

## الباب الثاني

### القانون الأول للديناميكا الحرارية - الطاقة-

#### The First Law Of Thermodynamics - Energy

1.2. مقدمة .

2.2 . مفاهيم الاتزان .

3.2. القانون الصفري للديناميكا الحرارية .

4.2. القانون الأول للديناميكا الحرارية - الطاقة -

1.4.2. نصوص القانون الأول اللفظية والرياضية .

2.4.2. الشغل والحرارة .

3.4.2. الطاقة الداخلية .

4.4.2. الأثالبيا - المحتوى الحراري -

5.2. تطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية على التدفق .

6.2. القانون الأول للديناميكا الحرارية في صورة معدل وعمليات مستقرة الحالة

7.2. تطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية على الجريان المستقر - النظام المفتوح -

8.2. السعة الحرارية .

9.2. العمليات الترموديناميكية والمسارات المختلفة

10.2. تمارين .

إن علم الديناميكا الحرارية ( الترموديناميكا ) هو علم الطاقة وقوانين تحولاتها، وقد ظهر في القرن التاسع عشر نتيجة لتطور المكنات البخارية التي تتحول فيها الحرارة المتولدة عن احتراق الوقود إلى مشغل . ومن هنا جاءت التسمية "الترموديناميكية" .

وكما أشرنا سابقاً تعتبر القانون الأول للديناميكا الحرارية صيغة خاصة من قانون " حفظ الطاقة العامة " والذي تطور عبر قرون وعصور طويلة إلى أن اكتسب الصيغة النهائية له والتي تنص على أنه " الطاقة لا تبنى ولا تولد من العدم بل تتحول فقط من نوع معين إلى نوع آخر في مختلف العمليات " .

وهذا القانون يتناول كل أشكال الطاقة في الطبيعة مثل الطاقة المخزونة بكل أشكالها والطاقة العابرة بشكليها " الحرارة والشغل " . ومتى اختلف شكل من الطاقة ظهر بشكل آخر ، أي أن مجموع الطاقة في الكون ثابت دائماً .

أما القانون الأول – الطاقة – ((The First Law ( Energy)) في الديناميكا الحرارية فهو صيغة خاصة من قانون حفظ الطاقة العام لأنه يتعامل بشكل خاص مع الطاقة " العابرة " ، أي الطاقة التي تنتقل عبر حدود النظام الترموديناميكي مثل ( الحرارة والشغل) . فهذين الشكلين من الطاقة يتواجدان فقط عند الدخول إلى النظام أو الخروج منه . وقد عرف هذا القانون بقانون مصونية الطاقة منذ عهد قديم ، وذلك فيما يتعلق بالطاقة الميكانيكية ، حتى أواسط القرن التاسع عشر حين أثبت العالم الإنجليزي " جول " أن تحول الشغل إلى حرارة يخضع لعلاقة كمية تدعى ( بمبدأ التكافؤ ) . ويحدد القانون الأول العلاقة المتبادلة بين الحرارة والشغل وتغير طاقة النظام الترموديناميكي .

## 2-2 مفاهيم الاتزان (Equilibrium) .

أشرنا سابقاً أنه عند دراسة النظام الترموديناميكي المعزول ، إن البارامترات الكيميائية والفيزيائية وغيرها للأجسام التي تتألف منها ( درجة الحرارة والضغط والكثافة وغير ذلك )

تكون مختلفة ، حيث تنشأ تحت تأثير الفرق في درجات الحرارة أو الضغوط أو غيرها ، عمليات تؤدي بالنظام الترموديناميكي إلى الاتزان . وتدعى النظام الترموديناميكي بالنظام المتزن إذا كان حالته لا تتغير مع مرور الزمن ، وبشكل عام ، فإن النظام الترموديناميكي المتزن يمتاز بقيمة ثابتة لدرجة الحرارة والضغط وغيره من البارامترات .

لندرس النظام الترموديناميكي الواقع في حالة اتزان ، ولنأخذ على سبيل المثال ، الغاز الموجود في اسطوانة الضاغط المكبس ، وبما أن حالة الغاز متزنة ، فإن درجة الحرارة والضغط يكونان ثابتين في حجم الاسطوانة كله . وعند إنضغاط الغاز يزداد ضغطه وترتفع درجة حرارته ، وتتغير حالته ، أي تجري فيه العملية الترموديناميكية ( Thermodynamic Process ) .

فإذا كانت درجة الحرارة وضغط الغاز عندئذ ثابتين داخل حجم الاسطوانة في أي لحظة ، تكون حالة الغاز في حالة اتزان ، وتدعى مثل هذه العملية " بالعملية المتوازنة وهي تتابع الحالات المتوازنة للنظام .

### 3.2. القانون الصفري للديناميكا الحرارية (Zero Law Of Thermodynamic)

ينص هذا القانون على أنه إذا كان هناك تساوي في درجة حرارة جسمين مختلفين مع جسم ثالث فسيكون لهما نفس درجة الحرارة . ويعتبر هذا القانون هو الأساس في قياس درجات الحرارة بواسطة الترمومتر الزئبقي ويمكن أن يكون هناك اختلاف في درجة الحرارة إذا استخدم مقياس آخر يربط على نفس الجسم مثل المزيج الحراري أو مقياس المقاومة .

تقاس درجات الحرارة بمقاييس درجات الحرارة ( Thermometer Measurements ) المختلفة حيث بمقاس درجات الحرارة بالمقياس السيليزي ويرمز له بالرمز ( C ) وكذلك تسمى بالمقياس ( السنطي كريد ) حيث يقم التدريج إلى 100 قسم . المقياس الثاني هو " مقياس كلفن ( Kelvin's Measurement ) وهو يخضع للعلاقة التالية :-

$$K = C + 273 \dots\dots\dots(1.2)$$

والمقياس الثالث هو مقياس فهرنهايت ( Fihranhyte Measurement ) وهو يخضع

للعلاقة التالية :-

$$F = 9C / 5 + 32 \dots\dots\dots(2.2)$$

وتم تقسيم الفرق بين درجة الماء والتلج ودرجة الماء المغلي إلى 212 جزء .

## 2.4. القانون الأول في الديناميكا الحرارية First Law Of Thermodynamics

يعتمد علم الديناميكا الحرارية كما أشرنا سابقاً على قانونين مهمين تجريبيين تم الحصول عليهما نتيجة لتعميم التجارب والدراسات والأبحاث العديدة المختلفة ، وتمثل هذه القوانين الضوابط العامة التي تنظم تحولات الطاقة المختلفة وما ينتج عنها .

في هذا الباب سنقوم بعرض القانون الأول للديناميكا الحرارية ، وهو ما يسمى بقانون مصونية الطاقة وتحولها ، والذي ينص على أن الطاقة لا تفنى ولا تولد من العدم ، بل تتحول فقط من نوع معين إلى نوع آخر مختلف العمليات .  
وقد عرف قانون مصونية الطاقة منذ القدم وذلك فيما يتعلق بالطاقة الميكانيكية ( الحركية والكامنة ) .

في أواسط القرن التاسع عشر اثبت العالم الإنجليزي " جول " أن تحول الشغل إلى حرارة يخضع لعلاقة كمية وقد تبين أن الطاقة لا تفنى عندما تنتقل من نوع إلى آخر وتدعى هذه العلاقات الكمية " بمبدأ التكافؤ " وقد انعكست حقيقة مصونية الطاقة في منظومة وحدات القياس العالمية (SI) ، حيث تقاس جميع أنواع الطاقة بالجول .

### 1.4.2. نصوص القانون الأول اللفظية والرياضية .

كما أشرنا أن قانوني الديناميكا الحرارية هما قانونين تجريبيين ، لذلك فإن القانون الأول قانون مصونية الطاقة وتحولها لا يبرهن رياضياً ، وإنما يبرهن بالتجارب العديدة ، ولم تلاحظ ظاهرة معينة أو عملية واحدة خلال تاريخ الحضارة البشرية ، تخالف هذا القانون ، مما أدى إلى اعتباره قانوناً عاماً في الطبيعة .

أن القانون الأول للديناميكا الحرارية ينص على أن " مجموع كل أنواع الطاقة في النظام الترموديناميكي المعزول هو مقداراً ثابتاً وينتج عن ذلك أن نقصان أي نوع من الطاقة في نظام ما مؤلف من جسم أو عدة أجسام يجب أن يترافق بزيادة في الطاقة في نظام آخر من الأجسام .

يعبر عن القانون الأول للديناميكا الحرارية بعدة صيغ ونصوص لفظية تدل على صحته

ومنها :-

النص الأول:- " لا يمكن آلة أن تستمر في العمل من الدفعة الأولى إلى ما لا نهاية حيث أن الاحتكاك يمنع ذلك ، كما لا يمكن أن تكون هناك آلة تستطيع أن تبذل شغل ما لانهاضي بدون تزويدها بالطاقة من مصدر خارجي " وهذا النص يعرف " محرك الحركة الأبدية من النوع الأول مستحيل ."

النص الثاني :- " في المنظومة المغلقة تكون هناك خاصية تعتمد قيمتها على الفرق بين الحرارة والشغل خلال تغير الحالة حيث يمكن كتابتها جبرياً :-

$$Q_{1-2} - W = u_2 - u_1 \dots \dots \dots (3.2)$$

النص الثالث :- " أن الطاقة الداخلية داخل منظومة مغلقة ( النظام المعزول ) تبقى ثابتة إذا كانت معزولة عن الوسط الخارجي يمكن إثبات ذلك حيث :

$$Q = 0 \quad , \quad W = 0$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 0$$

$$u_2 = u_1$$

ومنه

أن قانون الديناميكا الحرارية الأول يحدد العلاقة المتبادلة بين الحرارة والشغل وتغيير طاقة النظام الديناميكي على الشكل التالي :

(( تصرف الحرارة الداخلة إلى النظام ، على تغيير طاقتها وإنجاز شغل )) ، أي :-

$$Q = E_2 - E_1 + W \dots \dots \dots (4.2)$$

حيث :- Q - الحرارة الداخلة إلى النظام أثناء عملية اختباره .

W - الشغل الذي ينجزه النظام خلال هذه العملية .

E1 , E2 - طاقة الجملة في بداية العملية ونهايتها .

كما تحدد الصيغة الرياضية التحليلية لقانون الديناميكا الأول (4.2) قاعدة الإشارات : حيث تكون الحرارة الداخلة إلى النظام بإشارة موجبة ، أما الحرارة التي تسحب من النظام بإشارة سالبة ، وتكون الشغل الذي يقوم به النظام موجباً ، ويكون الشغل الذي يجري على النظام سالباً .

وتتجمع الطاقة الكلية للنظام من طاقته الحركية ( $E_{kin}$ ) وطاقته الكامنة ( $E_{pot}$ ) والطاقة الداخلية لحركة ذراته والوضع المتبادل لذراته ( $u$ ) :-

$$E = E_{kin} + E_{pot} + u \dots \dots \dots (5.2)$$

وإذا كان النظام ثابت فإن

$$( E_{kin} = E_{pot} = 0 )$$

وتكون الطاقة الكلية للنظام عندئذٍ مساوية لطاقته الداخلية كما أشرنا سابقاً :-

$$E = u \dots \dots \dots (6.2)$$

وفي هذه الحالة يكتب قانون الديناميكا الحرارية الأول كما يلي :-

$$Q = u_2 - u_1 + W \dots \dots \dots (7.2)$$

حيث  $u_1$  ,  $u_2$  الطاقة الداخلية للنظام في بداية العملية ونهايتها .

يبين من قانون الديناميكا الحرارية الأول أنه يجب تقديم حرارة  $Q$  ، للحصول على شغل مفيد  $W$  في محرك حراري يعمل باستمرار ، ويطلق على المحرك الذي يعمل بشكل دائم دون أن يستهلك أي طاقة ، اسم المحرك الأبدي من النوع الأول . وينتج من هذا القانون أنه يستحيل وجود محرك أبدي من النوع الأول ، وذلك لأنه لا يمكن إنجاز " شغل دون صرف حرارة " إلا على حساب نقص في الطاقة الداخلية للنظام ، واحتياطي هذه الطاقة محدود .

أما الصيغ الرياضية للقانون الأول للديناميكا الحرارية يمكن الحصول عليها بافتراض إن جسماً عاملاً كتلته ( $1 \text{ Kg}$ ) ينفذ شغل معيناً ما وأنه يكتسب عند مروره بالجزء  $c, d$  كمية متناهية في الصغر على شكل حرارة ( $dQ$ ) ، عندئذٍ سترتفع درجة حرارته بمقدار ( $dt$ ) وسيكبر حجمه بمقدار ( $dv$ ) كما هو مبين في الشكل (1-2) .

إن ارتفاع درجة حرارته بمقدار (dt) سيؤدي إلى تزايد سرعة جزيئاته أي إلى تزايد طاقته الداخلية الحركية ، أما كبر حجمه بمقدار (dv) سيؤدي إلى تزايد المساحة بين جزيئاته أي إلى تزايد طاقته الداخلية الكامنة ، وهذه التغيرات في الطاقة الداخلية الحركية والكامنة يشكلان التزايد الكلي للطاقة الداخلية النوعية (dQ) .

عندما يكبر حجم الجسم العامل بمقدار (dv) فإنه ينجز شغلاً خارجياً بمقدار (dw) للتغلب على القوى الخارجية فإذا لم يحصل ظواهر أخرى في الجسم العامل عندئذ استناداً إلى قانون مصونية الطاقة يمكننا أن نكتب الصيغة التالية :-

$$du = dQ - dw \dots\dots\dots(8.2)$$

$$u_2 - u_1 = \int_1^2 dq - \int_1^2 dw = q_{1-2} - w_{1-2} \dots\dots\dots(9.2)$$

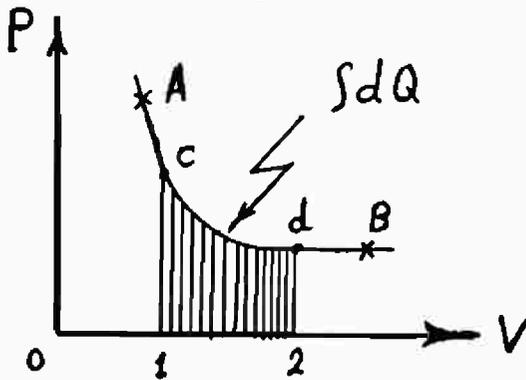
ومن أجل العمليات العكسية :-

$$du = dq - pdv$$

ومنه:-

$$u_2 - u_1 = q_{1-2} + \int_1^2 pdv \dots\dots\dots(10.2)$$

تعبّر المعادلات (7.2) ، (8.2) عن الصيغ الرياضية للقانون الترموديناميكا الأول وهي تنص على أن " تغير الطاقة الداخلية (u) للنظام الترموديناميكي يكون مساوياً للمجموع الجبري لكل من الطاقة المقدمة إليه على شكل حرارة نوعية (dq) . والشغل النوعي الخارجي الذي ينجزه (dw) ، والطاقة المقدمة للجسم العامل على شكل حرارة نوعية تعرف على تغير طاقته الداخلية النوعية وإلى إنجازه لشغل خارجي .



الشكل (1-2)

#### 2.4.2. الحرارة واشغل .

إن الحرارة مثل الشغل ، هي طريقة لنقل الطاقة من النظام الترموديناميكي إلى الوسط المحيط أو بالعكس من الوسط المحيط إلى النظام . و لا تتحدد الحرارة فقط بالحالة الأولية والحالة النهائية للنظام ، وإنما تتحدد أيضاً بالعملية التي ينتقل بموجبها النظام من حالة إلى أخرى ، وأن عدم تغير حالة النظام ( عندما تدرس الحالة التوازنية مثلاً ) يؤكد بشكل قاطع إن الحرارة تساوي صفر .

إن الحرارة والشغل هي صور وظواهر حدود . فهما يظهران عند حدود النظام وكل منهما يمثل طاقة تغير حدود النظام . إن المنظومات الترموديناميكية لا تحتوي أبداً على حرارة أو شغل ولكن قد يظهر أحدهما أو كليهما في أثناء تغير حالة النظام .

وبمقارنة الشغل والحرارة نجد أن الشغل هو طريقة ماكروفيزيائية لنقل الطاقة ، كما أشرنا سابقاً مثل تحرك مكبس الضاغط ، أما الحرارة فهي خلافاً للشغل ، طريقة ميكروفيزيائية لنقل الطاقة بالتأثير المتبادل بين الذرات مباشرة .

وقد تبين من التجارب والدراسات بأن الأجسام الداخلة في سير العملية الترموديناميكية تتبادل الطاقة فيما بينها ويعني ذلك إن طاقة بعضها يزيد بينما طاقة الآخر يقل ويتم نقل الطاقة بين الأجسام بطريقتين :-

❖ الطريقة الأولى :- لنقل الطاقة : تتم بواسطة التماس أو الاتصال المباشر للأجسام ذات درجات حرارة مختلفة حيث يتم عندها نقل الطاقة أما بواسطة تبادل الطاقة الحركية بين جزيئات الأجسام المتماسة أو المتصلة ، وأما بواسطة الانتقال الإشعاعي للطاقة الداخلة بين الأجسام المشعة عن طريق الموجات الكهرومغناطيسية .

❖ الطريقة الثانية :- فهي مرتبطة بوجود حقول القوى أو الضغط الخارجي ، حيث يجب على الجسم أن يتحرك في حقل القوى لنقل الطاقة وإما أن يغير تعديل في الضغط الخارجي بتغير آخر في نقل الطاقة بشرط انتقال الجسم كله أو جزء منه في الفراغ على شكل شغل .

والشغل هنا حسب الطريقة الثانية هو كمية الطاقة المنقولة . وهو الشكل المرئي لنقل الطاقة بينما تمثل الحرارة مجموعة من العمليات الغير مرئية بالعين المجردة .

إن الحرارة والشغل يعتبران دوال مسار ويصطلح إن الشغل وكمية الحرارة الداخلة إلى النظام الترموديناميكي مقادير موجبة ، أما الشغل وكمية الحرارة الخارجة من النظام أي المبذولة على النظام فهي مقادير سالبة .

### 3.4.2. الطاقة الداخلية

إن الطاقة الداخلية كما أشرنا في الباب الأول هي مجموعة الطاقة الحركية للجزيئات ، والطاقة الكامنة أو طاقة وضع الجزيئات ، فإنها تحدد بحالة الجملة فقط ، و لا تتعلق بأية عملية . فمثلاً إذا علمنا درجة حرارة بخار الماء وضغطه ، نستطيع تحديد طاقته الداخلية .

إن الطاقة الداخلية تعتبر خاصية وليست دالة مسار ، حيث أن المقادير التي تميز الدوال الترموديناميكية للحالة ، أو اسم الخواص الترموديناميكية . وتبعاً لهذا التعريف تعتبر الطاقة الداخلية دالة ( تابعاً ) للحالة .

وهي كمية تختلف عن الحرارة والشغل حيث أنها تحدث داخل النظام ويمكن أن تزداد وأن تقل بتغيير حالة النظام أما الحرارة والشغل فهما حالتان مختلفتان تعتمدان على جريان الطاقة .

### 4.4.2. الأنتالپيا – المحتوى الحراري –

هناك طريقتين لتزويد الغاز بالحرارة وهما إما بحجم ثابت أو بضغط ثابت وبم ان الشغل المبذول على الغاز أو الناتج منه يعطي بالعلاقة التالية :-

$$W = \int P.dv.....(10.2)$$

فلا يكون هناك شغلاً ناتجاً من تزويد الغاز بالحرارة عند ثبوت الحجم ، بل نتيجة لذلك تعمل الحرارة على زيادة الطاقة الداخلية فقط .

أشرنا سابقاً بأن الصيغة الرياضية للقانون الأول هي :-

$$dQ = du + P.dv.....(11.2)$$

حيث يلاحظ من هذه الصيغة التفاضلية بأن مقدار التغير في كمية الحرارة (dQ) هو تفاضل غير تام ، فإذا مر النظام من الحالة الابتدائية (A) إلى الحالة النهائية (B) الشكل (1-2) ينتج :-

$$\int_A^B dQ = \int_A^B du + \int_A^B P.dv \dots \dots \dots (12.2)$$

الطرف الأيسر من هذه المعادلة لا يمكن تكامله ما لم نعرف تفاصيل المسار الواصل بين الحالتين الابتدائية والنهائية . نفس الشيء ينطبق على الحد الثاني من الجانب الأيمن إلى الحد (Pdv) .

فإذا فرضنا أن النظام قد أمتص الحرارة تحت ضغط ثابت فعندئذ يكون المسار معلوم " أي تغير حجم النظام مع ثبوت الضغط " وعليه تحت ( P = const ) يكون :-

$$\int_A^B dQ = \int_A^B du + P \int_A^B dv \dots \dots \dots (13.2)$$

فنحصل بعد التكامل على :-

$$Q = u_B - u_A + P (V_B - V_A)$$

حيث (Q) تمثل مقدار الحرارة التي يمتصها أو يبعثها النظام تحت ضغط ثابت نرتب المعادلة فنحصل على :-

$$Q = (u_B + PV_B) - (u_A + PV_A) \dots \dots \dots (14.2)$$

ومن هذه المعادلة نحصل على دالة جديدة تدعى " الأنتالبيا" ويرمز لها بالرمز (H) وتعطي كما يلي :-

$$H = u + PV \dots \dots \dots (15.2)$$

وبذلك تصبح المعادلة (14.2) كما يلي :-

$$Q = H_B - H_A$$

أو :-

$$Q = \Delta H$$

وهكذا فإنه لأي عملية عكسية تتم تحت ضغط ثابت تكون كمية الحرارة المنتقلة مساوية للتغير في الأنثاليا .

إن المعادلة (14.2) تعرف " الأنثاليا " على إنها مجموع الطاقة الداخلية (u) وحاصل ضرب الضغط في الحجم (PV) . وهذا التعريف ليس له مفهوم ( فيزيائي ) محدد بل اكتساب مدلوله لأسباب رياضية بحتة . فكثر ظهور المقدار (u + PV) في كثير من المعادلات المستخدمة في الديناميكا الحرارية خاصة بالنسبة للمسائل المتعلقة بالنظام المفتوح والذي يجعل استخدام الرمز (H) بدل (u + PV) .

من الواضح أنه حتى يمكن إضافة الطاقة الداخلية (u) إلى حاصل ضرب الضغط في الحجم (PV) يجب أن تكون الوحدات المستخدمة للكميتين واحدة .  
الأنثاليا النوعية يرمز لها بالرمز (h) وهي الأنثاليا المنسوبة إلى ( 1 Kg ) من المادة :-

$$h = u + P_v \dots\dots\dots(16.2)$$

إن الأنثاليا النوعية (h) ، يمثلها مثل الطاقة الداخلية (u) هي تابع الحالة وتعطي قيمتها في الجداول والمراجع .

5.2. تطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية على التدفق .

في العادة لا يكون البخار أو السائل أو الغاز في العديد من الوحدات الحرارية المختلفة في حالة هدوء ، بل يكون في حالة حركة على هيئة تدفق . وتصبح من أجل التدفق الصيغ (1.2) لقانون الديناميكا الحرارية الأول ، على أن يعوض فيها تغير الطاقة (E2 - E1) طبقاً لما جاء في الصيغة (18.2) بمجموع تغير الطاقة الحركية للتدفق :

$$\Delta E_{kin} = m(w_2^2 - w_1^2 / 2) \dots \dots \dots (17.2)$$

مع تغير الطاقة الكامنة للتدفق :-

$$\Delta E_{pot} = mg(z_2 - z_1) \dots \dots \dots (18.2)$$

وتغير طاقته الداخلية  $\Delta u$  ، حيث أن  $m$  كتلة المادة (Kg) و  $w$  سرعة التدفق (m/s) و  $Z$  ارتفاع موضع التدفق ، (m) .

أن محصلة الشغل ( $W$ ) تتألف من الشغل المنجز المفيد والذي يسمى أيضاً بالشغل التقني ( $W_{us}$ ) ومن الشغل المعروف على حركة التدفق ويدعى بشغل الدفع أو التميرر ويساوي :-

$$W_{prop} = P_2 V_2 - P_1 V_1 = m(P_2 V_2 - P_1 V_1) \dots \dots \dots (19.2)$$

$$W = W_{us} + W_{prop} \dots \dots \dots (20.2)$$

وبتعويض الصيغ (17.2) ، (18.2) ، (19.2) ، (20.2) في الصيغة (4.2) نحصل على :-

$$Q = H_2 - H_1 + m(w_2^2 - w_1^2) / 2 + mg(Z_2 - Z_1) + W_{us} \dots \dots \dots (21.2)$$

وبعد تقسيم هذه العبارة على الكتلة ( $m$ ) نحصل على صيغة القانون الأول للديناميكا الحرارية من أجل التدفق (بالنسبة 1 Kg من المادة) :-

$$q = h_2 - h_1 + (w_2^2 - w_1^2) / 2 + g(Z_2 - Z_1) + W_{us} \dots \dots \dots (22.2)$$

وهي معادلة التدفق للجريان المستمر وتعادل الأنثالبيا في الصيغة (12.2) لما يلي :-

$$H = u + PV \dots \dots \dots (23.2)$$

والأنتالبيا النوعية هي الأنتالبيا المنسوبة إلى 1 Kg من المادة :-

$$h = u + Pv \dots\dots\dots(24.2)$$

الشغل المتوفر ( التقني )  $W_{us}$  الذي يدخل في المعادلة (20.2) هو الشغل المفيد لأي جهاز مثل - التوربين والضواغط والمضخة أو المروحة - يقع على طريق تدفق السائل أو الغاز . فإذا لم يوجد جهاز مشابه فإن  $W_{us} = 0$  .

وفي مثل تلك الحالات التي يمكن فيها إهمال تغيرات الطاقة الحركية

$$(w_2^2 - w_1^2)/2$$

والطاقة الكامنة  $mg (Z_2 - Z_1)$  للتدفق بسبب صغر قيمتها ، فإن المعادلة (22.2) تأخذ الشكل التالي :-

$$q = h_2 - h_1 + W_{us} \dots\dots\dots(25.2)$$

عند دراسة تدفق مادة ما ، لا يقصد بالمقدار الداخلي في الصيغ (17.2) ، (18.2) ، (19.2) ، (20.2) كتلة هذه المادة وإنما معدل التدفق الكتلي ، أي كتلة المادة التي تمر عبر مقطع معين خلال وحدة زمن ( Kg / s ) .

وعندئذ تكون  $\Delta E_{kin}$  ،  $\Delta E_{pot}$  ،  $W$  ،  $E_{prop}$  ،  $W_{us}$  ،  $Q$  عبارة عن قدرات تقاس بالواط حيث (  $1 W = 1 J / s$  ) أما  $V$  فهي التدفق الحجمي (  $m^3/s$  ) .

إن دراسة الأمثلة التالية سوف توضح ما تم عرضه في هذا البند من تطبيق للقانون الأول للديناميكا الحرارية على التدفق .

مثال (1.2) .

مانع كتلته 2.25 Kg وحجمه  $0.1 m^3$  يوجد داخل اسطوانة عند ضغط مقداره 7 bar . سلطت على هذا المانع طاقة حرارية حتى أصبح حجمه  $0.2 m^3$  . إذا كانت الأنتالبيا الابتدائية 210 kJ / Kg والنهائية 280 kJ / Kg . أوجد :-

1- كمية الطاقة الحرارية المسلطة على المانع .

2- تغيير الطاقة الداخلية للمانع .

نرتب معطيات السؤال :-

$$\begin{aligned}m &= 2.25 \text{ Kg} & h_1 &= 210 \text{ kJ / Kg} \\V_1 &= 0.1 \text{ m}^3 & h_2 &= 280 \text{ kJ / Kg} \\P &= 7 \text{ bar} & h_2 &= 280 \text{ kJ / Kg} \\V_2 &= 0.2 \text{ m}^3\end{aligned}$$

الحل :-

$$\begin{aligned}Q_{1-2} &= \Delta u + W_{1-2} \\ \Delta u &= Q - W \\ W &= P (V_2 - V_1) = 7 \cdot 10^2 (0.2 - 0.1) = 70 \text{ kJ.} \\ \Delta u &= 157.5 - 70 = 87.5 \text{ KJ} \\ Q &= m (h_2 - h_1) \\ &= 2.25 \text{ Kg} (280 \text{ kJ / Kg} - 210 \text{ kJ / Kg}). \\ &= 2.25 \text{ Kg} (70 \text{ kJ / Kg}). \\ Q &= 157.5 \text{ kJ}\end{aligned}$$

أما التغير في الطاقة الداخلية للمائع :-

$$\begin{aligned}\Delta u_{1-2} &= Q_{1-2} - W_{1-2} \\ \Delta u &= 157.5 - 70 = 87.5 \text{ KJ} .\end{aligned}$$

مثال (2-2)

غاز نيتروجين داخل اسطوانة كتلته 1Kg عند ضغط مقداره 7 bar ودرجة حرارة  $27. \text{C}^0$  . ليتمدد الغاز 4 أضعاف حجمه الأصلي وهذا الإجراء يتم على أساس ثبوت الضغط أوجد :-

- 1- الحجم الأصلي للغاز .
- 2- درجة حرارته النهائية .
- 3- الشغل المبذول من قبل الغاز بفرض إن غاز النيتروجين غاز مثالي وثابت الغاز للنيتروجين  $R = 0.2968 \text{ KJ / Kg} \cdot \text{K}^0$

الحل :-

من معطيات السؤال نجد :-

$$\begin{aligned}P &= 7 \text{ BAR} = 7 \cdot 10^2 \text{ Kpa} & \text{الضغط} \\ T &= 27 + 273 = 300 \text{ K}^0 \\ V_2 &= 4 V_1 .\end{aligned}$$

المطلوب الأول .

لإيجاد الحجم الأصلي لغاز النيتروجين نستخدم المعادلة العامة للغازات حيث :-

$$P_1 V_1 = mRT_1$$

ومنه نجد :-

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{mRT_1}{P_1} \\ &= \frac{1 \cdot 0.2968 \cdot 300}{7 \times 10^2} = 0.1272 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$V_2 = 4V_1 = 4 \cdot 0.1272 = 0.5088 \text{ m}^3$$

المطلوب الثاني .

درجة حرارة غاز النيتروجين النهائية أيضاً يمكن إيجادها :-

$$T_2 = \frac{P_2 V_2}{mR}$$

$$T_2 = \frac{7 \cdot 10^2 \cdot 0.5088}{1 \cdot 0.2968} = 1200 \text{ K}^0$$

$$= 1200 - 273 = 927 \text{ C}^0.$$

المطلوب الثالث .

الشغل المبذول من قبل الغاز :-

$$W = P(V_2 - V_1) = 7 \times 10^2 (0.5088 - 0.12772)$$

$$= 267.12 \text{ KJ}.$$



$$h_2 = 885 + 7.10^2 \cdot 0.28 = 1081 \text{KJ} / \text{Kg}$$

رابعاً - الشغل وطاقته المبذولة نحصل عليها كما يلي :-

$$\begin{aligned} W &= P(V_2 - V_1) \\ &= 7.10^2(0.28 - 0.014) = 186.2 \text{KJ}. \end{aligned}$$

## 6.2 . القانون الأول للديناميكا الحرارية في صورة معدل وعمليات مستقرة الحالة .

يمكن التعبير عن المعدل الخطي أو عن المعدل المتوسط لعبور الطاقة حدود النظام أما في صورة شغل إذا نسبنا جميع الحدود الاستمرار إلى الزمن أي فترة زمنية (dt) .  
لو فرضنا أنه خلال فترة (dt) ستعبر حدود النظام كمية الحرارة (dQ) وسيبذل النظام كمية من الشغل (dw) وسيكون التغير في الطاقة الداخلية (Δu) والتغير في الطاقة الحركية (Δ Ekin) ، فيكون من القانون الأول للديناميكا الحرارية ممكن كتابة العلاقة التالية :-

$$\frac{dO}{dt} = \frac{dw}{dt} + \frac{\Delta u}{dt} - \frac{\Delta E_{kin}}{dt} + \frac{\Delta E_{pot}}{dt} \dots \dots \dots (26.2)$$

إن العلاقة (26.2) تعبر عن القانون الأول للديناميكا الحرارية في صورة معدل .

7.2. تطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية على الجريان المستمر - النظام المفتوح .  
سنقوم في هذا البند بدراسة تطبيقات مختلفة منفصلة أولاً مثل ( التوربين ، الضاغط ، الغلاية ، المكثف ، البرق ، الناشر ، ، الخنق ) وبعد ذلك سوف نقوم بدراسة وعرض هذه التطبيقات مجتمعة بتسلسل معين للحصول على منظومة معينة يمكن الاستفادة منها في كثير من التطبيقات والمجالات الهندسية الصناعية المختلفة .

### 1. التوربين - (Turbine)

يعتبر التوربين محركاً حرارياً ، تتحول في داخله الطاقة الكامنة للمائع إلى طاقة حركية . وتتحول الطاقة الحركية بدورها إلى طاقة ميكانيكية تعترف على حركة الدوار ، ويجري تحول الطاقة الحرارية للبخر إلى طاقة حركية في القنوات الخانقة ، حيث يتمدد البخار فيها نتيجة لانخفاض الضغط .

إذاً يمكن اعتبار التوربين أنه يتم فيها انخفاض ضغط المائع لإنتاج شغل .  
إن سرعة دخول المائع وخروجه تقريباً متساوية ، أي أنه يمكن إهمال الطاقة الحرارية نظراً

لأن سرعة المائع عالية لذلك ليس لديه الوقت الكافي للتبادل الحراري مع الوسط المحيط لذلك فإنه يمكننا فرض (  $Q = 0$  ) ، كما ويمكن إهمال طاقة الوضع لصغرها بالمقارنة مع بقية الحدود وبتطبيق معادلة الجريان المستمر :-

$$Q = W = m (h_2 - h_1) + \frac{1}{2} (C_2^2 - C_1^2) + g (Z_2 - Z_1)$$

$$- W = m (h_2 - h_1) + 0 + 0$$

فنحصل على :-

$$-W = m (h_2 - h_1)$$

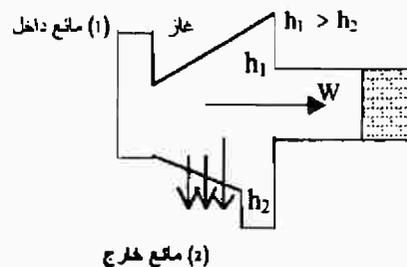
أو

$$W = m (h_1 - h_2)$$

وذلك لأن

$$h_1 > h_2$$

إن الشكل (2.2) يبين كيفية عمل التوربين



الشكل (2.2) - التوربين .

مثال (1-2)

مانع يجري خلال توربين بمعدل كتلته  $45 \text{ Kg / min}$  عند التغير في الأنثالبيا النوعية

$\Delta h = -580 \text{ KJ / Kg}$  ، وفقد التوربين على شكل طاقة حرارية  $Q = -2100 \text{ KJ}$  .

أحسب القدرة الناتجة بواسطة التوربين على فرض أن التغير في الطاقة الحركية وطاقة الوضع مهملة وتساوي الصفر ..

الحل :-

$$Q - W = m (h_2 - h_1)$$

$$-2100 - W = 45 (-580)$$

$$-W = 45 (-580 + 2100)$$

ومنه :-

$$W = 45 (580) - 2100 = 2400 \text{ KJ min}$$

وبالتحويل نحصل :-

$$2400 = 400 \text{ KJ s}$$

2. الضاغط (Compressor).

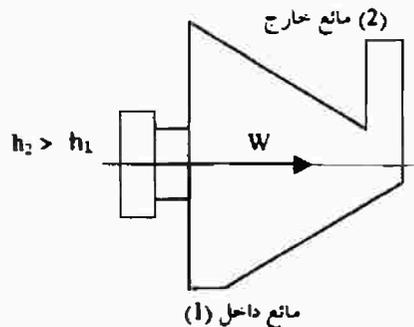
عمل الضاغط هو عكس عمل التوربين إذ يتم إنجاز شغل على المائع داخل الضاغط لزيادة ضغطه وعند تطبيق معادلة الجريان المستمر سوف يكون لدينا نفس التحليل الذي جرى على التوربين والمعادلة النهائية سوف تأخذ الشكل التالي :-

$$-W = m (h_2 - h_1)$$

$$h_2 > h_1 \quad \text{حيث أن :-}$$

والشغل يكون هنا بعكس الشغل الذي يبذله التوربين إشارته سالبة لأنه مبذول على المنظومة .

إن الشكل (3.2) يبين كيفية عمل الضاغط .



الشكل (3.2) الضاغط .

مثال رقم (2.2) .

ضاغط مستلم مانع بمعدل  $45 \text{ Kg / min}$  ، عند الدخول إلى الضاغط كانت الأنتالبييا النوعية  $46 \text{ KJ / Kg}$  وعند الخروج من الضاغط كانت الأنتالبييا النوعية  $175 \text{ KJ / Kg}$  ، والطاقة الحرارية الخارجة من الضاغط إلى المحيط كانت تساوي  $105 \text{ KH / min}$  . أوجد القدرة اللازمة لتدوير الضاغط .

الحل :-

$$v_2 = \frac{v_2}{m} = \frac{0.28}{1.12} = 0.025 \text{ m}^3 \text{ Kg}$$

ثالثاً - الطاقة الحرارية المجهزة :-

$$Q = m (h_2 - h_1)$$

$$h_2 = u_2 - P_2 V_2$$

$$h_2 = 885 + 7.10^2 \cdot 0.28 = 1081 \text{ KJ Kg}$$

$$Q = 1.12 (1081 - 695) = 432.32 \text{ KJ}$$

رابعاً - الشغل وطاقته المبذولة نحصل عليها كما يلي :-

$$W = P (V_2 - V_1)$$

$$= 7.10^2 (0.28 - 0.014) = 186.2 \text{ KJ.}$$

$$Q - W = m (h_2 - h_1)$$

$$-W = m (h_2 - h_1) - Q$$

$$W = -Q - m (h_2 - h_1)$$

$$= \frac{-105}{60} - \frac{45}{60} (175 - 46)$$

$$= \frac{-5700}{60}$$

$$W = -95 \text{ KJ / s}$$

### 3. الغلاية - (Boiler).

تعمل الغلاية ( المرجل ) بشرط الاستقرار حيث يضخ الماء إلى الغلاية عن طريق أنبوب التغذية ، ويتم إضافة حرارة للغلاية عن طريق فرن أو موقد ، ولا يتم إنجاز شغل خلال هذا الإجراء من العملية . وبتطبيق معادلة الجريان المستمر حيث :-

$$Q - W = m \left[ (h_2 - h_1) + \frac{1}{2} (C_2^2 - C_1^2) + g (z_2 - z_1) \right]$$

فإذا كانت الطاقة الحركية وطاقة الوضع ذات قيم صغيرة بالمقارنة مع بقية الحدود فإنها

عادة ما تهمل وتصبح العلاقة السابقة :-

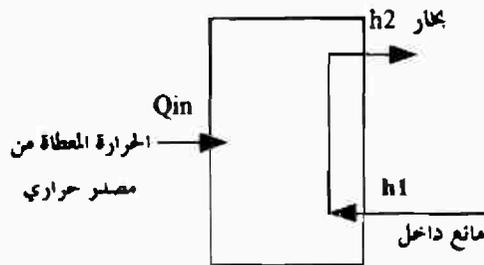
$$Q = m (h_2 - h_1)$$

وتكتب هذه المعادلة كمعادلة معدل . عندما تكون (m) هي عبارة عن تدفق كتلي أي عندما تتسب (m) إلى الزمن فإن Q أيضاً تتسب إلى الزمن حيث :-

$$\dot{Q} = \dot{m} (h_2 - h_1)$$

Q - هو معدل الحرارة المضافة .

الشكل (4-2) يوضح كيفية عمل الغلاية ، والتي تعمل على تحويل السائل ( ماء ، فريون ، أو أمونيا ) إلى بخار .



الشكل (4-2) - الغلاية .

مثال (3-2) .

غلاية تعمل تحت ضغط ثابت يساوي 15 bar فيتم تبخر الماء بمعدل (1000 Kg / ساعة) ، عند دخول المانع إلى الغلاية كانت الأنتالبييا 165 KJ / Kg ، ويغادر الغلاية بأنثالبييا

2200KJ / Kg من خلال أنبوب الخروج للغلاية أعلى أنبوب الدخول — (16m) ، وأن سرعة الدخول للمائع هي 12m / s وسرعة الخروج هي 33m / s . أوجد معدل الطاقة الحرارية المجهزة للغلاية بالواط ( watt) .

الحل :-

$$Q = m [(h_2 - h_1) + \frac{1}{2} (C_2^2 - C_1^2) + g (z_2 - z_1)]$$

$$m = \frac{1000}{360} = 0.277 \text{ Kg } s$$

$$= 0.277 [ (2.035) + \frac{1}{2} (920) \cdot 10^{-3} - 9.8 (16 \cdot 10^{-3}) ]$$

$$Q = 564.311 \text{ KJ } s , [ \text{kw} ]$$

$$X 10^3 = \text{wat} (J / s)$$

4. المكثف - (Condenser).

إن عمل المكثف هو عكس الغلاية من حيث المبدأ والعمل ، ففي المكثف يتم طرح الطاقة الحرارية لكي يتم تكثيف البخار السائل كما هو مبين في الشكل (2-5) ، حيث يمر البخار على الأنابيب المليئة بالماء البارد فيحصل انتقال وتبادل بالحرارة ، أي بمعنى أدق عند ملامسة البخار بالأنابيب الباردة يحصل انتقال الحرارة من البخار إلى داخل الأنابيب وتطبيق معادلة الجريان المستقر حيث :-

$$Q - W = m (h_2 - h_1) + \frac{1}{2} (C^2 - C^2) + g (Z_2 - Z_1)$$

وحيث إن الشغل يساوي صفر ، فإنه يمكن إهمال الطاقة الحركية ، وطاقة الوضع عند مقارنتها مع بقية الحدود

$$Q = m [h_2 - h_1]$$

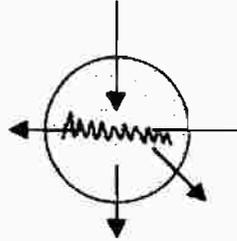
حيث أن :-  $h_2 > h_1$  الانتالبيا عند الدخول

وعندما تكون (m) معدل الجريان عند Q تكون معدل الطاقة الحرارية المطروحة فتصبح العلاقة :-

$$\dot{Q} = \dot{m} (h_2 - h_1)$$

أي أن معدل الحرارة التي ينتزعها ماء التبريد تكافئ النقصان في الانتالبييا الكلية للمادة الشغالة .

أنابيب ماء التبريد  
ماء خارج ساخن



الشكل ( 5-2 )

مثال (4-2) .

مانع يدخل إلى مكثف بمعدل 35Kg / S ، وأنثالبييا 2200 KJ / Kg ويغادر بانثالبييا 255 KJ / Kg ، ماء التبريد يدخل بمعدل 730 Kg / min ، فإذا كان التغير في الانتالبييا النوعية للماء خلال مروره في المكثف 92 KJ / Kg . أحسب معدل الطاقة الحرارية المطروحة إلى الجو .

الحل :-

$$\begin{aligned} Q &= m [h_2 - h_1] \\ &= 35 (255 - 2200) \\ &= -68075 \text{ KJ} / \text{min} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q &= m(h_2 - h_1) \\ &= 730(92) \\ &= 67160 \text{ KJ} / \text{min} \end{aligned}$$

فيصبح المجموع الجبري لكمية الحرارة

$$Q = -68075 + 67160$$

$$Q = -915 \text{ KJ / min}$$

5.البوق – (Nozzie).

البوق هو عبارة عن أنبوبة دائرية مساحة مقطعها متغير . وظيفة البوق هي تحويل الطاقة الحرارية للمادة العاملة إلى طاقة حركة .

حيث يقوم بخفض ضغط المائع أثناء جريانه ويقوم بزيادة سرعته أثناء خروجه من البوق ، وحيث أن الإجراء سريع جداً ولا يكفي لفقدان أو كسب حرارة أي ( تبادل حراري ) وكذلك لا ينجز شغل .

أي :- (  $W = 0$  ) ، وطاقة وضع (  $g (Z_2 - Z_1)$  ) وبتطبيق معادلة الجريان المستقر :-

$$Q - W = m (h_2 - h_1) - \frac{1}{2} (C_2^2 - C_1^2) + g (Z_2 - Z_1)$$

$$0 - 0 = m (h_2 - h_1)$$

$$- m (h_2 - h_1) = + \frac{1}{2} m (C_2^2 - C_1^2) + 0$$

$$- m (h_2 - h_1) = \frac{1}{2} m (C_2^2 - C_1^2)$$

$$- (h_2 - h_1) = \frac{1}{2} C_2^2$$

$$C_2^2 = 2 (h_1 - h_2)$$

$$C_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)}$$

$$C_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)}$$

وهذه العلاقة الأخيرة تسمى معادلة سرعة خروج المائع من البوق

أما الناشر فيتم العكس للعملية المنجزة خلال مرور المائع في البوق و بإجراء العمليات الحسابية في معادلة الجريان المستقر تصبح سرعة الخروج (C2) صغيرة جداً بحيث يمكن إهمالها لذلك تصبح معادلة وسرعة دخول المائع إلى الناشر هي :-

$$C_1 = \sqrt{2(h_1 - h_2)}$$

6. الخنق -

في هذه العملية يتم خفض الضغط وذلك خلال مروره عبر فتحة متطابقة مثلاً مرور مائع خلال الصنوبر أو سداد ، صمام ، حيث لا يتم إنجاز شغل بل يؤدي ذلك إلى خنق لهذا المائع أو الغاز وبكل تأكيد انخفاض في ضغطه . وأن التغير في سرعة الدخول والخروج يمكن إهماله ، ولا يكون هناك أيضاً فقدان في الحرارة أو الطاقة الحركية ، وبذلك تكون معادلة الجريان المستقر :-

$$Q - W = m (h_2 - h_1) + \frac{1}{2} (C_2^2 - C_1^2) + g (Z_2 - Z_1)$$

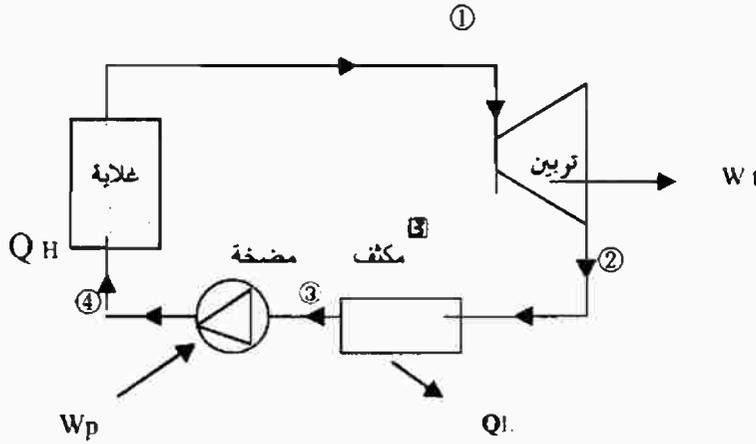
$$0 = m (h_2 - h_1)$$

ومنه:-

$$mh_2 = mh_1$$

$$h_2 = h_1$$

إن التطبيقات السابقة المدروسة لا توجد بشكل منفصل كما أشرنا سابقاً وإنما توجد ضمن منظومة ، مجمعة بتسلسل معين ومكونة منظومة يمكن الاستفادة منها في كثير من العمليات الصناعية كما هو مبين مثلاً في الشكل (2-6) والذي يُمثل محطة بخارية بسيطة .



الشكل (2-6) محطة بخارية بسيطة

يمر المائع بسلسلة من الإجراءات المتصلة عند عمل المحطة البخارية البسيطة وهي عبارة عن مجموعة التطبيقات المشار إليها سابقاً عند دخول الماء إلى الغلاية بضغط ودرجة حرارة معينة يخرج منها على شكل بخار متوجهاً إلى التوربين حيث يدخل فيه بضغط عالي ويخرج منه بضغط منخفض أي بعد تمدد البخار داخل التوربين وذلك مؤدياً إلى إنتاج شغل .

يدخل بالتالي البخار الخارج من التوربين إلى المكثف بضغط منخفض إذ يتكاثف البخار بداخله وذلك بطرح حرارة من المكثف إلى الخارج (Q\_c) حيث يتحول البخار إلى ماء ويذهب إلى خزان ومنه إلى مضخة التغذية التي تقوم برفع الماء إلى ضغط ودرجة حرارة اللازمة إلى الدخول إلى الغلاية (المرجل) .

إن كل عنصر من عناصر المختلفة أو ما يسمى (بالدارة) يعمل بنظام مفتوح ومعادلة الطاقة لكل عنصر هي:-  
 بالنسبة للغلاية المرجل :-

$$Q_{1-2} = m (h_2 - h_1)$$

بالنسبة للتوربين :-

$$W = m (h_2 - h_1)$$

بالنسبة للمكثف :-

$$Q_{3-4} = m (h_4 - h_3)$$

بالنسبة للمضخة :-

$$W = m (h_1 - h_4)$$

في حالة الدورة المغلقة نحصل على :-

$$Q - W = 0 \quad \Rightarrow \quad Q = W$$

$$(Q_{1-2} + Q_{3-4}) - \sum W = \sum Q - \sum W = 0$$

8.2. السعة الحرارية .

السعة الحرارية عبارة عن قيمة فيزيائية عامة بمعرفتها يمكن تحديد كمية الحرارة المعطاة إلى الجسم أو كمية الحرارة المأخوذة منه وكذلك تغير طاقته الداخلية .  
 إن السعة الحرارية النوعية ( أو ببساطة السعة الحرارية ) هي كمية الحرارة التي يلزم تقديمها لوحدة كمية المادة في العملية المعطاة ، لكي تتغير درجة حرارتها بمقدار درجة مئوية واحدة .

وبما أنه يمكن اعتماد وحدة كمية المادة على إنها (1Kg) أو (1mol) أو (1 m<sup>3</sup>) فإننا نميز السعة الحرارية الكتلية ( J / Kg . K<sup>0</sup> ) ، ( C ) ، والسعة الحرارية المولية ( J / mol . K<sup>0</sup> ) ، ( M<sub>C</sub> ) أو السعة الحجمية ( J / m<sup>3</sup> . K<sup>0</sup> ) ، ( C' ) ، وإذا عرفنا إحدى هذه السعات الحرارية يمكننا حساب السعات الأخرى بموجب العلاقتين التاليتين :-

$$C' = c/v \dots\dots\dots(27.2)$$

$$c = \mu c / \mu \dots\dots\dots(28.2)$$

حيث:- (v) الحجم النوعي للمادة ،  $\mu$  - الكتلة الجزيئية ( المولية) وينتج من تعريف السعة الحرارية إن :-

$$c = q \cdot (T_2 - T_1) \dots\dots\dots(29.2)$$

حيث أن:- q - الحرارة المعطاة للجسم أثناء عملية ما ،  $(T_2 - T_1)$  - تغير درجة الحرارة أثناء هذه العملية ، وكما ذكرنا سابقاً بأن الحرارة q لا تتعلق فقط بالحالتين الأولية والنهائية للمنظومة فحسب ، بل وتتعلق أيضاً بطبيعة العملية ، وبالتالي فإن السعة الحرارية التي تتمدد بموجب العلاقة (29-2) يجب أن تتعلق بطبيعة العملية .

فعلى سبيل المثال في العملية الأديباتية لا تعطى كما نعلم الحرارة للنظام ولا تسحب منه أي أن ( q = 0 ) لذا فإن السعة الحرارية تساوي في هذه الحالة الصفر . وفي العملية التي تجري مع ثبات الحجم مثلاً يكون الشغل مساوياً للصفر ( W = 0 ) حيث تُصرف الحرارة بكاملها على زيادة الطاقة الداخلية للنظام حيث :-

$$q = u_2 - u_1 \dots\dots\dots(30.2)$$

وبتعويض ذلك في العلاقة (29.2) نحصل على السعة الحرارية للنظام في عملية ثبات الحجم ، وهي تسمى بالسعة الحرارية عند ثبات الحجم :-

$$c_v = (u_2 - u_1) \cdot (T_2 - T_1) \dots\dots\dots(31.2)$$

وفي ما يسمى بالعملية ( الأيزوبارية ) يكون الضغط ثابتاً ، لذا فإن كمية الحرارة (q) بموجب القانون الأول للديناميكا الحرارية يمكن أن تكون في نهاية العملية :-

$$q = h_2 - h_1 \dots\dots\dots(32.2)$$

أما السعة الحرارية عندئذ فتدعى بالسعة الحرارية عند ثبات الضغط :-

$$c_p = (h_2 - h_1) / (T_2 - T_1) \dots\dots\dots(33.2)$$

وتدل التجارب على أن السعة الحرارية عند ثبات الضغط لا يمكن أن تكون أقل من السعة الحرارية عند ثبات الضغط الحجم أي أن :-

$$c_p \geq c_v \dots\dots\dots(34.2)$$

كما ويمكن حساب كمية الحرارة (q) عند ثبات الحجم بموجب الطاقة الداخلية :-

$$q = u_2 - u_1 \dots\dots\dots(35.2)$$

أو بموجب السعة الحرارية عند ثبات الحجم حيث :-

$$q = c_v (T_2 - T_1) \dots\dots\dots(36.2)$$

من النادر ما تستخدم العلاقتان السابقتان (35.2) ، (36.2) عندما لا تتوفر جداول الأنتالبيا h ، والطاقة الداخلية u.

## 9.2. العمليات الترموديناميكية والمسارات المختلفة .

يعود الدور الرئيسي في الهندسة الحرارية والديناميكا الحرارية وتطبيقاتها " للعمليات الترموديناميكية " وطرق حسابها . حيث أن حساب العمليات الترموديناميكية يعنى تحديد جميع البارامترات في بداية العملية ونهايتها وتحديد الحرارة والشغل ، وكذلك تمثيل هذه العملية على المخططات الترموديناميكية ( مثلًا على المخطط -  $pov$  ).

وكما أشرنا سابقاً فإنه توجد عدة طرق لانتقال الحرارة والحصول على شغل وتسمى هذه الطرق المختلفة والعديدة بالعمليات أو الإجراءات الترموديناميكية .

عند دراسة هذه العمليات نستخدم كل من معادلة الحالة العامة للغازات المثالية :-  
 $PV = RT \dots\dots\dots(37.2)$

ومعادلة القانون الأول للديناميكا الحرارية :-

$$dq = du + p \cdot dv \dots\dots\dots(38.2)$$

$$dq = dh - vdp \dots\dots\dots(39.2)$$

في علم الديناميكا الحرارية توجد خمسة عمليات حسابية للغاز المثالية هي :-

1- عملية ثبات الحجم ( Constant Volume process )

تعرف عملية ثبات الحجم بالعملية " الايزوكورية " ( Isochoric ) الشكل ( 7.2 )

ولحالتين اختياريين من العملية الايزوكورية نحصل بالنسبة للغاز المثالي على مايلي :-

$$P_2 / P_1 = T_2 / T_1 \dots\dots\dots(40.2)$$

وبما أن حجم الغاز في عملية ثبات الحجم لا يتغير أي أن  $(v_1 = v_2)$  فإن الشغل

$( w = 0 )$  ، أما الحرارة التي تتحدد بقانون الديناميكا الحرارية الأول :-

$$q = u_1 + u_2 + w \dots\dots\dots(41.2)$$

ومنه نحصل على :-

$$q = u_2 - u_1 \dots\dots\dots(42.2)$$

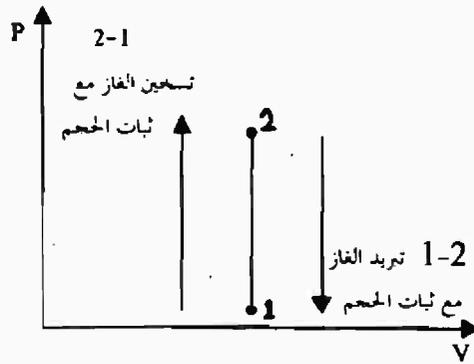
ويمكن عند عدم توفر جداول الطاقة الداخلية الاستعانة بالعلاقة التالية :-

$$q = C_v (T_2 - T_1) \dots\dots\dots(43.2)$$

وإذا اشتركت في العملية كمية الغاز ( M (Kg) ، فإن كمية الحرارة تكون:

$$Q = mq$$
$$= m C_v (T_2 - T_1) \dots\dots\dots(44.2)$$

ويتم تمثيل عملية ثبات الحجم على المخطط P,V بخط عمودي ، ويدعى بالخط الأيزوكوري . وتكون العملية 2-1 الشكل ( 7-2 ) عبارة عن تسخين الغاز مع ثبات الحجم ، وهي تترافق بتقديم الحرارة وتكون العملية 1-2 عبارة عن تبريد الغاز مع ثبات الحجم وهي تترافق بسحب الحرارة .



الشكل ( 7 - 2 ) عملية ثبات الحجم

أن كمية الحرارة المتبادلة بين المنظومة والوسط المحيط بها لا تتوقف على نوع المنظومة - مفتوحة أو مغلقة - وتساوى التغير في الطاقة الداخلية للمادة المشغالة أي أن:-

$$Q_v = \Delta u \dots\dots\dots(45.2)$$

2. عملية ثبات الضغط ( Constont Pressure Process ) .

تعرف عملية ثبات الضغط بالعملية " الايزوبارية " ( Isobaric ) الشكل ( 2-8 )  
ولحالتين اختياريتين من عملية الايزوبارية :-

$$Pv_1 = RT_1 \ ; \ Pv_2 = RT_2 \dots\dots\dots(46.2)$$

وبالقسمة على بعضها البعض نحصل على العلاقة بين البارامترات في عملية ثبات  
الضغط للغاز المثالي :-

$$v_2 / v_1 = T_2 / T_1 \dots\dots\dots(47.2)$$

ويحصل في عملية ثبات الضغط الشكل ( 2-8 ) أما تقديم الحرارة التي تصرف على  
زيادة الطاقة الداخلية للغاز ( تسخينه ) وتتجز شغل ( الغاز يتمدد ) ، أو سحب الحرارة ،  
والغاز عندئذ يبرد وينضغط ( أي يتعرض الغاز لإتجاز شغل عليه ) ويكون شغل عملية  
ثبات الضغط.

$$W = P ( v_2 - v_1 ) \dots\dots\dots(48.2)$$

ومن أجل الغاز المثالي :-

$$Pv = RT$$

لذا فإنه يمكن تحويل العلاقة ( 48.2 ) كما يلي :-

$$W = P ( v_2 - v_1 ) = Pv_2 - Pv_1 = RT_2 - RT_1 = R ( T_2 - T_1 ) \dots\dots(49.2)$$

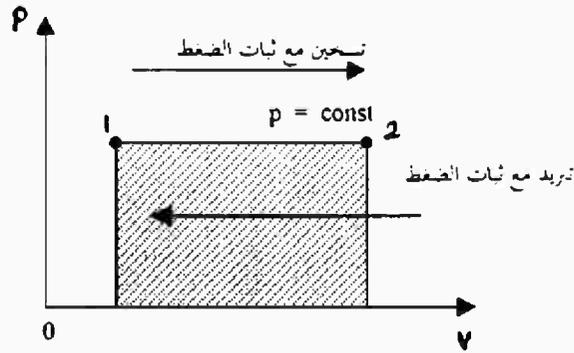
ويمكن تحديد كمية الحرارة المقدمة للغاز ( أو المسحوبه منه ) من القانون الأول  
للديناميكا الحرارية كما يلي :-

$$\begin{aligned} q &= u_2 - u_1 + W = u_2 - u_1 + P ( v_2 - v_1 ) \\ &= ( u_2 + Pv_2 ) - ( u_1 + Pv_1 ) \\ &= h_2 - h_1 \end{aligned}$$

وهكذا فإن كمية الحرارة في عملية ثبات الضغط تساوي الفرق في الانتالبيا  
 وإذا كانت عملية ثبات الضغط تجري على  $m(\text{Kg})$  من الغاز ، يكون لدينا :-

$$W = mw , Q = mq$$

وبما أن الضغط ثابت  $p = \text{const}$  في العملية الايزوبارية ، فإن هذه العملية سوف  
 تتمثل على المخطط -  $v$  ;  $p$  الشكل (8-2) على شكل خط مستقيم : التسخين مع ثبات  
 الضغط (المرحلة 1-2) وتمثل المساحة المظللة شغل عملية ثبات الضغط .



الشكل (8-2) عملية ثبات الضغط للغاز المثالي .

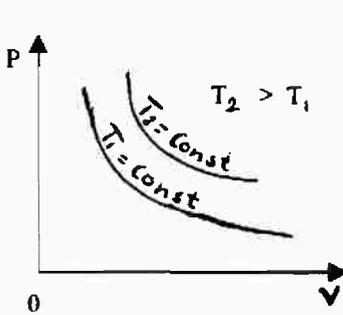
3. عملية ثبات درجة الحرارة بالعملية " الايزوترمية " ( Isothermal ) الشكل (8-2) .  
 حيث تبقى درجة الحرارة ثابتة (  $T = \text{const}$  ) وتكون العلاقة بين البارامترات من أجل عملية  
 ثبات درجة الحرارة للغاز المثالي هي :-

$$pV = \text{const}$$

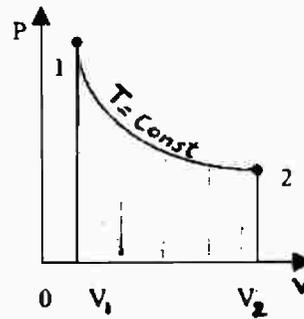
أو :-

$$P_1 v_1 = P_2 v_2 \ ; \ P_1 / P_2 = v_2 / v_1 \dots \dots \dots (50.2)$$

ويبدو من معادلة (50.2) إن المنحنى البياني لثبات درجة الحرارة على المخطط  $P$  و  $V$  الشكل (9-2) . هو عبارة عن قطع زائد . وتكون العملية (1-2) عبارة عن التمدد الايزوثيرمي . وأن المنحنى البياني لثبات درجة الحرارة ، الذي يوافق الدرجة الأعلى من الحرارة ، يكون أعلى من سابقه ، وذلك لأن  $pV = RT$  الشكل (10-2) .



الشكل (10-2) الوضع المتبادل لمنحنيات ثبات درجة الحرارة للغاز المثالي .



الشكل (9-2) عملية ثبات درجة الحرارة للغاز المثالي .

وبما أن الطاقة الداخلية للغاز المثالي تتعلق فقط بدرجة الحرارة ، فإن الطاقة الداخلية عند عملية ثبات درجة الحرارة لا تتغير ، إذا  $u_2 = u_1$  ، إذا  $u_2 - u_1 = 0$  . وفي هذه الحالة ، كما ينص القانون الأول للديناميكا الحرارية تصرف كمية الحرارة المعطاة للنظام بكاملها على إنجاز شغل حيث :-

$$q = W \dots \dots \dots (51.2)$$

وكما أشرنا سابقاً ، فإن المساحة الواقعة تحت منحنى العملية على المخطط  $P$  و  $V$  تمثل شغل التمدد . وطبقاً للعلاقة (51-2) تكون المساحة المضللة على الشكل (9-2)

مساوية لشغل عملية ثبات درجة الحرارة ولكمية الحرارة المعطاة أثناء هذه العملية وتحسب كمية الحرارة والشغل الذي ينجزه الغاز أثناء عملية ثبات درجة الحرارة ، بموجب العلاقة التي يتم الحصول عليها رياضياً :-

$$q = w = 2.3 RT \text{ Log}(v_2/v_1) \dots \dots \dots (52.2)$$

أو باستخدام معادلة بويل (50.2) :-

$$q = w = 2.3 RT \text{ Log}(P_1/P_2)$$

ومن أجل كمية اختيارية من الغاز ( m , Kg ) تقوم بعملية ثبات درجة الحرارة :-

$$Q = W = m w \dots \dots \dots (53.2)$$

#### 4. العملية الاديباتية (Adiabatic Process) .

( عملية ثبات كمية الحرارة )

العملية الاديباتية هي العملية التي لا يصحبها تبادل حرارة بين الجسم العامل والوسط المحيط بها . ولكي نضمن جريان هذه العملية  $q = 0$  ، يجب أن تجري بسرعة . وبما أن  $q = 0$  في العملية الاديباتية ، ينتج من القانون الأول للديناميكا الحرارية إن شغل العملية الاديباتية .

$$W = u_1 - u_2$$

$$Pv^k = \text{const} \dots \dots \dots (55.2)$$

حيث :  $K = C_p / C_v$  دليل المنحنى الاديباتي للغاز المثالي . وعليه ، فمن أجل حالتين اختياريتين يكون لدينا :-

$$P_1 v_1^K = P_2 v_2^K \dots \dots \dots (56.2)$$

أو :-

$$P_2 / P_1 = (v_1 / v_2)^K ; v_2 / v_1 = (P_1 / P_2)^{1/K} \dots \dots \dots (57.2)$$

وإذا عوضنا في الصيغة (56.2) نحصل على :-

$$T_1 v_1^{K-1} = T_2 v_2^{K-1} \dots \dots \dots (58.2)$$

وإذا عوضنا في المعادلة (56.2)  $v = RT/p$  نحصل على :-

$$T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(K-1)/K} \quad ; \quad P_2/P_1 = (T_2/T_1)^{K/(K-1)}$$

ومن الضروري اعتماد القيم المتوسطة للدليل عند حساب العمليات الاديباتية حيث :-

$$K = c_p/c_v = (h_2 - h_1)/(u_2 - u_1) \dots\dots\dots(60.2)$$

وتوجد قيم الانثالپيا  $h$  والطاقة الداخلية  $u$  من الجداول والمراجع الملحقة .

وبالرغم من أن الصيغة (54.2) هي أبسط وأدق صيغة لحساب شغل العملية الاديباتية ، تستخدم أحياناً المعادلات التي يكون فيها الشغل مرتبطاً بعلاقة البارامترات ( $P$  ,  $V$  ,  $T$ ) العملية الاديباتية حيث ينتج من الصيغ السابقة :-

$$w = u_2 - u_1 = c_v (T_1 - T_2) \dots\dots\dots(61.2)$$

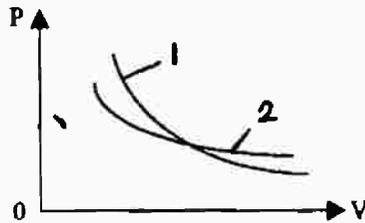
وفي النهاية نحصل على الصيغة التالية لشغل العملية الاديباتية :-

$$w = R (T_1 - T_2)/(K-1) \dots\dots\dots(62.2)$$

وإذا كانت العملية الاديباتية تتجز من قبل ( $m$  , Kg) من الغاز ، فإن الشغل الكلي يكون :-

$$W = mw$$

وبمقارنة المعادلات الأساسية للعمليات الاديباتية ( $PV^K = \text{const}$ ) والعمليات الايزوترمية ( $PV = \text{const}$ ) يمكن أن نستنتج أن المنحنى الاديباتي (1) للغاز المثالي سيكون أشد ميلاً على المخطط -  $P$  و  $v$  من المنحنى الايزوترمي (2) كما هو مبين في الشكل (11-2)



الشكل (11.2) - الوضع المتبادل للمنحنى الاديباتي ومنحنى ثبات درجة الحرارة للغاز المثالي على المخطط -  $P$  و  $v$  .

## 5. العملية البوليترودية (Polytropic Process).

تطلق أسم العملية البوليترودية على العملية التي تلبي جميع حالاتها الشرط التالي :-

$$p v^n = \text{const} \dots\dots\dots(63.2)$$

حيث  $n$  عدد ثابت للعملية المعطاة ، يدعى بدليل المنحنى البوليترودي ، وهو يأخذ أية قيمة كانت .

وتعتبر عمليات ثبات الحجم وثبات الضغط وثبات درجة الحرارة وثبات كمية الحرارة للغاز المثالي ، كحالات خاصة للعملية البوليترودية ، ففي عملية ثبات الحجم (  $v = \text{const}$  ) تكون قيمة  $n = \pm \infty$  ، وفي عملية الضغط (  $p = \text{const}$  )  $n = 0$  ، وفي ثبات كمية الحرارة (  $p v^k = \text{const}$  )  $n = k$  .

وبإعطاء قيم متنوعة يمكن الحصول على عمليات بوليترودية مختلفة ، وبالفعل يمكن أن نمرر عبر النقطة A مجموعة من المنحنيات التي تختلف عن بعضها فقط بقيمة  $n$  . ويبدو من الشكل (2-12) كيف تتغير  $n$  بشكل انسيابي عند الانتقال من منحنى إلى آخر ، وليس من الصعب تصور المنحنى البوليترودي ذي القيم المتنوعة لـ  $(n)$  على المخطط -  $p, v$  .

كما ويمكن الحصول على العلاقات بين البارامترات (  $p, v, T$  ) ، في العملية البوليترودية ، باستخدام المعادلة الأساسية (63.2) للعملية البوليترودية ، والمعادلة الحرارية لحالة الغاز المثالي : معادلة كلايرون - مندليف - (  $p v = RT$  ) وبما أن معادلة العملية البوليترودية (63.2) لها نفس الشكل الذي تملكه معادلة العملية الأديباتية (  $p_1 v_1^K = p_2 v_2^K$  ) فإن علاقة البارامترات ستكون متشابهة لما في الصيغ (56.2) ، (59.2) حيث يوضع دليل المنحنى البوليترودي  $n$  بدلاً من دليل المنحنى الأديباتي  $K$  :

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n ; p_2/p_1 = (v_1/v_2)^n ; v_2/v_1 = (p_1/p_2)^{1/n} \dots\dots(64.2)$$

ويحسب كذلك شغل العملية البوليترودية بموجب الصيغ المشابهة لصيغ العملية الأديباتية حيث :-

$$W = R (T_1 - T_2) / (n-1) = RT_1 (1 - (v_1/v_2)^{n-1}) / n-1 =$$

$$RT_1 (1 - (p_2/p_1)^{(n-1)/n}) / (n-1) \dots \dots \dots (56.2)$$

$$W = m w$$

حيث  $w$  :

تحدد العملية البوليتروبية بموجب الصيغة

$$q = n (T_2 - T_1) \dots \dots \dots (66.2)$$

حيث  $C_n$  السعة الحرارية الكتلية للعملية البوليتروبية .

فمن أجل العملية الايزوبارية ( عملية ثبات الضغط )  $C_n = C_v$  أما من أجل العملية

الاختيارية البوليتروبية :

$$C_n = C_v (n - k) \dots \dots \dots (67.2)$$

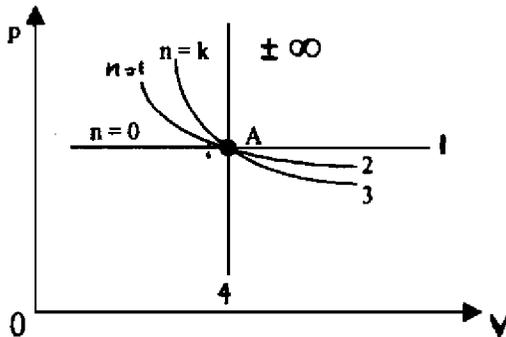
حيث (m) دليل المنحنى البوليتروبي للعملية الجاري حسابها و K دليل المنحنى الادياباتي

للغاز وهو يحدد بالعلاقة (60.2) أو من الجداول بشكل تقريبي .

وإذا كانت العملية البوليتروبية لا تنجز من قبل (1Kg) من الغاز ، بل من قبل m ,

Kg فإن كمية الحرارة الكلية :-

$$Q = m q \dots \dots \dots (68.2)$$



الشكل (12.2) العمليات البوليتروبية للغاز المثالي ( مع ثبات السعة الحرارية ) :-

- 1- منحنى ثبات الضغط .
- 2- منحنى ثبات درجة الحرارة .
- 3- منحنى ادياباتاتي .
- 4- منحنى ثبات الحجم .

## تمارين (2)

س1. بخار ماء بأنبوب قطره الداخلي (0.2m) حيث يدخل إلى تربين عند ضغط (15Mpa) ودرجة حرارة (600 C<sup>0</sup>) وسرعة (100 m/s) . ويخرج بضغط (500 Kpa) ودرجة حرارة (151.86 C<sup>0</sup>) من خلال فتحة أنبوب قطره (0.8m) . فإذا تم إهمال كل من طاقة الوضع والفقد الحراري من التربين . أوجد :-

❖ معدل تدفق بخار الماء	[ 126.12 Kg/s]
❖ سرعة البخار عند فتحة الخروج	[94.1m/s]
❖ القدرة المولدة من التربين	[105.134MW]

س2. صمام خانق (Throttling) يستخدم لخفض ضغط الموائع . أوجد درجة حرارة خروج المائع من الخانق إذا دخل عند درجة حرارة (500C<sup>0</sup>) وضغط (5 Mpa) ، وخرج بضغط (100 kPa) ، وذلك عندما يكون المائع :-

❖ ماء	[490.6 C <sup>0</sup> ]
❖ غاز مثالي	[500C <sup>0</sup> ]

س3. في إجراء تكثيف بمحطة بخارية يدخل بخار ماء إلى مكثف بمعدل تدفق (18Kg/s) عند درجة حرارة (150C<sup>0</sup>) . أوجد معدل الطاقة الحرارية المطروحة خلال مرور البخار بالمكثف ( علماً بأن الإجراء تم عند ضغط ثابت ) .

$$[ - 46.326 \text{ MW} ]$$

س4. في المسألة السابقة ، إذا استخدم ماء سائل بمعدل تدفق (200 kg/s) وذلك لتبريد البخار المار بالمكثف . أوجد مقدار الارتفاع في درجة حرارة هذا الماء علماً بأن السعة الحرارية النوعية للماء للسائل ( C = 4.18 KJ/Kg K ) .

$$[ 55.4C^0 ]$$

س5. محطة بخارية بسيطة تتكون من تربين وغلاية ومكثف ومضخة . فإذا كانت القدرة الناتجة عن التربين (8723 KW) ، ومعدل انتقال الطاقة الحرارية إلى الغلاية (26577 kW) ومن المكثف (18651 Kw) . بافتراض أن الطاقة الحرارية المفقودة من التربين والمضخة يمكن إهمالها ، أوجد :-

- ❖ القدرة المطلوبة لتشغيل المضخة [797 Kw]
- ❖ الكفاءة الحرارية للمحطة البخارية [29.82%]

س6. يتلقى ضغط هواء جوي عند ضغط (95 kPa) ودرجة حرارة ( $20C^0$ ) وبسرعة دخول يمكن إهمالها . وعند مخرج الضاغط كان ضغط الهواء (380 kPa) ودرجة حرارته ( $180C^0$ ) وسرعته (180 m/s) . فإذا كانت القدرة المطلوبة لتشغيل للضاغط (15Kw) . فإذا أهمل الفقد الحراري من الضاغط . فما هو معدل انسياب كتلة الهواء بالضاغط ( $C_p = 1.0035 \text{ kJ/kg K}$ ) .

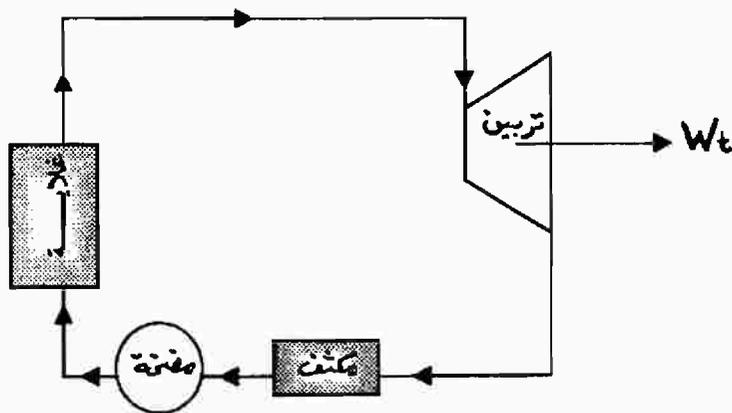
[5.1 Kg/min]

س7. البيانات التالية معطاة لمحطة بخارية بسيطة لتوليد القدرة ( أنظر الشكل المرفق ):

$$P_1 = 6\text{MPa} \quad p_2 = 100 \text{ kPa} \quad P_3 = P_2 \quad m = 30 \text{ kg/s}$$

$$T_1 = 500 C^0 \quad X_2 = 1 \quad P_4 = P_1$$

القدرة المطلوبة لتشغيل المضخة (189.3 KW)



المطلوب :-

- ◀ القدرة الناتجة عن التربين . [22.4MW]
- ◀ معدل انتقال الطاقة الحرارية من المكثف [-67.74 MW]
- ◀ معدل انتقال الطاقة الحرارية إلى الغلاية [89.952 MW]
- ◀ الكفاءة الحرارية للمحطة [η = 24.963 %]

س8. اسطوانة بمكبس حر الحركة تحتوي على ( 5Kg ) من الماء عند ضغط (2 MPa) ودرجة حرارة (300C<sup>0</sup>) يبرد النظام تحت ضغط ثابت إلى أن أصبح كسـر الجفاف (40 %). أوجد :-

1- درجة الحرارة النهائية	2- الحجم الابتدائي	3- الحجم النهائي
4- كتلة البخار في الحالة النهائية	5- كتلة السائل في الحالة النهائية	6- الشغل المبذول
7- كمية الحرارة المنتقلة	8- التغير في الانتروبي	

س9. اسطوانة بمكبس تحتوي على هواء ( غاز مثالي ) كتلته ( 5 Kg ) عند درجة حرارة ( 330 K ) وضغط (100kPa) تعرض لإجراء ضغط إلى أن وصل الضغط إلى (1000 kPa) . أوجد الشغل المبذول وكمية الحرارة المنتقلة والتغير في الانتروبي عندما يكون الإجراء :-

- انعكاسي بولتروبي (n = 1.2)
- انعكاسي أديباتيكي
- انعكاسي عند درجة حرارة ثابتة

(أعتبر للهواء  $C_p = 1.0035 \text{ kJ/Kg K}$  ,  $C_v = 0.7165 \text{ kJ/Kg K}$ )

س10. اسطوانة بها مكبس تحتوي على بخار كتلته 0.5 Kg وحجمه 0.1m<sup>3</sup> عند ضغط 4bar انتقلت الحرارة إلى البخار حتى وصلت درجة الحرارة 300C<sup>0</sup> على حين كان الضغط ثابتاً . أحسب كمية الحرارة والشغل لهذا النظام . مثل هذا الإجراء على (T-V)

س11. اسطوانة تحتوي على مائع كتلته (0.07 Kg) بضغط 1bar وحجم  $0.06m^3$  والطاقة الداخلية النوعية  $200 \text{ kJ/Kg}$  بعد حصول إجراء إنضغاط بولتروبي . أصبح الضغط 9bar ، والحجم  $0.0111m^3$  ، والطاقة الداخلية النوعية للمائع  $370 \text{ kJ/kg}$  .

◆ أحسب :-

1- طاقة الشغل المطلوبة لعملية الانضغاط .

2- كمية الطاقة الحرارية أثناء هذا الإجراء .

س12. حدد الشغل المبذول على الانضغاط الأديباتي (5kg) من الهواء ، وحدد الضغط النهائي إذا ازدادت درجة الحرارة من الصفر إلى  $300C^0$  ، وإذا علمت أن الضغط الأولي  $P_1 = 0.1 \text{ MPa}$  .

س13. حدد الشغل المطلوب للانضغاط البوليتروبي (1.5kg) من الميثان ( $CH_4$ ) من 0.1 حتى  $1 \text{ MPa}$  ، وحدد درجة حرارته النهائية وكمية الحرارة المسحوبة ، إذا كانت درجة الحرارة الأولية  $t_1 = 20 C^0$  ، ودليل المنحنى البوليتروبي  $n = 1.12$  ، والكتلة المولية للميثان  $\mu = 16$  ..