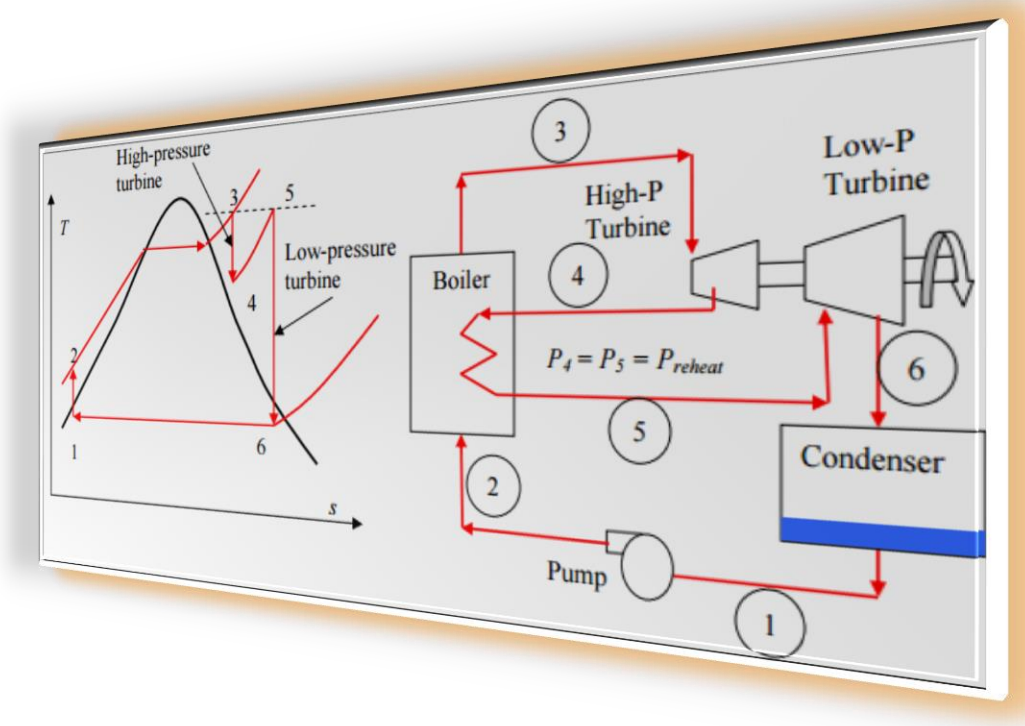
المحطة البخارية



Steam Plant

إعداد وترجمة
المهندس عدنان بهجت جليل

جدول المحتويات Table of Content

الصفحة	الموضوع
٢	تمهيد . المحطة البخارية الأساسية .
٣	مولد البخار أو المرجل .
٤	ملاحظة على المراجل .
٥	ملاحظات توضيحية . التوربين .
٦	ملاحظات توضيحية .
٧	ملاحظات على التوربينات . المكثف .
٨	ملاحظات على المكثف . مضخة التغذية .
٩	المحطة البخارية كمنظومة كاملة .
١٠	المتغيرات .
١١ - ١٤	المحطة البخارية المتقدمة . تسخين ماء التغذية .
١٥	إعادة التسخين .
١٦	إسترجاع أو إسترداد الحرارة – المقتصدات .
١٧	المراجع .

تمهيد Introduction

تم التبشير بتسخير طاقة أو قدرة البخار Steam power خلال الثورة الصناعية Industrial revolution . كانت البداية في أوائل القرن الثامن عشر الميلادي عام (١٧١٢) مع أول محرك بخاري Steam engine أختُرع من قبل المهندس والمخترع البريطاني توماس نيوكمان Thomas Newcomen (١٦٦٤ - ١٧٢٩) . كانت التطورات المبكرة بطيئة للغاية ، حيث تم إستخدام تصميم شركة Newcomen في بريطانيا لما يقرب من (١٠٠ عام) .
يمكن وصف محرك Newcomen بشكل أفضل كمحرك فراغي أو تخلخلي Vacuum engine . حيث كان يتم إنشاء الفراغ بتكثيف البخار . ومع ذلك ، كان المحرك غير فعال Inefficient للغاية ، فقد كان لا بد من إحضار الفحم Coal من مسافة كانت مكلفة لتشغيل المحرك .
في عام (١٧٦٩) حقق المهندس الأسكتلندي جيمس واط James Watt (١٧٣٦ - ١٨١٩) زيادة كبيرة في الطاقة والكفاءة Efficiency مع تطويراته وتحسيناته . فقد قام بإعادة تصميم المحرك بحيث يحدث التكثيف Condensation خارج الأسطوانة Cylinder . هذا يعني أن الأسطوانة لم تفقد الحرارة Heat أثناء كل شوط Stroke . كما سمح بإستخدام المراجل المضغوطة Pressurised boilers وبالتالي الحصول على الطاقة في شوط الصعود Up-stroke بالإضافة إلى شوط النزول Down-stroke .
هذا المحرك أفسح المجال للمحرك البخاري الترددي Reciprocating steam engine والذي تم ترقيته وضبطه إلى درجة عالية . كانت المحركات البخارية ثنائية وثلاثية التمدد Double and triple expansion steam engines شائعة وكان هناك بالكاد طلب على الطاقة الميكانيكية Mechanical energy التي لم يستطع البخار تحقيقها .
ومع ذلك ، كانت المحركات البخارية الترددية معقدة ، وبالتالي لم تكن موثوقة Reliable دائما . في عام (١٨٨٤) أنتج المهندس الإنكليزي الأيرلندي تشارلز بارسونز Charles Parsons (١٨٥٤- ١٩٣١) أول توربين بخاري Steam turbine . ومع إكتشاف العالم الكيمائي والفيزيائي الإنكليزي مايكل فاراداي Michael Faraday (١٧٩١ - ١٨٦٧) المبكر للحث الكهرومغناطيسي Electromagnetic induction عام (١٨٣١) ، بدأ الإستخدام الواسع للكهرباء Electricity . بإلتقاء كلا التقنيتين ومع الشبكة الوطنية National grid ، تم القضاء تدريجيا على الحاجة إلى محطات البخار الخاصة بالمصانع .
اليوم ، يكاد إنتاج الطاقة الميكانيكية بإستخدام البخار يقتصر كليا على توليد الكهرباء Electricity generation .

المحطة البخارية الأساسية Basic steam plant

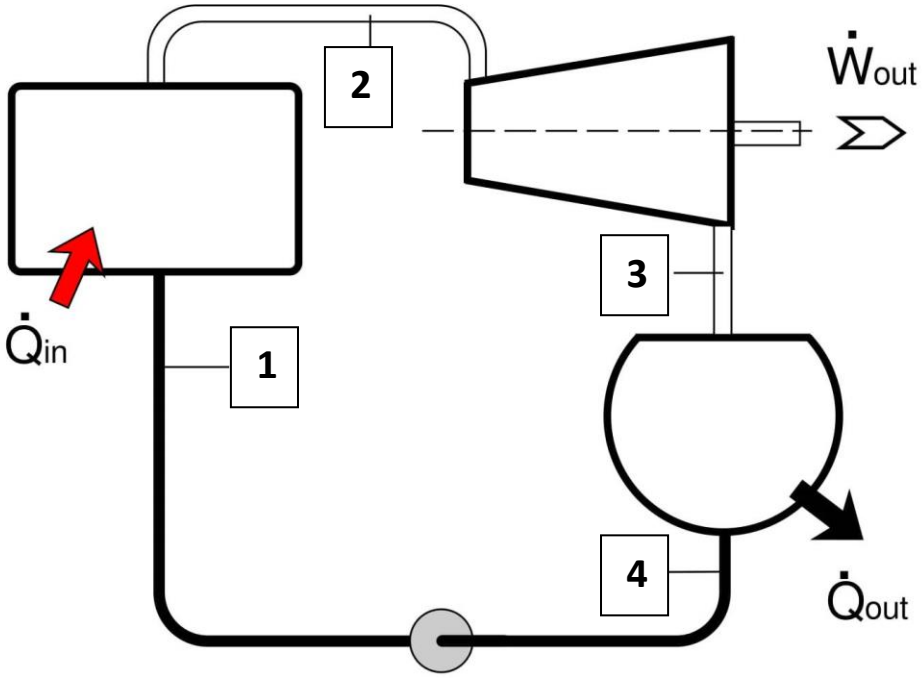
تتكون المحطة البخارية الأساسية من :

1 ⟵ 2 : مولد البخار أو المرجل Steam generator or Boiler .

2 ⟵ 3 : التوربين البخاري Steam Turbine .

3 ⟵ 4 : المكثف Condenser .

4 ⟵ 1 : مضخة التغذية Feed pump .

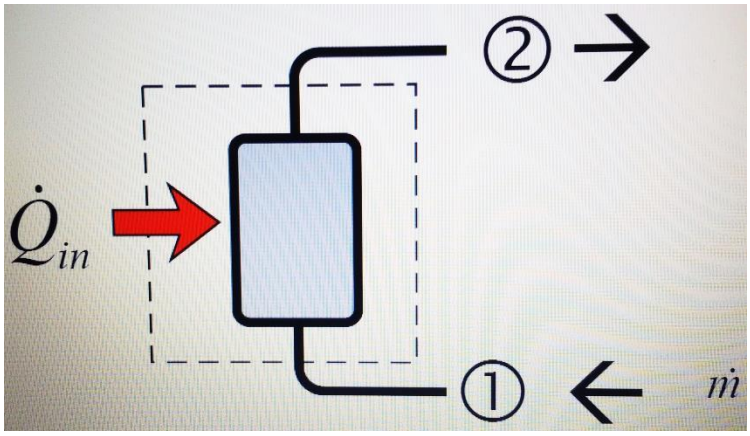


steam بخار

water (condensate) ماء (متكثف)

مولد البخار أو المرجل Steam Generator or Boiler

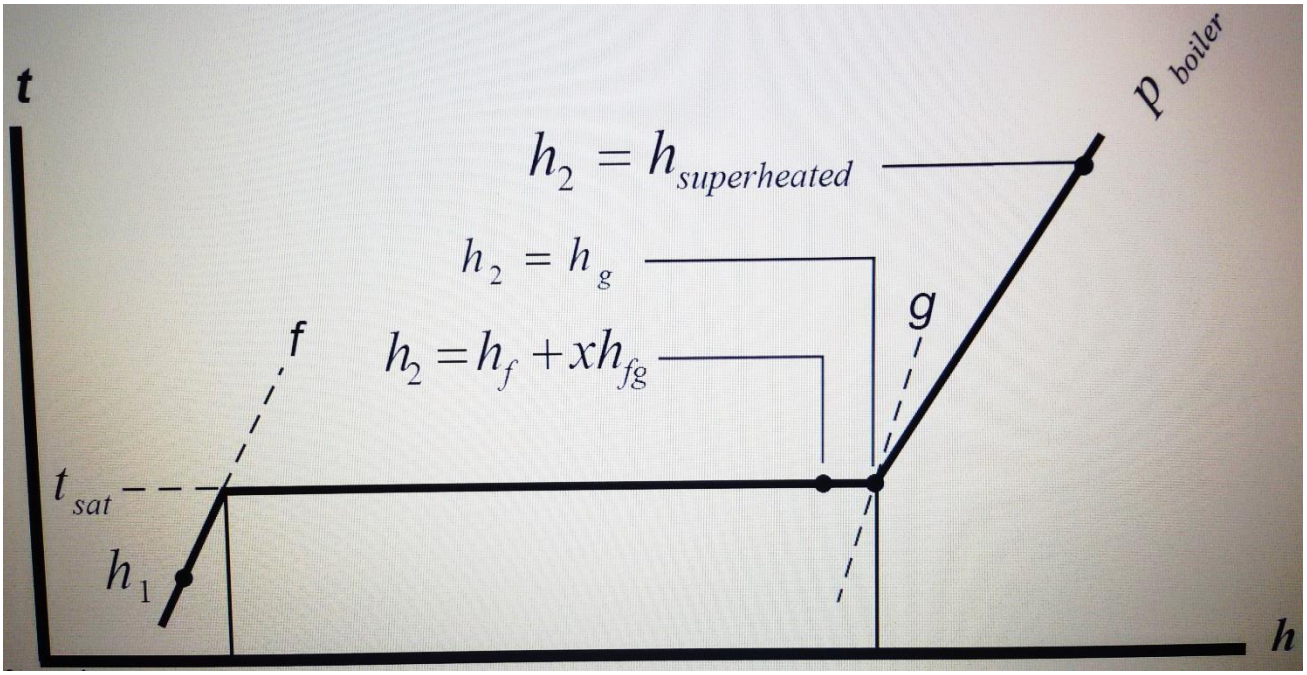
الغرض من المرجل هو تحويل المياه (التي تم ضخها إلى داخله تحت الضغط) إلى البخار . قد يظهر البخار رطبا Wet ، أو جاف مشبع Dry saturated ، أو محمص (شديد السخونة) Superheated إعتمادا على تصميم المرجل Boiler design .



قد نقوم بتحليل المرجل كنظام مفتوح بحالة مستقرة وثابتة Steady State open system بإستخدام معادلة الطاقة للتدفق المستقر Steady State Flow Energy Equation (SSFEE) يكون معدل أنتقال الحرارة Heat transfer rate ($\dot{Q}_{in}$) إلى الماء \ البخار (كيلوجول\ثانية KJ/s) :

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

h_1 هو المحتوى الحراري (الإنثالبي) النوعي أو المحدد Specific enthalpy للمياه غير المبردة Sub-cooled water (أي عند درجة حرارة أقل من درجة حرارة تشبعها Saturation temperature) . ويمكن إيجاده من جداول السوائل المضغوطة غير المبردة Compressed (Subcooled) Liquid Tables ، وعادة ما تكون القيم المشبعة Saturated values (التي في نفس درجة الحرارة) دقيقة بما فيه الكفاية .



ملاحظة على المراجل :

معدل إنتقال الحرارة إلى الماء \ البخار عادة أقل من معدل الطاقة المتحررة (المنبعثة) بواسطة الإحتراق Combustion داخل المرجل ، لذلك قد نُعرف كفاءة المرجل Boiler efficiency على النحو التالي :

$$\eta_{boiler} = \dot{m} (h_2 - h_1) / \dot{m}_{fuel} \times LCV$$

$\dot{m}$ = معدل التدفق الكتلي للماء \ البخار mass flow rate (كغم \ ثانية Kg/s) .
$\dot{m}_{fuel}$ = معدل التدفق الكتلي للوقود Fuel mass flow rate (كغم \ ثانية Kg/s) .
LCV = القيمة الحرارية الدنيا للوقود Lower Heating Value أو Lower Calorific Value وهي كمية الطاقة الناتجة لحرق (١كغم) من المادة (أي كمية الحرارة المتحررة أثناء إحتراقها) . ويتم التعبير عنها بوحدة الطاقة لكل وحدة كتلة أو لكل وحدة حجم من الوقود (كيلوجول\كغم KJ/Kg أو كيلوجول \ م^3 KJ/m^3)

ملاحظات توضيحية :

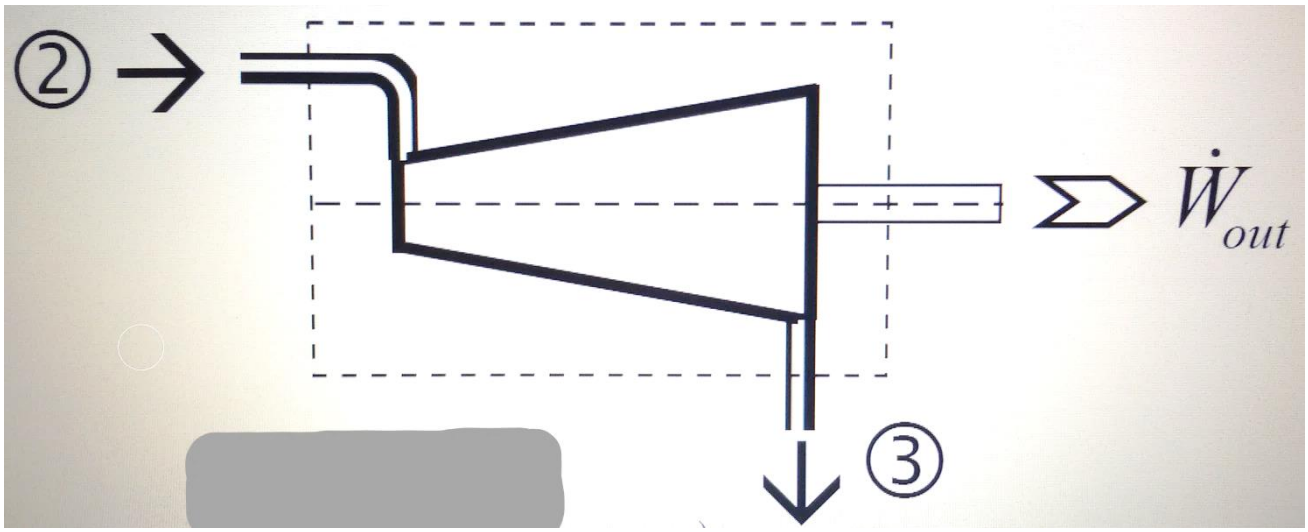
١- الانثالبي Enthalpy : هي المحتوى الحراري للمادة أو هي الطاقة المخزونة نتيجة الضغط ودرجة حرارة للمادة في حالة السريان وهي خاصية للمادة تساوي مجموع الطاقة الداخلية للمادة وطاقة الضغط . وحدة القياس كيلو جول / كيلوغرام KJ/Kg ورمزه H أو h .

٢- النظام المفتوح Open System : هو النظام الذي تسمح حدوده بأنتقال المادة والطاقة (شغل او حرارة) بعملية جريانية ، يسمى بنظام الحجم المحدد ، كالماء في المرجل حيث يمتص حرارة ويفقد جزء من كتلته خلال التبخر . خليط الغازات في اسطوانة محرك احتراق داخلي يتخلص من الحرارة والغازات من خلال العاد م . ان المادة يمكن ان تدخل او تخرج من خلال فتحات ، اما الطاقة فتنتقل عبر الحدود . اذا كانت الكتلة بوحدة الزمن الداخلة والخارجة متساوية فإنها تبقى ثابتة وتسمى بعملية الجريان المستقر كما في التوربين او ضاغط الهواء .

٣- درجة حرارة التشبع Saturation temperature : تشير البيانات الموجودة في جدول البخار المشبع saturated steam table دائما إلى البخار عند نقطة تشبع معينة ، تُعرف أيضا بأسم نقطة الغليان Boiling point . هذه هي النقطة التي يمكن أن تتعايش أو تتكيف فيها المياه (السائلة Liquid) والبخار (الغاز Gas) عند نفس درجة الحرارة والضغط Pressure .

التوربين Turbine

يعمل التوربين البخاري بطريقة مشابهة للتوربين الغازي Gas turbine . يتم إستخدام نفس معادلات الأداء Performance والكفاءة الأساسية بإستثناء أنه لا يمكن التعامل مع البخار كغاز مثالي Perfect gas .



$$\dot{W}_{out} = \dot{m}\,(h_2 - h_3)$$

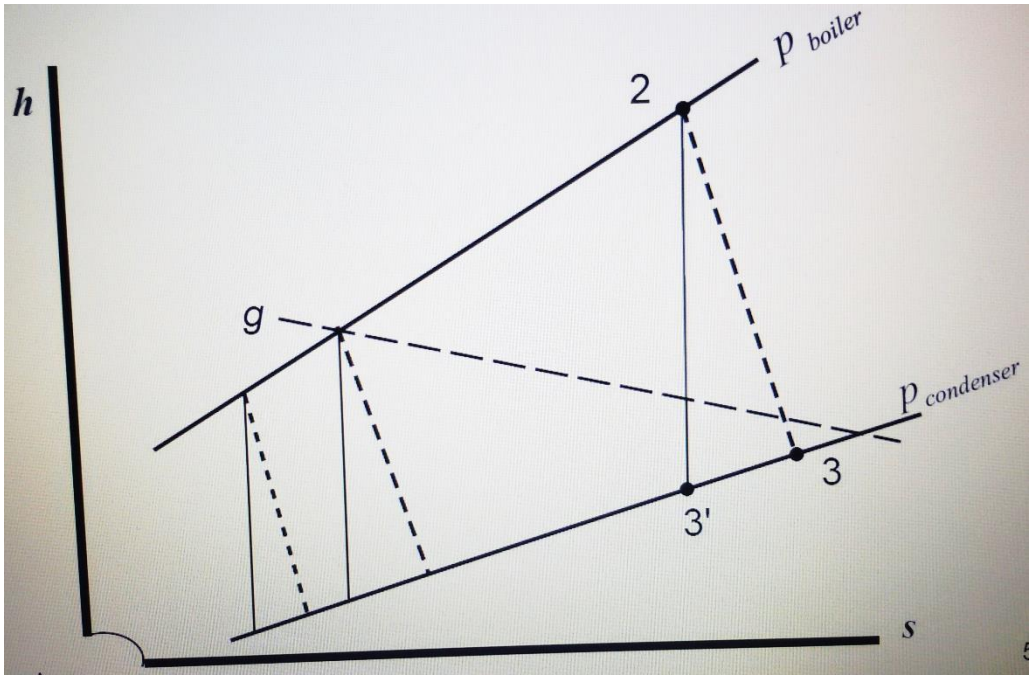
$$\eta_{isen} = \dot{W}_{out} \,/\, \dot{W}_{isen} = \dot{m}\,(h_2 - h_3) \,/\, \dot{m}\,(h_2 - h_{3isen})$$

$$\eta_{isen} = (h_2 - h_3) \,/\, (h_2 - h_{3'})$$

$\dot{W}_{out}$ = الشغل الفعلي المنجز بواسطة التوربين Actual work done by the turbine
(كيلوجول\ثانية KJ/s) = كيلواط KW
η_{isen} = كفاءة تساوي الإنتروبي (الكفاءة المثالية) Isentropic efficiency .
$\dot{W}_{isen}$ = الشغل المنجز المثالي Isentropic work .

h_3 = المحتوى الحراري النوعي للبخار الخارج من التوربين في العملية الفعلية Actual process .
$h_{3isen} = h_{3'}$ = المحتوى الحراري النوعي للبخار الخارج من التوربين في عملية متساوية الإنتروبي (مثالية) .

كما هو الحال مع التوربين الغازي ، يمكن إظهار العملية الديناميكية الحرارية (ثيرموديناميكية) Thermodynamic process على مخطط درجة الحرارة – الإنتروبي (Entropy) T- s Chart ، أو بشكل أكثر فائدة على مخطط الإنثالبي – الإنتروبي (h - s chart) .

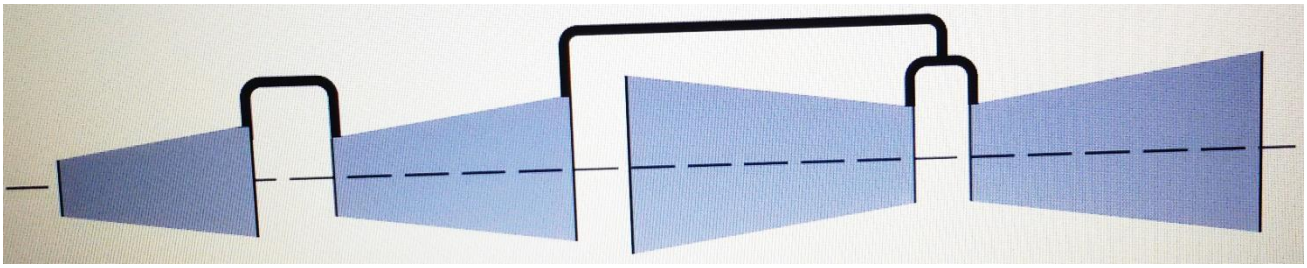


ملاحظات توضيحية :

١- الأنتروبي Entropy : هو مقياس مباشر لخاصية عدم الانتظام (درجة الفوضى ، العشوائية) بين الجسيمات المكونة للنظام (أيونات ، ذرات أو جزيئات) . وحدة القياس كيلو جول / كيلو غرام درجة حرارة كلفن (KJ/Kg K) والرمز S .
خاصية ثيرموديناميكية تصف الى أي مدى تصل درجة الفوضى وعدم انتظام جسيمات النظام ، وتشتت الطاقة المصاحبة لهذه الجسيمات . وهذه الخاصية ترتبط بالحرارة المضافة أو المزالة خلال إجراء معين وكلما كان الانتظام قليلاً في النظام (العشوائية أكبر) كلما كانت قيمة الأنتروبي كبيرة ، وكلما كان النظام أكثر انتظاماً (أقل عشوائية) كلما كانت قيمة الأنتروبي صغيرة .
٢- عملية متساوية الأنتروبي (Isentropic) : وهي العملية التي تتم عند أنتروبي ثابت = ٠ dS . عملية حرارية مثالية تتم بدون فقدان حرارة ومادة بين النظام والمحيط أي لا أحتكاك في العملية .
٣- كفاءة تساوي الإنتروبي (كفاءة الإنتروبية الثابتة) Isentropic efficiency :
تستخدم الإنتروبية الثابتة لحساب كفاءة آلة ميكانيكية حرارية Thermal mechanical machine . وطبقا لقوانين الديناميكية الحرارية لا يمكن الطاقة الحرارية Heat energy أن تتحول بالكامل إلى نوع آخر من الطاقة (مثل الكهرباء Electricity أو طاقة حركية Kinetic energy) ، أي أن :
الطاقة الحرارية = جزء طاقة تحول إلى حركة + جزء طاقة لم يتحول إلى حركة
وكفاءة آلة ميكانيكية تعمل بالحرارة تكون دائما أقل من كفاءة الآلة المثالية . وتستخدم كفاءة الإنتروبية الثابتة بغرض مقارنة تلك العملية بكفاءة آلة واقعية .
في التحليل الهندسي ، كفاءة الإنتروبية الثابتة هي معيار لقياس درجة تدهور الطاقة في أجهزة التدفق الثابت Steady-flow devices . وبالتالي ، فإن العملية المثالية Idealized process للتوربين هي عملية متساوية بين ضغوط الدخول والخروج . والناتج المطلوب من التوربين هو الشغل المنتج Work output .

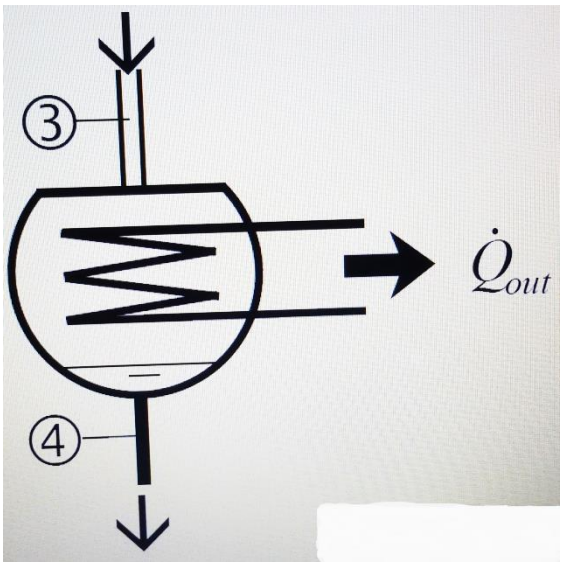
ملاحظات على التوربينات :

عادة ما يكون أداء التوربينات البخارية تابع لحقيقة أن الحجم النوعي Specific volume للبخار يزداد بشكل كبير بينما ينخفض الضغط .
يتم تقسيم التوربين البخاري الكبير النموذجي Typical large steam turbine إلى مرحلة الضغط العالي High pressure stage (HP) والمتوسط Intermediate (IP) والمنخفض Low (LP) الضغط . قد يتم تقسيم مرحلة LP .



المكثف Condenser

يقوم المكثف بإحضار بخار العادم Exhaust steam إلى تماس مع وسط بارد Cool medium (عادة ما يكون ماء بارد) من أجل إزالة الحرارة و تكثيفه مرة أخرى إلى الماء المعروف باسم المتكثف Condensate . من الناحية الديناميكية الحرارية ، فإن المكثف يتصرف بنفس الطريقة التي يتصرف بها المرجل ، ولكن في الإتجاه المعاكس .



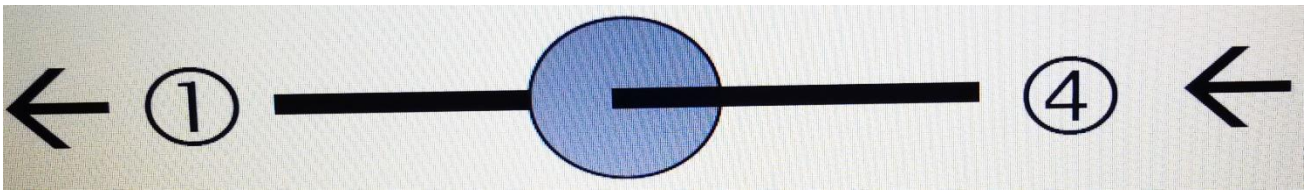
$$Q_{out} = \dot{m} (h_3 - h_4)$$

ملاحظات على المكثف :

١- درجة حرارة ماء التبريد Cooling water temperature تكون عادة في المدى (من ١٠ درجة مئوية C° إلى ٣٠ درجة مئوية) إعتمادا على المصدر Source . وبالتالي ، فإن درجات حرارة التكثيف تتراوح (من ٢٥ درجة مئوية إلى ٤٥ درجة مئوية) . وهذا يعني أن ضغوط التكثيف Condensing pressures تكون في المدى (من ٣ إلى ٨ كيلو باسكال kPa) ، أي أقل تماما من الضغط الجوي Atmospheric pressure . مما يتسبب في حدوث المشاكل مع تسرب الهواء Air leakage إلى داخل المكثفات ، والتي يجب التصدي لها عن طريق إستخدام مضخات التفريغ Vacuum pumps .
٢- البخار المتكثف سوف يترك المكثف عادة كسائل مشبع Saturated liquid عند درجة حرارة التشبع Saturation temperature .

مضخة التغذية Feed pump

هناك حاجة إلى مضخة التغذية لضخ المياه مرة أخرى إلى المرجل . ومن أجل القيام بذلك ، يجب أن ترفع الضغط على الأقل إلى ضغط المرجل Boiler pressure . و تتطلب طاقة ميكانيكية Mechanical energy لتحقيق ذلك ، ولكن بالمقارنة مع الطاقة التي تنتجها التوربين ، فإن الكمية المطلوبة صغيرة جدا ، ويمكن تجاهلها عادة في حسابات كفاءة المحطة Plant efficiency .



لأيجاد متطلبات الطاقة الفعلية Actual power لمضخة التغذية ، نستخدم معادلة الطاقة للتدفق المستقر SSFEE . الإشارة السالبة تشير إلى أن الشغل $\dot{W}_{fp}$ ينجز على النظام (مضخة التغذية) .

$$-\dot{W}_{fp} = \dot{m}\,(h_1 - h_4)\,.$$

$$= \dot{m}\,[(u_1 + p_1 v_1)] - [(u_4 + p_4 v_4)]$$

بما أن درجة حرارة الماء لن تتغير بشكل ملحوظ ، وبما أن الماء غير قابل للإنضغاط Incompressible عمليا

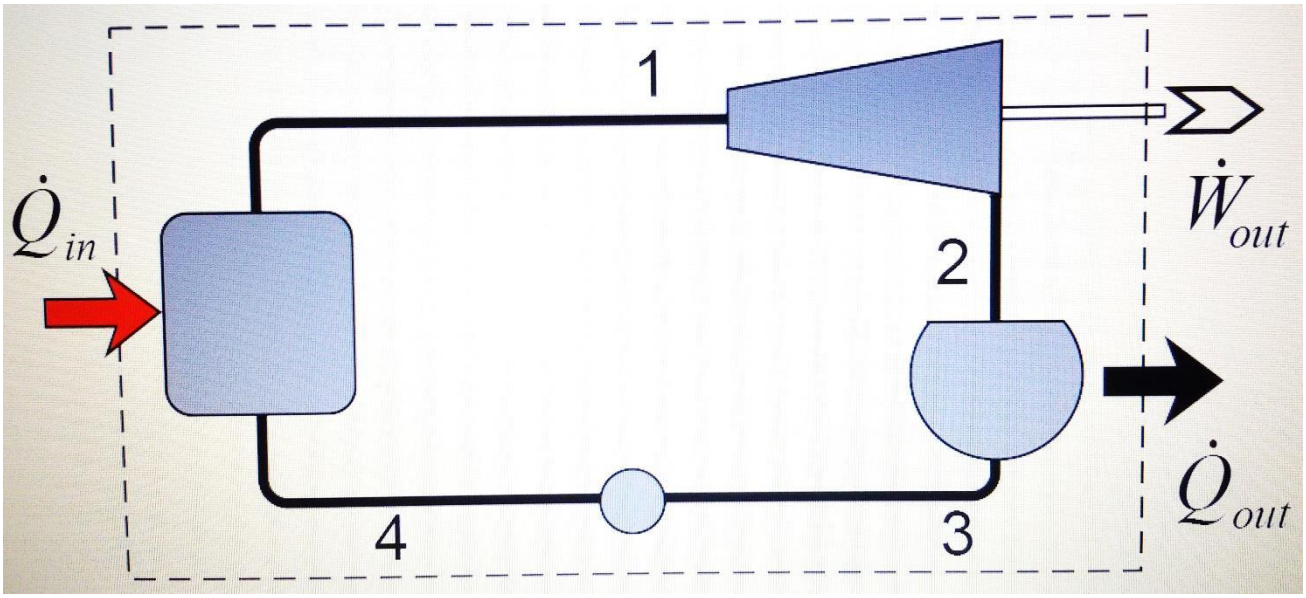
$$u_1 = u_4 \qquad v_1 = v_4$$

$$\therefore \quad \dot{W}_{fp} = \dot{m}\, v_1\,(p_4 - p_1)$$

$$(\dot{W}_{fp} \;/\; \dot{m}) = \Delta h = 0.001 \times (2 \times 10^6) = 2\ KJ/Kg$$

بمقارنة هذه القيمة مع تغير المحتوى الحراري النوعي عبر التوربين ~ (١٠٠٠ كيلوجول \ كغم) ، أي يُهمل .

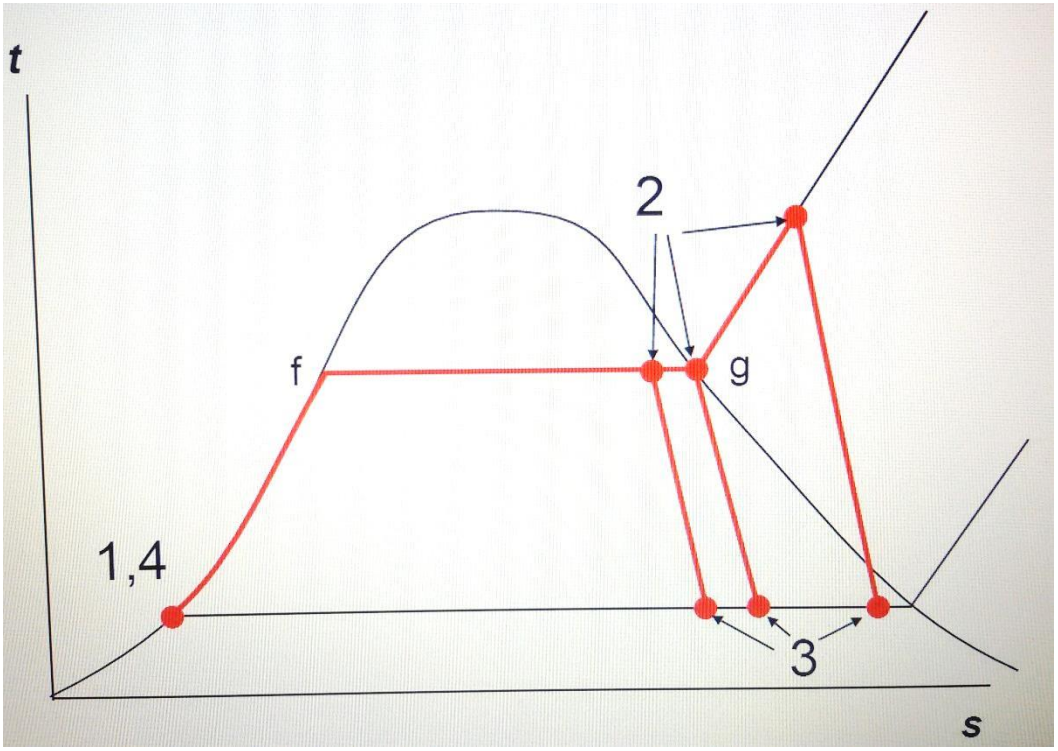
المحطة البخارية كمنظومة كاملة Steam Plant as a complete system

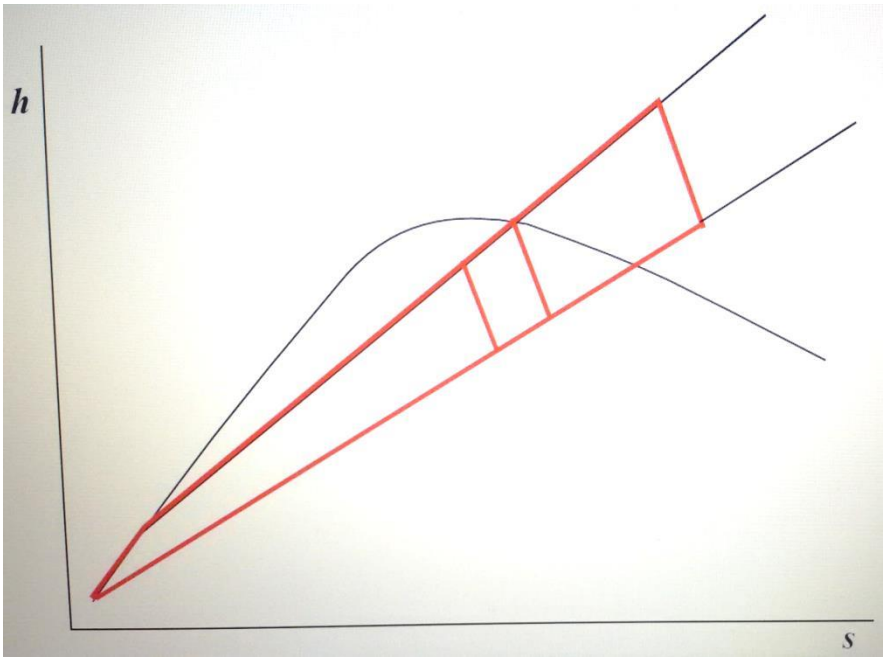


كمحرك أو آلة حرارية Heat engine :

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out}$$

الدورة Cycle أدناه : ($h_2 \leq h_g$ دورة رانكين Rankine Cycle . $h_2 > h_g$ دورة رانكين مع التحميص Superheated Rankine Cycle) .





الكفاءة الحرارية للدورة Cycle thermal efficiency
(بأهمال قدرة مضخة التغذية Feed pump power) :

$$\eta_{th} = \dot{W}_{out} \;/\; Q_{in} = \dot{m}\,(h_2 - h_3) \;/\; \dot{m}\,(h_2 - h_1)$$

أي أن :

$$\eta_{th} = \dot{m}\,(h_2 - h_3) \;/\; \dot{m}\,(h_2 - h_1)$$

المتغيرات Variables :

(Q_{in}) و (Q_{out}) = معدل تدفق (إنتقال) الحرارة إلى أو من النظام (وحدة طاقة لكل وحدة زمنية) .
Heat flow rate to or from the system (energy per unit time)

$\dot{m}$ = معدل تدفق الكتلة (وحدة الكتلة لكل وحدة زمنية) Mass flow rate (mass per unit time) .

($\dot{W}_{out}$) و ($\dot{W}_{fp}$) = الطاقة الميكانيكية المجهزة (الناتجة) أوالمستهلكة في النظام (وحدة طاقة لكل وحدة زمنية)
Mechanical power provided by or consumed in the system (energy per unit time)

η_{th} = الكفاءة الحرارية للعملية (ناتج القدرة الصافي لكل وحدة حرارة داخلة ، بلا أبعاد) .
Thermal efficiency of the process (net power output per heat input, dimensionless)

η_{isen} = كفاءة تساوي الإنتروبي لعمليات الضغط (مضخة التغذية) و التمدد (التوربين) ، بدون أبعاد .
Isentropic efficiency of the compression (feed pump) and expansion (turbine) processes, dimensionless

h_1 , h_2 , h_3 , h_4 =المحتويات الحرارية النوعية Specific enthalpies عند النقاط المشار إليها على المحطط T– s .

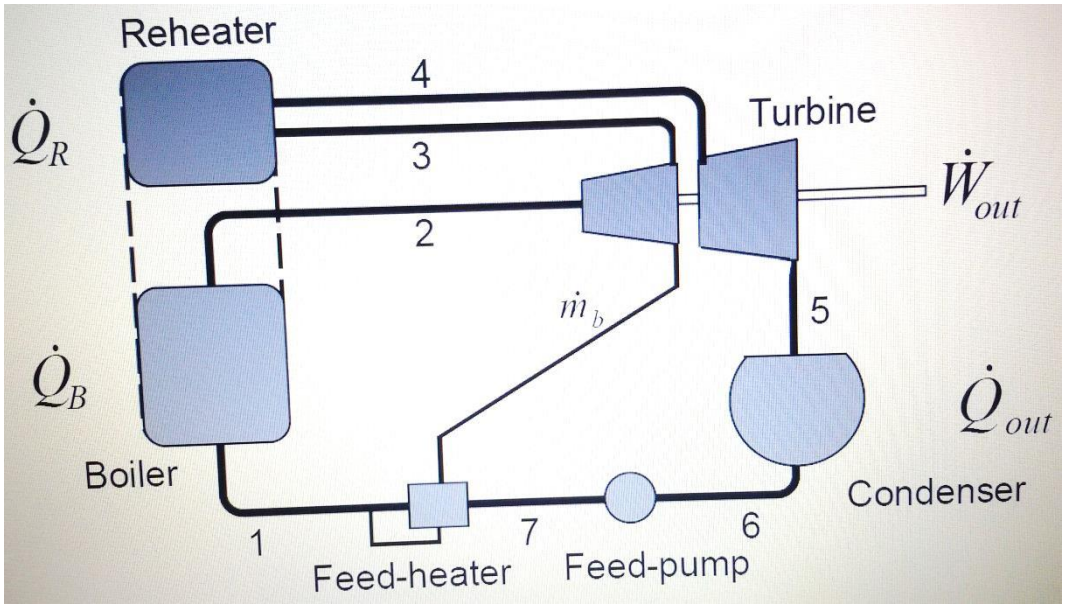
(h_{3isen}) أو ($h_{3'}$) = المحتوى الحراري النوعي النهائي Final specific enthalpy للمائع Fluid إذا كان التوربين متساوي الإنتروبي Isentropic .

$(\boldsymbol{P}_1)$, $(\boldsymbol{p}_4)$ = الضغوط قبل وبعد عملية الضغط
The pressures before and after the compression process
v = الحجم Volume (متر مكعب m^3) .
u = الطاقة الداخلية Internal energy وهي الطاقة الكلية للجزيئات (طاقتها الحركية وطاقتها الكامنة) . فكما نعلم أن جزيئات المادة في حالة حركة مستمرة ، وتمتلك طاقة حركية بسبب هذه الحركة ، كما أنها تختزن طاقة كامنة بسبب القوى المتبادلة بينها . وحدة القياس (كيلو جول KJ) ورمزها (U أو u) .

المحطة البخارية المتقدمة Advanced Steam plant

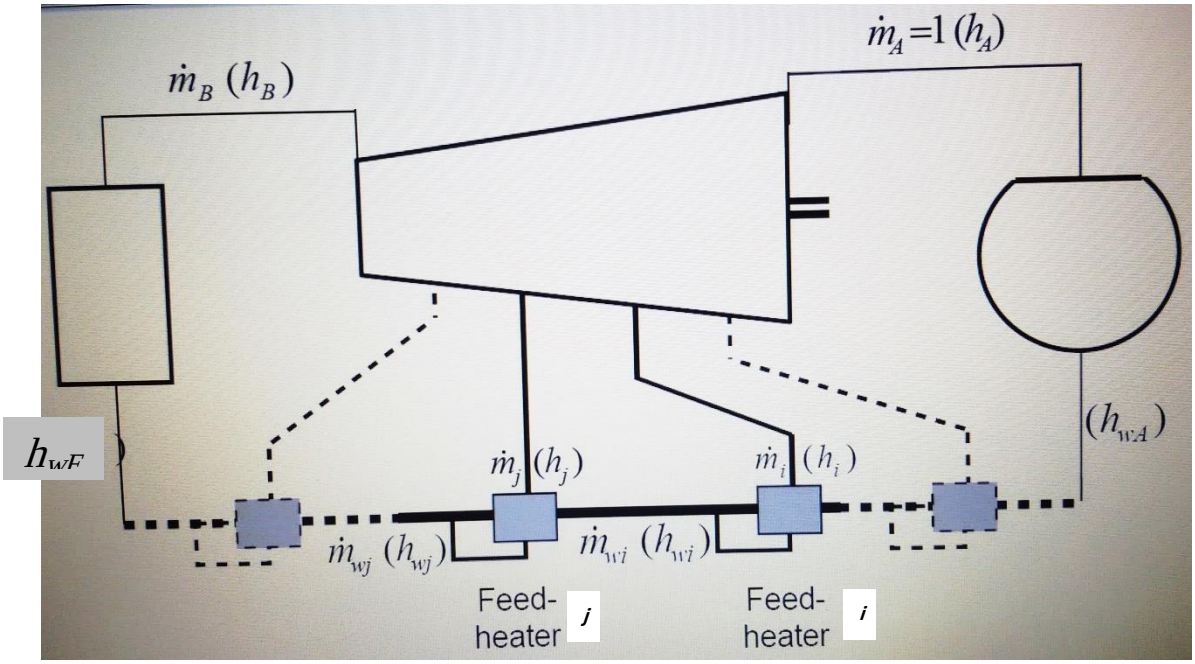
يمكن تحسين الدورة والكفاءة الحرارية الأجمالية overall thermal efficiency لمحطة البخار من خلال تضمين ما يلي :

١- تسخين ماء التغذية Feed-heating .
٢- إعادة التسخين Reheat .
٣- إسترجاع أو إسترداد الحرارة Heat recovery .



تسخين ماء التغذية Feed-heating :

مسخنة ماء تغذية Feed-heater واحدة من شأنها أن ترفع درجة حرارة ماء التغذية Feed water temperature بواسطة كمية معينة تعتمد على حالة البخار المستنزف Steam bled من التوربين والذي يُستخدم لزيادة درجة حرارة ماء التغذية .
ماذا لو أضفنا المزيد من مسخنات ماء التغذية ؟ و كيف يجب أن نستخدمها ؟
دعونا نلقي نظرة على عدد غير محدد من مسخنات ماء التغذية التي تخدم محطة البخار . سنركز على أي أثنين متجاورين من مسخنات ماء التغذية .



ملاحظة : يشير الرمز (w) إلى الماء السائل .

تكون معادلة موازنة الطاقة Energy balance لمسخنة ماء التغذية (j) :

$$\dot{m}_j\,(h_j - h_{wj}) = \dot{m}_{wi}\,(h_{wj} - h_{wi}) \qquad \textbf{(i)}$$

أي أن ، المحتوى الحراري المفقود من قبل البخار االمستنزف Bled steam = المحتوى الحراري المكتسب بواسطة ماء التغذية الوارد إلى المسخنة .

تكون معادلة موازنة الكتلة Mass balance لمسخنة ماء التغذية (j) :

$$\dot{m}_{wj} = \dot{m}_{wi} + \dot{m}_j \qquad \textbf{(ii)}$$

من المعادلة **(i)** :

$$\dot{m}_j = \dot{m}_{wi}\ \frac{(h_{wj} - h_{wi})}{(h_j - h_{wj})}$$

ومن المعادلة **(ii)** :

$$\dot{m}_{wj} = \dot{m}_{wi}\left(1 + \frac{h_{wj} - h_{wi}}{h_j - h_{wj}}\right)$$

$$\dot{m}_{wj} / \dot{m}_{wi} = \gamma_j = 1 + \frac{h_{wj} - h_{wi}}{h_j - h_{wj}}$$ أو :

$h_{wj} - h_{wi} = r_j$ (إرتفاع المحتوى الحراري لماء التغذية في المسخنة j)

$h_j - h_{wj} = F_j$ (إنخفاض المحتوى الحراري للبخار المستنزف في داخل المسخنة j)

$\gamma_j = 1 + (r_j / F_j)$ بالتالي :

يمكن كتابة معادلة معدل التدفق الكتلي إلى داخل التوربين ($\dot{m}_B$) كما يلي :

$$\dot{m}_B = \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_{wj}} \times \frac{\dot{m}_{wj}}{\dot{m}_{wi}} \times \frac{\dot{m}_{wj}}{\dot{m}_{wh}} \times \times \times \frac{\dot{m}_{wa}}{1}$$

$\dot{m}_B = \prod_{n=1}^{j} \gamma_j$ أي أن ($\dot{m}_B$) = إنتاج جميع النسب : Product of all the ratios

$\eta_{th} = 1 - (Q_{out} / Q_{in}) = 1 - [\dot{m}_A (h_A - h_{wA}) / \dot{m}_B (h_B - h_{wF})]$ الآن :

$\dot{m}_A = 1$ ولكن :

$\therefore \ \eta_{th} = 1 - [(h_A - h_{wA}) / \dot{m}_B (h_B - h_{wF})]$

بالنسبة إلى القيم المعطاة للمحتويات الحرارية Enthalpies (أي أن مؤشرات أو بيانات التشغيل الخاصة بالمحطة قد تم إعتماها) ، فإن الكفاءة الحرارية للمحطة تكون بالحد الأقصى عندما يكون ($\dot{m}_B$) بالحد الأقصى أي عندما يكون ($\prod_{n=1}^{j} \gamma_j$) بالحد الأقصى .

يمكن إستنتاج هذا الشرط عند حدوث ذلك من خلال الأخذ بنظر الإعتبار أي مسخنتين متجاورتين (i & j) .

لنفترض أن الإرتفاع الإجمالي للمحتوى الحراري في ماء التغذية عبر كلتا المسخنتين هو (R) ، بالتالي فإن :

$R = r_i + r_j$

$r_j = R - r_i$ أي أن :

وهكذا فإن :

$$\gamma_j = 1 + \frac{R - r_i}{F_j}$$

وبالتالي :

$$\gamma_i \gamma_j = (1 + \frac{r_i}{F_i})(1 + \frac{R - r_i}{F_j})$$

إذا نظرنا إلى الدورة على المخططين (t – h) أو (h - s) ، يمكن ملاحظة أن إنخفاض المحتوى الحراري للبخار المُستنزف للمسخنتين المتجاورتين هو نفسه تقريبا .

وهكذا فإن :

$$\boldsymbol{F_i = F_j = F}$$

و أن :

$$\gamma_i \gamma_j = (1 + \frac{\boldsymbol{r_i}}{\boldsymbol{F}})(1 + \frac{\boldsymbol{R - r_i}}{\boldsymbol{F}})$$

يتم تحديد القيمة القصوى ل ($\boldsymbol{\gamma_i \gamma_j}$) عندما تكون :

$$\frac{\partial (\gamma_i \gamma_j)}{\partial \boldsymbol{r_i}} = 0$$

$$(1 + \frac{\boldsymbol{r_i}}{\boldsymbol{F}})(-\frac{1}{\boldsymbol{F}}) + (1 + \frac{\boldsymbol{R - r_i}}{\boldsymbol{F}})(\frac{1}{\boldsymbol{F}}) = 0$$

أي عندما : $\boldsymbol{R = 2r_i \quad or \quad r_i = \frac{1}{2} R}$

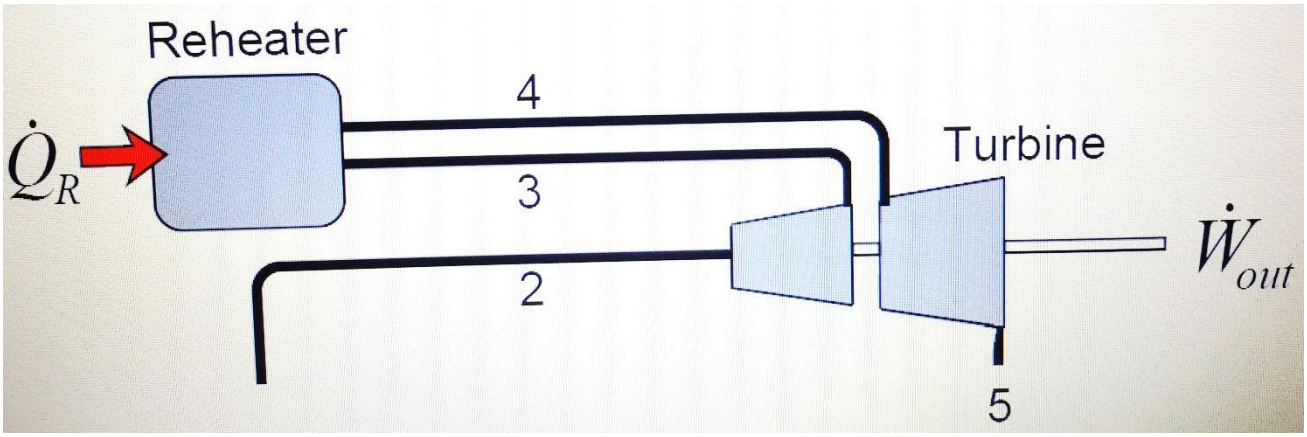
أي أن إرتفاع المحتوى الحراري في ماء التغذية الذي يمر من خلال مسخنتين متجاورتين يجب أن يكون متساوي للحصول على القيمة القصوى للناتج ($\boldsymbol{\gamma_i \gamma_j}$) .

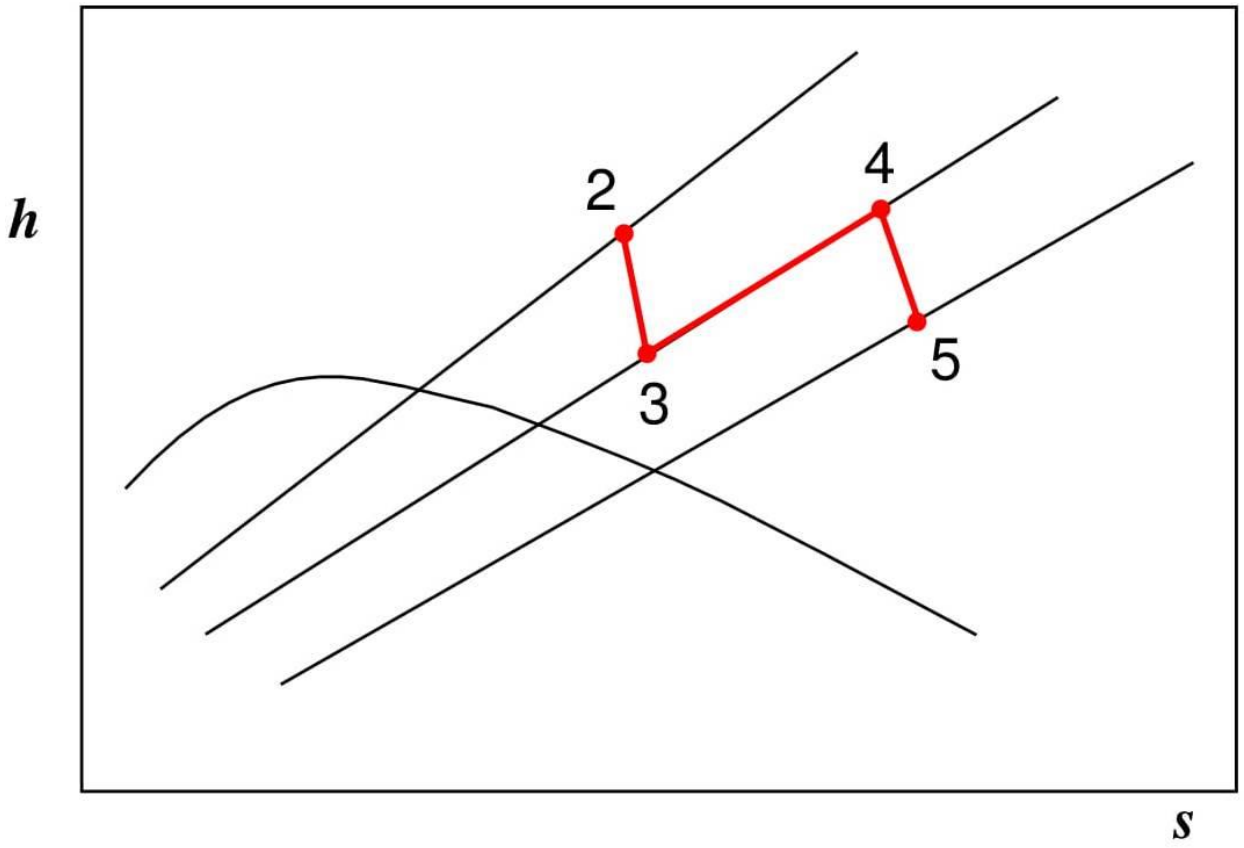
يمكن أن يمتد التحليل Analysis إلى أي عدد من أجهزة مسخنات ماء التغذية بنفس النتيجة ، أي أن تساوي الارتفاعات بالمحتوى الحراري في المسخنات هي الشرط المطلوب لزيادة الإنتاج وبالتالي زيادة الكفاءة الحرارية للمحطة .

نظرا لأن الحد الأقصى إلى حد ما سهل ، فلا يجب أن يكون (تساوي إرتفاع المحتوى الحراري) دقيقا .

إذا خططنا التحسن في الكفاءة الحرارية للمحطة ضد عدد المسخنات لوجدنا بعد (٣ أو ٤) مسخنات أن الزيادة في التحسين لا يبرر تكلفة Cost المسخنات الإضافية وتعقيد المحطة Plant complexity .

إعادة التسخين Reheat :

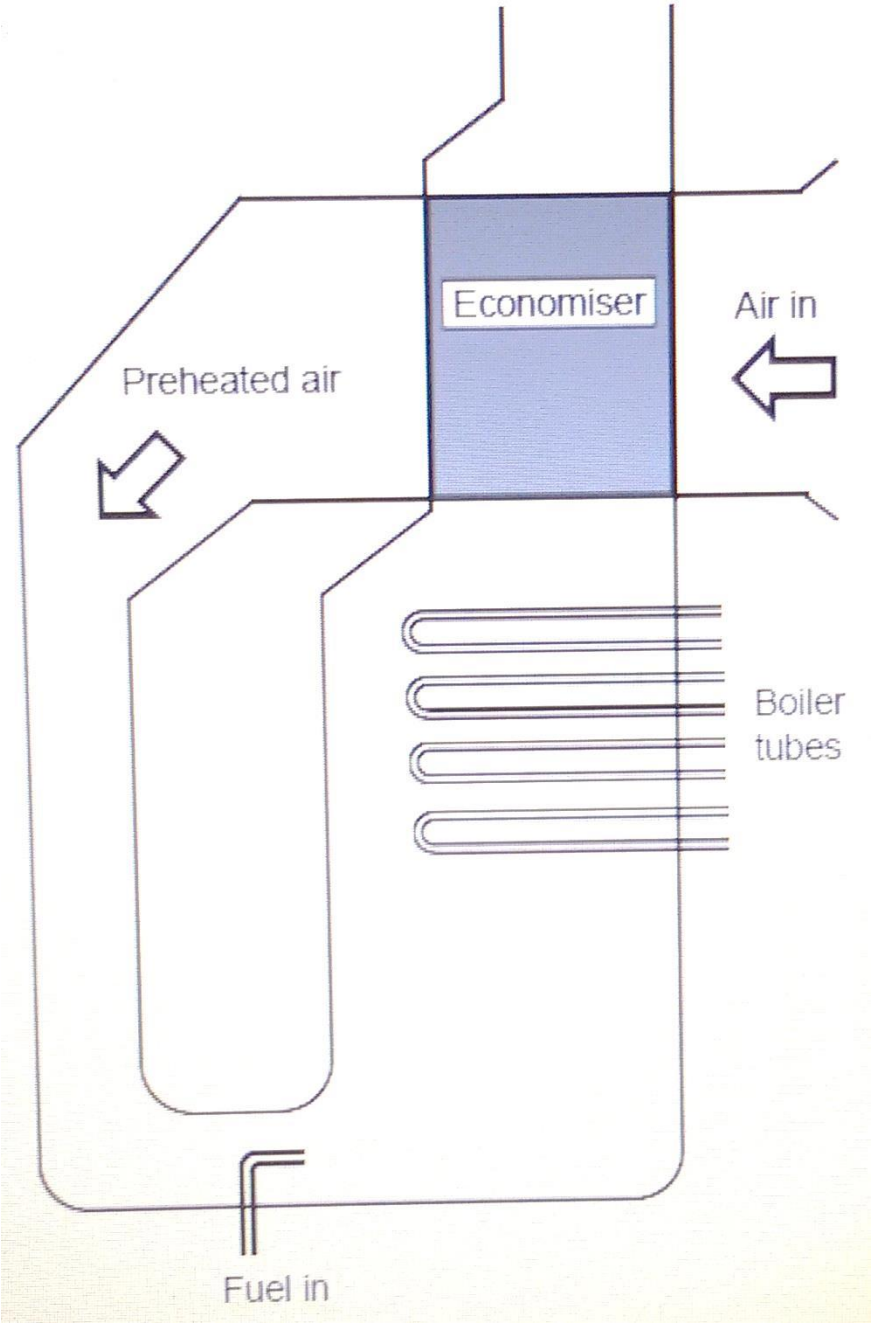




إعادة التسخين :

١- يحافظ على بخار العادم Exhaust steam بعيدا عن خط التشبع Saturation line .
٢- يسمح بتزويد حرارة إضافية Additional heat بدرجة حرارة عالية .
٣- عادة ما يحصل تحسن قليل في الكفاءة الحرارية .

إسترجاع أو إسترداد الحرارة ـ المقتصدات Heat Recovery - Economisers



المقتصدة (هواء – إلى – هواء) (air-to-air) تقوم بالتسخين المسبق Preheat للهواء القادم In-coming air بإستخدام الهواء المستنزف (المهدور) Waste heat في غازات المدخنة Flue gases .

References المراجع

1- www.scribd.com/document/188528710/Steam
2- Wikipedia- the free encyclopedia ويكيبيديا ، الموسوعة الحرة
3- Dictionary of Engineering – Second Edition - McGraw-Hill
٤- إصدارات مجمع اللغة العربية بالقاهرة :
مجموعة المصطلحات العلمية والفنية – المجلد ٢١ سنة ١٩٧٩ والمجلد ٢٧ سنة ١٩٨٨ والمجلد ٤٢ سنة ٢٠٠٢ ، ومعجم مصطلحات الهندسة الميكانيكية – الطبعة الأولى ١٩٩٨ ، ومعجم الفيزياء ٢٠٠٩
٥- معجم المصطلحات العلمية والفنية والهندسية - أحمد شفيق الخطيب - ٢٠٠٥