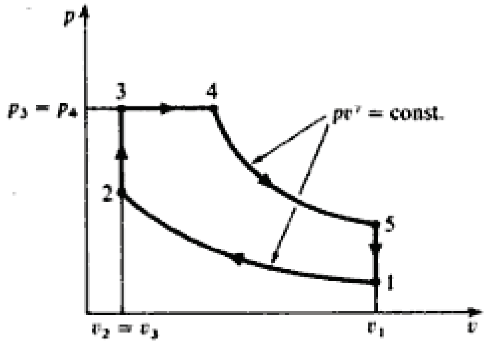
$$Q_2 = c_v(T_4 - T_1) = 0.718(638 - 288) = \underline{251}\,\text{kj/kg}$$

عليه من المعادلة (3.3)،

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{251}{598} = \underline{0.58} \quad \text{or} \quad \underline{58}\,\%$$

4.8 دورة الإحتراق الثنائي: (The Dual Combustion Cycle)

بالرغم من أنَّ محركات الزيت الحديثة ما يزال يُطلق عليها محركات ديزل إلا أنَّها إشتقت بتقارب 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 مُحمل بنابض، ويتم تشغيل مضخة الوقود بواسطة حدبة تُدار من العمود المرفقي للمحرك. الدورة المثالية المستخدمة كأساس للمقارنة تُسمي بدورة الإحتراق الثنائي أو الدورة الممزوجة (mixed cycle)، ويتم توضيحها على مخطَّط p – v في الشكل (4.12).



شكل (4.12) دورة الإحتراق الثنائي على مخطَّط p – v

الإجراء من 1 إلي 2 هو إنضغاط ثابت القصور الحراري.

الإجراء من 2 إلي 3 هو تسخين إنعكاسي ثابت الحجم.

الإجراء من 3 إلي 4 هو تسخين إنعكاسي ثابت الضغط.

الإجراء من 4 إلي 5 تمدَّد ثابت القصور الحراري.

الإجراء من 5 إلي 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 ثنـائي. لكي يتم تثبيت الكـفاءة الحرارية مطـلقاً 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،

$$\eta = 1 - \frac{k\beta^\gamma - 1}{\left[(k-1) + \gamma k(\beta - 1)\right] r_v^{\gamma-1}} \qquad (4.11)$$

لاحظ أنَّه عندما $k = 1$ ($i.e.\ p_3 = p_2$)، تنخفض بالتالي المعادلة (4.11) إلي الكفاءة الحرارية لدورة ديزل المعطاة بالمعادلة (4.10). لا تعتمد كفاءة دورة الإحتراق الثنائي فقط على نسبة الإنضغاط بل تعتمد أيضاً على المقادير النسبية للحرارة المكتسبة بحجم ثابت وبضغط ثابت. يكون من المرهق جداً إستخدام المعادلة (4.11)،

ويكون الأسلوب الأفضل لحساب الكفاءة الحرارية هو تقييم كل درجة حرارة حول الدورة وبالتالي إستخدام المعادلة (3.3)، $\eta = 1-(Q_2/Q_1)$. يتم إيجاد الحرارة المكتسبة، Q_1، بإستخدام المعادلة التالية للحرارة المضافة بحجم ثابت وضغط ثابت على الترتيب.

$$Q_1 = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)$$

تُعطي الحرارة المفقودة، Q_2، بـ،

$$Q_2 = c_v(T_4 - T_1)$$

مثال (4.6):

محرك زيت يسحب هواء عند 1.01bar، 20°C ويكون ضغط الدورة الأقصى مساوياً لـ 69bar. تكون نسبة الإنضغاط 18/1. أحسب الكفاءة الحرارية لدورة الهواء القياسية المؤسسة على دورة الإحتراق الثنائي. إفترض أنَّ الحرارة المضافة بحجم ثابت تكون مساوية للحرارة المضافة بضغط ثابت.

الحل:

يتم توضيح الدورة على مخطَّط p – v في الشكل (4.13). مستخدماً المعادلة (2.20)،

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1} = 18^{0.4} = \underline{3.18}$$

$$\text{i.e. } T_2 = 3.18 \times T_1 = 3.18 \times 293 = \underline{931}\,\text{K}$$

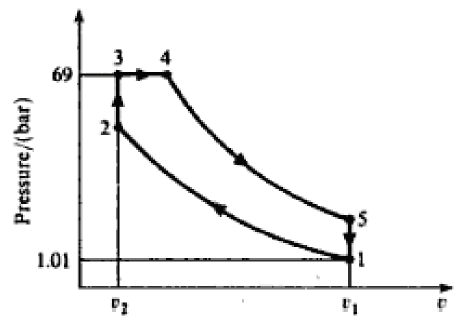
(حيث $T_1 = 20 + 273 = 293$ K).

من 2 إلي 3 يكون الإجراء بحجم ثابت، بالتالي،

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

(بما أنَّ $v_3 = v_2$، $\frac{p_3 v_3}{T_3} = \frac{p_2 v_2}{T_2}$).

$$T_3 = \frac{p_3}{p_2} \times T_2 = \frac{69 \times 931}{p_2}$$



شكل (4.13) دورة الإحتراق الثنائي

لإيجاد p_2، إستخدم المعادلة (2.19)،

$$\text{i.e.}\quad \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma} = 18^{1.4} = 57.2$$

$$\text{i.e.}\quad p_2 = 57.2 \times 1.01 = \underline{57.8}\ \text{bar}$$

بالتالي بالتعويض،

$$T_3 = \frac{69 \times 931}{57.8} = \underline{1112}\ \text{K}$$

الآن الحرارة المضافة بحجم ثابت تكون مساوية للحرارة المضافة بضغط ثابت في هذا المثال. عليه،

$$c_v\left(T_3 - T_2\right) = c_p\left(T_4 - T_3\right)$$

$$\text{i.e.}\ \ 0.718(1112 - 931) = 1.005(T_4 - 1112)$$

$$\therefore T_4 = \frac{0.718 \times 181}{1.005} + 1112 = \underline{1241.4}\,\text{K}$$

$$\text{i.e.}\ \ T_4 = \underline{1241.4}\,\text{K}$$

لإيجاد T_5 من الضروري معرفة قيمة نسبة الحجم v_5/v_4. عند ضغط ثابت من 3 إلي 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)،

$$\frac{T_4}{T_5}=\left(\frac{v_5}{v_4}\right)^{\gamma-1}=16.14^{0.4}=\underline{3.04}$$

$$\text{i.e.}\quad T_5=\frac{1241.1}{3.04}=\underline{408}\,\text{K}$$

الآن فإنَّ الحرارة المكتسبة، Q_1 تُعطي بـ،

$$Q_1=c_v\left(T_3-T_2\right)+c_p\left(T_4-T_3\right)\quad \text{أو} \quad Q_1=2c_v\left(T_3-T_2\right)$$

(بما أنَّه في هذا المثال تكون الحرارة المضافة بحجم ثابت مساوية للحرارة المضافة بضغط ثابت).

$$\therefore Q_1=2\times0.718\times\left(1112-931\right)=\underline{260}\,\text{kj/kg}$$

تُعطي الحرارة المفقودة، Q_2، بـ ،

$$Q_2=c_v\left(T_5-T_1\right)=0.718\left(408-293\right)=\underline{82.6}\,\text{kj/kg}$$

بالتالي من المعادلة (3.3)،

$$\eta=1-\frac{Q_1}{Q_2}=1-\frac{82.6}{260}=1-0.318=\underline{0.682}\quad\text{or}\quad\underline{68.2}\,\%$$

هنا يجب ذكر أنَّ محرك الزيت الحديث ذو السرعة العالية يشتغل على دورة بحيث أنَّ دورة أوتو تكون الأساس الأفضل للمقارنة. أيضاً، بما أنَّ حساب الكفاءة الحرارية لدورة أوتو يكون أبسط بكثير عن ذلك لدورة الإحتراق الثنائي، بالتالي فإنَّ هذا يكون سبباً آخر لإستخدام دورة أوتو كمعيار للمقارنة.

4.9 متوسط الضغط الفعَّال: (Mean Effective Pressure)

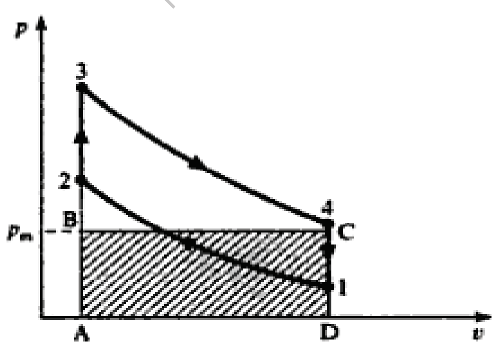
لقد تم تعريف مصطلح نسبة الشغل في المقطع 4.3، وهذا قد تم توضيحه ليكون قاعدة مفيدة لمحطات قدرة عملية. لمحركات الإحتراق، لا يكون مصطلح نسبة الشغل مفهوماً مفيداً، بما أنَّ الشغل المبذول على أو بمائع التشغيل يحدث داخل إحدى الأسطوانات. لكي يتم مقارنة المحركات الترددية يتم تعريف مصطلح آخر

يعرف بمتوسط الضغط الفعَّال. يتم تعريف متوسط الضغط الفعَّال كإرتفاع لمستطيل بنفس الطول والمساحة كما في الدورة المرسومة على مخطَّط p – v. يتم توضيح هذه لدورة أوتو في الشكل (4.14).

يكون المستطيل ABCDA بنفس الطول كما في الدورة 12341، وتكون المساحة ABCDA مساوية للمساحة 12341. بالتالي فإنَّ متوسط الضغط الفعّال p_m، يكون الإرتفاع AB للمستطيل. عليه يمكن كتابة الشغل المبذول لكل kg من الهواء،

$$W = \text{المساحة} \quad ABCDA = p_m(v_1 - v_2) \qquad (4.12)$$

يكون العنصر $(v_1 - v_2)$ متناسباً مع الحجم المكتسح للأسطوانة، بالتالي يمكن الملاحظة من المعادلة (4.12) أن متوسط الضغط الفعَّال يُعطي قياساً لشغل الخرج لكل حجم مكتسح. عليه يمكن استخدامه لمقارنة محركات مشابهة بحجم (بمقاس) مختلف. يكون متوسط الضغط الفعَّال الذي تمت مناقشته في هذا المقطع خاصاً بدورة الهواء القياسية. سيتم التوضيح لاحقاً أنَّ متوسط الضغط الفعَّال البياني لمحرك فعلي يمكن قياسه من مخطَّط بيان ويُستخدم لتقييم الشغل البياني المبذول بالمحرك.



شكل (4.14) متوسط الضغط الفعَّال على مخطط p – v

مثال (4.7):

أحسب متوسط الضغط الفعَّال للدورة في المثال (4.6).

الحل:

في المثال (4.6) وُجِد أن الحرارة المكتسبة، Q_1، والكفاءة الحرارية يكونان 260kj/kg و 68.2% على الترتيب. من المعادلة (3.5)،

$$\eta = \frac{W}{Q_1}$$

عليه،

$$W = \eta Q_1 = 0.682 \times 260 = \underline{177}\ kj/kg$$

الآن من تعريف متوسط الضغط الفعَّال، والمعادلة (4.12) نحصل على،

$$W = p_m(v_1 - v_2)$$

مستخدماً المعادلة التالية $pv = RT$ والمعادلة (4.8)، $r_v = v_1/v_1 = 18$،

بالتالي،

$$v_1 - v_2 = \left(v_1 - \frac{v_1}{18}\right) = \frac{17}{18} v_1 = \frac{17}{18}\frac{RT_1}{p_1} = \frac{17 \times 287 \times 293}{18 \times 1.01 \times 10^3}$$

$$\text{i.e. } v_1 - v_2 = \underline{0.786}\ m^3/kg$$

بالتالي بالتعويض،

$$W = p_m \times 0.786 \quad \text{أو} \quad p_m = W/0.786 kj/m^3$$

$$\text{i.e. متوسط الضغط الفعَّال} = \frac{177 \times 10^3}{10^3 \times 0.786} = \underline{2.25}\ \text{bar}$$

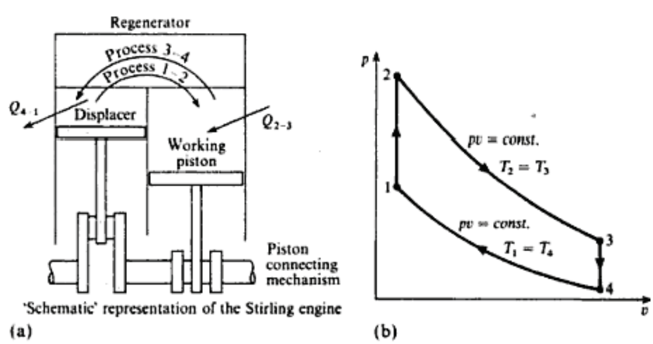
4.10 دورات إستيرلنق و إريكسون: (The Stirling and Ericsson Cycle)

لقد تم التوضيح أنَّه لا يمكن لدورة أن تمتلك كفاءة أكبر من تلك لدورة كارنوت التي تعمل بين حدي درجة الحرارة T_1 وT_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.

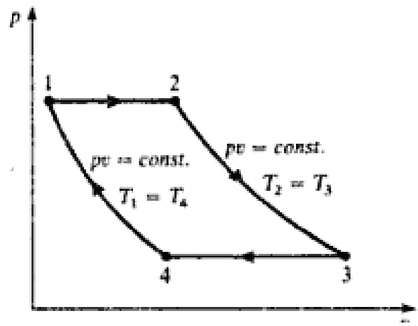
يتم توضيح دورة إستيرلينق في مخطَّط p – v في الشكل 4.15(b) ويتم تمثيلها مخططياً في الشكل 4.15(a). يجب التأكيد على أنَّه ليس ذلك وصفاً فيزيائياً لمحرك إستيرلينق بل هو إحدى الطرق التي يمكن أن تُعطي فهماً لنوع العلاقة التي تربط الإجراءات المكونة للدورة.

يتم إمداد الحرارة لمائع التشغيل، الذي هو عادة الهايدروجين أو الهيليوم، من مصدر خارجي، الإجراء 3–2، كلما يتمدَّد الغاز بثبات الحرارة ($T_2=T_3$)، وتفقد الحرارة إلي غاطس خارجي، الإجراء 1–4، كلما يتم إنضغاط الغاز بثبات درجة الحرارة ($T_1=T_4$). يتم توصيل الإجرائين ثابتي درجة الحرارة بإجرائين إنكاسيين ثابتي الحجم 1–2 و 4–3 يكون خلالها تغييرات درجة الحرارة مكافئة لـ ($T_2=T_1$). يتم إستخدام الحرارة المفقودة أثناء الإجراء 3-4، $Q_{3-4}=c_v\left(T_2-T_1\right)$، لتسخين الغاز أثناء الإجراء 2–1، i.e. $Q_{1-2}=c_v\left(T_2-T_1\right)=Q_{3-4}$، وهذا يفترض أن يحدث مثالياً وإنعكاسياً في مولد تجديدي (regenerator). يتطلب المولد التجديدي مصفوفة من مادة تقوم بفصل غازات التسخين و التبريد لكنه يسمح لدرجات الحرارة بالتغير 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 دروة إريسكون مشابهة لدورة إستيرلينق بإستثناء أن الإجراءان ثابتي درجة الحرارة يتم توصيلهما بإجرائين ثابتي الضغط، كما موضح في الشكل (4.16).



شكل (4.16) دورة إركسون على مخطَّط p – v

يتم الحصول على كفاءة دورة إستيرلينق بإعتبار إنتقالات الحرارة بين النظام والأجسام الخارجية، .i.e إمداد حرارة بدرجة حرارة عالية، وغاطس بدرجة حرارة منخفضة يتم عنده فقد الحرارة.

الحرارة المكتسبة من المصدر الساخن، مستخدماً المعادلات (2.11) و(2.12)،

لكل وحدة كتلة غاز ،

$$Q_{2-3} = W_{2-3} = RT_2 \log_e \frac{p_2}{p_3}$$

بالمثل الحرارة المفقودة إلي 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

$$W = Q_{2-3} - Q_{4-1}$$

وبما أنَّ كفاءة الدورة،

$$\eta = \frac{W}{Q_{2-3}}$$

$$\therefore \eta = \frac{Q_{2-3} - Q_{4-1}}{Q_{2-3}} = 1 - \frac{Q_{4-1}}{Q_{2-3}}$$

$$= 1 - \frac{RT_1 \log_e \frac{p_2}{p_3}}{RT_2 \log_e \frac{p_1}{p_4}}$$

لإجراء ثابت الحجم 2−1،

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

وللإجراء 4−3،

$$\frac{p_3}{p_4} = \frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\therefore \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4} \quad , \qquad \frac{p_2}{p_3} = \frac{p_1}{T_4}$$

كفاءة كارنوت، $\therefore \eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$

(يمكن إستنباط هذه النتيجة بدون برهان رسمي بما أنَّ إجرءات إمداد الحرارة وفقد الحرارة تحدث عند درجات حرارة ثابتة).

$$\text{نسبة الشغل} = \frac{W_{2-3} - W_{4-1}}{W_{2-3}} = 1 - \frac{W_{4-1}}{W_{2-3}} = 1 - \frac{Q_{4-1}}{Q_{2-3}} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

وتكون مساوية في القيمة لكفاءة الدورة.

التفسير العملي للدورة المثالية سوف لن يتم وصفه بالتفصيل ويُنصح القارئ بإستشارة ما كتبه الإختصاصيين عن الترتيبات الميكانيكية المستخدمة وتقويمات الإداء. يُعطي الشكل 4.15(b) تمثيلاً مبسطاً للمحرك ويُوضح الضرورة لكباسين، كباس تشغيل وكباس إزاحة، الذي هو حقيقة يعمل في أجزاء مختلفة لنفس الأسطوانة وليس كما تم تمثيله. من الضروري للدورة المثالية للكباسات أن تتحرك باستمرارية وهذه فقط قد تم تقريبها بالآلات

المستخدمة. تكون النتيجة هي أنَّه لا يتم تحقيق إجراءات الدورة المثالية ويكون هنالك إنحرافاً معتبراً عن مخطَّط $p - v$ المثالي بما أنَّ إجراءات التشغيل والتبريد تندمج لتبتعد عن مفهوم التسخين ثابت الحجم. لقد كانت المحاولات الأولي لبناء محرك إستيرلينق غير ناضجة وجعلته الإنجازات المتسارعة لمحرك الإحتراق الداخلي غير مواكباً. منذ عام 1938 عندما بدأ Philips من Eindhoven تطوير الدورة زادت الرغبة في الإمكانية العملية لمحرك إستيرلينق. لقد كان الجاذب لهذه الدورة هو أنَّها يمكن أن تستفيد من أي شكل للحرارة من الوقود التقليدي أو البلدي، مصادر الطاقة الشمسية أو النووية، بمعلومية أن درجة الحرارة التي يتم خلقها تكون عالية بكفاية. تكون المحركات هادئة، وبكفاءة مساوية أو أفضل من محركات الإحتراق الداخلي الأفضل وباهتزاز قليل نتيجة لطبيعة الإدارة المطلوبة لإعطاء حركة تفاضلية (فرقية) بين كباسي التشغيل والإزاحة. يكون مدى التطبيق الممكن لمحركات إستريلينق واسعاً ليشمل الإستخدامات البحرية، توليد الكهرباء لأحمال عالية وكوحدات إسعافية (stand-by units)، لأغراض المحركات خصيصاً عند المقارنة بمحركات الديزل، أو في مواقف يمكن أو يجب إستخدام وقودات غير تقليدية أو أيَّ مصادر للحرارة. لقد تم إعتبار محرك إستيرلينق للإستخدام في الفضاء بإستعمال الطاقة من الشمس، وللغواصات اللانووية وللطوربيدات. ولقد 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 وإستخدامها 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°C و 15°C.

Ans. (73.2%)

2- محركان حراريان إنعكاسيان يشتغلان في توالي بين مصدر عند 527°C وغاطس عند 17°C. إذا كان للمحركان كفاءات متساوية ويلفظ الأول إلى الثاني 400kj. أحسب:-

A. درجة الحرارة التي يتم عندها إمداد حرارة إلي 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 تشتغل بين 307°C و 17°C يكون الضغطان الأقصى والأدنى هما 62.4bar و 1.04bar. أحسب الكفاءة الحرارية ونسبة الشغل. إفترض أنَّ مائع التشغيل هو الهواء.

Ans. (50%; 0.287)

4- وحدة توربينة غاز مغلقة الحلقة تعمل بين درجتي حرارة قصوى ودنيا مقدارهما 760°C و 20°C ، لها نسبة ضغط 7/1. أحسب الكفاءة الحرارية المثالية ونسبة الشغل.

Ans. (42.7%; 0.503)

5- في دورة قياسية مؤسسة على دورة أوتو تكون درجتا الحرارة القصوى والدنيا هما 1400°C و 15°C. تكون الحرارة المكتسبة لكل kg من الهواء هي 800 kj. أحسب نسبة الإنضغاط والكفاءة الحرارية. أحسب أيضاً نسبة الضغط الأقصى إلي الضغط الأدنى في الدورة.

Ans. (5.26/1; 48.6%; 30.5/1)

6- محرك بترولي ذو أربع أسطوانات بحجم مكتسح مقداره $2000cm^3$، وبحجم خلوصي في كل أسطوانة مقداره $60cm^3$. أحسب الكفاءة الحرارية لدورة الهواء القياسية. إذا كانت أحوال السحب هي 1bar و 24°C، ودرجة الحرارة القصوى للدورة هي 1400°C، أحسب متوسط الضغط الفعَّال 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 لنيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2000م).

2. أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات انتقال الكتلة بالانتشار والحمل الجزء الأول، الثاني" ، جامعة وادي لنيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2005م).

3. أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات ديناميكا حرارية(1) و ديناميكا حرارية(2)" ، جامعة وادي لنيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2007م).

4. برهان محمود العلي ، أحمد نجم الصبحة ، بهجت مجيد مصطفى ، " ترجمة كتاب أساسيات انتقال الحرارة" ، مديرية دار الكتب للطباعة والنش ، 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",2nd Edition, Longman, 1986.
4. Rogers G. F. C. and Mayhew Y. R., "Engineering Thermodynamics, Work and Heat Transfer", 4th Edition, Longman, 1992.
5. National Engineering Labrotary, "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 Thoery", 3rd 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 Turbomachinary", 3rd 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", 2nd Edition, Wiley, 1990.
19. Reay D. A. and Macmichael D. B. A., "Heat Pumps", 2nd Edition, Pergamon, 1987.
20. Rogers G. F. C. and Mayhew Y. R., "Thermodynamics and Transport Properties of Fluids", 4th Edition, Basil Blackwell, 1987.
21. Kemp D. D., "Global Environmental Issues", Routledge, 1990.
22. Threlkeld J. L., "Thermal Environmental Engineering", 2nd Edition, Prentice, 1970.
23. Jones W. P., "Air Conditioning Engineering", 3rd Edition, Edward Arnold, 1985.
24. Welty J. R., "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer", 3rd 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", 3rd 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", 2nd Edition, McGraw – Hill, 1990.
30. Kays W. M. and London A. L., "Compact Heat Exchangers", 3rd Edition, McGraw – Hill, 1984.
31. McAdams W. H., "Heat Transmission", 3rd 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.

نبـذة عـن المـؤلـف:

أسامة محمد المرضي سليمان وُلِدَ بمدينة عطبرة بالسودان في العام 1966م. حاز على دبلوم هندسة ميكانيكية من كلية الهندسة الميكانيكية – عطبرة في العام 1990م. تحصَّل 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 ثلاثين كتاباً باللغة العربية ولعشرة كتب باللغة الإنجليزية بالإضافة لخمسين ورقة علمية منشورة في دور نشر ومجلات عالمية إلى جانب إشرافه على أكثر من ثلاثمائة بحث تخرج لكل من طلاب الماجستير، الدبلوم العالي، البكالوريوس، والدبلوم العام. يشغِل الآن وظيفة أستاذ مساعد بقسم الميكانيكا بكلية الهندسة والتقنية – جامعة وادي النيل. بالإضافة لعمله كاستشاري لبعض الورش الهندسية بالمنطقة الصناعية عطبرة. هذا بجانب عمله كمدير فني لمجموعة ورش الكمالي الهندسية لخراطة أعمدة المرافق واسطوانات السيارات والخراطة العامة وكبس خراطيش الهيدروليك.