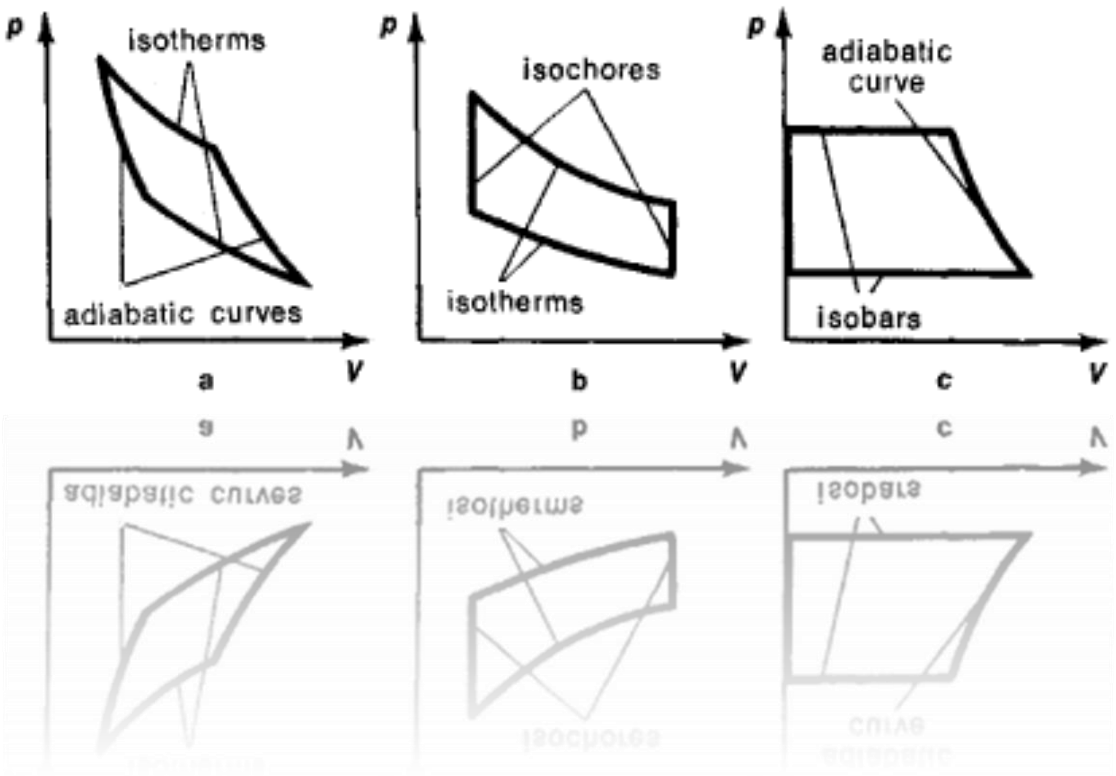
الدورة الديناميكية الحرارية



Thermodynamic cycle

إعداد
المهندس عدنان بهجت جليل

الدورة الديناميكية الحرارية Thermodynamic cycle

المحتويات

الدورة الديناميكية الحرارية 2
الحرارة والشغل 2
الشغل 2
دورات القدرة (الطاقة) 3
دورات المضخة الحرارية 5
تصميم الأنظمة الحقيقية 6
دورات ديناميكية حرارية معروفة 8
دورة مثالية 9
دورة كارنوت 9
دورة ستيرلنغ 10
دوال الحالة والإنتروبي 11
المراجع 12

الدورة الديناميكية الحرارية Thermodynamic cycle

تتكون الدورة الديناميكية الحرارية من سلسلة من العمليات الديناميكية الحرارية التي تنقل الحرارة Heat والشغل Work ، في حين تتغير الضغوط ودرجات الحرارة ومتغيرات الحالة الأخرى ، مما يؤدي في النهاية إلى عودة النظام إلى حالته الأولية . في عملية المرور خلال هذه الدورة ، قد يقوم النظام بتنفيذ شغل على البيئة المحيطة به Surroundings ، وبالتالي يعمل كمحرك حراري Heat Engine .

تعتمد كميات الحالة فقط على الحالة الديناميكية الحرارية ، ويؤدي الاختلاف التراكمي لمثل هذه الخصائص إلى الصفر خلال الدورة . كميات العملية (أو كميات المسار) ، مثل الحرارة والشغل تكون معتمدة على العملية ، والحرارة التراكمية والشغل هي غير صفرية . ينص القانون الأول للديناميكية الحرارية على أن الدخل الحراري الصافي Net Heat Input يساوي صافي ناتج الشغل Net Work Output لأي دورة . إن الطبيعة الدورية أو المتكررة لمسار العملية تسمح بإستمرارية عمل الدورة ، مما يجعل الدورة مفهوما مهما في الديناميكية الحرارية . تستخدم الدورات الديناميكية الحرارية غالبا عمليات شبه ثابتة Quasistatic Processes لنمذجة وصياغة عمل الأجهزة الفعلية .

ملاحظة : عملية شبه ثابتة هي عملية ديناميكية حرارية تحدث ببطء بما فيه الكفاية لكي يبقى النظام في حالة توازن داخلي . مثال على ذلك هو الإنضغاط شبه الإستاتيكي ، حيث يتغير حجم النظام بمعدل بطيء بما فيه الكفاية للسماح للضغط بالبقاء متجانسا وثابتا في جميع أنحاء النظام .

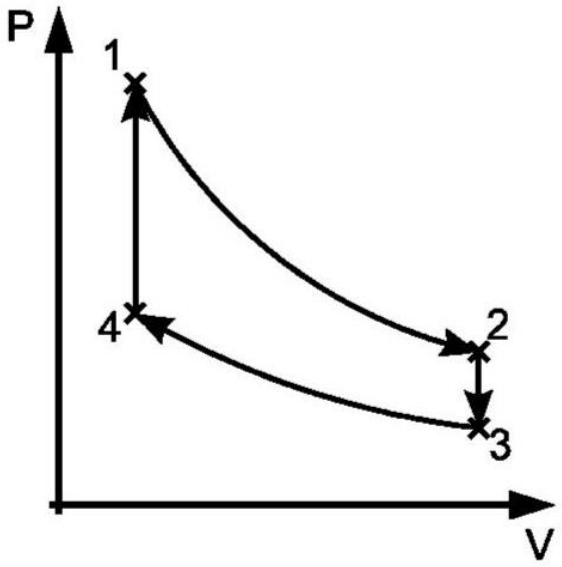
الحرارة والشغل Heat and work

هناك فئتان أساسيتان من الدورات الديناميكية الحرارية هما **دورات القدرة Power Cycles** و **دورات مضخة الحرارة Heat Pump Cycles** . دورات القدرة عبارة عن دورات تحول بعض المدخلات الحرارية Heat Input إلى مخرجات شغل ميكانيكية Mechanical Work Output ، بينما تنقل دورات المضخات الحرارية الحرارة من درجات حرارة منخفضة إلى درجات عالية بإستخدام شغل ميكانيكي Mechanical Work Input . يمكن أن تعمل الدورات المتكونة بالكامل من عمليات شبه ثابتة كدورات قدرة أو دورات مضخة حرارية عن طريق التحكم في إتجاه العملية . على المخطط البياني للحجم - الضغط أو المخطط البياني للحرارة - الإنتروبي ، تشير إتجاهات عقارب الساعة وعكس عقارب الساعة إلى دورات القدرة ودورات المضخة الحرارية على التوالي .

الشغل Work

لأن صافي التغيير أو الإختلاف في خصائص الحالة خلال دورة ديناميكية حرارية هو صفر ، فإنه يشكل حلقة

أو دورة مغلقة على مخطط الضغط – الحجم **PV- Diagram** . يعرض المحور **Y** الضغط (**P**) ويظهر المحور **X** الحجم (**V**) . المنطقة التي تحيط بها الحلقة هي الشغل (**W**) الذي تقوم به وتنجزه العملية .



مثال على مخطط P-V لدورة ديناميكية حرارية

$$(1) \qquad W = \oint P\, dV$$

هذا الشغل يساوي التوازن في الحرارة (Q) المنقولة إلى النظام :

$$(2) \qquad W = Q = Q_{in} - Q_{out}$$

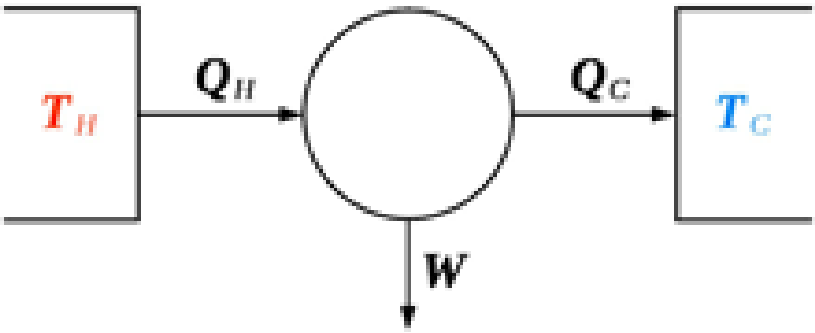
تقوم المعادلة (٢) بإجراء عملية دورية مماثلة لعملية متساوية الحرارة Isothermal Process : على الرغم من أن الطاقة الداخلية Internal Energy تتغير خلال مسار العملية الدورية ، عندما تنهي العملية الدورية طاقة النظام هي نفس الطاقة التي كانت عليها عند بدء العملية .

إذا تحركت العملية الدورية في إتجاه عقارب الساعة حول الدورة ، سيكون W موجبا ، وتمثل محرك حراري Heat Engine . إذا تحركت عكس إتجاه عقارب الساعة ، فسيكون W سالبا ، ويمثل مضخة حرارية Heat Pump .

دورات القدرة (الطاقة) Power cycles

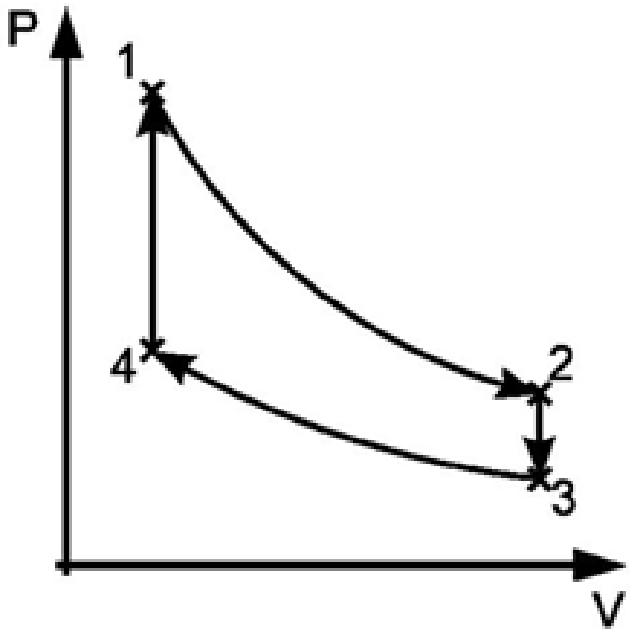
دورات الطاقة الديناميكية الحرارية هي أساس عمل المحركات الحرارية ، التي تجهز معظم الطاقة الكهربائية في العالم وتدير تقريبا جميع المركبات الآلية و السيارات . يمكن تقسيم دورات الطاقة وفقا لنوع المحرك

الحراري الذي يُسعى إلى تصميمه . إن الدورات الأكثر شيوعا التي تمثل محركات الإحتراق الداخلي Internal Combustion Engines هي دورة أوتو Otto Cycle ، التي تمثل محركات البنزين Gasoline Engines ودورة الديزل Diesel Cycle ، التي تمثل محركات الديزل Diesel Engines . وتشمل الدورات التي تمثل محركات الإحتراق الخارجي External Combustion Engines دورة برايتون Brayton Cycle ، التي تمثل التوربينات الغازية Gas Turbines ، ودورة رانكين Rankine Cycle ، التي تمثل التوربينات البخارية Steam Turbines .



مخطط المحرك الحراري

على سبيل المثال ، الشغل الميكانيكي للضغط - الحجم الذي يتم في دورة المحرك الحراري ، يتكون من ٤ عمليات ديناميكية حرارية ، هي :



تظهر الدورة الديناميكية الحرارية التي في إتجاه عقارب الساعة والمحددة بالأسهم أن الدورة تمثل محرك حراري . تتكون الدورة من أربع حالات (علامات الضرب x) وأربعة عمليات ديناميكية حرارية (خطوط) .

$$(3) \qquad W = W_{1\to2} + W_{2\to3} + W_{3\to4} + W_{4\to1}$$

$$W_{1\to2} = \int_{V_1}^{V_2} P\,dV, \text{ negative, work done by system}$$

$$W_{2\to3} = \int_{V_2}^{V_3} P\,dV, \text{ zero work if V2 equal V3}$$

$$W_{3\to4} = \int_{V_3}^{V_4} P\,dV, \text{ positive, work done on system}$$

$$W_{4\to1} = \int_{V_4}^{V_1} P\,dV, \text{ zero work if V4 equal V1}$$

إذا لم يحدث تغيير بالحجم في العملية (1 ← 4) و (3 ← 2) ، فإن المعادلة (3) تُبسط إلى :

$$(4) \qquad W = W_{1\to2} + W_{3\to4}$$

$W_{1\to2}$ الشغل سالب يتم من قبل النظام .

$W_{2\to3}$ الشغل = ٠ ، إذا (V3 = V2) .

$W_{3\to4}$ الشغل موجب يتم على النظام .

$W_{4\to1}$ الشغل = ٠ ، إذا (V1 = V4) .

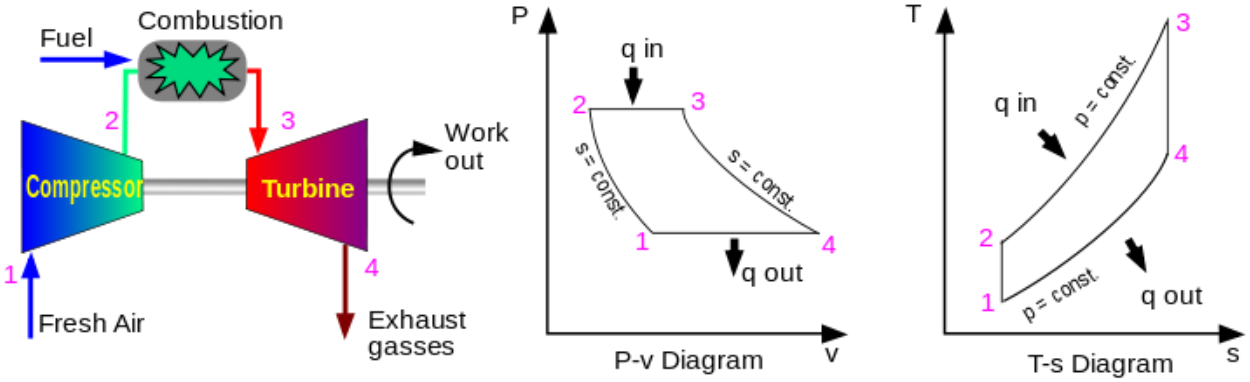
دورات المضخة الحرارية Heat pump cycles

دورات المضخات الحرارية هي نماذج للمضخات الحرارية والثلاجات . الفرق بين الإثنين هو أن المضخات الحرارية تهدف إلى الحفاظ على مكان دافئ بينما يتم تصميم الثلاجات لتبريده . دورة التبريد الأكثر شيوعا هي دورة إنضغاط البخار Vapor Compression Cycle ، التي تمثل أنظمة تستخدم مواد التبريد التي تغير الطور . دورة التبريد بالأمتصاص Absorption Refrigeration Cycle هي بديل يمتص مادة التبريد في محلول سائل بدلا من تبخيره . تتضمن دورات تبريد الغاز Gas Refrigeration Cycles دورة برايتون المعكوسة Reversed Brayton Cycle ودورة هامبسون - ليند Hampson-Linde Cycle . التجديد Regeneration في تبريد الغاز يسمح بتسييل الغازات Liquefaction .

ملاحظة : دورة هامبسون - ليند هي عملية كيميائية تستخدم من أجل فصل غازات الهواء الرئيسية وهي النتروجين والأكسجين والآرغون ، وذلك من خلال عملية تسييل الهواء أو الغاز و تستخدم تغيرات درجة الحرارة الناتجة عن ضغط وتخفيف ضغط الغاز . أثناء العملية يتم الوصول إلى درجات حرارة منخفضة تقع في المجال بين (٧٧ - ١٠٠ كلفن) .

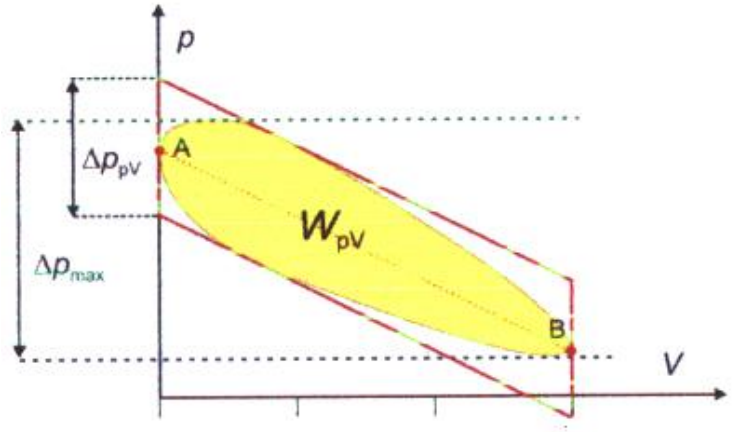
تصميم الأنظمة الحقيقية Modelling Real Systems

يمكن إستخدام الدورات الديناميكية الحرارية لتصميم الأجهزة والمنظومات الحقيقية ، وعادة ما يتم ذلك عن طريق وضع سلسلة من الإفتراضات . غالبا ما يكون تبسيط الإفتراضات ضروريا للحد من المشكلة إلى شكل يمكن التحكم فيه بدرجة أكبر . على سبيل المثال ، كما هو موضح في الشكل ، يمكن تصميم أنظمة مثل التوربين الغازي أو المحرك النفاث كدورة برايتون . يتكون النظام الفعلي من سلسلة من المراحل ، كل منها تم تصميمها بذاتها كعملية ديناميكية حرارية مثالية Idealized Thermodynamic Process . على الرغم من أن كل مرحلة تعمل على مائع التشغيل Working Fluid هي عبارة عن نظام حقيقي معقد ، فقد يتم تصميمها على أنها عمليات مثالية تقارب سلوكها الحقيقي . هناك افتراض آخر هو أن غازات العادم Exhaust Gases سوف يتم تمريرها من خلال المدخل بفقدان حرارة متساوي ، وبالتالي إكمال الدورة المثالية .



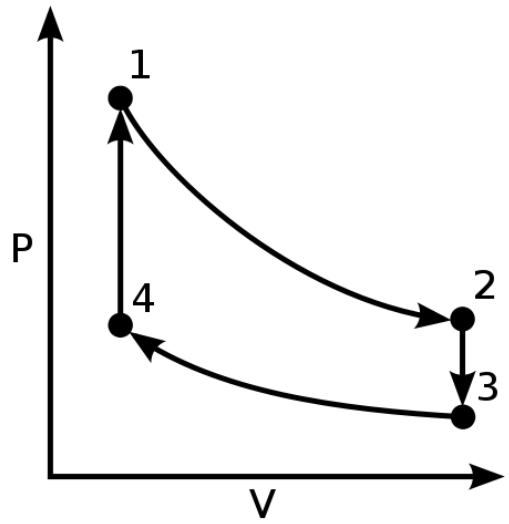
مثال على نظام حقيقي تم تصميمه من خلال عملية مثالية : مخططات PV و TS لدورة برايتون تم ربطها بالعمليات الفعلية لمحرك التوربين الغازي

قد يكون الفرق بين الدورة المثالية والأداء الفعلي Actual Performance كبيرا . على سبيل المثال ، توضح الأشكال التالية الإختلافات في ناتج الشغل المتوقع من دورة ستيرلنغ Stirling المثالية والأداء الفعلي لمحرك ستيرلنغ Stirling Engine :

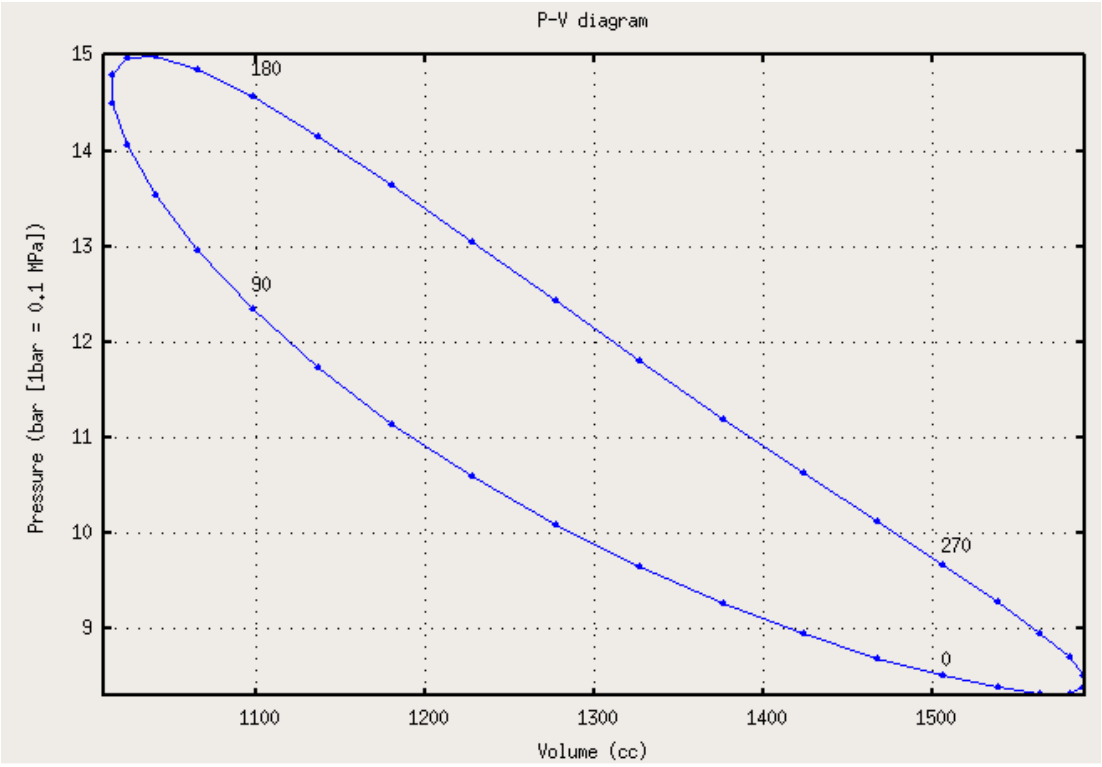


الفعلية والمثالية ، يظهر الفرق في الشغل الناتج

work output



دورة ستيرلنغ المثالية



الأداء الفعلي

بما أن الشغل الناتج يتم تمثيله من قبل الجزء الداخلي للدورة ، فهناك فرق كبير بين الشغل الناتج المتوقع للدورة المثالية والشغل الفعلي الناتج الذي يظهره المحرك الحقيقي . قد يُلاحظ أيضا أن العمليات المنفردة الحقيقية تتباعد عن نظيراتها المثالية . على سبيل المثال ، يحدث التوسع تحت حجم ثابت Isochoric Expansion (العملية ١-٢) مع بعض التغيير الفعلي في الحجم .

ملاحظة : عملية متساوية الحجم (isochoric) : وهي العمليات التي تتم تحت حجم ثابت $dV = 0$.

Well-known thermodynamic cycles دورات ديناميكية حرارية معروفة

عمليا ، عادة ما تكون الدورات الحرارية الديناميكية المثالية البسيطة مصنوعة من أربعة عمليات ديناميكية حرارية . يمكن إستخدام أي عمليات ديناميكية حرارية . ومع ذلك ، عند تصميم الدورات المثالية ، يتم في الغالب إستخدام العمليات التي يتم فيها الحفاظ على ثبات حالة متغيرة واحدة ، مثل عملية متساوية الحرارة Isothermal Process (درجة حرارة ثابتة dT = 0) ، عملية متساوية الضغط Isobaric (ضغط ثابت dP = 0) ، عملية متساوية الحجم Isochoric (حجم ثابت dV = 0) ، عملية متساوية الإنتروبية (إنتروبي ثابت dS=0) وهي عملية حرارية مثالية تتم بدون فقدان حرارة ومادة بين النظام والمحيط أي لا أحتكاك في العملية ، أو عملية متساوية الإنثالبية Isenthalpic (محتوى حراري الثابت dH = 0) . في كثير من الأحيان يتم إستخدام عمليات ثابتة الحرارة (كظومة) Adiabatic Processes ، حيث لا يتم خلال العملية أي تبادل للحرارة بين النظام والوسط المحيط (Q = 0) .

في ما يلي بعض الأمثلة على الدورات الديناميكية الحرارية وعملياتها الأساسية :

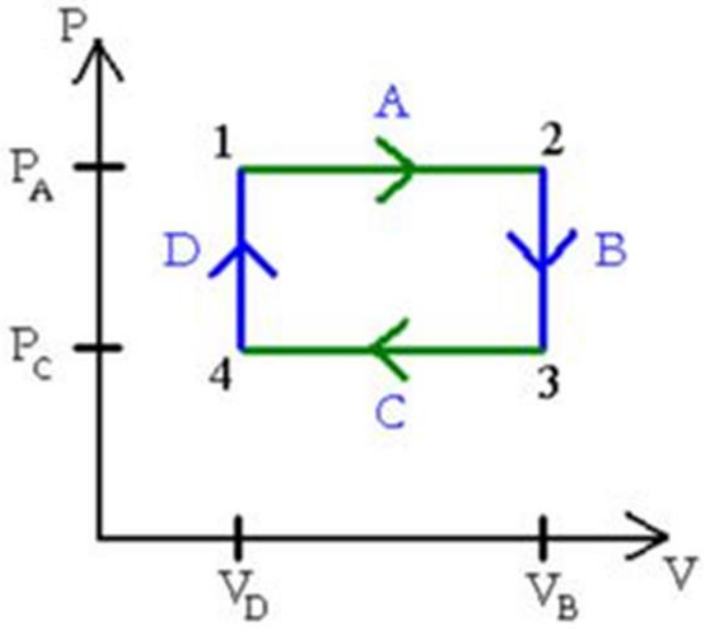
Cycle	Process 1-2 (Compression)	Process 2-3 (Heat Addition)	Process 3-4 (Expansion)	Process 4-1 (Heat Rejection)	Notes
Power cycles normally with external combustion - or heat pump cycles:					
Bell Coleman	adiabatic	isobaric	adiabatic	isobaric	A reversed Brayton cycle
Brayton	adiabatic	isobaric	adiabatic	isobaric	Jet engines aka first Ericsson cycle from 1833
Carnot	isentropic	isothermal	isentropic	isothermal	
Ericsson	isothermal	isobaric	isothermal	isobaric	the second Ericsson cycle from 1853
Scuderi	adiabatic	variable pressure and volume	adiabatic	isochoric	
Stirling	isothermal	isochoric	isothermal	isochoric	
Stoddard	adiabatic	isobaric	adiabatic	isobaric	
Power cycles normally with internal combustion:					
Diesel	adiabatic	isobaric	adiabatic	isochoric	
Lenoir	isobaric	isochoric	adiabatic	isobaric	Pulse jets (Note: 3 of the 4 processes are different)
Otto	adiabatic	isochoric	adiabatic	isochoric	Gasoline / petrol engines
Rankine	adiabatic	isobaric	adiabatic	isobaric	Steam engine

دورة مثالية Ideal Cycle

يتم إنشاء الدورة المثالية من :

١- أعلى وأسفل الحلقة (الدورة) : زوج من عمليات متساوية ضغط متوازية .

٢- يسار ويمين الحلقة (الدورة) : زوج من عمليات متساوية حجم متوازية .



توضيح لمحرك حراري بدورة مثالية (الأسهم في اتجاه عقارب الساعة)

دورة كارنوت Carnot Cycle

دورة كانوت هي دورة تتكون كليا من العمليات القابلة للإنعكاس Reversible Processes وهي عمليات إنضغاط وتمدد متساوي الإنتروبية Isentropic Compression and Expansion وعمليات إضافة وطرح حرارة بثبات درجة الحرارة Isothermal Heat addition and Rejection . تعتمد الكفاءة الحرارية Thermal Efficiency لدورة كارنوت فقط على درجات الحرارة المطلقة Absolute Temperatures للمستودعين اللذين يتم فيهما نقل الحرارة ، وبالنسبة لدورة القدرة تكون الكفاءة :

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

حيث أن T_L هي درجة الحرارة الأقل في الدورة و T_H هي الأعلى .

بالنسبة لدورات كارنوت للطاقة ، فإن معامل الأداء Coefficient of Performance للمضخة الحرارية Heat Pump هو :

$$COP = 1 + \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

وبالنسبة للثلاجة refrigerator ، فإن معامل الأداء هو :

$$COP = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

يحد القانون الثاني للديناميكية الحرارية Second Law of thermodynamics من كفاءةEfficiency ومعامل الأداء لجميع الأجهزة الدورية (تعمل بنظام الدورة) Cyclic devices عند مستويات كفاءة كارنوت أو أقل منها . دورة ستيرلنغ ودورة إريكسون Stirling Cycle and Ericsson Cycle هما دورتان قابلتان للإنعكاس تستخدمان التجديد أو إعادة التوليد Regeneration للحصول على نقل حراري متساوي درجة الحرارة .

دورة ستيرلنغ Stirling Cycle

تشبه دورة ستيرلنغ دورة أوتو Otto Cycle ، فيما عدا أن العمليات الكظومة (ثابتة الحرارة) Adiabatic Processes يتم إستبدالها بعمليات متساوية درجة الحرارة Isothermal Processes . كما أنها نفس دورة إريكسون مع إستبدال العمليات متساوية الضغط Isobaric Processes بعمليات الحجم الثابت Constant Volume Processes .

١- أعلى و أسفل الحلقة (الدورة) : زوج من عمليات متساوية درجة الحرارة شبه متوازية .

٢- أيسر وأيمن الحلقة (الدورة) : زوج من عمليات متساوية حجم متوازية .

تتدفق الحرارة Q إلى الدورة من خلال أعلى متساوي درجة الحرارة وأيسر متساوي الحجم ، وتتدفق بعض هذه الحرارة من خلال أسفل متساوي درجة الحرارة وأيمن متساوي الحجم ، ولكن معظم التدفق للحرارة يكون من خلال زوج متساوي درجة الحرارة . هذا أمر منطقي لأن كل الشغل الذي تقوم به الدورة يتم بواسطة زوج العمليات المتساوية في درجة الحرارة Isothermal Processes ، والتي تم وصفها بواسطة $Q = W$. هذا يشير إلى أن كل الحرارة الصافية Net Heat تأتي من خلال أعلى متساوي درجة الحرارة . في الواقع ، كل الحرارة التي تأتي من خلال أيسر متساوي الحجم ، يخرج من خلال أيمن متساوي الحجم : لأن أعلى متساوي درجة الحرارة كله يكون في نفس درجة الحرارة الأسخن T_H و أسفل متساوي درجة الحرارة كله يكون في نفس درجة الحرارة الأبرد T_C ، و لأن التغير في الطاقة لحجم ثابت يتناسب مع التغير في درجة الحرارة ، لذلك يتم إلغاء كل الحرارة القادمة من خلال أيسر متساوي الحجم تماما بواسطة الحرارة الخارجة من أيمن متساوي الحجم .

State functions and entropy دوال الحالة والإنتروبي

إذا كانت Z عبارة عن دالة حالة ، فسيظل توازن Z دون تغيير أثناء العملية الدورية Cyclic Process :

$$\oint dZ = 0$$

الإنتروبية هي دالة حالة ويتم تعريفها على أنها :

$$S = \frac{Q}{T}$$

لذلك يكون التغير في الإنتروبية :

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

لذلك من الواضح أنه بالنسبة لأي عملية دورية :

$$\oint dS = \oint \frac{dQ}{T} = 0$$

مما يعني أن صافي تغير الإنتروبية عبر الدورة = صفر

References المراجع

1- Cengel, Yunus A.; Boles, Michael A. (2002). *Thermodynamics: an engineering approach*. Boston: McGraw-Hill. pp. 14.
ISBN 0-07-238332-1.

2- Cengel, Yunus A.; Boles, Michael A. (2002). Thermodynamics: an engineering approach. Boston: McGraw-Hill. pp. 452. ISBN
0-07-238332-1.

3- Wikipedia- the free encyclopedia ويكيبيديا ، الموسوعة الحرة

4- Dictionary of Engineering – Second Edition - McGraw-Hill .

٥- معجم المصطلحات العلمية والفنية والهندسية - أحمد شفيق الخطيب – ٢٠٠٥ .