# مختصر قوانيين الترموديناميك

الطبعة الثانية 2014

محمد عبد الله الحسن العلي

# مختصر قوانيين الترموديناميك

الطبعة الثانية ( طبعة محسّنة )

كلية الهندسة التقنية بطرطوس

إعداد محمد عبد الله الحسن العلي

# المقدمة

نتيجة لما أنعم الله علينا من آلاء و بحمد منه سبحانه ، قمت باعتماد أساليب جديدة نسبياً لتحديث هذا المختصر الذي نحن بصدده ، مستنداً في التأليف إلى ذروة سنام المعايير العالمية ، و لا سيما تلك المصادر الهندسية الضخمة الفخمة ذات الوزن المرموق المهوب التي وقعت بين يدي جراء بحث شاق مضني بين دهاليز الشبكة العنكبوتية ، فعمدت إلى تغيير **حجم الصفحة** مبتعداً عن الحجوم التقليدية السائدة البائدة ، و **تصغير الخط** ( حيث بعض الأشخاص الأحباب تحفظ من صغر الخط و هذا حقهم لأنهم لم يعتادوا على ذلك ، لكن أتمنى منهم أن يعودوا إلى آخر المؤلفات في عصرنا هذا لأبرز علماء هذا القرن ليجدوا أنني لم أتخذ منحاً جديداً بل سرت على نهجم و نسجت غزلي على منوالهم لأن جوهر التأليف يكمن في المضمون لا في حجم الخط و عدد السطور ) ، مع تغيير **نمط الخط** حيث رسيت في هذا المختصر على هذا الخط الذي هو من أبرز الخطوط العربية و أوضحها على الإطلاق ، بالإضافة إلى اعتماد **مبدأ العمودين** في الصفحة ، و بعض الميزات التي تعطي هذا المختصر الجمال و البهاء .

و الجدير بالذكر أن مقرّرات **الترموديناميك** السائدة في بلدنا الحبيب " **سوريا** " اعتمدت رموزاً منها ما يعود إلى أمهات كتب علماء **الروس** بطابعها السوفيتي ، و بعضها الآخر يرجع إلى نخبة كتب علماء **الألمان** بطابعها الغربي ، إلا أنّ الغلبة في نهاية الأمر يرجح للمفردات الروسية كون غالبية علماء هذا العلم قد درس في روسيا و خاصة في الحقبة السوفيتية ناهيك عن العلاقات الجوهرية التي ربطت بين البلدين لعقود .

فبعد رجوعي إلى أبرز كتب علم الترموديناميك بتسمياتها الشتى و لا سيما أمهات الكتب **الأمريكية** و عيون الكتب **البريطانية** و فخر الكتب **الفرنسية** بالإضافة إلى ما أسلفت آنفاً و أعني كلاً من الكتب الروسية و الألمانية ، قد تباينت في الطرح لكنها ببساطة قد توافقت في المضمون . لكن من باب الأمانة العلمية كانت الريادة و بلا منازع للكتب الأمريكية التي أسهبت في الطرح و طالت في الوصف و أمعنت في الشرح . و أتمنى في المستقبل القريب البعيد أن أنقل ما أنتجه الأمريكان في **كتاب** يستفيد منه القاصي و الداني لعشاق هذا العلم من العرب .

و أتمنى من كل **الطلبة** أن يتطلعوا إلى الدرجات العُلى و المراتب الأولى و هذا حق مشروع للجميع و ليس حكراً على أحد ، و أعلم عزيزي الطالب أنّ جهدك الذاتي و نشاطك الفكري هو الركيزة الأساسية في نجاحك و تفوّقك ، فاحرص على بذل ما تستطيعه ، و تعاون مع مدرّسيك لتبلغ مُرادك .

**سائلاً الله لكل الطلبة السداد و هو ولي التوفيق**

و في النهاية أحبّ أن أتوجه بكلمة عطرة ملئها الود و الحب و مضمونها الأمانة و الصدق إلى الدكتور الكبير **عدنان عمران** أحد أركان هذه الكلية و من أبرز علمائها ، الذي لا يمكن لكلمات المادحين أن تعطيه حقه ، أو لنثر الشعراء أن تصف جوهره ، أو لأقلام الناقدين أن تنال منه . لكن أوجز و أقول : تتلمذنا على يديه ، و نهلنا من بحره ، غرس فينا حب هذا العلم ، و سقانا بحلم العمل ، فعشنا معه أجمل الدروس و أروع الأوقات . و من ناحية أخرى ، فقد أودع لنا في كتابه النفيس الثمين " أسس الترموديناميك " أبرز ما يطلبه الباحث و يتمناه الدارس و يبتغيه الطالب للإلمام بهذا العلم من كل جوانبه و أدق تفصيلاته و أسمى تطبيقاته .

و أودّ أن ألفت النظر إلى المدرّس المخضرم ذي الباع الطويل و القدم الراسخة في تدريس هذا العلم ، و الذي امتاز بمرونة الإعطاء و جدّية الطلب و سعة الأفق و مصداقية الرأي والشكر يتجدد ولا ينقطع للمهندس **عزيز** .

و أخيراً نعِدُ كل أساتذتنا الكرام و مدرسينا الأفاضل بأن نكون عند حسن ظنهم و مرتجى آمالهم و مبتغى طموحاتهم ، و سنكون القطفة التي ينتظرها البلد و ينشدها الوطن ، فنحن قادمون و على خطاكم سائرون و بأنوركم مهتدون فانتظرونا و لا تعجلوا علينا .

بقلم محمد عبد الله الحاج جاسم الحسن العلي

# الفهرس


| | | |
|---|---|---|
| الفصل الأول | البارامترات الأساسية للحالة | 1 |
| الفصل الثاني | الغازات المثالية | 6 |
| الفصل الثالث | السعات الحرارية للغازات المثالية | 7 |
| الفصل الرابع | قانون الترموديناميك الأول | 8 |
| الفصل الخامس | العمليات الترموديناميكية على الغازات المثالية | 9 |
| الفصل السادس | خلائط الغازات المثالية | 11 |
| الفصل السابع | قانون الترموديناميك الثاني | 12 |
| الفصل الثامن | دورات محركات الاحتراق الداخلي | 14 |
| الفصل التاسع | دورات المحطات التوربينية الغازية | 16 |
| الفصل العاشر | دورات الضواغط | 19 |
| الفصل الحادي عشر | بخار الماء | 21 |
| الفصل الثاني عشر | دورات المحطات البخارية | 23 |
| الفصل الثالث عشر | دورات آلات التبريد | 28 |


تم بحمد الله سبحانه و تعالى إكمال هذا المختصر ليخرج للملأ بطبعته الثانية ليكون عوناً لطالب العلم الذي أتمنى منه أن يدعو لمؤلف هذا المختصر بالتوفيق و الصلاح الذي هو بأمس الحاجة لمثل هذه الدعوات .

و الجدير بالذكر أن فكرة جمع قوانين الترموديناميك في مختصر مفيد جاء قبل عيد الأضحى بأسبوعين في أواخر أيلول لعام 2013 ، حيث أني جئت إلى طرطوس في ذلك الوقت قادماً من حلب بغية استئجار بيت و تجهيز ما يمكن إتيانه للانطلاق نحو العام الدراسي الجديد مادياً و معنوياً ، و أنا بطبيعة الحال أحبّ أن أفيد الطلبة الكرام بأي شيء يبسط عليهم ما عانوا منه الأمرّين . فبادرتني هذه الفكرة و عملت عليها على الفور ، و كرّست جُلّ وقتي بين البحث عن بيت مقبول و السهر ليلاً على مصادر الترموديناميك الأجنبية التي تأخذ لباب العقل غالباً و تثير الدهشة حيناً و تهوى إليها الأفئدة تارة أخرى . ثم انتهيت في آخر الأمر ألاّ أضيّع الطلبة الأعزاء بهذه المصادر ، و أن أكتفي قدر الإمكان بالمقرّر الدراسي المطلوب . و خلال هذه الفترة الوجيزة عملت شيئاً مقبولاً إلاّ أن سبب التأخير هو الرسومات البيانية التي أخذت معظم أوقات التلخيص . ثم وقفت اضطرارياً و ذلك لبدء العام الدراسي الجديد . بعدئذ أكملت ما تبقى من فصول المختصر في مطلع أيار لعام 2014 و كان يكمن وراء ذلك أشخاصاً جعلهم الله سبباً لإتمام هذا المختصر حيث أود أن أشكرهم بهذه المناسبة سائلاً الله لهم التوفيق و الريادة .

و أخيراً أسأل الله أن يكون هذا العمل خالصاً لوجهه الكريم ، لا أنشد فيه إلاّ رضاه ، و لا أرجو بذلك إلاّ رحمته .

الفصل

# 1

# البارامترات الأساسية للحالة

## تعريف الترموديناميك

الترموديناميك هو دراسة **الطاقة** و الطرق الممكن استخدامها لتحسين حياة الناس حول العالم ، حيث أنّ الاستخدام الفعّال للطبيعة و مصادر الطاقة المتجدّدة هي إحدى أهم القضايا البيئية و السياسية و التقنية في القرن الواحد و العشرين .

في علم الميكانيك ندرس مفهوم القوة للحصول عل أشياء مفيدة ، أمّا في علم الترموديناميك فنقوم بدراسة متوازنة للطاقة و كل نتائجها التقنية . الأشياء التي تدرس في الميكانيك تدعى **أجسام** و نحلّلها عبر استخدام مخططات **الجسم الحر** ، أمّا الأشياء التي تدرس في الترموديناميك تدعى **جمل ( أنظمة )** و يستعاض عن مخططات الجسم الحر الميكانيكية بمخططات **الجمل** في الترموديناميك .

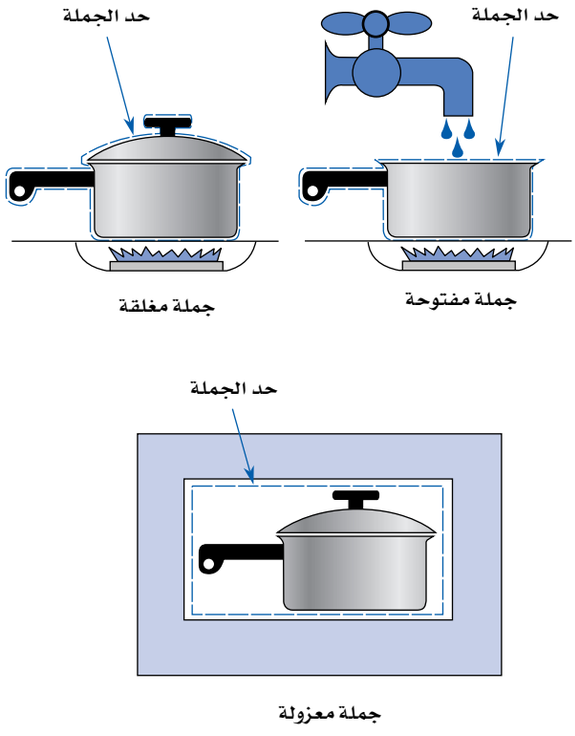
كلمة **الترموديناميك** هي لفظة إنكليزية تنحدر أصلاً من الكلمتين اليونانيتين " ***θερμη*** " ( **ترمو** ، و تعني حرارة ) و " ***δυναμις*** " ( **ديناميك** ، و تعني طاقة ) .

إذاً **فالترموديناميك** هو العلم الذي يُعنى بدارسة العمليات المختلفة التي تنقل الطاقة من شكل إلى آخر ( مثل تحويل الحرارة إلى عمل ) .

## الجمل الترموديناميكية

- **الجملة :** هي جزء من الفضاء الذي يحتوي على المادة المختارة للتحليل الترموديناميكي .
- **الوسط المحيط ( محيط الجملة ) :** هو كل شيء خارج الجملة .
- **حد الجملة :** هو السطح الحقيقي أو التخيّلي الذي يطوّق الجملة و يفصلها عن محيطها .
- **أنواع الجمل الترموديناميكية :**

1. **الجملة المفتوحة :** هي الجملة التي يمكن لكل من الكتلة و الطاقة أن تنفذان من حد الجملة .
2. **الجملة المغلقة :** هي الجملة التي لا يمكن للكتلة أن تنفذ من حد الجملة بينما يمكن للطاقة أن تنفذ من حد الجملة .
3. **الجملة المعزولة :** هي الجملة التي لا يمكن لكل من الكتلة و الطاقة أن تنفذان من حد الجملة .




**الشكل يبيّن : الأنواع الثلاث للجمل الترموديناميكية .**

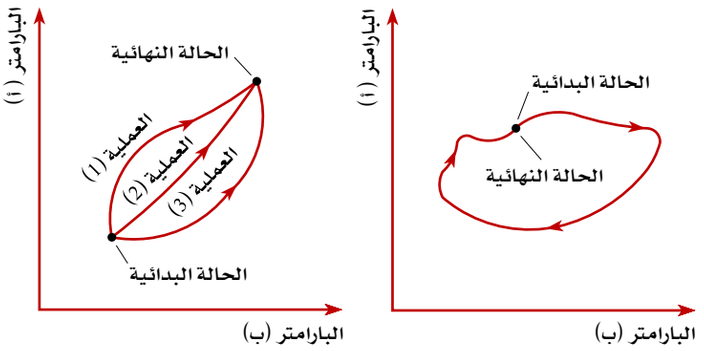
## وصف الجملة الترموديناميك

- **الطريقة العيانيّة ( المايكروسكوبية ) :** لا تأخذ بالحسبان كمية المادة في المستوى الجزئي ، و بكلمة أخرى تُعنى هذه الطريقة الترموديناميكة بدراسة السلوك الإجمالي أو العام . و هذا ما يعرف **بالترموديناميك التقليدي** . و يتطلب تحليل الجملة العياني صيغ رياضية بسيطة . و من خواص الطريقة العيانية الضغط و درجة الحرارة ، التي يمكن أن تقاس بسهولة عبر الأدوات و الأجهزة كما يمكن إدراكها بحواسنا .
- **الطريقة المجهرية ( الميكروسكوبية ) :** تعتبر أنّ الجملة مكوّن من عدد كبير جداً من الجسيمات الصغيرة المعروفة بالجزيئات ، هذه الجزيئات لها سرع و طاقات مختلفة ، و قيم هذه الطاقات تتغير بشكل ثابت تبعاً للزمن . فهذه الطريقة الترموديناميكية التي تُعنى مباشرة بدراسة تركيب المادة تُعرف **بالترموديناميك الإحصائي** . من خواص الطريقة المجهرية السرعة و الاندفاع و الطاقة الحركية و قوة التأثير ، التي لا يمكن قياسها بسهولة عن طريق

الأجهزة كما لا نستطيع أن نشعر بها بواسطة حواسنا . إذاً فهذه الطريقة معقّدة لأنها تحتاج إلى متغيرات كثيرة لوصف الجملة .

## الخواص الأساسية للترموديناميك

- **الطور :** هو كمية المادة التي تكون متجانسة بكافة أجزائها في كل من التركيبين الكيميائي و الفيزيائي . و يعني التجانس في التركيب الفيزيائي أن كل المادة صلبة أو سائلة أو غازية .
- **المادة النقية :** هي المادة التي لها تركيب كيميائي ثابت لا يتغير . فالمادة النقية يمكن أن تُوجد بأكثر من طور لكن يجب أن يكون لها نفس التركيب الكيميائي في كل طور .
- **البارامتر :** هو ميزة الجملة العيانيّة القابلة للقياس مثل الكتلة و الحجم و الضغط و درجة الحرارة . و تقسم بارامترات الجملة إلى نوعين : إحداها **البارامترات المركزّة** و هي لا تعتمد على كتلة الجملة مثل الضغط و درجة الحرارة ، و الأخرى هي **البارامترات الممدّدة** التي تعتمد على كتلة الجملة مثل الحجم .
- **الحالة :** هي قيم كل البارامترات الترموديناميكية التي تصف الجملة . و تصنف حالة الجملة إلى **حالة مستقرة** و هي التي تبقى قيم البارامترات في كل أجزائها ثابتة خلال اللحظة الزمنية المدروسة ، و إلى **حالة غير مستقرة** إذا تغيرت قيم البارامترات خلال اللحظة الزمنية المدروسة .
- **الاتزان الحراري :** هي الحالة التي ينعدم عندها انتقال الحرارة بين الأجسام المتلامسة نتيجة لتساوي درجات حرارتها .
- **العملية :** هي أية تغيّر يطرأ على الجملة و ينقلها من حالة إلى أخرى .
- **مسار العملية :** هي سلسلة الحالات التي تمر بها العملية .
- **الدورة :** هي تتابع العمليات التي تبدأ و تنتهي عند نفس الحالة .



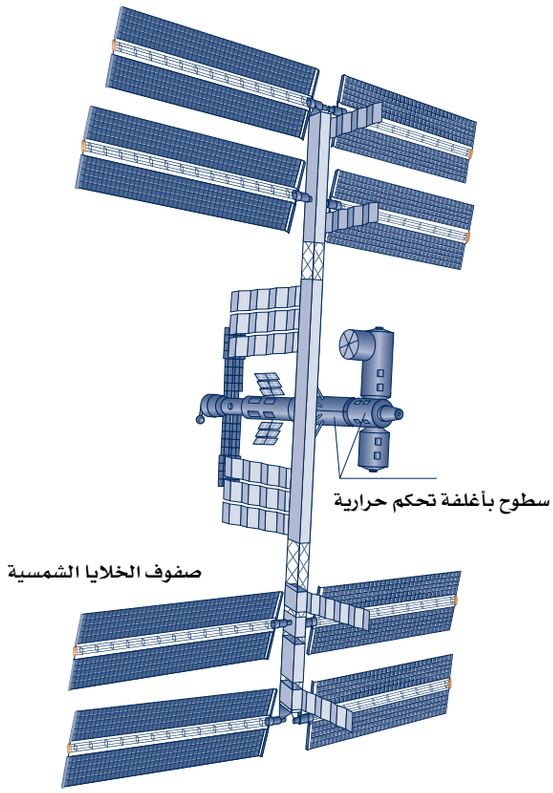

الحالة و البارامتر و العملية — الدورة الترموديناميكية

**الشكل يبيّن : البارامتر و الحالة و العملية و الدورة .**

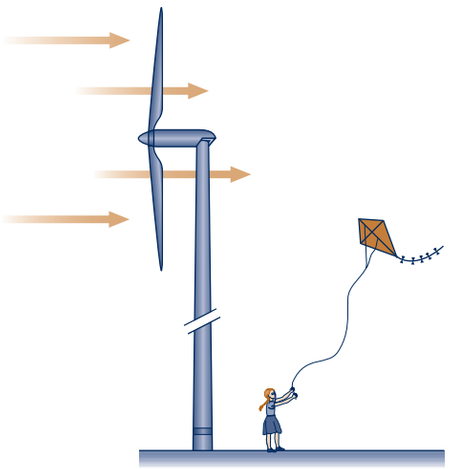
## أبرز تطبيقات الترموديناميك الهندسية

- محركات السيّارات .
- التوربينات الغازية و البخارية :
  - توربينات إنتاج القدرة .
  - توربينات الدفع .
- الضواغط و المضخات .
- محطات توليد القدرة الكهربائية و النووية .
- أنظمة دفع الطائرات و الصواريخ .
- أنظمة الاحتراق .
- أنظمة التدفئة و التبريد و التكييف :
  - آلات التبريد الغازية و البخارية .
  - المضخات الحرارية .
- أجهزة التبريد الإلكترونية .
- أنظمة الطاقة البديلة .
  - خلايا الوقود .
  - أنظمة الحرارة الجوفية .
  - الطاقة الشمسية .
  - طاقة الرياح .
- تطبيقات الطب الحيوي :
  - أجهزة الإنعاش .
  - الأعضاء الاصطناعية .

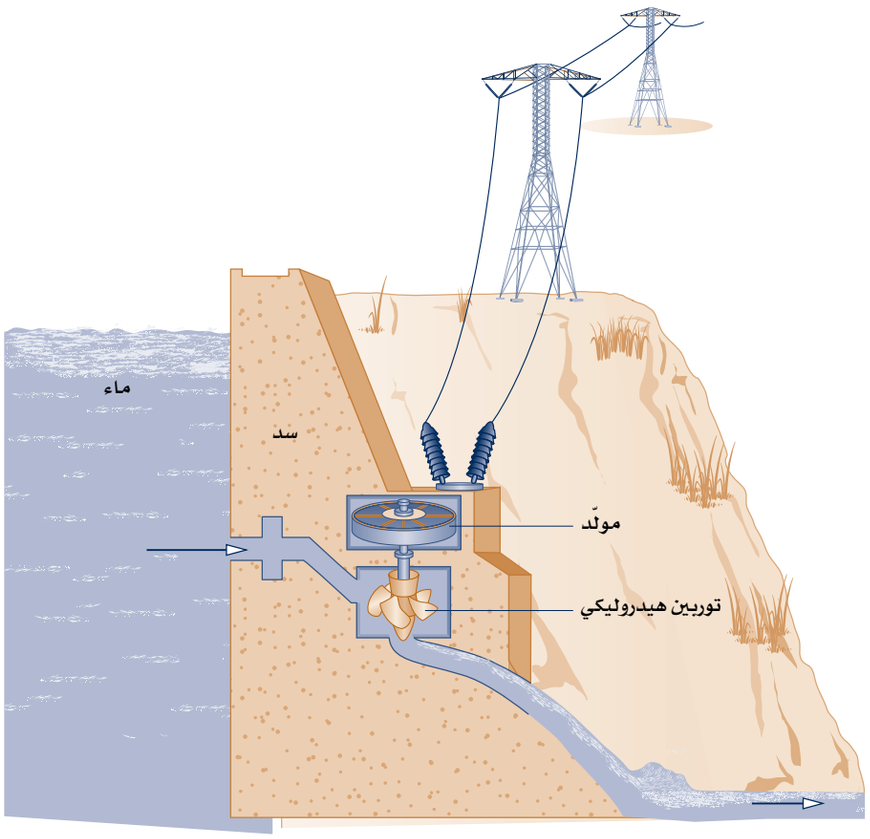
**و لعلّ بعض التطبيقات التي أوردناها كما هو مبيّن أدناه :**



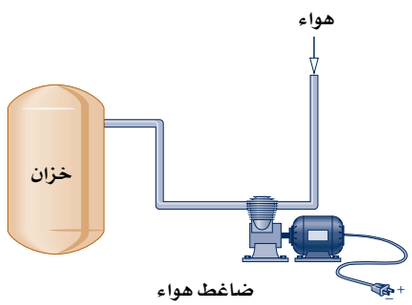

محطة فضاء دولية



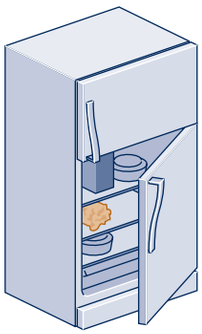
طاقة الرياح



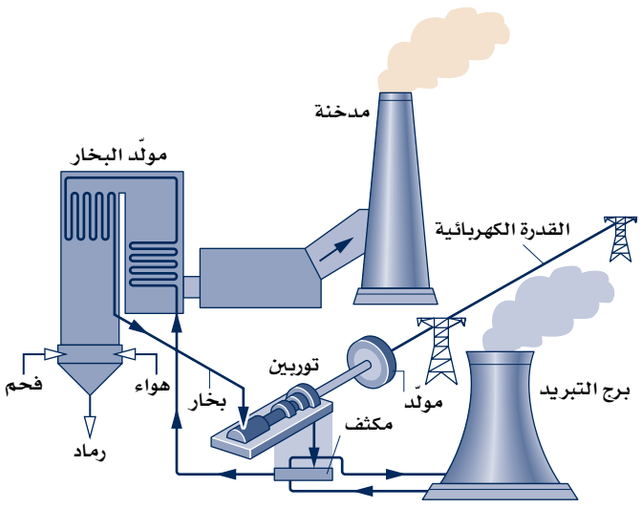

طاقة المياه



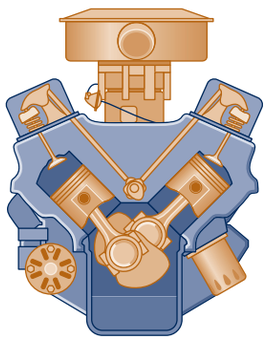

ضاغط هواء



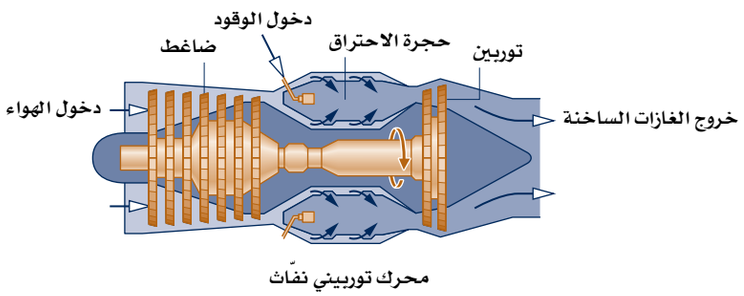
برّاد



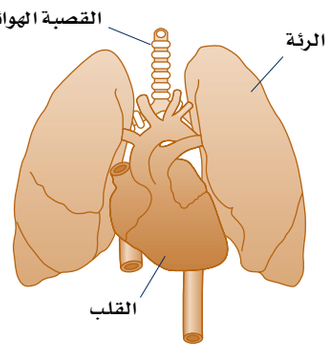

محطّة قدرة كهربائية



محرك سيّارة




محرك توربيني نفّاث




تطبيقات الطب الحيوي

## الرموز

- $V$ = الحجم ، $(m^3)$ .
- $m$ = الكتلة ، $(kg)$ .
- $v$ = الحجم النوعي ، $(m^3/kg)$ .
- $\rho$ = الكثافة ، $(kg/m^3)$ .
- $T$ = درجة الحرارة المطلقة ، $(K)$ .
- $t$ = درجة الحرارة المئوية ، (℃).
- $p$ = الضغط ، $(Pa)$ .
- $p_a$ = الضغط المطلق ، $(Pa)$ .
- $B$ = الضغط البارومتري ( الجوي ) ، $(Pa)$ .
- $p_m$ = الضغط المانومتري ( الزائد أو الفائض ) ، $(Pa)$ .
- $p_{vac}$ = الضغط الفاكومتري ( الناقص أو التخلخل ) ، $(Pa)$ .

## الكثافة و الحجم النوعي

- **الكثافة :** هي مقدار الكتلة على واحدة الحجم :

$$\boldsymbol{\rho = \frac{m}{V}}$$

- **الحجم النوعي :** هو مقدار الحجم على واحدة الكتلة ، و يعّرف أيضاً بأنه مقلوب الكثافة :

$$\boldsymbol{v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}}$$

- تقاس الكثافة في الجملة $(SI)$ بـ $(kg/m^3)$ ، أمّا الحجم النوعي بـ $(m^3/kg)$ .

## درجة الحرارة

- **درجة الحرارة :** هي التي تصف درجة سخونة أو برودة مادة ما .
- تقاس درجة الحرارة في الجملة الدولية وفق سلّمين : عادةً ما يكون بالكلفن $(K)$ أو تارةً أخرى بالسيلزيوس (℃) . كما يوجد سلالم أخرى ما زالت تستخدم في بعض البلدان إلى يومنا هذا ، و لعلّ أشهرها سلّم فهرنهايت (℉) و سلّم رانكن $(R)$ .
- **معادلات التحويل بين واحدات درجات الحرارة وفق أبرز السلالم الحرارية :**
  - العلاقة بين سلّمي كلفن و سيلزيوس :

$$\boldsymbol{T = t + 273,15}$$

  - العلاقة بين سلّمي رانكن و فهرنهايت :

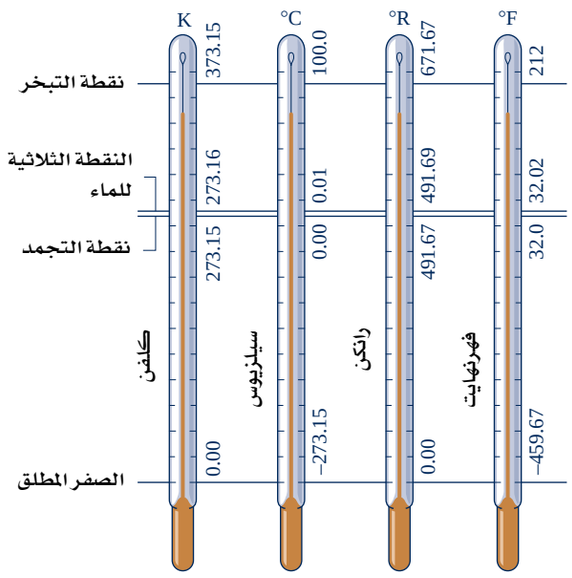
$$\boldsymbol{T(R) = T(°F) + 459,67}$$

  - العلاقة بين سلّمي رانكن و كلفن :

$$\boldsymbol{T(R) = 1,8T}$$

  - العلاقة بين سلّمي فهرنهايت و سيلزيوس :

$$\boldsymbol{T(°F) = 1,8t + 32}$$




**الشكل يبيّن :** مقارنة بين سلالم درجات الحرارة .

## الضغط

- **الضغط :** هو مقدار القوة المؤثرة على واحدة السطح :

$$\boldsymbol{p = \frac{F}{A}}$$

- يقاس الضغط في الجملة الدولية بالباسكال $(1\ Pa = 1\ N/m^2)$ ، إلا أنّ هذه الواحدة صغيرة جداً ، فيستعاض عنها بواحدة أكبر منها هي واحدة البار $(bar)$ حيث $\boldsymbol{(1\ bar = 10^5\ Pa)}$ ، أو بأحدى مضاعفات الباسكال نفسه ، كما يقاس الضغط أيضاً بواحدة الضغط الجوي التكنيكي أو ما يعرف بالأتموسفير $(at)$ حيث $\boldsymbol{(1\ at = 101325\ Pa)}$ ، و في كثير من الأحيان ما يقاس الضغط بارتفاع عمود من المائع كالزئبق و الماء و غيرهما .
- **الأجهزة المستخدمة في قياس الضغط :**
  - **البارومتر $(B)$ :** يقيس الضغط الجوي .
  - **المانومتر $(p_m)$ :** يقيس الضغط الأعلى من الضغط الجوي :

$$\boldsymbol{p_m = p_a - B}$$

  - **الفاكومتر $(p_{vac})$ :** يقيس الضغط الأقل من الضغط الجوي :

$$\boldsymbol{p_{vac} = B - p_a}$$

- و عند قياس الضغط بهذه الأجهزة عند درجات حرارة مختلفة ، يجب إرجاع قراءات هذه الأجهزة إلى درجة الصفر مئوية وفق العلاقات التالية :

$$\boldsymbol{B_0 = B(1 - 0,000172t)}$$

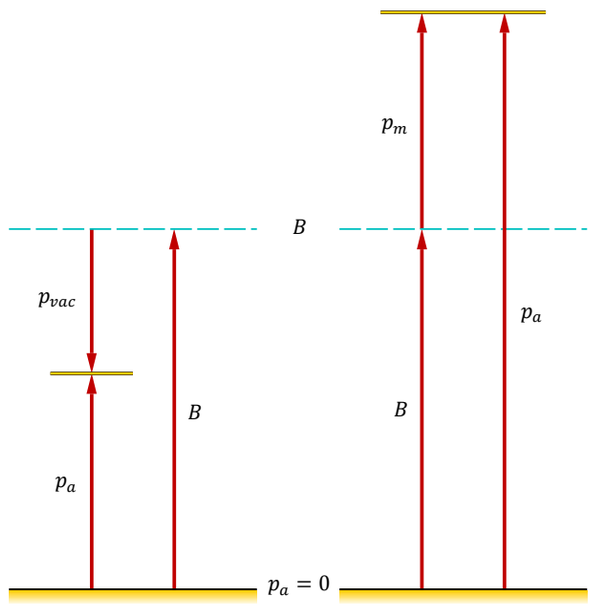
$$\boldsymbol{p_{m_0} = p_m(1 - 0,000172t)}$$

$$\boldsymbol{p_{vac_0} = p_{vac}(1 - 0,000172t)}$$

- و من ثم حساب الضغط المطلق من علاقتي الضغطين المانومتري و الفاكومتري كما مرّ معنا آنفاً :

$$\boldsymbol{p_a = B + p_m}$$

$$\boldsymbol{p_a = B - p_{vac}}$$




الشكل يبيّن : **الضغط المطلق و البارومتري و المانومتري و الفاكومتري .**

- أمّا أبرز النسب بين واحدات قياس الضغط المستخدمة فيمكن إيداعها في الجدول التالي :

| $Pa$ | $bar$ | $kgf/cm^2$ | $mmHg$ | $mmH_2O$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | $10^{-5}$ | $1{,}02 \times 10^{-5}$ | $7{,}5 \times 10^{-3}$ | 0,102 |

- و للحصول على مضاعفات الباسكال يجب إدراج إحدى البادئات قبل الواحدة ، و لتكن بادئة الميغا $(M)$ هي المراد إضافتها إلى واحدة الباسكال $(Pa)$ فتصبح ميغاباسكال $(MPa)$ . و لتكن أيضاً بادئة الكيلو $(k)$ هي المراد إضافتها إلى واحدة الجول $(J)$ فتصبح كيلوجول $(kJ)$ و هلمّ جر، و لمعرفة بقية البادئات نورد الجدول المبيّن أدناه ليوضّح البادئات المتعارف عليها دولياً :

**البادئات القياسية للواحدات في الجملة الدولية ( $SI$ )**

| البادئة | الرمز | المكافئ |
|---|---|---|
| تيرا | $T$ | $1\,000\,000\,000\,000 = 10^{12}$ |
| غيغا | $G$ | $1\,000\,000\,000 = 10^{9}$ |
| ميغا | $M$ | $1\,000\,000 = 10^{6}$ |
| كيلو | $k$ | $1\,000 = 10^{3}$ |
| هيكتو | $h$ | $100 = 10^{2}$ |
| ديكا | $da$ | $10 = 10^{1}$ |
| ديسي | $d$ | $0,1 = 10^{-1}$ |
| سنتي | $c$ | $0,01 = 10^{-2}$ |
| ميلي | $m$ | $0,001 = 10^{-3}$ |
| ميكرو | $\mu$ | $0,000\ 001 = 10^{-6}$ |
| نانو | $n$ | $0,000\,000\,001 = 10^{-9}$ |
| بيكو | $p$ | $0,000\,000\,000\,001 = 10^{-12}$ |
| فمتو | $f$ | $0,000\,000\,000\ 000\ 001 = 10^{-15}$ |
| أتو | $a$ | $0,000\,000\,000\,000\ 000\ 001 = 10^{-18}$ |

**انتهى الفصل**

الفصل

2

# الغازات المثالية

## الرموز

- $n$ = عدد المولات ، $(mol)$ .
- $\mu$ = الكتلة المولية ، $(kg/kmol)$ .
- $V_\mu$ = الحجم المولي ، $(m^3/kmol)$ .
- $R_\mu$ = ثابت الغازات العام ، $(J/kmol \cdot deg)$ .
- $R$ = ثابت الغازات ، $(J/kg \cdot deg)$ .

## مفهوم الغازات المثالية

- **الغاز المثالي :** هو الغاز المكوّن من جزيئات مرنة مهملة الكتلة و الحجم ، و لا تؤثر بين جزيئاته قوى التماسك ( قوى التأثير التبادلي ) .

## قوانين الغازات المثالية

1. **قانون بويل ماريوط :** عند ثبات درجة الحرارة $(T = const)$ يتناسب ضغط الغاز المثالي عكساً مع الحجم النوعي :

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2} \Leftrightarrow \frac{p_{\text{صغير}}}{p_{\text{كبير}}} = \frac{v_{\text{صغير}}}{v_{\text{كبير}}}$$

2. **قانون غي لوساك :** عند ثبات الضغط $(p = const)$ يتناسب الحجم النوعي للغاز المثالي طرداً مع درجة الحرارة :

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} \Leftrightarrow \frac{v_{\text{صغير}}}{v_{\text{كبير}}} = \frac{T_{\text{صغير}}}{T_{\text{كبير}}}$$

3. **قانون شارل :** عند ثبات الحجم النوعي $(v = const)$ يتناسب ضغط الغاز المثالي طرداً مع درجة الحرارة :

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \Leftrightarrow \frac{p_{\text{صغير}}}{p_{\text{كبير}}} = \frac{T_{\text{صغير}}}{T_{\text{كبير}}}$$

4. **قانون أوفوغادرو :** الحجوم المتساوية للغازات المختلفة التي لها درجة الحرارة نفسها و الضغط نفسه ، فإنها تحتوي على العدد نفسه من الجزيئات .

- الكتلة المولية و الحجم المولي :

$$\mu = \frac{m}{n}$$

$$V_\mu = \frac{V}{n}$$

- كتلة الغاز المثالي استناداً إلى أوفوغادرو تتناسب طرداً مع الكتلة المولية له ، و عليه فإن كثافة الغاز تتناسب أيضاً و بشكل طردي مع الكتلة المولية له :

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{\mu_2}{\mu_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

- عند الشروط الفيزيائية النظامية :

$$T = 273\ K \ \& \ t = 0\ ℃$$

$$p = 1\ at\ = 101325\ Pa\ = 760\ mmHg$$

$$V_\mu = 22,4\ m^3/kmol$$

- الحجم النوعي و الكثافة لأي غاز عند الشروط الفيزيائية النظامية :

$$v_0 = \frac{V_\mu}{\mu} = \frac{22,4}{\mu}$$

$$\rho_0 = \frac{1}{v_0} = \frac{\mu}{22,4}$$

## معادلة الحالة للغازات المثالية

- **معادلة الحالة ( معادلة كلايبرون ) :** هي العلاقة ما بين البارامترات الحرارية الثلاث $(p, v, T)$ الضغط و الحجم النوعي و درجة الحرارة :

$$pv = RT$$

$$pV = mRT$$

$$pV_\mu = R_\mu T$$

- ثابت الغازات العام :

$$R_\mu = \frac{pV_\mu}{T} = \frac{101325 \times 22,4}{273} = 8314\ J/kmol \cdot deg$$

- ثابت الغازات :

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314}{\mu}$$

**انتهى الفصل**

الفصل

3

# السعات الحرارية للغازات المثالية

## الرموز

- $c$ = السعة الحرارية الكتلية ، $(kJ/kg \cdot deg)$ .
- $c'$ = السعة الحرارية الحجمية ، $(kJ/m^3 \cdot deg)$ .
- $c_\mu$ = السعة الحرارية المولية ، $(kJ/kmol \cdot deg)$ .
- $c_p$ = السعة الحرارية الكتلية عند ضغط ثابت، $(kJ/kg \cdot deg)$ .
- $c_v$ = السعة الحرارية الكتلية عند حجم ثابت ، $(kJ/kg \cdot deg)$ .
- $c'_p$ = السعة الحرارية الحجمية عند ضغط ثابت ، $(kJ/m^3 \cdot deg)$ .
- $c'_v$ = السعة الحرارية الحجمية عند حجم ثابت ، $(kJ/m^3 \cdot deg)$ .
- $c_{\mu p}$ = السعة الحرارية المولية عند ضغط ثابت ، $(kJ/kmol \cdot deg)$ .
- $c_{\mu v}$ = السعة الحرارية المولية عند حجم ثابت ، $(kJ/kmol \cdot deg)$ .
- $k$ = نسبة السعة الحرارية ( مؤشر الإديابات ) .

## مفاهيم أساسية

- **السعة الحرارية :** هي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحدة كتلة المادة بمقدار درجة واحدة :

$$c = \frac{dQ}{mdT}$$

- **تقسم السعة الحرارية إلى :**

كتلية $(c)$ و حجمية $(c')$ و مولية $(c_\mu)$ .

- **المعادلات التي تربط بين السعات الحرارية :**
  - العلاقة بين السعة الحرارية الكتلية و المولية :

$$c = \frac{c_\mu}{\mu}$$

  - العلاقة بين السعة الحرارية الحجمية و الكتلية :

$$c' = \rho c$$

  - العلاقة بين السعة الحرارية الحجمية و المولية :

$$c' = \rho \frac{c_\mu}{\mu}$$

- **نوعي السعة الحرارية الأكثر شيوعاً في الحسابات الترموديناميكية :**

1. السعة الحرارية عند ضغط ثابت .
2. السعة الحرارية عند حجم ثابت .

- **من أسس مولر :**

$$R = c_p - c_v$$

$$R_\mu = c_{p_\mu} - c_{v_\mu}$$

- **نسبة السعة الحرارية :**

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

- من علاقة مولر و نسبة السعة الحرارية ينتج :

$$c_v = \frac{R}{k-1}$$

$$c_p = \frac{kR}{k-1}$$

## حساب السعات الحرارية من الجداول الترموديناميكية

1. **السعة الحرارية ثابتة** أي غير مرتبطة بدرجة الحرارة أو حسب النظرية الحركية الجزئية ( الدقة مقبولة ) :

$$c = \frac{c_\mu}{\mu} \Rightarrow \begin{cases} c_v = \frac{c_{\mu v}}{\mu} \\ c_p = \frac{c_{\mu p}}{\mu} \end{cases}$$

2. **السعة الحرارية مرتبطة بدرجة الحرارة خطياً** ( الدقة جيدة ) :

$$c = a + bt \Rightarrow \begin{cases} c_v = a + bt \\ c_p = a + bt \end{cases}$$

$$c' = a' + b't \Rightarrow \begin{cases} c'_v = a' + b't \\ c'_p = a' + b't \end{cases}$$

3. **السعة الحرارية مرتبطة بدرجة الحرارة لا خطياً** ( الأكثر دقة ) :

$$c\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c|_0^{t_2} \cdot t_2 - c|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} \Rightarrow \begin{cases} c_v\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_v|_0^{t_2} \cdot t_2 - c_v|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} \\ c_p\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_p|_0^{t_2} \cdot t_2 - c_p|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} \end{cases}$$

انتهى الفصل

الفصل

4

# قانون الترموديناميك الأول

## الرموز

- $Q$ = كمية الحرارة ، $(J)$ .
- $q$ = كمية الحرارة النوعية ، $(J/kg)$ .
- $L$ = العمل ( عمل تغير الحجم ) ، $(J)$ .
- $l$ = العمل النوعي ( عمل تغير الحجم النوعي ) ، $(J/kg)$ .
- $L'$ = العمل التكنيكي ( عمل تغير الضغط ) ، $(J)$ .
- $l'$ = العمل التكنيكي النوعي ( عمل تغير الضغط النوعي ) ، $(J/kg)$ .
- $\Delta U$ = تغير الطاقة الداخلية ، $(J)$ .
- $\Delta u$ = تغير الطاقة الداخلية النوعي ، $(J/kg)$ .
- $\Delta I$ = تغير الإنتالبية ، $(J)$ .
- $\Delta i$ = تغير الإنتالبية النوعي ، $(J/kg)$ .

## العمل

- **العمل :** هو شكل من أشكال الطاقة ، أمّا في الترموديناميك فإن العمل يقسم إلى :
  أ. **عمل تغير الحجم** ( **العمل الميكانيكي** ) ، و يرمز بـ $(L_v)$ أو $(L)$ .
  ب. **عمل تغير الضغط** ( **العمل التكنيكي** )، و يرمز بـ $(L_p)$ كرمزاً فرنسياً أو $(L')$ كرمزاً روسياً أو $(L_t)$ كرمزاً ألمانياً .
- و ينسب العمل أيضاً إلى طبيعة العملية التي ينجزها الجسم العامل لا إلى حالته و نميز :
  1. **عمل التمدد** : هو العمل الذي ينجزه الجسم العامل خلال عملية التمدد ، و يعتبر في الحسابات الترموديناميكية **موجباً** دوماً .
  2. **عمل الانضغاط** : هو العمل الذي ينجزه الجسم العامل خلال عملية الانضغاط ، و يعتبر في الحسابات الترموديناميكية **سالباً** دوماً .
- و بقي أنّ نذكر أنّ **العمل المفيد** هو العمل الذي يمكننا التصرف به كما نشاء ، و يرمز له بـ $(L_0)$ .
- كما أنني أنوه الطلبة بأن الرمز الجديد للعمل هو $(W)$ لكن لم نعتمده بعد .

## الطاقة الداخلية

- **الطاقة الداخلية :** هي كل أشكال الطاقة الحركية و الكامنة المحتملة للجزيئات ، إذ تتعلق الطاقة الداخلية بتركيب هذه الجزيئات و درجة نشاطها .
- يرمز للطاقة الداخلية بـ $(U)$ ، و هو من الرموز النادرة التي اتفق عليها العالم ، و ما زال مستخدماً إلى يومنا هذا .

## الإنتالبية

- **الإنتالبية :** عُرف المقدار $(U + pV)$ بعدة أسماء مختلفة على مرّ السنين ، ففي السنوات الأولى لنشوء علم الترموديناميك عُرفت الإنتالبية بـ " وظيفة الحرارة ، و محتوى الحرارة ، و الحرارة الكلية " .
- و الجدير بالذكر أنّ مصطلح الإنتالبية هو كلمة يونانية لم تترجم بل نقلت و لفظت كما هي ، و الكلمة هي " $\boldsymbol{\varepsilon\nu\theta\alpha\lambda\pi o\sigma}$ " و تعني **مخزون الدفء** .
- حيث أعطي للإنتالبية الرمز $(I)$ . علماً أن هذا الرمز أُستخدم لعقدين من الزمن تقريباً ، و الآن أصبح غائراً في القدم و تم الاستغناء عنه في المناهج الروسية ذاتها أو غيرها على السواء و الاستعاضة بدلاً عنه بالرمز $(H)$ و ذلك لتكونوا على دراية إذا شاء أحدكم أن يقلب بعض الأوراق المرجعية الأجنبية للترموديناميك .

## التعبير عن قانون الترموديناميك الأول

- **صيغة القانون الأول للترموديناميك :** كل الحرارة المعطاة لجسم عامل تُصرف على تغير الطاقة الداخلية لهذا الجسم و على إنجاز عمل خارجي .
  - **المعادلة الأولى لقانون الترموديناميك الأول :**

$$Q = \Delta U + L$$

$$q = \Delta u + l$$

  - **المعادلة الثانية لقانون الترموديناميك الأول :**

$$Q = \Delta I + L'$$

$$q = \Delta i + l'$$

**انتهى الفصل**

الفصل

# 5

# العمليات الترموديناميكة على الغازات المثالية

## الرموز

- $\Delta S$ = تغير الإنتروبي ، $(J/deg)$ .
- $\Delta s$ = تغير الإنتروبي النوعي ، $(J/kg \cdot deg)$ .
- $k$ = مؤشر الإديابات .
- $n$ = مؤشر البوليتروب .
- $\varphi$ = حصة الحرارة المصروفة على تغير الطاقة الداخلية .
- $\psi$ = حصة الحرارة المتحولة إلى عمل .

## مفاهيم أساسية

- مفهوم العمليات الترموديناميكية :

أ. **العملية العكوسة** : هي العملية التي تجري بالاتجاهين المباشر و العكسي ، و بعد جريانها بالاتجاه العكسي يعود الجسم العامل إلى حالته الأولية دون صرف طاقة إضافية و دون أن تُترك أي أثر في الجسم العامل و لا في الوسط المحيط ، حيث أن كل **العمليات المثالية** هي عمليات عكوسة .

ب. **العملية غير العكوسة** : هي العملية التي تجري بالاتجاهين المباشر و العكسي ، إلا أنّ عند جريانها بالاتجاه العكسي لا يعود الجسم العامل إلى حالته الأولية و تُترك أثار واضحة في الجسم العامل أو الوسط المحيط ، حيث أن كل **العمليات الحقيقة** هي عمليات غير عكوسة .

- العمليات الترموديناميكية للغازات المثالية :

1. **العملية الإيزوخورية** : هي العملية التي تجري بثبات الحجم $(v = const)$ .
2. **العملية الإيزوبارية** : هي العملية التي تجري بثبات الضغط $(p = const)$ .
3. **العملية الإيزوترمية** : هي العملية التي تجري بثبات درجة الحرارة $(T = const)$ .
4. **العملية الإديباتية** : هي العملية التي تجري بدون تبادل حراري مع الوسط المحيط $(dq = 0)$ ، أو العملية التي تجري بثبات الإنتروبي $(s = const)$ .
5. **العملية البوليتروبية** : هي العملية العامة التي يمكن أن تتغير فيها كل بارامترات الجسم العامل ، و تعتبر كل العمليات الأربعة السابقة حالات خاصة منها .

- **الإنتروبي** : هو المقياس لكمية الفوضى ضمن الجملة الترموديناميكة . و يمكن فقط أن ينتج الإنتروبي ضمن الجملة لكن لا يمكن تحطميه . حيث أنّ جملة الإنتروبي يمكن أن تزداد أو تنقص عن طريق انتقال الإنتروبي عبر حد الجملة . أمّا حسابياً فالإنتروبي النوعي يمثل نسبة كمية الحرارة المعطاة أو المأخوذة خلال عملية ما إلى درجة حرارة الوسط المحيط :

$$ds = \frac{dq}{T}$$

## دراسة العمليات الترموديناميكية

لدراسة العمليات الترموديناميكة لا بد من معرفة ما يلي :

1. معادلة العملية : التي تصف قانون تغير حالة الجسم العامل .
2. التمثيل البياني : و ذلك على مخطط $p - v$ .
3. العلاقة بين البارامترات: أي ما بين البارامترات الثلاث $p$ و $v$ و $T$ .
4. العمل النوعي ( عمل تغير الحجم النوعي ) :

$$l = \int_{v_1}^{v_2} pdv$$

5. العمل التكنيكي النوعي ( عمل تغير الضغط النوعي ) :

$$l' = -\int_{p_1}^{p_2} vdp$$

6. تغير الطاقة الداخلية النوعي :

$$\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$$

7. تغير الإنتالبية النوعي :

$$\Delta i = c_p(T_2 - T_1)$$

8. كمية الحرارة النوعية :

$$q = \Delta u + l$$
$$q = \Delta i + l'$$

9. حصة الحرارة المصروفة على تغير الطاقة الداخلية :

$$\varphi = \frac{\Delta u}{q}$$

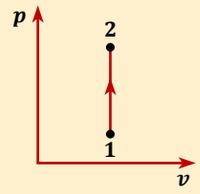
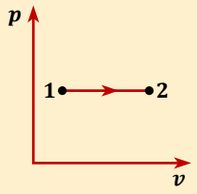
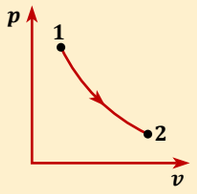
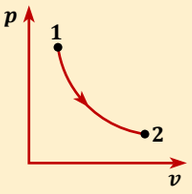
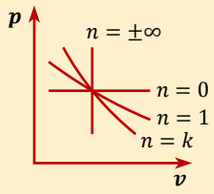
10. حصة الحرارة المتحولة إلى عمل :

$$\psi = 1 - \varphi$$

11. تغير الإنتروبي النوعي :

$$\Delta s = c_v ln\frac{T_2}{T_1} + Rln\frac{v_2}{v_1}$$
$$\Delta s = c_p ln\frac{T_2}{T_1} - Rln\frac{p_2}{p_1}$$
$$\Delta s = c_v ln\frac{p_2}{p_1} + c_p ln\frac{v_2}{v_1}$$

## مقارنة بين العمليات الترموديناميكية

| | العملية الإيزوخورية | العملية الإيزوبارية | العملية الإيزوترمية | العملية الإدياباتية | العملية البوليتروبية |
|---|---|---|---|---|---|
| .1 | $v = const.$ | $p = const.$ | $pv = const.$<br>$T = const.$ | $p \cdot v^k = const.$<br>$s = const.$ | $p \cdot v^n = const.$ |
| .2 |  |  |  |  |  |
| .3 | $\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$ | $\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$ | $\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}$ | $\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k$<br>$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$<br>$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$ | $\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n$<br>$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$<br>$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$ |
| .4 | $l = 0$ | $l = p(v_2 - v_1)$<br>$l = R(T_2 - T_1)$ | $l = p_1 v_1 ln\frac{v_2}{v_1}$<br>$l = p_1 v_1 ln\frac{p_1}{p_2}$<br>$l = RTln\frac{v_2}{v_1}$<br>$l = RTln\frac{p_1}{p_2}$ | $l = \frac{1}{k-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2)$<br>$l = \frac{R}{k-1}(T_1 - T_2)$<br>$l = \frac{p_1 v_1}{k-1}\left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}\right]$<br>$l = \frac{p_1 v_1}{k-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]$<br>$l = \frac{RT_1}{k-1}\left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}\right]$<br>$l = \frac{RT_1}{k-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]$ | $l = \frac{1}{n-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2)$<br>$l = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2)$<br>$l = \frac{p_1 v_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}\right]$<br>$l = \frac{p_1 v_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$<br>$l = \frac{RT_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}\right]$<br>$l = \frac{RT_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$ |
| .5 | $l' = v(p_1 - p_2)$<br>$= R(T_1 - T_2)$ | $l' = 0$ | $l' = l$ | $l' = kl$ | $l' = nl$ |
| .6 | $\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$ | $\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$ | $\Delta u = 0$ | $\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$<br>$\Delta u = -l$ | $\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$ |
| .7 | $\Delta i = c_p(T_2 - T_1)$ | $\Delta i = c_p(T_2 - T_1)$ | $\Delta i = 0$ | $\Delta i = c_p(T_2 - T_1)$<br>$\Delta i = -l'$ | $\Delta i = c_p(T_2 - T_1)$ |
| .8 | $q = \Delta u$ | $q = \Delta i$ | $q = l$ | $q = 0$ | $q = c_v\frac{n-k}{n-1}(T_2 - T_1)$ |
| .9 | $\varphi = 1$ | $\varphi = \frac{1}{k}$ | $\varphi = 0$ | $\varphi = \infty$ | $\varphi = \frac{n-1}{n-k}$ |
| .10 | $\psi = 0$ | $\psi = \frac{k-1}{k}$ | $\psi = 1$ | $\psi = -\infty$ | $\psi = \frac{1-k}{n-k}$ |
| .11 | $\Delta s = c_v ln\frac{T_2}{T_1}$<br>$\Delta s = c_p ln\frac{T_2}{T_1} - Rln\frac{p_2}{p_1}$<br>$\Delta s = c_v ln\frac{p_2}{p_1}$ | $\Delta s = c_v ln\frac{T_2}{T_1} + Rln\frac{v_2}{v_1}$<br>$\Delta s = c_p ln\frac{T_2}{T_1}$<br>$\Delta s = c_p ln\frac{v_2}{v_1}$ | $\Delta s = Rln\frac{v_2}{v_1}$<br>$\Delta s = -Rln\frac{p_2}{p_1}$<br>$\Delta s = c_v ln\frac{p_2}{p_1} + c_p ln\frac{v_2}{v_1}$ | $\Delta s = 0$ | $\Delta s = c_v ln\frac{T_2}{T_1} + Rln\frac{v_2}{v_1}$<br>$\Delta s = c_p ln\frac{T_2}{T_1} - Rln\frac{p_2}{p_1}$<br>$\Delta s = c_v ln\frac{p_2}{p_1} + c_p ln\frac{v_2}{v_1}$ |

انتهى الفصل

الفصل

# 6

# خلائط الغازات المثالية

## خواص خلائط الغازات المثالية

| | |
|---|---|
| $g_i = \frac{m_i}{m_{mix}}$ | الحصة الكتلية |
| $x_i = \frac{n_i}{n_{mix}}$ | الحصة المولية |
| $r_i = \frac{V_i}{V_{mix}}$ | الحصّة الحجمية |
| $\pi_i = \frac{p_i}{p_{mix}}$ | الحصّة الضغطية |
| $\sum g_i = 1$ | مجموع الحصص الكتلية |
| $\sum x_i = 1$ | مجموع الحصص المولية |
| $\sum r_i = 1$ | مجموع الحصص الحجمية |
| $\sum \pi_i = 1$ | مجموع الحصص الضغطية |
| $m_i = g_i m_{mix}$ | الكتلة الجزئية |
| $n_i = x_i n_{mix}$ | عدد المولات الجزئي |
| $V_i = r_i V_{mix}$ | الحجم الجزئي |
| $p_i = \pi_i p_{mix}$ | الضغط الجزئي |
| $m_{mix} = \sum m_i$ | الكتلة |
| $n_{mix} = \sum n_i$ | عدد المولات |
| $V_{mix} = \sum V_i\,(T_{mix}\,,\,p_{mix})$ | الحجم " قانون دولتن " |
| $p_{mix} = \sum p_i\,(T_{mix}\,,V_{mix})$ | الضغط " قانون أماغت " |

## في خلائط الغازات دوماً يكون

$$x_i = \frac{n_i}{n_{mix}} = \frac{V_i}{V_{mix}} = \frac{p_i}{p_{mix}} \quad \Rightarrow \quad x_i = r_i = \pi_i$$

## ثابت الغازات

$$R_{mix} = \sum g_i R_i = 8314 \sum \frac{g_i}{\mu_i}$$

$$R_{mix} = \frac{1}{\sum \frac{r_i}{R_i}}$$

$$R_{mix} = \frac{p_{mix} V_{mix}}{m_{mix} T_{mix}}$$

$$R_{mix} = \frac{8314}{\mu_{mix}}$$

## الكتلة المولية

$$\mu_{mix} = \sum r_i \mu_i$$

$$\mu_{mix} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\mu_i}}$$

$$\mu_{mix} = \frac{m_{mix}}{n_{mix}}$$

$$\mu_{mix} = \frac{8314}{R_{mix}}$$

## الحجم النوعي

$$v_{mix} = \sum g_i v_i$$

$$v_{mix} = \frac{V_{mix}}{m_{mix}}$$

$$v_{mix} = \frac{1}{\rho_{mix}}$$

في الشروط النظامية $\quad v_{mix} = \frac{22,4}{\mu_{mix}}$

## الكثافة

$$\rho_{mix} = \sum r_i \rho_i$$

$$\rho_{mix} = \frac{m_{mix}}{V_{mix}}$$

$$\rho_{mix} = \frac{1}{v_{mix}}$$

في الشروط النظامية $\quad \rho_{mix} = \frac{\mu_{mix}}{22,4}$

## الحصة الكتلية

$$g_i = r_i \frac{\mu_i}{\mu_{mix}} = r_i \frac{\rho_i}{\rho_{mix}}$$

$$g_i = r_i \frac{R_{mix}}{R_i}$$

## الحصة الحجمية

$$r_i = g_i \frac{R_i}{R_{mix}}$$

$$r_i = \frac{\frac{m_i}{\mu_i}}{\sum \frac{m_i}{\mu_i}} = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum \frac{g_i}{\mu_i}}$$

## في خلائط الغازات

$$c_{v_{mix}} = \frac{R_{mix}}{k_{mix} - 1}$$

$$c_{p_{mix}} = \frac{k_{mix} R_{mix}}{k_{mix} - 1}$$

$$k_{mix} = \frac{c_{p_{mix}}}{c_{v_{mix}}}$$

$$R_{mix} = c_{p_{mix}} - c_{v_{mix}}$$

## السعة الحرارية لخلائط الغازات

| | |
|---|---|
| $c_{v_{mix}} = \sum g_i c_{v_i}$ | السعة الحرارية الكتلية الإيزوخورية |
| $c_{p_{mix}} = \sum g_i c_{p_i}$ | السعة الحرارية الكتلية الإيزوبارية |
| $c'_{v_{mix}} = \sum r_i c'_{v_i}$ | السعة الحرارية الحجمية الإيزوخورية |
| $c'_{p_{mix}} = \sum r_i c'_{p_i}$ | السعة الحرارية الحجمية الإيزوبارية |

## تغير الطاقة الداخلية و تغير الإنتالبية و تغير الإنتروبي لخلائط الغازات

| | |
|---|---|
| $\Delta u_{mix} = c_{v_{mix}} (T_{mix_2} - T_{mix_1})$ | تغير الطاقة الداخلية النوعي |
| $\Delta i_{mix} = c_{p_{mix}} (T_{mix_2} - T_{mix_1})$ | تغير الإنتالبية النوعي |
| $\Delta s_{mix} = c_{v_{mix}} ln \frac{T_{mix_2}}{T_{mix_1}} + R_{mix} ln \frac{v_{mix_2}}{v_{mix_1}}$ | تغير الإنتروبي النوعي |
| $\Delta s_{mix} = c_{p_{mix}} ln \frac{T_{mix_2}}{T_{mix_1}} - R_{mix} ln \frac{p_{mix_2}}{p_{mix_1}}$ | |

انتهى الفصل

الفصل

7

# قانون الترموديناميك الثاني

## الرموز

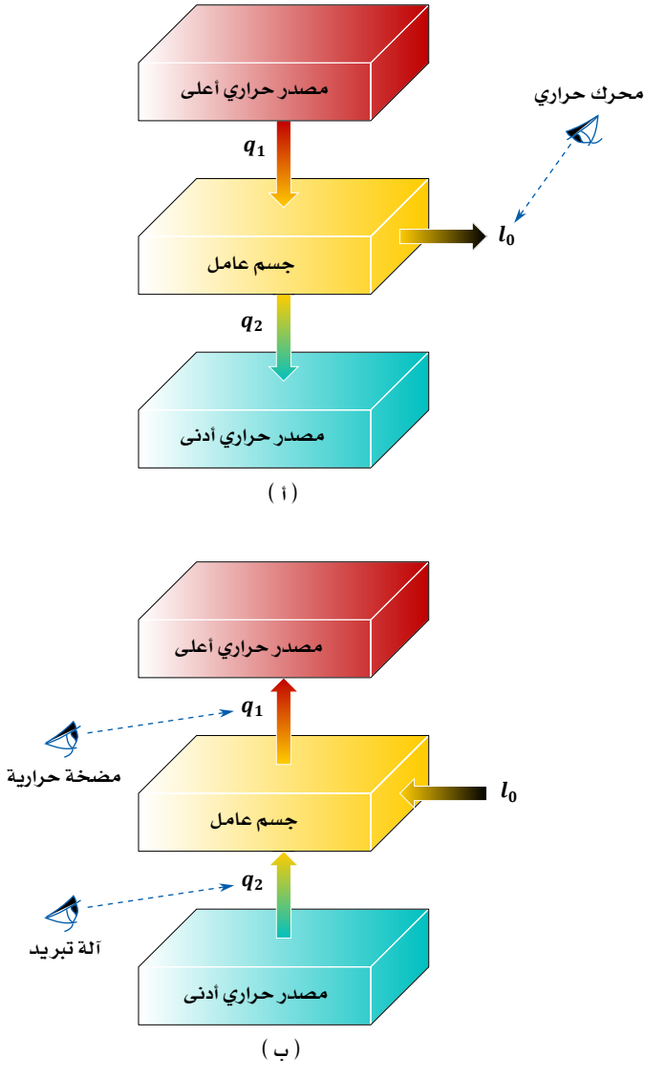
- $\eta_T$ = المردود الحراري .
- $\varphi$ = معامل التدفئة .
- $\varepsilon$ = معامل التبريد .

## صيغ قانون الترموديناميك الثاني

- **صيغة كارنو :** أينما وجد فرق بدرجات الحرارة يمكن توليد القوة المحركة .
- **صيغة كلاوزيوس :** لا يمكن للحرارة أن تنتقل تلقائياً من جسم بارد إلى جسم ساخن دون دفع الثمن .
- **صيغة طومسون مع كلاوزيوس :** لا يمكن أن تتحول كل الحرارة المأخوذة من مصدر حراري ما إلى عمل ، إذ يتحول جزء منها إلى عمل و ينتقل الجزء الآخر إلى المصدر الحراري الآخر .
- **صيغة أوستفالد :** إن تصميم محرك أبدي من النوع الثاني أمر غير ممكن ، و يقصد بالمحرك الأبدي المحرك القادر على تحويل كل الحرارة المأخوذة من مصدر واحد إلى عمل .
- **ما تبقى من الصيغ :** فجميعها تدل على عدم إمكانية تحول كل الحرارة المأخوذة من مصدر حراري واحد إلى عمل .
- **إذاً لكي يتحول جزء من الحرارة إلى عمل يجب أن يتواجد ما يلي :**
  1. مصدر حراري ذي درجة حرارة عليا .
  2. جسم عامل .
  3. مصدر حراري ذي درجة حرارة دنيا .

## الدورات الترموديناميكية

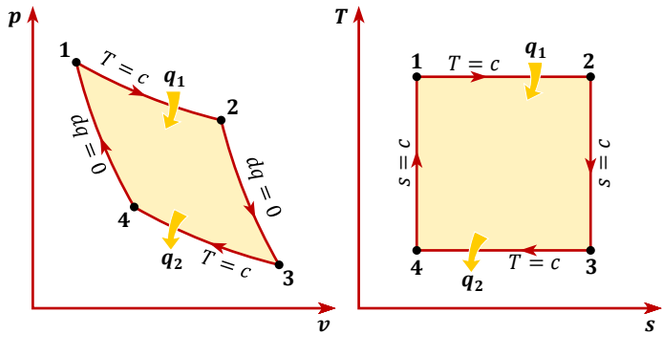
- **الدورات العكوسة :** هي **دورات مثالية** . أي هي الدورات التي لا تأخذ بالاعتبار أيّة مفاقيد ، و هذه الدورات نموذجية حيث تعتبر مقياساً عاماً تقارن بها الدورات الأخرى .
- **الدورات الغير عكوسة ( اللاعكوسة ) :** هي **دورات حقيقة** . أي هي الدورات التي نشاهدها على أرض الواقع .
- **الدورات المباشرة :** هي الدورات التي تتحول فيها الحرارة إلى عمل . و تعمل وفقها **المحركات الحرارية** ، و تجري هذه الدورات على المخططات **باتجاه دوران عقارب الساعة** .
- **الدورات الغير مباشرة ( العكسية ) :** هي الدورات التي تنتقل فيها الحرارة من الجسم الأكثر برودة إلى الجسم الأكثر سخونة . و تعمل وفقها **آلات التبريد و المضخات الحرارية** ، و تجري هذه الدورات على المخططات **بعكس اتجاه دوران عقارب الساعة** .




**الشكل يبيّن : ( أ ) المحرك الحراري ، ( ب ) المضخة الحرارية و آلة التبريد .**

## دورة كارنو العكوسة المباشرة

- دورة كارنو العكوسة المباشرة : هي الدورة المثالية للمحرك الحراري الأول .
- تملك دورة كارنو العكوسة المباشرة أعلى مردود حراري إذ يعتبر مقياساً عاماً تقارن به كل دورات المحركات الحرارية .
- قيمة المردود الحراري لدورة كارنو المباشرة دوماً أصغر من الواحد $(\eta_T < 1)$ .
- **سير عمليات دورة كارنو العكوسة المباشرة :**
  - العملية 1 ← 2 : إعطاء الحرارة تحت درجة حرارة ثابتة .
  - العملية 2 ← 3 : تمدّد إدياباتي .
  - العملية 3 ← 4 : طرح الحرارة تحت درجة حرارة ثابتة .
  - العملية 4 ← 1 : انضغاط إدياباتي .




الشكل يبيّن : دورة كارنو العكوسة المباشرة على مخططي $p - v$ و $T - s$ .

- العمل النوعي المفيد :

$$l_0 = l_1 - |l_2|$$
$$l_0 = (l_{1\to2} + l_{2\to3}) - |l_{3\to4} + l_{4\to1}|$$
$$l_0 = \left[RT_1 ln\frac{v_2}{v_1} + \frac{R}{k-1}(T_2 - T_3)\right] - \left[RT_3 ln\frac{v_3}{v_4} + \frac{R}{k-1}(T_1 - T_4)\right]$$

- كمية الحرارة النوعية :

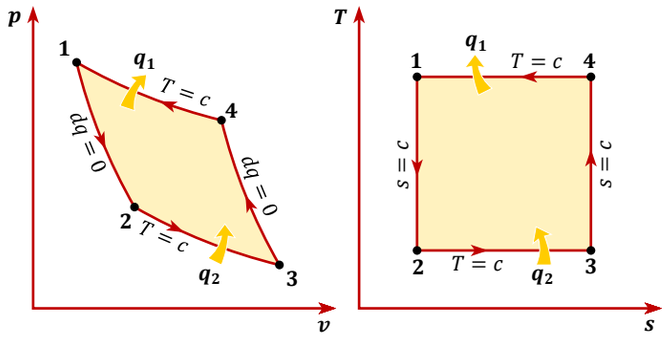
$$q = q_1 - |q_2|$$
$$q = q_{1\to2} - |q_{3\to4}|$$
$$q = RT_1 ln\frac{v_2}{v_1} - RT_3 ln\frac{v_3}{v_4}$$

- المردود الحراري :

$$\eta_T = \frac{l_0}{q_1} = \frac{q_1 - |q_2|}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = 1 - \frac{T_{\text{أدنى}}}{T_{\text{أعلى}}}$$

## دورة كارنو العكوسة الغير مباشرة

- دورة كارنو العكوسة العكسية : هي الدورة المثالية للمضخة الحرارية و آلة التبريد الهوائية .
- تملك دورة كارنو العكوسة الغير مباشرة أعلى معاملي تبريد و تدفئة إذ يعتبرا مقياسين عامين تقارن بهما كل دورات المضخات الحرارية و آلات التبريد .
- تقع قيمة معامل التبريد لدورة كارنو الغير مباشرة في المجال $(0 < \varepsilon < \infty)$ ، أمّا معامل التدفئة لدورة كارنو الغير مباشرة فيقع في المجال $(1 < \varphi < \infty)$ .
- **سير عمليات دورة كارنو العكسية :**
  - العملية 1 ← 2 : تمدّد إدياباتي .
  - العملية 2 ← 3 : إعطاء الحرارة تحت درجة حرارة ثابتة .
  - العملية 3 ← 4 : انضغاط إدياباتي .
  - العملية 4 ← 1 : طرح الحرارة تحت درجة حرارة ثابتة .




الشكل يبيّن : دورة كارنو العكوسة الغير مباشرة على مخططي $p - v$ و $T - s$ .

- العمل النوعي المفيد :

$$|l_0| = |l_1| - l_2$$
$$|l_0| = |l_{3\to4} + l_{4\to1}| - (l_{1\to2} + l_{2\to3})$$
$$|l_0| = \left[\frac{R}{k-1}(T_4 - T_3) + RT_4 ln\frac{v_4}{v_1}\right] - \left[\frac{R}{k-1}(T_1 - T_2) + RT_2 ln\frac{v_3}{v_2}\right]$$

- كمية الحرارة النوعية :

$$q = |q_1| - q_2$$
$$q = |q_{4\to1}| - q_{2\to3}$$
$$q = RT_4 ln\frac{v_4}{v_1} - RT_2 ln\frac{v_3}{v_2}$$

- معامل التبريد لآلات التبريد :

$$\varepsilon = \frac{q_2}{|l_0|} = \frac{q_2}{|q_1| - q_2} = \frac{T_{min}}{T_{max} - T_{min}} = \frac{T_{\text{أدنى}}}{T_{\text{أعلى}} - T_{\text{أدنى}}}$$

- معامل التدفئة للمضخات الحرارية :

$$\varphi = \frac{q_1}{|l_0|} = \frac{q_1}{|q_1| - q_2} = \frac{T_{max}}{T_{max} - T_{min}} = \frac{T_{\text{أعلى}}}{T_{\text{أعلى}} - T_{\text{أدنى}}}$$

- العلاقة بين معامل تدفئة المضخات الحرارية و معامل تبريد آلات التبريد :

$$\varphi = \varepsilon + 1$$

---

و أخيراً نورد القانون الثاني للترموديناميك و به ننهي هذا الفصل :

$$\frac{T_{max}}{T_{min}} = \frac{q_1}{q_2} \Leftrightarrow \frac{T_{\text{أعلى}}}{T_{\text{أدنى}}} = \frac{q_{\text{أعلى}}}{q_{\text{أدنى}}}$$

انتهى الفصل

الفصل

8

# دورات محركات الاحتراق الداخلي

## الرموز

- $\varepsilon$ = نسبة الانضغاط .
- $\lambda$ = درجة ازدياد الضغط .
- $\rho$ = درجة التمدّد الأولية .
- $p_i$ = الضغط الدليلي الوسطي .

## مفاهيم أساسية

- **نسبة الانضغاط** : هي نسبة الحجم الكلي للإسطوانة إلى حجم غرفة الاحتراق ، و بالتالي هي نسبة الحجم النوعي للجسم العامل في بداية **عملية الانضغاط الإديباباتي** إلى الحجم النوعي في نهاية العملية ذاتها :

$$\varepsilon = \frac{v_{\text{بدائي}}}{v_{\text{نهائي}}} = \frac{v_{\text{كبير}}}{v_{\text{صغير}}} = \frac{v_1}{v_2}$$

- **درجة ازدياد الضغط** : هي نسبة الضغط للجسم العامل في نهاية **عملية إعطاء الحرارة تحت حجم ثابت** إلى الضغط في بداية العملية ذاتها :

$$\lambda = \frac{p_{\text{نهائي}}}{p_{\text{بدائي}}} = \frac{p_{\text{كبير}}}{p_{\text{صغير}}} = \frac{p_3}{p_2}$$

- **درجة التمدّد الأولية** : هي نسبة الحجم النوعي للجسم العامل في نهاية **عملية إعطاء الحرارة تحت ضغط ثابت** إلى الحجم النوعي في بداية العملية ذاتها :

$$\rho = \frac{v_{\text{نهائي}}}{v_{\text{بدائي}}} = \frac{v_{\text{كبير}}}{v_{\text{صغير}}} = \frac{v_3}{v_2}$$

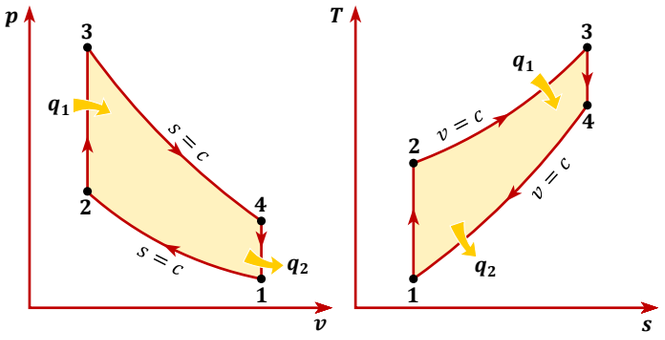
- **الضغط الدليلي الوسطي** : هو نسبة العمل النوعي المفيد للجسم العامل إلى فرق الحجم النوعي لعملية الانضغاط الإديباباتي ( الحجم العامل ) :

$$p_i = \frac{l_0}{v_1 - v_2}$$

## دورة أوتو

- **دورة أوتو** : هي الدورة المثالية لمحرك الاحتراق الداخلي ذي الاشتعال بالشرارة .
- تدعى دورة أوتو أيضاً بـ " دورة محرك الاحتراق الداخلي **ذي إعطاء الحرارة تحت حجم ثابت** " .

- **سير عمليات دورة أوتو :**
  - العملية 1 ← 2 : انضغاط إديباباتي .
  - العملية 2 ← 3 : إعطاء الحرارة تحت حجم ثابت .
  - العملية 3 ← 4 : تمدّد إديباباتي .
  - العملية 4 ← 1 : طرح الحرارة تحت حجم ثابت .




**الشكل يبيّن** : دورة أوتو على مخططي $p - v$ و $T - s$ .

- **العمل النوعي المفيد :**

$$l_0 = l_1 - |l_2|$$
$$l_0 = l_{3\to4} - |l_{1\to2}|$$
$$l_0 = \frac{R}{k-1}(T_3 - T_4) - \frac{R}{k-1}(T_2 - T_1)$$

- **كمية الحرارة النوعية :**

$$q = q_1 - |q_2|$$
$$q = q_{2\to3} - |q_{4\to1}|$$
$$q = c_v(T_3 - T_2) - c_v(T_4 - T_1)$$

- **المردود الحراري :**

$$\eta_T = \frac{l_0}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1}$$
$$\eta_T = \frac{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}{T_3 - T_2}$$
$$\eta_T = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$
$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

- **درجات الحرارة :**

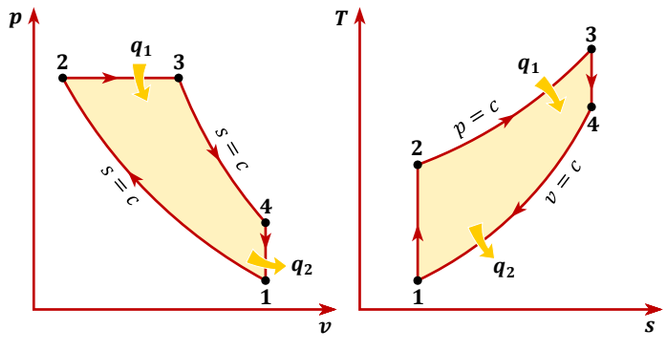
$$T_2 = T_1\varepsilon^{k-1}$$
$$T_3 = T_2\lambda$$
$$T_4 = T_3\frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

## دورة ديزل

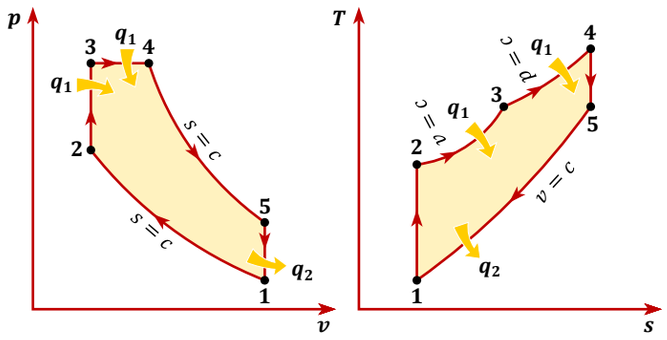
- **دورة ديزل :** هي الدورة المثالية لمحرك الاحتراق الداخلي ذي الاشتعال بالانضغاط ( و هذا المحرك يعرف بمحرك الديزل ) .
- تدعى دورة ديزل أيضاً بـ " دورة محرك الاحتراق الداخلي **ذي إعطاء الحرارة تحت ضغط ثابت** " .
- **سير عمليات دورة ديزل :**
  - العملية 1 ← 2 : انضغاط إدياباتي .
  - العملية 2 ← 3 : إعطاء الحرارة تحت ضغط ثابت .
  - العملية 3 ← 4 : تمدّد إدياباتي .
  - العملية 4 ← 1 : طرح الحرارة تحت حجم ثابت .

## دورة ترانكلر

- **دورة ترانكلر :** هي الدورة المثالية لمحرك الاحتراق الداخلي المزدوجة .
- تدعى دورة ترانكلر أيضاً بـ " دورة محرك الاحتراق الداخلي **ذي إعطاء الحرارة تحت حجم و ضغط ثابتين** " .
- **سير عمليات دورة ترانكلر :**
  - العملية 1 ← 2 : انضغاط إدياباتي .
  - العملية 2 ← 3 : إعطاء الحرارة تحت حجم ثابت .
  - العملية 3 ← 4 : إعطاء الحرارة تحت ضغط ثابت .
  - العملية 4 ← 5 : تمدّد إدياباتي .
  - العملية 5 ← 1 : طرح الحرارة تحت حجم ثابت .




**الشكل يبيّن :** دورة ديزل على مخططي $p - v$ و $T - s$ .




**الشكل يبيّن :** دورة ترانكلر على مخططي $p - v$ و $T - s$ .

- **العمل النوعي المفيد :**

$$l_0 = l_1 - |l_2|$$
$$l_0 = (l_{2\to3} + l_{3\to4}) - |l_{1\to2}|$$
$$l_0 = \left[R(T_3 - T_2) + \frac{R}{k-1}(T_3 - T_4)\right] - \frac{R}{k-1}(T_2 - T_1)$$

- **كمية الحرارة النوعية :**

$$q = q_1 - |q_2|$$
$$q = q_{2\to3} - |q_{4\to1}|$$
$$q = c_p(T_3 - T_2) - c_v(T_4 - T_1)$$

- **المردود الحراري :**

$$\eta_T = \frac{l_0}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1}$$
$$\eta_T = 1 - \frac{1}{k}\cdot\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$
$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}\cdot\frac{1}{k}\cdot\frac{\rho^k - 1}{\rho - 1}$$

- **درجات الحرارة :**

$$T_2 = T_1\varepsilon^{k-1}$$
$$T_3 = T_2\rho$$
$$T_4 = T_1\rho^k$$

- **العمل النوعي المفيد :**

$$l_0 = l_1 - |l_2|$$
$$l_0 = (l_{3\to4} + l_{4\to5}) - |l_{1\to2}|$$
$$l_0 = \left[R(T_4 - T_3) + \frac{R}{k-1}(T_4 - T_5)\right] - \frac{R}{k-1}(T_2 - T_1)$$

- **كمية الحرارة النوعية :**

$$q = q_1 - |q_2|$$
$$q = (q_{2\to3} + q_{3\to4}) - |q_{5\to1}|$$
$$q = [c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)] - c_v(T_5 - T_1)$$

- **المردود الحراري :**

$$\eta_T = \frac{l_0}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1}$$
$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}\cdot\frac{\lambda\rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)}$$

- **درجات الحرارة :**

$$T_2 = T_1\varepsilon^{k-1}$$
$$T_3 = T_2\lambda$$
$$T_4 = T_3\rho$$
$$T_5 = T_1\lambda\rho^k$$

انتهى الفصل

الفصل

9

# دورات المحطات التوربينية الغازية

## الرموز

- $\beta$ = درجة ازدياد الضغط ( خلال الانضغاط الإدياباتي ) .
- $\eta_{oi}$ = المردود النسبي الداخلي .
- $\eta_m$ = المردود الميكانيكي .
- $\eta_{el}$ = المردود الكهربائي .
- $\dot{m}$ = التدفق الكتلي ( الإنتاجية الكتلية ) ، $(kg/s)$ .
- $N$ = الاستطاعة ، $(W)$ .
- $N_0$ = الاستطاعة النظرية ، $(W)$ .
- $N_i$ = الاستطاعة الحقيقية ، $(W)$ .
- $N_e$ = الاستطاعة الفعّالة ، $(W)$ .
- $N_{el}$ = الاستطاعة الكهربائية ، $(W)$ .
- $l_0$ = العمل النظري النوعي ، $(J/kg)$ .
- $l_i$ = العمل الحقيقي النوعي ، $(J/kg)$ .
- $l_e$ = العمل الفعّال النوعي ، $(J/kg)$ .
- $l_{el}$ = العمل الكهربائي النوعي ، $(J/kg)$ .

## مفاهيم أساسية

- **درجة ازدياد الضغط ( خلال عملية الانضغاط الإدياباتي )** : هي نسبة الضغط للجسم العامل في نهاية **عملية الانضغاط الإدياباتي** إلى الضغط في بداية العملية ذاتها :

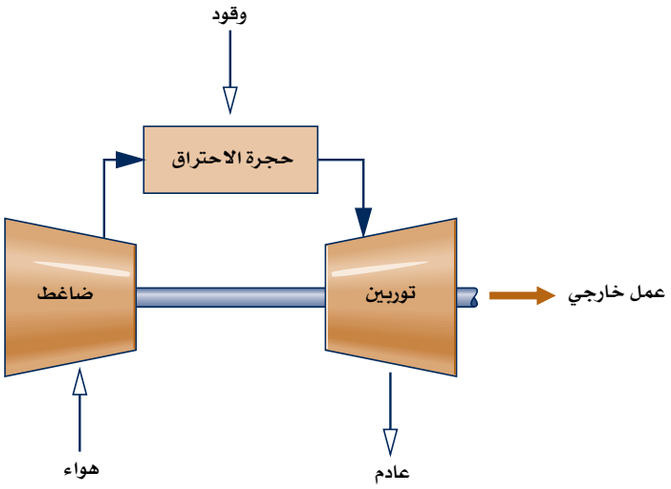
$$\beta = \frac{p_{\text{نهائي}}}{p_{\text{بدائي}}} = \frac{p_{\text{كبير}}}{p_{\text{صغير}}} = \frac{p_2}{p_1}$$

- **ملاحظة** :

الملحقة $(T)$ تدل على التوربين ، بينما الملحقة $(C)$ تدل على الضاغط ، فمثلاً الرمز $(\eta_m^T)$ يعني المردود الميكانيكي للتوربين ، بينما الرمز $(N_i^C)$ يعني الاستطاعة الحقيقة للضاغط ، و هكذا .

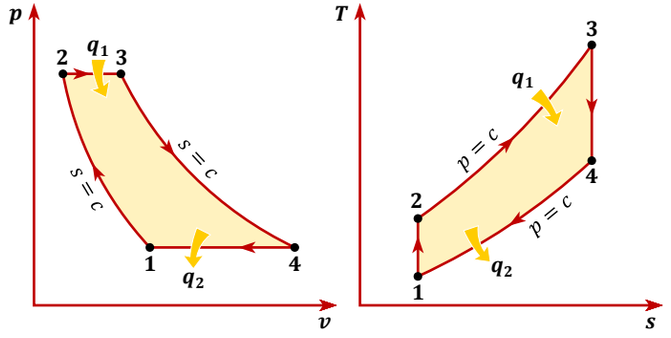
## دورة المحطة التوربينية بإعطاء الحرارة تحت ضغط ثابت

- تعرف دورة المحطة التوربينية الغازية مع إعطاء الحرارة تحت ضغط ثابت أيضاً ( في بعض المصادر الأجنبية ) بـ " **دورة براتن** " و هي عبارة عن الدورة المثالية للمحطة التوربينية الغازية الحديثة ، أو باسم "**دورة المحطة التوربينية الغازية**".




**الشكل يبيّن** : مبدأ عمل دورة المحطة التوربينية الغازية المفتوحة .

- **سير عمليات هذه الدورة** :
  - العملية $1 \leftarrow 2$ : انضغاط إدياباتي .
  - العملية $2 \leftarrow 3$ : إعطاء الحرارة تحت ضغط ثابت .
  - العملية $3 \leftarrow 4$ : تمدّد إدياباتي .
  - العملية $4 \leftarrow 1$ : طرح الحرارة تحت ضغط ثابت .




**الشكل يبيّن** : دورة المحطة التوربينية الغازية مع إعطاء الحرارة تحت ضغط ثابت على مخططي $p-v$ و $T-s$ .

- العمل النوعي المفيد :

$$l_0 = l_1 - |l_2|$$
$$l_0 = (l_{2\to3} + l_{3\to4}) - |l_{4\to1} + l_{1\to2}|$$
$$l_0 = \left[R(T_3 - T_2) + \frac{R}{k-1}(T_3 - T_4)\right] - \left[R(T_4 - T_1) + \frac{R}{k-1}(T_2 - T_1)\right]$$

- كمية الحرارة النوعية :

$$q = q_1 - |q_2|$$
$$q = q_{2\to3} - |q_{4\to1}|$$
$$q = c_p(T_3 - T_2) - c_p(T_4 - T_1)$$

- المردود الحراري :

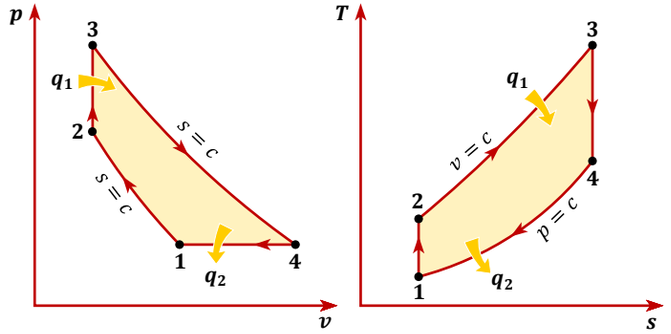
$$\eta_T = \frac{l_0}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1}$$
$$\eta_T = \frac{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}{T_3 - T_2}$$
$$\eta_T = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$
$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}$$

- درجات الحرارة :

$$T_2 = T_1\beta^{\frac{k-1}{k}}$$
$$T_3 = T_2\rho$$
$$T_4 = T_3\frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}$$

## دورة المحطة التوربينية بإعطاء الحرارة تحت حجم ثابت

- تعرف هذه الدورة أيضاً ( استناداً إلى المراجع ) بـ " دورة أتكنسن " و هي عبارة الدورة المثالية للمحطة التوربينية الغازية المحسّنة من دورة أوتو ، حيث حجمها الكبير و ثمنها المرتفع لم تلبي حاجات السوق و أدّيا مع مرور الزمن إلى زوالها .
- سير عمليات هذه الدورة :
  - العملية 1 ← 2 : انضغاط إدياباتي .
  - العملية 2 ← 3 : إعطاء الحرارة تحت حجم ثابت .
  - العملية 3 ← 4 : تمدّد إدياباتي .
  - العملية 4 ← 1 : طرح الحرارة تحت ضغط ثابت .




الشكل يبيّن : دورة المحطة التوربينية الغازية مع إعطاء الحرارة تحت حجم ثابت على مخططي $p - v$ و $T - s$ .

- العمل النوعي المفيد :

$$l_0 = l_1 - |l_2|$$
$$l_0 = l_{3\to4} - |l_{4\to1} + l_{1\to2}|$$
$$l_0 = \frac{R}{k-1}(T_3 - T_4) - \left[R(T_4 - T_1) + \frac{R}{k-1}(T_2 - T_1)\right]$$

- كمية الحرارة النوعية :

$$q = q_1 - |q_2|$$
$$q = q_{2\to3} - |q_{4\to1}|$$
$$q = c_v(T_3 - T_2) - c_p(T_4 - T_1)$$

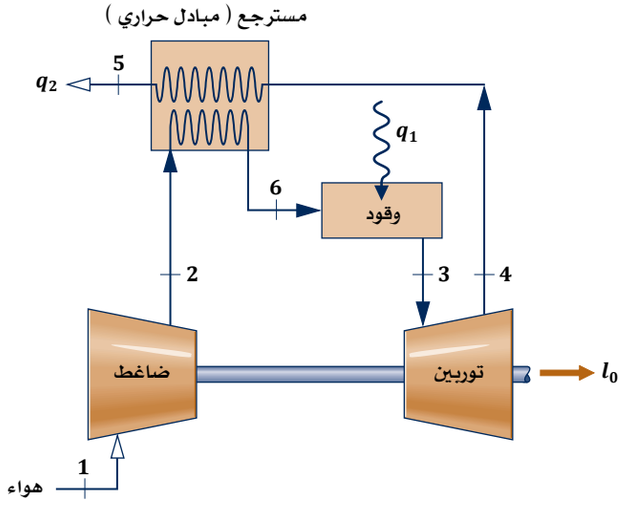
- المردود الحراري :

$$\eta_T = \frac{l_0}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1}$$
$$\eta_T = 1 - k\cdot\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$
$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}\cdot k\cdot\frac{\lambda^{\frac{1}{k}} - 1}{\lambda - 1}$$

- درجات الحرارة :

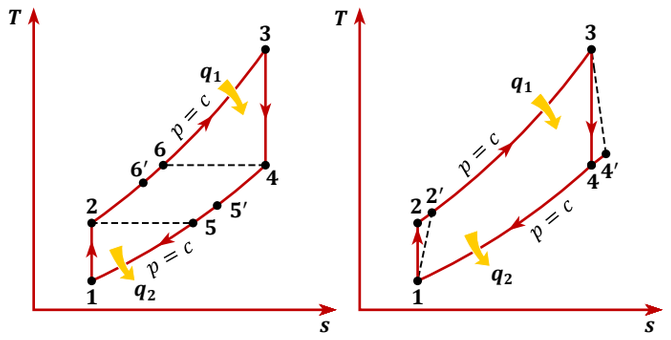
$$T_2 = T_1\beta^{\frac{k-1}{k}}$$
$$T_3 = T_2\lambda$$
$$T_4 = T_1\lambda^{\frac{1}{k}}$$

## دورة المحطة التوربينية الغازية مع استرجاع للحرارة




الشكل يبيّن : مبدأ عمل دورة المحطة التوربينية الغازية مع استرجاع للحرارة .

- سير عمليات هذه الدورة :
  - العملية 1 ← 2 : انضغاط إدياباتي ( في الضاغط ) .
  - العملية 2 ← 6 : تسخين الهواء ( في المسترجع ) .
  - العملية 6 ← 3 : إعطاء الحرارة تحت ضغط ثابت ( في حجرة الاحتراق ) .
  - العملية 3 ← 4 : تمدّد إدياباتي ( في التوربين ) .
  - العملية 4 ← 5 : سحب الحرارة من غازات الاحتراق ( إلى المسترجع ).
  - العملية 5 ← 1 : طرح الحرارة تحت ضغط ثابت ( إلى الوسط المحيط ) .




الشكل يبيّن : دورة المحطة التوربينية الغازية مع استرجاع للحرارة ، و سير العمليات الحقيقية لدورة المحطة التوربينية الغازية على مخطط $T-s$ .

- عندما يكون الاسترجاع كاملاً ( تاماً ) :
  - كمية الحرارة المعطاة :
$$q_1 = q_{6\to 3} = c_p(T_3 - T_6) = c_p(T_3 - T_4)$$
  - كمية الحرارة المطروحة :
$$|q_2| = |q_{5\to 1}| = c_p(T_5 - T_1) = c_p(T_2 - T_1)$$
  - المردود الحراري :
$$\eta_T = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4}$$
- نسبة الاسترجاع :
$$\sigma = \frac{q_{6'\to 2}}{q_{6\to 2}} = \frac{T_{6'} - T_2}{T_6 - T_2}$$
- عندما يكون الاسترجاع غير كاملاً ( جزئياً ) :
  - كمية الحرارة المعطاة :
$$q_1 = q_{6'\to 3} = c_p(T_3 - T_{6'}) = c_p[(T_3 - T_2) - \sigma(T_6 - T_2)]$$
  - كمية الحرارة المطروحة :
$$|q_2| = |q_{5'\to 1}| = c_p(T_{5'} - T_1) = c_p[(T_4 - T_1) - \sigma(T_6 - T_2)]$$
  - المردود الحراري :
$$\eta_T = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{(T_4 - T_1) - \sigma(T_6 - T_2)}{(T_3 - T_2) - \sigma(T_6 - T_2)}$$

## سير العمليات الحقيقية لدورة المحطة التوربينية الغازية

- سير عمليات هذه الدورة الحقيقية :
  - العملية $1 \leftarrow 2'$ : انضغاط إدياباتي لا عكوسي للهواء ( في الضاغط ) .
  - العملية $2' \leftarrow 3$ : إعطاء الحرارة تحت ضغط ثابت ( في حجرة الاحتراق ) .
  - العملية $3 \leftarrow 4'$ : تمدّد إدياباتي لا عكوسي لغازات الاحتراق ( في التوربين )
  - العملية $4' \leftarrow 1$ : طرح الحرارة تحت ضغط ثابت ( إلى الوسط المحيط ) .
- العمل النوعي النظري للتوربين :
$$l_0^T = i_3 - i_4 = c_p(T_3 - T_4)$$
- العمل النوعي الحقيقي للتوربين :
$$l_i^T = i_3 - i_{4'} = c_p(T_3 - T_{4'})$$
- المردود النسبي الداخلي للتوربين :
$$\eta_{oi}^T = \frac{l_i^T}{l_0^T} = \frac{T_3 - T_{4'}}{T_3 - T_4}$$
- العمل النوعي النظري للضاغط :
$$l_0^C = i_2 - i_1 = c_p(T_2 - T_1)$$
- العمل النوعي الحقيقي للضاغط :
$$l_i^C = i_{2'} - i_1 = c_p(T_{2'} - T_1)$$
- المردود النسبي الداخلي للضاغط :
$$\eta_{oi}^C = \frac{l_0^C}{l_i^C} = \frac{T_2 - T_1}{T_{2'} - T_1}$$
- المردود الداخلي للمحطة التوربينية الغازية :
$$\eta_i = \frac{l_i}{q_1} = \frac{l_i^T - l_i^C}{q_1} = \frac{(T_3 - T_{4'}) - (T_{2'} - T_1)}{T_3 - T_{2'}}$$
$$\eta_i = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{T_{4'} - T_1}{T_3 - T_{2'}}$$

## الاستطاعات

- الاستطاعة النظرية :
$$N_0 = \dot{m} l_0 = \dot{m}\left(l_0^T - l_0^C\right)$$
$$l_0^T = i_3 - i_4 = c_p(T_3 - T_4)$$
$$l_0^C = i_2 - i_1 = c_p(T_2 - T_1)$$
- الاستطاعة الحقيقة :
$$N_i = \dot{m} l_i$$
$$l_i = l_i^T - l_i^C$$
$$l_i = l_0^T \eta_{oi}^T - \frac{l_0^C}{\eta_{oi}^C}$$
- الاستطاعة الفعّالة :
$$N_e = \dot{m} l_e$$
$$l_e = l_e^T - l_e^C$$
$$l_e = l_i^T \eta_m^T - \frac{l_i^C}{\eta_m^C}$$
$$l_e = l_0^T \eta_{oi}^T \cdot \eta_m^T - \frac{l_0^C}{\eta_{oi}^C \cdot \eta_m^C}$$
- الاستطاعة الكهربائية :
$$N_{el} = \dot{m} l_{el}$$
$$l_{el} = l_{el}^T - l_{el}^C$$
$$l_{el} = l_e^T \eta_{el}^T - \frac{l_e^C}{\eta_{el}^C}$$
$$l_{el} = l_0^T \eta_{oi}^T \cdot \eta_m^T \cdot \eta_{el}^T - \frac{l_0^C}{\eta_{oi}^C \cdot \eta_m^C \cdot \eta_{el}^C}$$

انتهى الفصل

الفصل

# 10

# دورات الضواغط

## الرموز

- $\dot{V}$ = التدفق الحجمي ( الإنتاجية الحجمية ) ، $(m^3/s)$ .
- $m$ = عدد مراحل الانضغاط .
- $\pi$ = نسبة الانضغاط ( للضواغط ) .
- $c_{p_w}$ = السعة الحرارية للماء عند ضغط ثابت ، و قيمتها $(4{,}186\ kJ/kg \cdot deg)$ .

## مفاهيم أساسية

- **الضاغط :** هو عبارة عن آلة مخصّصة لضغط الغازات و الأبخرة .
- **تقسم الضواغط حسب الضغط الذي تقدمه إلى :**
  1. ضواغط أو مضخات تخلخلية .
  2. ضواغط أو آلات نفخ الغاز .
- **تقسم الضواغط حسب مبدأ العمل إلى :**
  1. ضواغط مكبسية .
  2. ضواغط توربينية .
- **تقسم الضواغط حسب الحجم الممتص إلى :**
  1. ضواغط منخفضة التغذية $(\dot{V} = 0{,}003\ m^3/s)$ .
  2. ضواغط متوسطة التغذية $(\dot{V} = 0{,}003 - 0{,}03\ m^3/s)$ .
  3. ضواغط عالية التغذية $(\dot{V} = 0{,}03\ m^3/s)$ .
- **تقسم الضواغط حسب عدد المراحل إلى :**
  1. ضواغط أحادية المرحلة .
  2. ضواغط متعدّدة المراحل .
- **نسبة الانضغاط لضاغط أحادي المرحلة :**

$$\pi = \frac{p_2}{p_1}$$

- **نسبة الانضغاط لضاغط متعدد المراحل :**

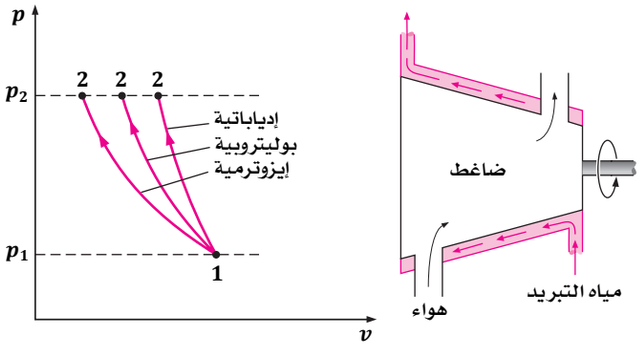
$$\pi = \sqrt[m]{\frac{p_{end}}{p_1}}$$

- **تقسم الضواغط حسب درجة ازدياد الضغط إلى :**
  1. ضواغط مروحية $(\pi = 1 - 1{,}1)$ .
  2. ضواغط لنفخ الغاز $(\pi = 1{,}1 - 1{,}4)$ .
  3. ضواغط لضغط الغازات $(\pi = 3 - 4)$ .

- **استطاعة الضاغط :**

$$N^C = \dot{m} l^C$$

## العمليات الترموديناميكية على الضاغط




**الشكل يبيّن : عمليات الانضغاط الثلاث للضاغط على مخطط $p - v$ ، و مبدأ عمل الضاغط .**

- **عمل الضاغط :**
  - **خلال عملية الانضغاط الإيزوترمية :**

$$l^C_{iso} = RT ln \frac{p_2}{p_1}$$

  - **خلال عملية الانضغاط الإدياباتية :**

$$l^C_{ada} = \frac{kR}{k-1}(T_2 - T_1)$$

$$l^C_{ada} = \frac{kRT_1}{k-1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]$$

  - **خلال عملية الانضغاط البوليتروبية :**

$$l^C_{pol} = \frac{nR}{n-1}(T_2 - T_1)$$

$$l^C_{pol} = \frac{nRT_1}{n-1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]$$

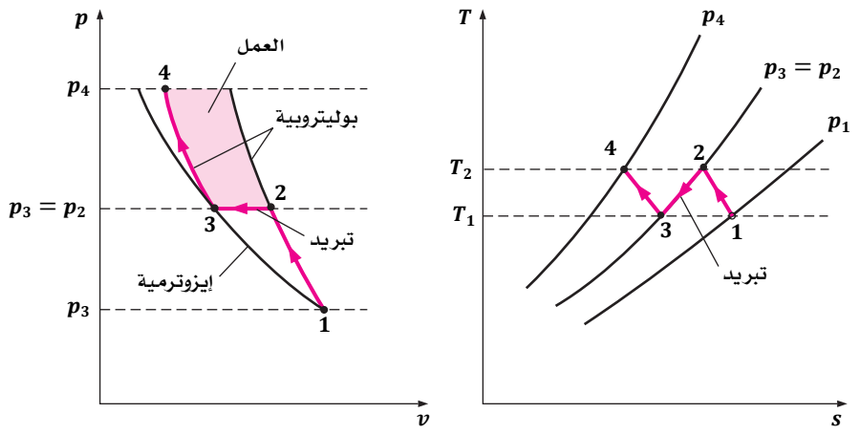
- **التدفق الكتلي للضاغط :**
  - **وفق الشروط النظامية :**

$$\dot{m} = \rho_0 \dot{V}_0 = \frac{\mu}{22{,}4}\dot{V}_0$$

  - **وفق معادلة الحالة :**

$$\dot{m} = \frac{p\dot{V}}{RT}$$

## ضاغط متعدد المراحل بتبريد تام




الشكل يبيّن : دورة ضاغط متعدد المراحل بتبريد تام على مخططي $p - v$ و $T - s$

- درجات الحرارة :

$$T_1 = T_3$$

$$T_2 = T_4$$

- نسبة الانضغاط ( تكون واحدة ) :

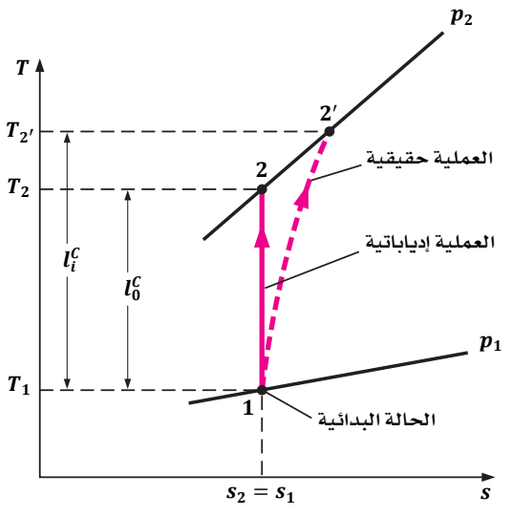
$$\pi = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_4}{p_3}$$

- عمل الضاغط ( هو عدد المراحل بعمل إحدى المراحل ) :

$$l^C = l_{1\to2} + l_{3\to4}$$

$$l^C = m l_{1\to2}$$

## سير العمليات الحقيقة في الضاغط




الشكل يبيّن : سير العمليات الحقيقة في الضاغط على مخطط $T - s$ .

- المردود النسبي الداخلي للضاغط :

$$\eta_{oi}^C = \frac{l_0^C}{l_i^C} = \frac{T_2 - T_1}{T_{2'} - T_1}$$

- الاستطاعة الحقيقة للضاغط :

$$\eta_{oi}^C = \frac{l_0^C}{l_i^C} = \frac{N_0^C}{N_i^C} \Rightarrow N_i^C = \frac{N_0^C}{\eta_{oi}^C}$$

## تدفق مياه التبريد في الضاغط

- تدفق مياه التبريد في قمصان الإسطوانات ( حسب نوع العملية ) :

$$\dot{m}_c = \frac{Q_{iso} \text{ or } Q_{ada} \text{ or } Q_{pol}}{c_{p_w} \Delta t_c}$$

- تدفق مياه التبريد في المبرّدات ( دوماً العملية إيزوبارية ) :

$$\dot{m}_x = \frac{Q_p}{c_{p_w} \Delta t_x}$$

- تدفق مياه البريد في الضاغط :

$$\dot{m} = \dot{m}_c + \dot{m}_x$$

انتهى الفصل

الفصل

# 11

# بخار الماء

## الرموز

- $X$ = درجة الجفاف .
- $m''$ = كتلة البخار المشبع الجاف ، $(kg)$ .
- $m$ = كتلة البخار المشبع الرطب ، $(kg)$ .
- $v$ = حجم البخار المحمص ، $(m^3/kg)$ .
- $v''$ = حجم البخار المشبع الجاف ، $(m^3/kg)$ .
- $v_x$ = حجم البخار المشبع الرطب ، $(m^3/kg)$ .
- $v'$ = حجم السائل المشبع ، $(m^3/kg)$ .
- $i$ = إنتالبي البخار المحمص ، $(kcal/kg)$ .
- $i''$ = إنتالبي البخار المشبع الجاف ، $(kcal/kg)$ .
- $i_x$ = إنتالبي البخار المشبع الرطب ، $(kcal/kg)$ .
- $i'$ = إنتالبي السائل المشبع ، $(kcal/kg)$ .
- $s$ = إنتروبي البخار المحمص ، $(kcal/kg \cdot deg)$ .
- $s''$ = إنتروبي البخار المشبع الجاف ، $(kcal/kg \cdot deg)$ .
- $s_x$ = إنتروبي البخار المشبع الرطب ، $(kcal/kg \cdot deg)$ .
- $s'$ = إنتروبي السائل المشبع ، $(kcal/kg \cdot deg)$ .
- $t_s$ = درجة حرارة الإشباع ، $(°C)$ .
- $r$ = الحرارة الكامنة لتشكيل البخار ، $(r = i'' - i')$ ، $(kcal/kg)$ .

## مخطط بخار الماء

■ **درجة الجفاف ( عامل الجفاف ) :**

هي نسبة كتلة البخار المشبع الجاف إلى كتلة البخار المشبع الرطب :

$$X = \frac{m''}{m}$$

أو تحسب من :

$$v_x = v' + X(v'' - v') \Rightarrow X = \frac{v_x - v'}{v'' - v'}$$

$$i_x = i' + X(i'' - i') \Rightarrow X = \frac{i_x - i'}{i'' - i'}$$

$$s_x = s' + X(s'' - s') \Rightarrow X = \frac{s_x - s'}{s'' - s'}$$

أو تحسب من :

درجة الجفاف + درجة الرطوبة = 1

درجة الجفاف = 1 − درجة الرطوبة

■ **بارامترات بخار الماء على مخطط $T - s$ :**

- بارامترات السائل المشبع :

$$v', i', s'$$

- بارامترات البخار المشبع الرطب :

$$v_x, i_x, s_x$$

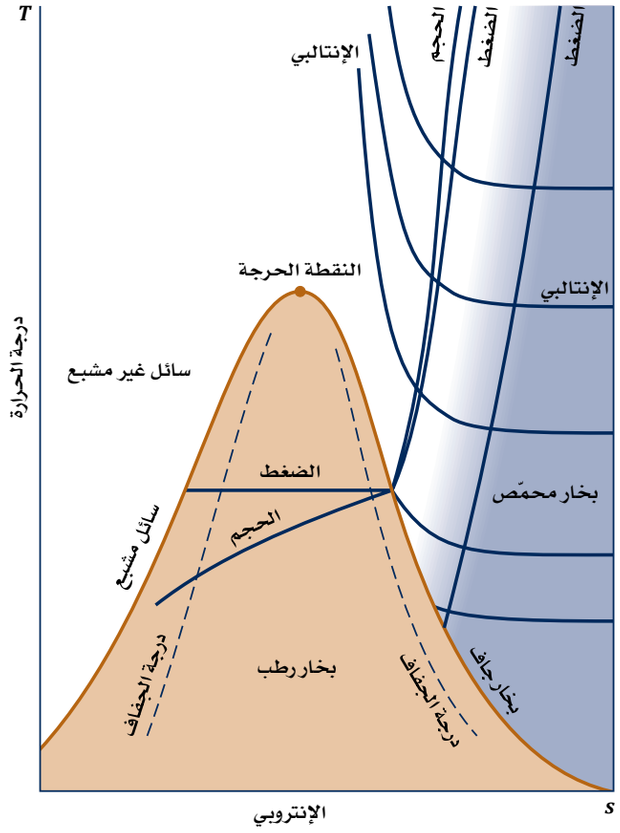
- بارامترات البخار المشبع الجاف :

$$v'', i'', s''$$

- بارامترات البخار المحمص :

$$v, i, s$$

■ **ملا حظة : يوجد عدة مخططات لبخار الماء ، لكن في دراستنا سنعتمد مخطط $T - s$ و هو كافي لإيجاد البارامترات المنشودة في منهاجنا الحالي .**




الشكل يبيّن : مخطط $T - s$ للماء .

## دراسة العمليات الترموديناميكية

لدراسة العمليات الترموديناميكة لا بد من معرفة ما يلي :

1. معادلة العملية : التي تصف قانون تغير حالة الجسم العامل .
2. التمثيل البياني : و ذلك على مخطط $T-s$ .
3. كمية الحرارة النوعية :

نعلم من فصل العمليات الترموديناميكية ما يلي :

- في العملية الإيزوخورية :

$$q = \Delta u$$

- في العملية الإيزوبارية :

$$q = \Delta i$$

- في العملية الإيزوترمية :

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

- في العملية الإدياباتية :

$$q = 0$$

4. تغير الإنتالبية النوعي :

$$\Delta i = i_2 - i_1$$

5. تغير الطاقة الداخلية النوعي :

$$\Delta u = [(i_2 - i_1) - (p_2 v_2 - p_1 v_1)]$$

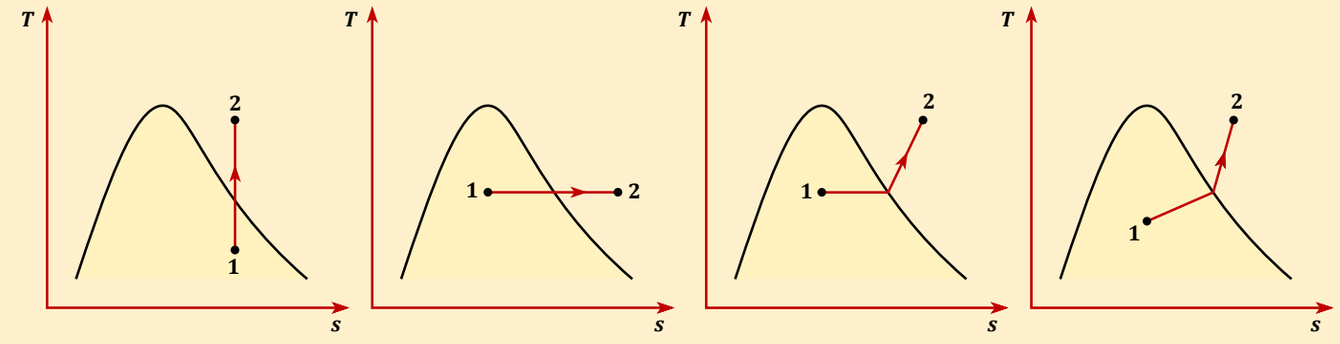
6. العمل النوعي ( عمل تغير الحجم النوعي ) :

$$l = q - \Delta u$$

7. تغير الإنتروبي النوعي :

$$\Delta s = s_2 - s_1$$

**مقارنة بين العمليات الترموديناميكية لبخار الماء**

| | العملية الإيزوخورية | العملية الإيزوبارية | العملية الإيزوترمية | العملية الإدياباتية |
|---|---|---|---|---|
| 1. | $v = const.$ | $p = const.$ | $T = const.$ | $s = const.$ |
| 2. |  | | | |
| 3. | $q = \Delta u$ | $q = \Delta i$ | $q = T(s_2 - s_1)$ | $q = 0$ |
| 4. | $\Delta i = i_2 - i_1$ | $\Delta i = i_2 - i_1$ | $\Delta i = i_2 - i_1$ | $\Delta i = i_2 - i_1$ |
| 5. | $\Delta u = (i_2 - i_1) - v(p_2 - p_1)$ | $\Delta u = (i_2 - i_1) - p(v_2 - v_1)$ | $\Delta u = (i_2 - i_1) - (p_2 v_2 - p_1 v_1)$ | $\Delta u = (i_2 - i_1) - (p_2 v_2 - p_1 v_1)$ |
| 6. | $l = 0$ | $l = p(v_2 - v_1)$ | $l = T(s_2 - s_1) - [(i_2 - i_1) - (p_2 v_2 - p_1 v_1)]$ | $l = -[(i_2 - i_1) - (p_2 v_2 - p_1 v_1)]$ |
| 7. | $\Delta s = s_2 - s_1$ | $\Delta s = s_2 - s_1$ | $\Delta s = s_2 - s_1$ | $\Delta s = 0$ |

انتهى الفصل

الفصل

# 12

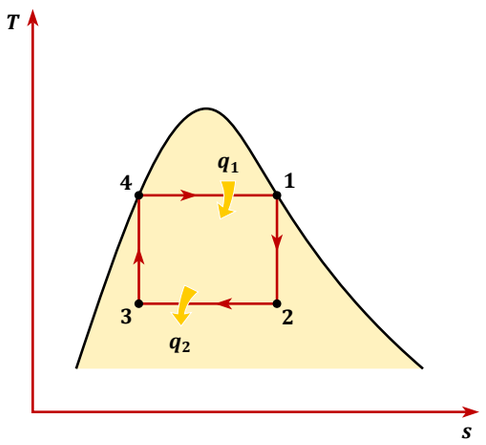
# دورات المحطات البخارية

## الرموز

- $\eta_{oi}^{T}$ = المردود النسبي الداخلي للتوربين .
- $\eta_{oi}^{P}$ = المردود النسبي الداخلي للمضخة .
- $\eta_{m}^{T}$ = المردود الميكانيكي للتوربين .
- $\eta_{m}^{P}$ = المردود الميكانيكي للمضخة .
- $\eta_{el}^{T}$ = المردود الكهربائي للتوربين .
- $\eta_{el}^{P}$ = المردود الكهربائي للمضخة .
- $l^{S}$ = عمل إسطوانة التمدد النوعي ، $(kcal/kg)$ .
- $l^{C}$ = عمل الضاغط النوعي ، $(kcal/kg)$ .
- $l^{T}$ = عمل التوربين النوعي ، $(kcal/kg)$ .
- $l^{P}$ = عمل المضخة النوعي ، $(kcal/kg)$ .
- $l_{0}^{T}$ = عمل التوربين النظري النوعي ، $(kcal/kg)$ .
- $l_{0}^{P}$ = عمل المضخة النظري النوعي ، $(kcal/kg)$ .
- $l_{i}^{T}$ = عمل التوربين الحقيقي النوعي ، $(kcal/kg)$ .
- $l_{i}^{P}$ = عمل المضخة الحقيقي النوعي ، $(kcal/kg)$ .
- $l_{e}^{T}$ = عمل التوربين الفعّال النوعي ، $(kcal/kg)$ .
- $l_{e}^{P}$ = عمل المضخة الفعّال النوعي ، $(kcal/kg)$ .
- $l_{el}^{T}$ = عمل التوربين الكهربائي النوعي ، $(kcal/kg)$ .
- $l_{el}^{P}$ = عمل المضخة الكهربائي النوعي ، $(kcal/kg)$ .
- $l_{0}$ = العمل النظري النوعي للمحطة ، $(kcal/kg)$ .
- $l_{i}$ = العمل الحقيقي النوعي للمحطة ، $(kcal/kg)$ .
- $l_{e}$ = العمل الفعّال النوعي للمحطة ، $(kcal/kg)$ .
- $l_{el}$ = العمل الكهربائي النوعي للمحطة ، $(kcal/kg)$ .
- $N_{0}$ = الاستطاعة النظرية للمحطة ، $(kW)$ .
- $N_{i}$ = الاستطاعة الحقيقية للمحطة ، $(kW)$ .
- $N_{e}$ = الاستطاعة الفعّالة للمحطة ، $(kW)$ .
- $N_{el}$ = الاستطاعة الكهربائية للمحطة ، $(kW)$ .
- $\dot{m}$ = التدفق الكتلي للبخار ( الإنتاجية الكتلية ) ، $(kg/s)$ .
- $q$ = كمية الحرارة النوعية ، $(kcal/kg)$ .
- $q_{1}$ = كمية الحرارة النوعية المعطاة ، $(kcal/kg)$ .
- $q_{2}$ = كمية الحرارة النوعية المطروحة ، $(kcal/kg)$ .
- $i$ = إنتالبي البخار ، $(kcal/kg)$ .

## دورة كارنو البخارية

- تمتلك دورة كارنو أعلى مردود حراري بالمقارنة مع الدورات الأخرى .
- لم تكن دورة كارنو نموذجاً مناسباً لدورات القدرة البخارية .
- **سير عمليات دورة كارنو البخارية :**
  - العملية 4 ← 1 : إعطاء الحرارة تحت ضغط ثابت ( في المرجل ) .
  - العملية 1 ← 2 : تمدد إدياباتي ( في أسطوانة التمدد ) .
  - العملية 2 ← 3 : طرح الحرارة تحت ضغط ثابت ( في المكثف ) .
  - العملية 3 ← 4 : انضغاط إدياباتي ( في الضاغط ) .




الشكل يبيّن : دورة كارنو البخارية على مخطط $T-s$ .

- العمل النوعي المفيد :

$$l_0 = l^S - |l^C|$$

$$l_0 = l_{1\to2} - |l_{3\to4}| = (i_1 - i_2) - (i_4 - i_3)$$

- كمية الحرارة النوعية :

$$q = q_1 - |q_2|$$

$$q = q_{4\to1} - |q_{2\to3}| = (i_1 - i_4) - (i_2 - i_3)$$

- المردود الحراري :

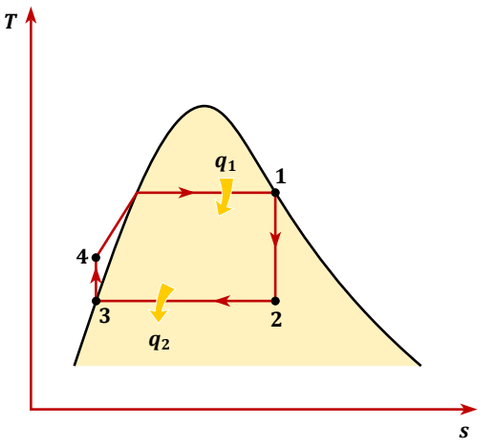
$$\eta_T = \frac{l_0}{q_1} = \frac{(i_1 - i_2) - (i_4 - i_3)}{i_1 - i_4}$$

$$\eta_T = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{i_2 - i_3}{i_1 - i_4}$$

$$\eta_T = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{T_2(s_2 - s_3)}{T_4(s_1 - s_4)} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

## دورة رانكن للبخار الرطب

- سير عمليات دورة رانكن للبخار الرطب :
  - العملية 4 ← 1 : إعطاء الحرارة تحت ضغط ثابت ( في المرجل ) .
  - العملية 1 ← 2 : تمدد إيزاباتي ( في التوربين ) .
  - العملية 2 ← 3 : طرح الحرارة تحت ضغط ثابت ( في المكثف ) .
  - العملية 3 ← 4 : انضغاط إيزاباتي ( في المضخة ) .




الشكل يبيّن : دورة رانكن للبخار الرطب على مخطط $T-s$ .

- العمل النوعي المفيد :

$$l_0 = l^T - |l^P|$$
$$l_0 = l_{1\to2} - |l_{3\to4}|$$
$$l_0 = (i_1 - i_2) - (i_4 - i_3)$$

- كمية الحرارة النوعية :

$$q = q_1 - |q_2|$$
$$q = q_{4\to1} - |q_{2\to3}|$$
$$q = (i_1 - i_4) - (i_2 - i_3)$$

- المردود الحراري :

$$\eta_T = \frac{l_0}{q_1} = \frac{(i_1 - i_2) - (i_4 - i_3)}{i_1 - i_4}$$
$$\eta_T = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{i_2 - i_3}{i_1 - i_4}$$

- المردود الحراري مع إهمال عمل المضخة :

$$\eta_T = \frac{l_0}{q_1} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_3}$$
$$\eta_T = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{i_2 - i_3}{i_1 - i_3}$$

- بارامترات النقاط :

النقطة 1 $\{p_1$ & $t_1 \Rightarrow$ جدولياً $\begin{cases} i_1 = i'' \\ s_1 = s'' \end{cases}$

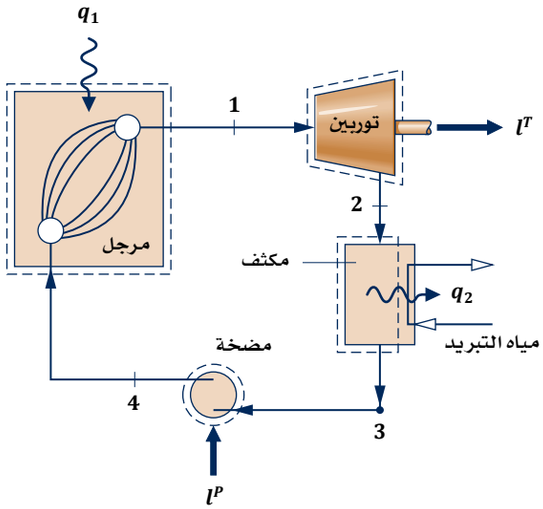
النقطة 2 $\begin{cases} s_2 = s_1 = s_x \\ p_2 \text{ \& } t_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{جدولياً} \begin{cases} s' \\ s'' \\ i' \\ i'' \end{cases} \\ \text{تحليلياً} \begin{cases} X = \dfrac{s_x - s'}{s'' - s'} \\ i_2 = i_x = i' + X(i'' - i') \end{cases} \end{cases}$

النقطة 3 $\{p_3 = p_2$ & $t_3 = t_2 \Rightarrow$ جدولياً $\begin{cases} i_3 = i' \\ v_3 = v' \end{cases}$

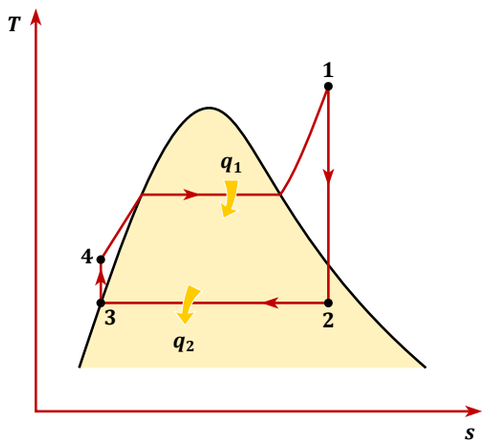
النقطة 4 $\begin{cases} p_4 = p_1 \\ p_3 = p_2 \\ i_3 \\ v_3 \end{cases} \Rightarrow$ تحليلياً $i_4 = i_3 + v_3(p_4 - p_3)$

## دورة رانكن للبخار المحمّص

- دورة رانكن للبخار المحمص : هي الدورة المثالية لمحطة القدرة البخارية البسيطة .
- لاحظنا في القسم الأخير أنّ زيادة ضغط المرجل يؤدي إلى زيادة المردود الحراري لدورة رانكن للبخار الرطب لكنّه أيضاً يزيد من محتوى رطوبة البخار إلى مستويات غير مقبولة .
- ثمّ من الطبيعي طرح السؤال التالي : كيف يمكن أن نستغلّ زيادة المردود الحراري في ضغوط المرجل العليا بدون مواجهة مشكلة الرطوبة المفرطة في المراحل النهائية للتوربين ؟




الشكل يبيّن : مبدأ عمل دورة رانكن للبخار المحمص .




الشكل يبيّن : دورة رانكن للبخار المحمص على مخطط $T-s$ .

- **سير عمليات دورة رانكن للبخار المحمص :**
  - العملية 4 ← 1 : إعطاء الحرارة تحت ضغط ثابت ( في المرجل ) .
  - العملية 1 ← 2 : تمدد إيباتي ( في التوربين ) .
  - العملية 2 ← 3 : طرح الحرارة تحت ضغط ثابت ( في المكثف ) .
  - العملية 3 ← 4 : انضغاط إيباتي ( في المضخة ) .

- **العمل النوعي المفيد :**

$$l_0 = l^T - |l^P|$$
$$l_0 = l_{1\to2} - |l_{3\to4}|$$
$$l_0 = (i_1 - i_2) - (i_4 - i_3)$$

- **كمية الحرارة النوعية :**

$$q = q_1 - |q_2|$$
$$q = q_{4\to1} - |q_{2\to3}|$$
$$q = (i_1 - i_4) - (i_2 - i_3)$$

- **المردود الحراري :**

$$\eta_T = \frac{l_0}{q_1} = \frac{(i_1 - i_2) - (i_4 - i_3)}{i_1 - i_4}$$
$$\eta_T = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{i_2 - i_3}{i_1 - i_4}$$

- **المردود الحراري مع إهمال عمل المضخة :**

$$\eta_T = \frac{l_0}{q_1} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_3}$$
$$\eta_T = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{i_2 - i_3}{i_1 - i_3}$$

- **بارامترات النقاط :**

$$\text{النقطة } 1 \begin{cases} t_1 \\ p_1 \end{cases} \Rightarrow \text{جدولياً} \begin{cases} i_1 \\ s_1 \end{cases}$$

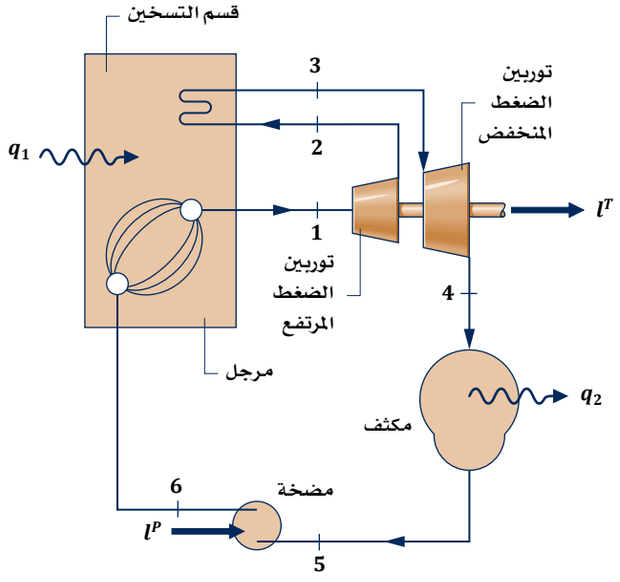
$$\text{النقطة } 2 \begin{cases} s_2 = s_1 = s_x \\ p_2 \ \& \ t_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{جدولياً} \begin{cases} s' \\ s'' \\ i' \\ i'' \end{cases} \\ \text{تحليلياً} \begin{cases} X = \dfrac{s_x - s'}{s'' - s'} \\ i_2 = i_x = i' + X(i'' - i') \end{cases} \end{cases}$$

$$\text{النقطة } 3 \begin{cases} p_3 = p_2 \ \& \ t_3 = t_2 \end{cases} \Rightarrow \text{جدولياً} \begin{cases} i_3 = i' \\ v_3 = v' \end{cases}$$

$$\text{النقطة } 4 \begin{cases} p_4 = p_1 \\ p_3 = p_2 \\ i_3 \\ v_3 \end{cases} \Rightarrow \text{تحليلياً } i_4 = i_3 + v_3(p_4 - p_3)$$

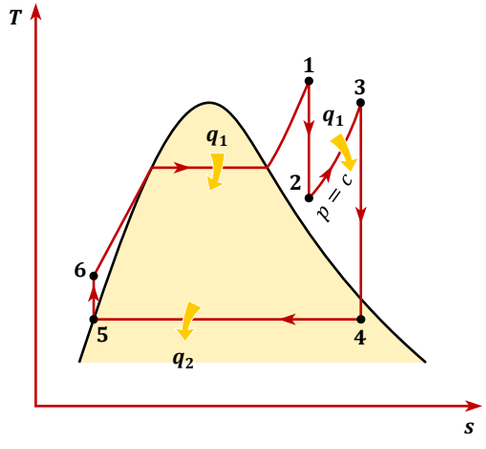
## دورة إعادة التسخين ( التحميص المرحلي )

- إنّ الهدف الوحيد من دورة إعادة التسخين هو تخفيض محتوى رطوبة البخار في المرحلة النهائية لعملية التمدّد في التوربين .
- لاحظنا في القسم السابق عند تشغيل دورة رانكن بضغوط عالية للمرجل أو بضغوط منخفضة للمكثف يصبح من الصعب منع القطرات السائلة من التشكّل في جزء الضغط المنخفض من التوربين .
- فإعادة التسخين لا تؤثر على المردود الحراري للدورة بشكل ملحوظ و إنما تتحكم بالرطوبة أو تزيلها بشكل كامل من التوربين بالإضافة إلى إنتاج عمل إضافي .
- تسمّى هذه الدورة في منهاجنا الدراسي بـ " **الدورة البخارية مع التحميص المرحلي للبخار** " .




**الشكل يبيّن : مبدأ عمل دورة إعادة التسخين .**

- **سير عمليات دورة إعادة التسخين :**
  - العملية 6 ← 1 : إعطاء الحرارة تحت ضغط ثابت ( في المرجل ) .
  - العملية 1 ← 2 : تمدّد إيباتي ( في التوربين الأول ) .
  - العملية 2 ← 3 : إعطاء حرارة تحت ضغط ثابت ( في المسخن أو المحمّص ) .
  - العملية 3 ← 4 : تمدّد إيباتي ( في التوربين الثاني ) .
  - العملية 4 ← 5 : طرح الحرارة تحت ضغط ثابت ( في المكثّف ) .
  - العملية 5 ← 6 : انضغاط إيباتي ( في المضخة ) .




**الشكل يبيّن : دورة إعادة التسخين على مخطط $T - s$ .**

- **العمل النوعي المفيد :**

$$l_0 = l^T - |l^P|$$
$$l_0 = (l_{1\to2} + l_{3\to4}) - |l_{5\to6}|$$
$$l_0 = [(i_1 - i_2) + (i_3 - i_4)] - (i_6 - i_5)$$

- كمية الحرارة النوعية :

$$q = q_1 - |q_2|$$
$$q = (q_{6\to1} + q_{2\to3}) - |q_{4\to5}|$$
$$q = [(i_1 - i_6) + (i_3 - i_2)] - (i_4 - i_5)$$

- المردود الحراري :

$$\eta_T = \frac{l_0}{q_1} = \frac{[(i_1 - i_2) + (i_3 - i_4)] - (i_6 - i_5)}{(i_1 - i_6) + (i_3 - i_2)}$$
$$\eta_T = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{i_4 - i_5}{(i_1 - i_6) + (i_3 - i_2)}$$

- المردود الحراري مع إهمال عمل المضخة :

$$\eta_T = \frac{l_0}{q_1} = \frac{(i_1 - i_2) + (i_3 - i_4)}{(i_1 - i_5) + (i_3 - i_2)}$$
$$\eta_T = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{i_4 - i_5}{(i_1 - i_5) + (i_3 - i_2)}$$

- بارامترات النقاط :

النقطة 1 $\begin{cases} t_1 \\ p_1 \end{cases} \Rightarrow$ جدولياً $\begin{cases} i_1 \\ s_1 \end{cases}$

النقطة 2 $\begin{cases} s_2 = s_1 \\ p_2 \end{cases} \Rightarrow$ جدولياً $i_2$

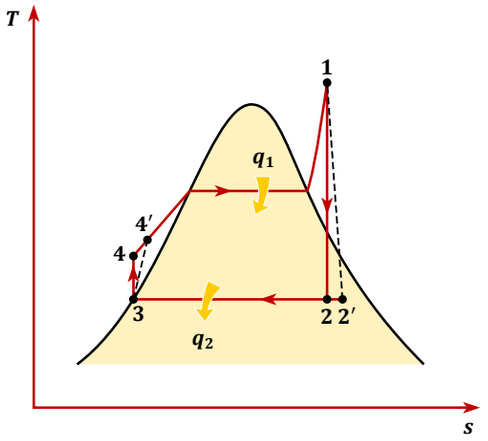
النقطة 3 $\begin{cases} p_3 = p_2 \\ t_3 \end{cases} \Rightarrow$ جدولياً $\begin{cases} i_3 \\ s_3 \end{cases}$

النقطة 4 $\begin{cases} s_4 = s_3 = s_x \\ p_4 \ \& \ t_4 \end{cases} \Rightarrow$ جدولياً $\begin{cases} s' \\ s'' \\ i' \\ i'' \end{cases}$ تحليلياً $\begin{cases} X = \dfrac{s_x - s'}{s'' - s'} \\ i_4 = i_x = i' + X(i'' - i') \end{cases}$

النقطة 5 $\{ p_5 = p_4 \ \& \ t_5 = t_4 \Rightarrow$ جدولياً $\begin{cases} i_5 = i' \\ v_5 = v' \end{cases}$

النقطة 6 $\begin{cases} p_6 = p_1 \\ p_5 = p_4 \\ i_5 \\ v_5 \end{cases} \Rightarrow$ تحليلياً $i_6 = i_5 + v_5(p_6 - p_5)$

## سير العمليات الحقيقة في المحطات التوربينية البخارية




الشكل يبيّن : سير العمليات الحقيقة في المحطات البخارية على مخطط $T - s$ .

- سير عمليات هذه الدورة :
  - العملية $4' \leftarrow 1$ : إعطاء الحرارة تحت ضغط ثابت ( في المرجل ) .
  - العملية $2' \leftarrow 1$ : تمدد إدياباتي لا عكوسي ( في التوربين ) .
  - العملية $3 \leftarrow 2'$ : طرح الحرارة تحت ضغط ثابت ( في المكثف ) .
  - العملية $4' \leftarrow 3$ : انضغاط إدياباتي لا عكوسي ( في المضخة ) .

- العمل النوعي المفيد :

$$l_0 = l_i^T - |l_i^P|$$
$$l_0 = l_{1\to2'} - |l_{3\to4'}|$$
$$l_0 = (i_1 - i_2') - (i_4' - i_3)$$

- كمية الحرارة النوعية :

$$q = q_1 - |q_2|$$
$$q = q_{4'\to1} - |q_{2'\to3}|$$
$$q = (i_1 - i_4') - (i_2' - i_3)$$

- المردود الحراري :

$$\eta_T = \frac{l_0}{q_1} = \frac{(i_1 - i_2') - (i_4' - i_3)}{i_1 - i_4'}$$
$$\eta_T = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{i_2' - i_3}{i_1 - i_4'}$$

- المردود الحراري مع اهمال عمل المضخة :

$$\eta_T = \frac{l_0}{q_1} = \frac{i_1 - i_2'}{i_1 - i_3}$$
$$\eta_T = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{i_2' - i_3}{i_1 - i_3}$$

- المردود النسبي الداخلي للتوربين :

$$\eta_{oi}^T = \frac{l_i^T}{l_0^T} = \frac{i_1 - i_2'}{i_1 - i_2}$$

- المردود النسبي الداخلي للمضخة :

$$\eta_{oi}^P = \frac{l_0^P}{l_i^P} = \frac{i_4 - i_3}{i_4' - i_3}$$

- بارامترات النقاط :

النقطة 1 $\begin{cases} t_1 \\ p_1 \end{cases} \Rightarrow$ جدولياً $\begin{cases} i_1 \\ s_1 \end{cases}$

النقطة 2 $\begin{cases} s_2 = s_1 = s_x \\ p_2 \ \& \ t_2 \end{cases} \Rightarrow$ جدولياً $\begin{cases} s' \\ s'' \\ i' \\ i'' \end{cases}$ تحليلياً $\begin{cases} X = \dfrac{s_x - s'}{s'' - s'} \\ i_2 = i_x = i' + X(i'' - i') \end{cases}$

النقطة $2'$ $\begin{cases} i_1 \\ i_2 \\ \eta_{oi}^T \end{cases} \Rightarrow$ تحليلياً $\eta_{oi}^T = \dfrac{i_1 - i_2'}{i_1 - i_2}$

النقطة 3 $\{ p_3 = p_2 \ \& \ t_3 = t_2 \Rightarrow$ جدولياً $\begin{cases} i_3 = i' \\ v_3 = v' \end{cases}$

النقطة 4 $\begin{cases} p_4 = p_1 \\ p_3 = p_2 \\ i_3 \\ v_3 \end{cases} \Rightarrow$ تحليلياً $i_4 = i_3 + v_3(p_4 - p_3)$

النقطة $4'$ $\begin{cases} i_3 \\ i_4 \\ \eta_{oi}^P \end{cases} \Rightarrow$ تحليلياً $\eta_{oi}^P = \dfrac{i_4 - i_3}{i_4' - i_3}$

## الاستطاعات

- الاستطاعة النظرية :

$$N_0 = \dot{m} l_0$$

$$l_0 = l_0^T - l_0^P$$

- الاستطاعة الحقيقة :

$$N_i = \dot{m} l_i$$

$$l_i = l_i^T - l_i^P$$

$$l_i = l_0^T \eta_{oi}^T - \frac{l_0^P}{\eta_{oi}^P}$$

- الاستطاعة الفعّالة :

$$N_e = \dot{m} l_e$$

$$l_e = l_e^T - l_e^P$$

$$l_e = l_i^T \eta_m^T - \frac{l_i^P}{\eta_m^P}$$

$$l_e = l_0^T \eta_{oi}^T \cdot \eta_m^T - \frac{l_0^P}{\eta_{oi}^P \cdot \eta_m^P}$$

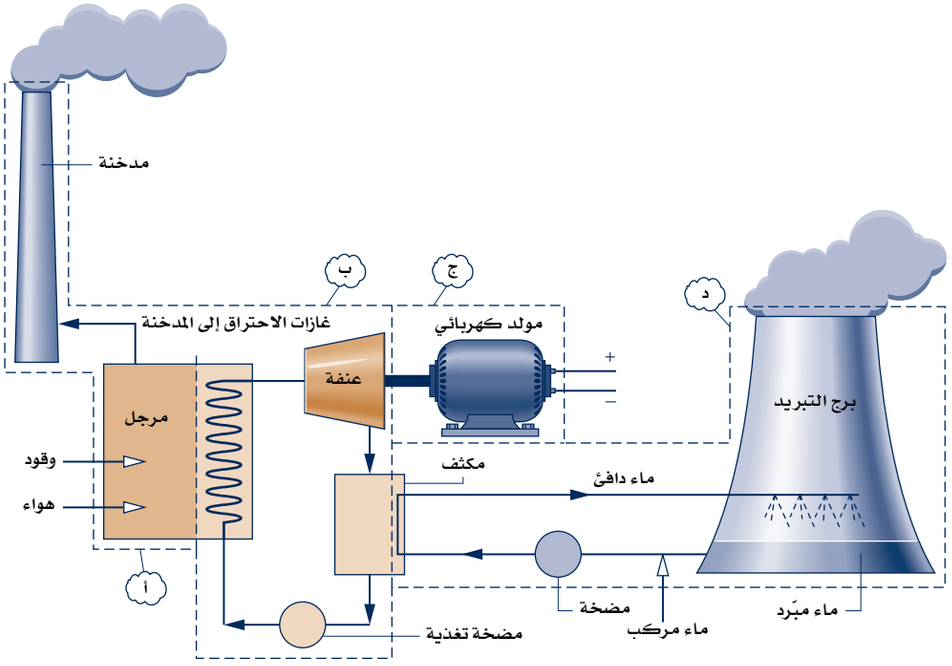
- الاستطاعة الكهربائية :

$$N_{el} = \dot{m} l_{el}$$

$$l_{el} = l_{el}^T - l_{el}^P$$

$$l_{el} = l_e^T \eta_{el}^T - \frac{l_e^P}{\eta_{el}^C}$$

$$l_{el} = l_0^T \eta_{oi}^T \cdot \eta_m^T \cdot \eta_{el}^T - \frac{l_0^P}{\eta_{oi}^P \cdot \eta_m^P \cdot \eta_{el}^P}$$




الشكل يبيّن : مكونات محطة بخارية بسيطة .

انتهى الفصل

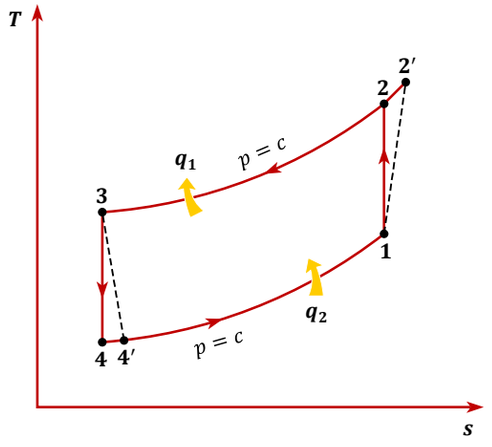
الفصل

13

# دورات آلات التبريد

## دورة آلة التبريد الهوائية

- سير عمليات دورة آلة التبريد الهوائية :
  - العملية 1 ← 2 : انضغاط إديباتي ( في الضاغط ) .
  - العملية 2 ← 3 : طرح حرارة تحت ضغط ثابت ( في المكثف أي المبرّد ) .
  - العملية 3 ← 4 : تمدد إديباتي ( في أسطوانة التمدد ) .
  - العملية 4 ← 1 : إعطاء حرارة تحت ضغط ثابت ( المبخّر أي حجرة التبريد ) .




الشكل يبيّن : دورة آلة التبريد الهوائية على مخطط $T - s$ .

- العمل المفيد النوعي :

$$l_0 = l^C - l^S$$
$$l_0 = l_{1\to2} - l_{3\to4}$$
$$l_0 = (i_2 - i_1) - (i_3 - i_4)$$
$$l_0 = c_p(T_2 - T_1) - c_p(T_3 - T_4)$$

- كمية الحرارة النوعية :

$$q = q_1 - q_2$$
$$q = q_{2\to3} - q_{4\to1}$$
$$q = (i_2 - i_3) - (i_1 - i_4)$$
$$q = c_p(T_2 - T_3) - c_p(T_1 - T_4)$$

- معامل التبريد :

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l_0} = \frac{i_1 - i_4}{(i_2 - i_1) - (i_3 - i_4)} = \frac{T_1 - T_4}{(T_2 - T_1) - (T_3 - T_4)}$$
$$\varepsilon = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{i_1 - i_4}{(i_2 - i_3) - (i_1 - i_4)} = \frac{T_1 - T_4}{(T_2 - T_3) - (T_1 - T_4)}$$

- معامل تبريد دورة كارنو العاملة ضمن نفس درجات الحرارة :

$$\varepsilon = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{T_1}{T_3 - T_1}$$

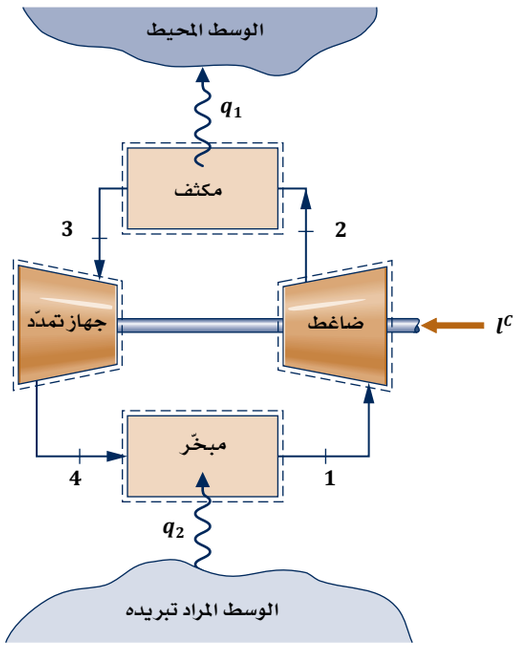
- المردود النسبي الداخلي للضاغط :

$$\eta_{oi}^C = \frac{i_{2'} - i_1}{i_2 - i_1} = \frac{T_{2'} - T_1}{T_2 - T_1}$$

- المردود النسبي الداخلي لأسطوانة التمدد :

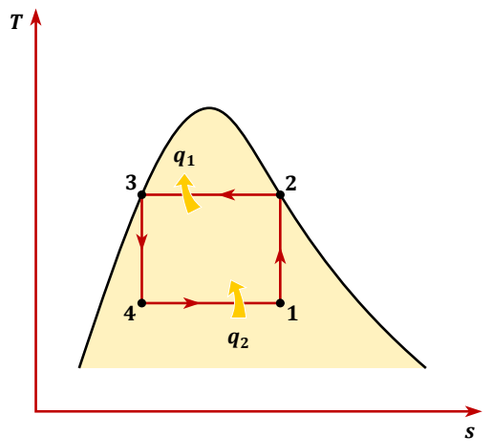
$$\eta_{oi}^S = \frac{i_3 - i_4}{i_3 - i_{4'}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4'}}$$

## دورة آلة تبريد كارنو البخارية




الشكل يبيّن : مبدأ عمل دورة آلة تبريد كارنو .

- سير عمليات دورة آلة التبريد الهوائية :
  - العملية 1 ← 2 : انضغاط إديباتي ( في الضاغط ) .
  - العملية 2 ← 3 : طرح حرارة تحت ضغط ثابت ( في المكثف أو المبرّد ) .
  - العملية 3 ← 4 : تمدد إديباتي ( في أسطوانة التمدد ) .
  - العملية 4 ← 1 : إعطاء حرارة تحت ضغط ثابت ( المبخر أو حجرة التبريد ) .




الشكل يبيّن : دورة آلة تبريد كارنو البخارية على مخطط $T-s$ .

- العمل المفيد النوعي :

$$l_0 = l^C - l^S = l_{1\to2} - l_{3\to4}$$
$$l_0 = (i_2 - i_1) - (i_3 - i_4)$$

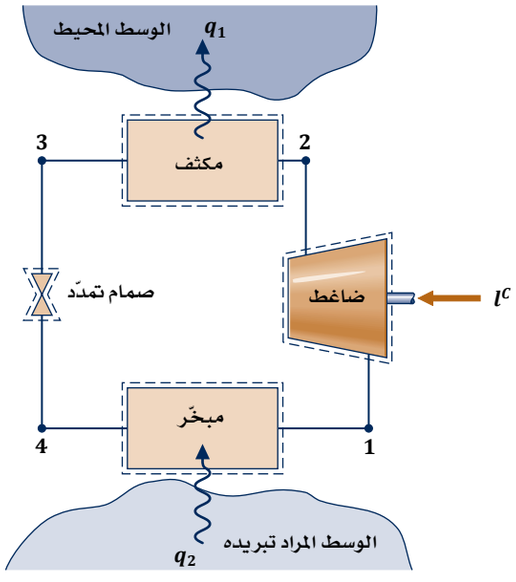
- كمية الحرارة النوعية :

$$q = q_1 - q_2$$
$$q = q_{2\to3} - q_{4\to1}$$
$$q = (i_2 - i_3) - (i_1 - i_4)$$

- معامل التبريد :

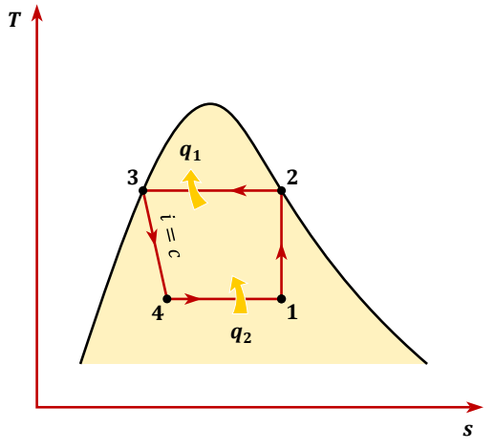
$$\varepsilon = \frac{q_2}{l_0} = \frac{i_1 - i_4}{(i_2 - i_1) - (i_3 - i_4)}$$
$$\varepsilon = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{i_1 - i_4}{(i_2 - i_3) - (i_1 - i_4)}$$
$$\varepsilon = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{T_4(s_1 - s_4)}{T_2(s_2 - s_3) - T_4(s_1 - s_4)} = \frac{T_{min}}{T_{max} - T_{min}}$$

## دورة آلة تبريد بخارية بصمام عياري ( خانق أو تمدد )

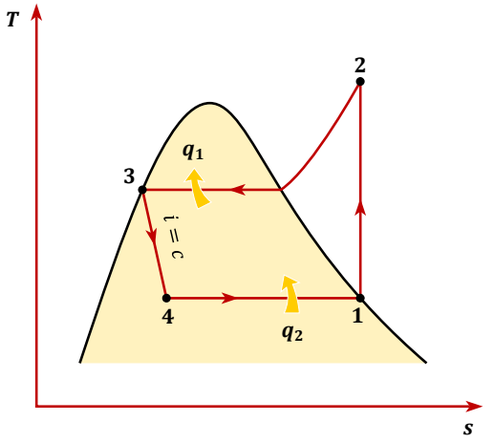



الشكل يبيّن : مبدأ عمل دورة آلة تبريد بخارية بصمام عياري (خانق أو تمدد ) .

- سير عمليات دورة آلة تبريد بخارية بصمام عياري :
  - العملية 1 ← 2 : انضغاط إدياباتي ( في الضاغط ) .
  - العملية 2 ← 3 : طرح حرارة تحت ضغط ثابت ( في المكثف ) .
  - العملية 3 ← 4 : خنق تحت إنتالبي ثابت ( في الصمام العياري ) .
  - العملية 4 ← 1 : إعطاء حرارة تحت ضغط ثابت ( في المبخّر ) .




( أ ) دورة آلة تبريد ذات امتصاص لبخار مشبع رطب




( ب ) دورة آلة تبريد ذات امتصاص لبخار مشبع جاف

الشكل يبيّن : دورات آلات تبريد بخارية بصمام عياري على مخطط $T-s$ .

- العمل المفيد النوعي :

$$l_0 = l^C$$
$$l_0 = l_{1\to2}$$
$$l_0 = i_2 - i_1$$

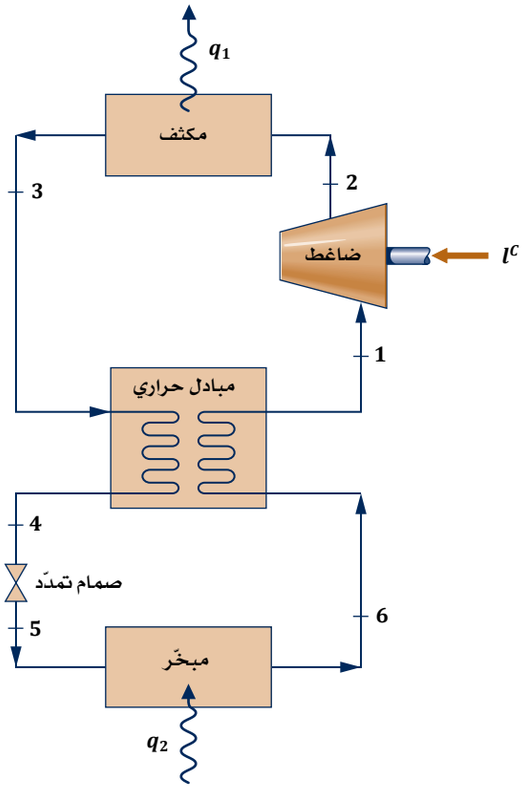
- كمية الحرارة النوعية :

$$q = q_1 - q_2$$
$$q = q_{2\to3} - q_{4\to1}$$
$$q = (i_2 - i_3) - (i_1 - i_4)$$
$$q = i_2 - i_1$$

- معامل التبريد :

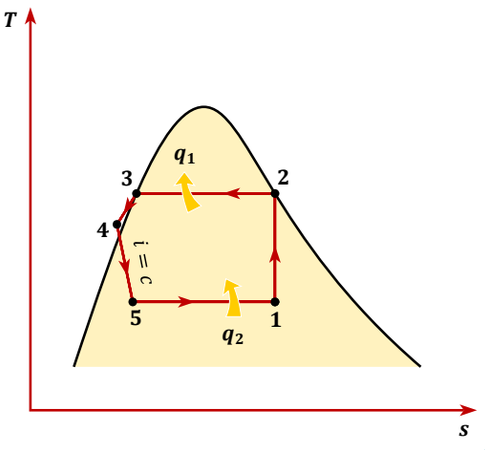
$$\varepsilon = \frac{q_2}{l_0} = \frac{i_1 - i_4}{i_2 - i_1}$$
$$\varepsilon = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{i_1 - i_4}{i_2 - i_1}$$

## دورة آلة تبريد بخارية بصمام عياري و مبرد إضافي

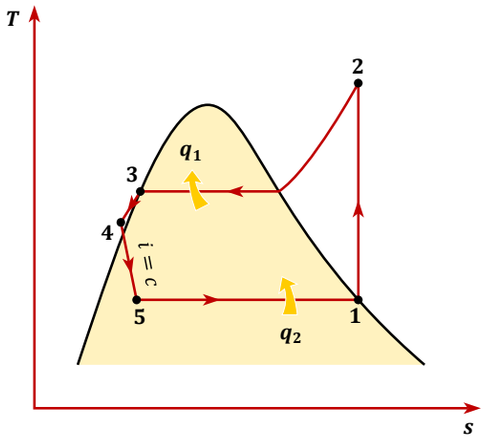



الشكل يبيّن : مبدأ عمل إحدى آلات التبريد المزودة بصمام عياري و مبرد إضافي .

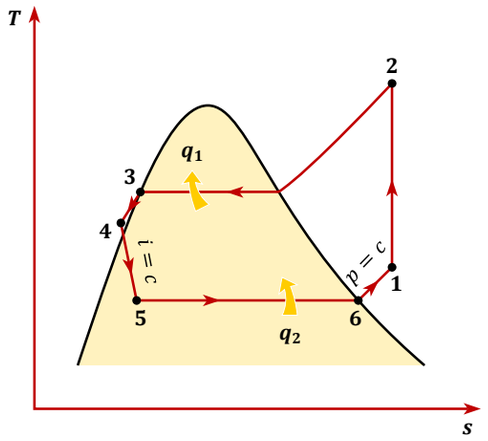
- سير عمليات دورة آلة التبريد البخارية المزودة بصمام عياري و مبرد إضافي :
  - العملية 1 ← 2 : انضغاط إدياباتي ( في الضاغط ) .
  - العملية 2 ← 3 : طرح حرارة تحت ضغط ثابت ( في المكثف ) .
  - العملية 3 ← 4 : تبريد تحت ضغط ثابت ( في المبادل الحراري ) .
  - العملية 4 ← 5 : خنق تحت إنتالبي ثابت ( في الصمام العياري ) .
  - العملية 5 ← 1 : إعطاء حرارة تحت ضغط ثابت ( في المبخر ) .
  - العملية 5 ← 6 : إعطاء حرارة تحت ضغط ثابت ( في المبخر ) .
  - العملية 6 ← 1 : تحميص تحت ضغط ثابت ( في المبادل الحراري ) .




( أ ) دورة آلة تبريد ذات امتصاص لبخار مشبع رطب




( ب ) دورة آلة تبريد ذات امتصاص لبخار مشبع جاف




( ج ) دورة آلة تبريد ذات امتصاص لبخار محمص

الشكل يبيّن : دورات آلات تبريد بصمام عياري و مبرد إضافي على مخطط $T - s$ .

- عندما تكون الدورة لآلة تبريد ذات امتصاص لبخار مشبع رطب أو جاف :
  - عمل الضاغط النوعي :

$$l^C = i_2 - i_1$$

  - الإنتاجية التبريدية النوعية :

$$q_2 = i_1 - i_5$$

  - معامل التبريد :

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l^C} = \frac{i_1 - i_5}{i_2 - i_1}$$

- عندما تكون الدورة لآلة تبريد ذات امتصاص لبخار محمص :
  - ملاحظة هامة :

$$l_{3\to4} = l_{6\to1}$$
$$i_3 - i_4 = i_1 - i_6$$

  - عمل الضاغط النوعي :

$$l^C = i_2 - i_1$$

  - الإنتاجية التبريدية النوعية :

$$q_2 = i_6 - i_5$$

  - معامل التبريد :

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l^C} = \frac{i_6 - i_5}{i_2 - i_1}$$

انتهى المختصر ☆☆