معدل الحرارة وكفاءة الأداء للمحطات الغازية لتوليد الكهرباء

Heat Rate & Efficiency of the Gas Turbine Power Plant

إعداد وترجمة
المهندس عدنان بهجت جليل

جدول المحتويات Table of Content

الموضوع	الصفحة
تعاريف مهمة ، أنواع الأنظمة الحرارية	3
الغاز المثالي Ideal Gas	4
الطاقة Energy ، الشغل Work ، الطاقة الداخلية Internal Energ ، الإنثالبي Enthalpy الإنتروبي Entropy	5
تعريف أدق للإنتروبي ، ما فائدة قيمة الإنتروبي	6
هل الإنتروبي دالة للحالة ، الطاقة والإنتروبي ، الأجراء الديناميكي الحراري (العملية الثرموديناميكية) Thermodynamic Process	7
أنواع العمليات الثرموديناميكية	8
الدورة الديناميكية الحرارية Thermodynamic Cycle	9
الإجراء العكوس Reversible Process ، الإجراء اللاعكوس Irreversible Process	10
الكفاءة الإنتروبية الثابتة Isentropic efficiency	11
التوربين الغازي ، فكرة عامة Gas Turbine , General	12
دورة التوربين الغازي المفتوحة ، دورة التوربين الغازي المغلقة	13
إجراءات (عمليات) دورة برايتون المثالية	16
الوصف الثرموديناميكي لدورة برايتون المثالية	17
دورة توربين الغاز الفعلية Actual Gas-turbine Cycle	21
مقارنة بين الدورة المثالية والحقيقية للتوربين الغازي	23
جدول توضيح رموز المعادلات	24
مخطط موللر للهواء الجاف وفيه قيم الإنثالبي والإنتروبي Mollier Diagram for Dry Air	25
مخطط (الضغط – الحجم) و مخطط (الإنتروبي – درجة الحرارة) لدورة برايتون (التوربين الغازي)	26
حساب معدل الحرارة وكفاءة محطة توليد الكهرباء ، الكفاءة Efficiency	27
معدل الحرارة Heat rate	28
عمليات تحول الطاقة أثناء توليد الكهرباء	30
الكفاءة الحرارية Thermal Efficiency	31
تعاريف ، القيمة الحرارية Heat value ، صرفيات أو أستهلاك الوقود Fuel consumption	33
معادلات حساب معدل الحرارة والكفاءة الحرارية	34
تحويلات الوحدات	35-37
تحسين أداء وكفاءة وحدات التوربين الغازي	38
مؤشرات الكفاءة والأداء للتوربينات الغازية	39
الأساليب الإقتصادية والتقنية المهمة لتحسين أداء المحطات الغازية ، التضبيب Fogging	40
التبريد البيني intercooling	42
التجديد (الأسترجاع) Regeneration	43
إعادة التسخين Reheater	44
التبريد البيني intercooling و الإسترجاع regeneration و إعادة التسخين reheating	46
التوليد المشترك للطاقة Cogeneration system	48
محطات الدورة المركبة (محطات الدورة المشتركة) combined cycle power plant	50
مخططات تأثير درجة الحرارة المحيطة ambient temperature على أداء التوربين الغازي	54-57
المراجع References	58

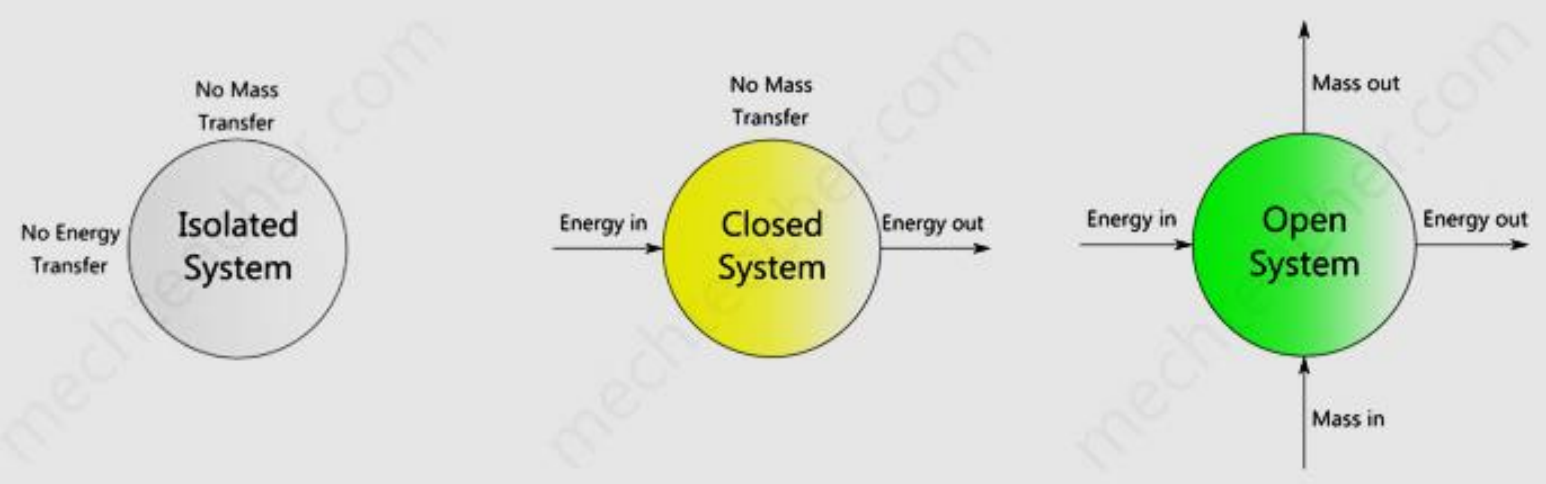
تعاريف مهمة كمدخل لموضوع الكفاءة والأداء في المحطات الغازية لتوليد الكهرباء :

أنواع الأنظمة الحرارية :

١ - النظام المغلق Closed System : هو النظام الذي لا تسمح حدوده بتبادل المادة مع المحيط ولكن تسمح بتبادل الطاقة (الشغل أوالحرارة) أي تبقى الكتلة ثابتة ، لذلك يسمى بنظام الكتلة المحددة ، كغاز محصور بمكبس داخل اسطوانة . او كالمرجل البخاري في اثناء فترة بداية التشغيل للحصول على ضغط معين للبخار .

٢- النظام المعزول Isolated System : هو النظام الذي لا تسمح حدوده بتبادل المادة أو الطاقة مع المحيط ، أي يبقى مجموع الطاقة فيه ثابتاً، لكونه لا يتأثر بالوسط المحيط . مثال الترمس الموضوع بداخله ماء بارد او ساخن .

٣- 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 .



وهناك انظمة اخرى كالنظام الاديباتي الذي تنتقل فيه الكتلة والطاقة ما عدا الطاقة الحرارية تكون قيمتها صفر مثل التوربين البخاري المعزول التام . وهناك انظمة نصف مفتوحة تسمح بدخول او خروج الكتلة فقط مثل قنينة الغاز.

في بعض الاحيان تكون المنظومة مغلقة في لحظة معينة ومفتوحة في لحظة اخرى مثال ذلك اسطوانة محرك احتراق داخلي ، تكون المنظومة الكلية Total System عادة كبيرة ومعقدة وقد يمكن تجزئتها ومن ثم جمع أجزاء المنظومة المجزأة . مثال ذلك محطة القدرة الكهربائية المغلقة التي يمكن دراسة اجزائها (المرجل، المبادل الحراري، التوربين، المضخات ... الخ) كمنظومات مفتوحة ، أي ان المائع يدخل ويخرج من كل واحدة من هذه المنظومات المصغرة .

الغاز المثالي Ideal Gas : هو غاز افتراضي لتسهيل التعامل مع الكثير من المتغيرات في المواضيع التي تتناولها الديناميكا الحرارية . والفرضيات أو الشروط الثلاثة التالية هي التي تجعل الغاز الحقيقي إذا وجد في هذه الظروف يتصرف كغاز مثالي:

١- حجم جزيئات الغاز مهملة بالنسبة للوعاء الذي يحتويه أي تحت ضغط منخفض او مساوي للضغط الجوي وعند درجة حرارة الغرفة (25 C° , 1 bar) .

٢- التصادمات بين جزيئات الغاز تصادمات مرنة. هذا يفترض ان الجزئيات لا تفقد أي من طاقتها عندما تتصادم مع بعضها البعض .

٣- حركة جزيئات الغاز حركة عشوائية دون مؤثرات خارجية .

الطاقة Energy : هي السعة التي يمتلكها النظام (الجسم) لأداء الشغل . وحدة القياس كيلو جول KJ والرمز E .

الشغل Work : هي الطاقة التي تخترق حدود المنظومة نتيجة لأي قوى أخرى غير فرق درجات الحرارة أو هي كمية الطاقة المنتقلة من نظام إلى آخر دون أن يرافقه انتقال للإنتروبي . وحدة القياس كيلوجول KJ ورمزه W .

الطاقة الداخلية Internal Energy : هي 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 ورمزه U . ويمكن زيادة الطاقة الداخلية للنظام بطريقتين :

١- تزويد النظام بطاقة حرارية من مصدر حراري .

٢- بذل شغل على النظام .

أما إذا فقد النظام كمية من الحرارة أو بذل النظام شغلا فإن طاقته الداخلية تقل .

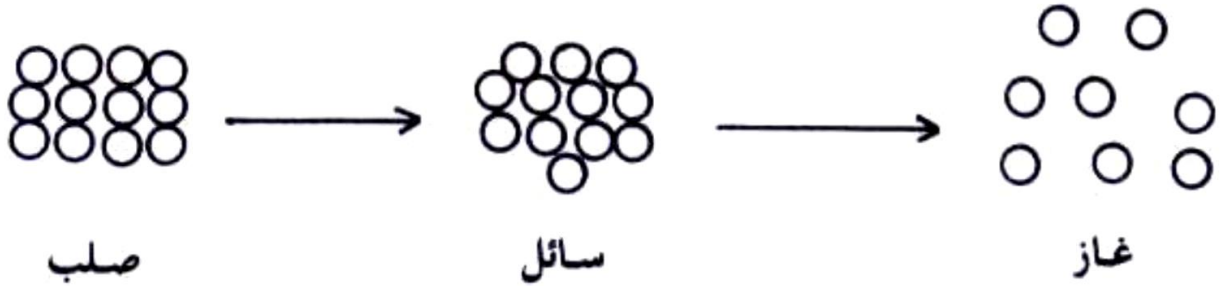
الإنثالبي Enthalpy : هي المحتوى الحراري للمادة أو هي الطاقة المخزونة نتيجة الضغط ودرجة حرارة للمادة في حالة السريان وهي خاصية للمادة تساوي مجموع الطاقة الداخلية للمادة وطاقة الضغط . وحدة القياس كيلو جول / كيلوغرام KJ/Kg ورمزه H .

الإنتروبي 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 .

تعريف أدق للإنتروبي : 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 .

ما فائدة قيمة الإنتروبي ؟

يستفيد منه الكيميائيون في معرفة ما إذا كان تفاعل كيميائي يمكن أن يحدث تلقائياً أم لا ، عند ظروف معينة من الضغط ودرجة الحرارة ، لأن جميع التفاعلات الكيميائية والتحولات الفيزيائية يرافقها زيادة في عدم الإنتظام (زيادة في العشوائية) أي زيادة في قيمة الإنتروبي .



زيادة الأنتروبي (عدم الأنتظام) عند التحول من الحالة الصلبة الى الحالة السائلة الى الحالة الغازية

من الشكل أعلاه يلاحظ أن قيم الإنتروبي في الحالة الغازية لمادة ما أكبر منها للحالة السائلة أو الحالة الصلبة $S_s < S_L < S_g$ حيث أن : إنتروبي المادة الغازية S_g ، إنتروبي المادة السائلة S_L ، إنتروبي المادة الصلبة S_s

هل الإنتروبي دالة للحالة ؟

نعم الإنتروبي دالة للحالة (أي يعتمد على الحالة الإبتدائية والحالة النهائية ولا يعتمد على المسار الذي يسلكه النظام) ، لذا فإنه يقاس التغير في الأنتروبي (dS) لأي عملية يتم فيها تغير النظام من حالته الإبتدائية الى حالته النهائية :

$dS = S_f - S_i$

حيث : إنتروبي النظام في الحالة النهائية S_f ، إنتروبي النظام في الحالة الإبتدائية S_i

الطاقة والإنتروبي :

الطاقة لا تفنى ولا تستحدث أي تبقى ثابتة حسب قانون حفظ الطاقة خلال التغيرات الكيميائية أو الفيزيائية ، بينما تصاحب هذه التغيرات زيادة في قيمة الإنتروبي .

الإجراء الديناميكي الحراري (العملية الثرموديناميكية) Thermodynamic Process : هو تغير في خواص او سلوك المائع Fluid عندما ينضغط أو يتمدد ، يسخن أو يبرد وقد يكون المائع غازًا (مثل الهواء) أو بخارًا (مثل بخار الماء) ، أو سائل أو خليطًا من هذه المواد شريطة أن لاتتفاعل مع بعضها كيميائيًا . هي تغير نظام من حالة إلى حالة أخرى ، مثل رفع درجة حرارة النظام (المرجل مثلا) . وفي حالة تواجد النظام في حالة توازن ثرموديناميكي فيمكن تغير تلك الحالة عن طريق تغيير أحد دوال الحالة أوعدة منها ، مثل تغيير درجة الحرارة أو تغيير الضغط والحجم والأنتروبي وغيرها . ولدراسة العمليات نسهل على أنفسنا فهمها بجعل أحد تلك المتغيرات ثابتا وملاحظة تغير العوامل الأخرى . من هنا نشأت بعض العمليات التي تهمنا بصفة خاصة نظرا لتطبيقاتها العملية ، وخصوصا في دراسة عمل المحركات وتحويل الطاقة إلى صور مختلفة .

تنقسم العمليات الثرموديناميكية إلى عدة أنواع :

١- عملية متساوية الضغط : (isobaric) وهي العمليات التي تتم تحت ضغط ثابت. مثال على ذلك التفاعلات الكيميائية التي نجريها في المختبرات ، فهي تتم تحت الضغط الجوي $dP = 0$.

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

٣- عملية متساوية الحرارة : (isothermal) وهي العمليات التي تتم تحت درجة حرارة ثابتة ، أي نحافظ خلالها على ثبات درجة الحرارة $dT = 0$.

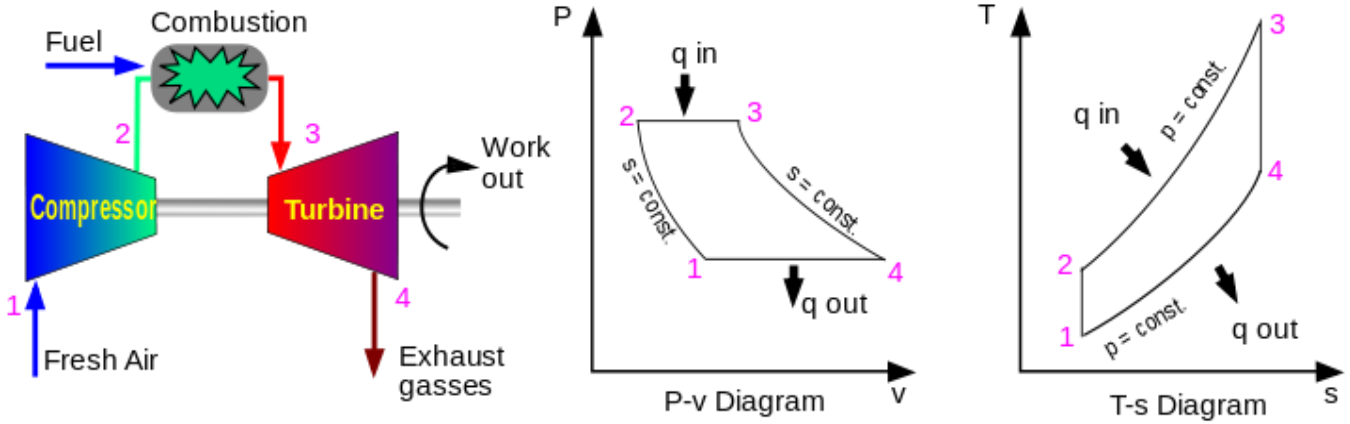
٤- عملية كظومة :(adiabatic) وهي العمليات التي تتم في النظام المعزول حراريا عن الوسط المحيط به . أي نمنع خلال تلك العملية أي تبادل للحرارة بين النظام والوسط المحيط $Q = 0$. هذه الحالة غير موجودة فعلا ولكن عندما يحدث الاجراء سريعًا لا يوجد وقت كافٍ للتبادل الحراري بين الغاز والمحيط عبر حدود النظام وكمثال على ذلك هو عملية الانضغاط والتمدد في محرك الاحتراق الداخلي التي يمكن اعتبارها تقريبًا عملية اديباتية ، ففي خلال الفترة الزمنية القصيرة التي تتم فيها هذه العمليات يمكن إهمال التبادل الحراري بين الغاز والمحيط بسبب سرعة المحرك العالية

٥- عملية متساوية الإنتروبية :(isentropic) وهي العمليات التي تتم عند أنتروبي ثابت $dS = 0$. عملية حرارية مثالية تتم بدون فقدان حرارة ومادة بين النظام والمحيط أي لا أحتكاك في العملية .

٦- عملية متساوية الإنثالبي :(isenthalpic) وهي العمليات التي تتم عند محتوى حراري ثابت .

٧- عملية مغلقة (دائرية) cyclic process : هي العملية التي يمر فيها النظام بعدد من التغيرات (العمليات) ، ثم يعود أخيراً الى حالته الإبتدائية مرة أخرى وبالنسبة للعملية المغلقة فإن $(dE = 0, dH = 0)$ حيث dH تغير في الأنثالبي و dE تغير في الطاقة الداخلية .

الدورة الديناميكية الحرارية Thermodynamic Cycle : هي مرور النظام بعدة تحولات (إجراءات) بحيث تتطابق بداية ونهاية الإجراءات . مثل دورة برايتون التي تصف التوربين الغازي أو دورة رانكن التي تصف التوربين البخاري وغيرها . تستخدم الدورة الديناميكية الحرارية لتمثيل جهاز حقيقي ، وعادة تحدد لها مبدئيا بعض الافتراضات . ويساعد تبسيط الافتراضات على تقليل مشاكل الضبط والتحكم ، فتسهل بالتالي التحكم في سير العملية . وعلى سبيل المثال كما هو مبين في الشكل (أدناه) ، نجد أن التوربين الغازي يمكن تمثيلهما بواسطة دورة برايتون .ويتكون المحرك من عدة مراحل ، وتمثل كل منها على حدة كعملية ترموديناميكية مثالية . وعلى الرغم من أن كل مرحلة نجريها على وسط مادة الشغل قد تكون معقدة في حقيقة الأمر ولكن تمثيلها كعمليات مثالية تقربنا بالفعل إلى سلوكها الحقيقي . وافتراض آخر يتعلق بالغاز العادم الذي قد نعيده إلى المدخل رغم فقدانه جزءا من حرارته ، فيعتبر هذا أيضا نوعا من المثالية في آداء الدورة . والفرق بين دورة مثالية ودورة حقيقية قد يكون كبيرا .



أمثلة لأنظمة حقيقية ممثلة بعملية مثالية : مخطط الضغط والحجم PV diagram ، و مخطط درجة الحرارة والإنتروبي TS diagram لدورة برايتون ، كنماذج لعمليات حقيقية للتوربين الغازي .

الإجراء العكوس Reversible Process : هو الإجراء المثالي ideal الذي يمكن عكس اتجاهه بعد حدوثه دون التسبب في إحداث تغير على حالة النظام و المحيط . أي لا أحتكاك بين النظام والمحيط . تسمي عملية دورية مثالية يمكن عكسها بدون فقد للطاقة بسبب الاحتكاك دورة عكسية. وغالبا يبقي الانتروبيا ثابتا خلال تلك العملية ، أي dS = 0 ومثال على تلك العملية عملية الانضغاط والتمدد الأدياباتي في دورة كارنو .تتكون دورة كارنو من عدة عمليات من الانضغاط والتمدد متتالية تحدث جميعها عند ثبات الإنتروبيا ، مثال عملي عليها دورة محرك احتراق داخلي مع ملاحظة أن دورة كارنو مثالية ولا تصل إليها كفاءة الدورات العملية .

الإجراء اللاعكوس Irreversible Process : هو الإجراء الذي يستحيل عكس اتجاهه بعد حدوثه دون تغيير على حالة النظام و المحيط . (الإجراء الذي لا يمكن للنظام أن يعود خلاله إلى حالته الابتدائية إلا بفقدان طاقة) .

إن جميع التحولات (العمليات) التي تجري في الطبيعة تلقائياً هي في الواقع تحولات لاعكوسة ، إذ إن حدوثها وفق اتجاهٍ ما مفضل على حدوثها في الاتجاه المعاكس ، فانتقال الحرارة يتم دائماً من الجسم الحار إلى الجسم البارد مهما كانت كمية الطاقة التي يحويها الجسم البارد مقارنة بما يحويه الجسم الحار، وينتشر الغاز من وعاء ذي ضغط عال إلى وعاء ذي ضغط منخفض مهما كان حجم كل من الوعاءين ، ولا يحدث العكس في كلتا الحالتين إلا بأداء شغل . وأبرز التحولات الحقيقية تحويل الطاقة الميكانيكية إلى حرارة كما في حالة الاحتكاك مثلا ، ويتم هذا التحول ببساطة وبكفاءة 100%، أما العكس أي تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية فالمسألة أصعب ، وتحتاج إلى ترتيبات ومحركات وغير ذلك ، ومع هذا لا يمكن أن تبلغ الكفاءة 100% .

في الثرموديناميك توجد إمكانيتان للتفاعل بين النظام والوسط المحيط ، فإما تستبدل حرارة بينهما أو يستبدل شغل . وعند تبادل الحرارة (طاقة) بينهما يتغير أيضا إنتروبيا النظام وإنتروبيا الوسط المحيط .

كفاءة الإنتروبية الثابتة Isentropic efficiency :

تستخدم الإنتروبية الثابتة لحساب كفاءة آلة ميكانيكية حرارية . وطبقا لقوانين الديناميكا الحرارية لا يمكن الطاقة الحرارية أن تتحول بالكامل إلى نوع آخر من الطاقة (مثل الكهرباء أو طاقة حركية) ، 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 .

التوربين الغازي ، فكرة عامة Gas Turbine , General

التوربين الغازي محرك حراري Heat engine ، أي أنه محرك يحول الطاقة الحرارية Heat energy إلى طاقة ميكانيكية Mechanical energy . عادة ما يتم إنتاج الطاقة الحرارية عن طريق حرق الوقود Fuel مع أوكسجين الهواء Oxygen of the air . هذه هي الطريقة التي يحول بها المحرك الطاقة الكيميائية Chemical energy للوقود ، أولا إلى طاقة حرارية ثم بعد ذلك إلى طاقة ميكانيكية . ومع ذلك ، في التوربينات الغازية ، وكذلك في الأنواع الأخرى من المحركات الحرارية ، يمكن تحويل جزء فقط من الطاقة الحرارية المنبعثة (المتحررة) إلى طاقة ميكانيكية . حيث سيتم إنتقال الطاقة الحرارية المتبقية إلى الغلاف الجوي Atmosphere .

تساوي كفاءة تحويل الطاقة Efficiency of the energy conversion جزءا من الطاقة الداخلة Input energy المتحولة إلى طاقة مفيدة Useful Output energy . في التوربين الغازي يتم تحويل (25 - 40 %) من الطاقة الداخلة إلى طاقة ميكانيكية . وسيتم إنتقال (60 - 75 %) المتبقية إلى الغلاف الجوي في شكل حرارة ضائعة (خسائر العادم Waste heat (exhaust losses . الكفاءة بالتالي تساوي 25- 40 % .

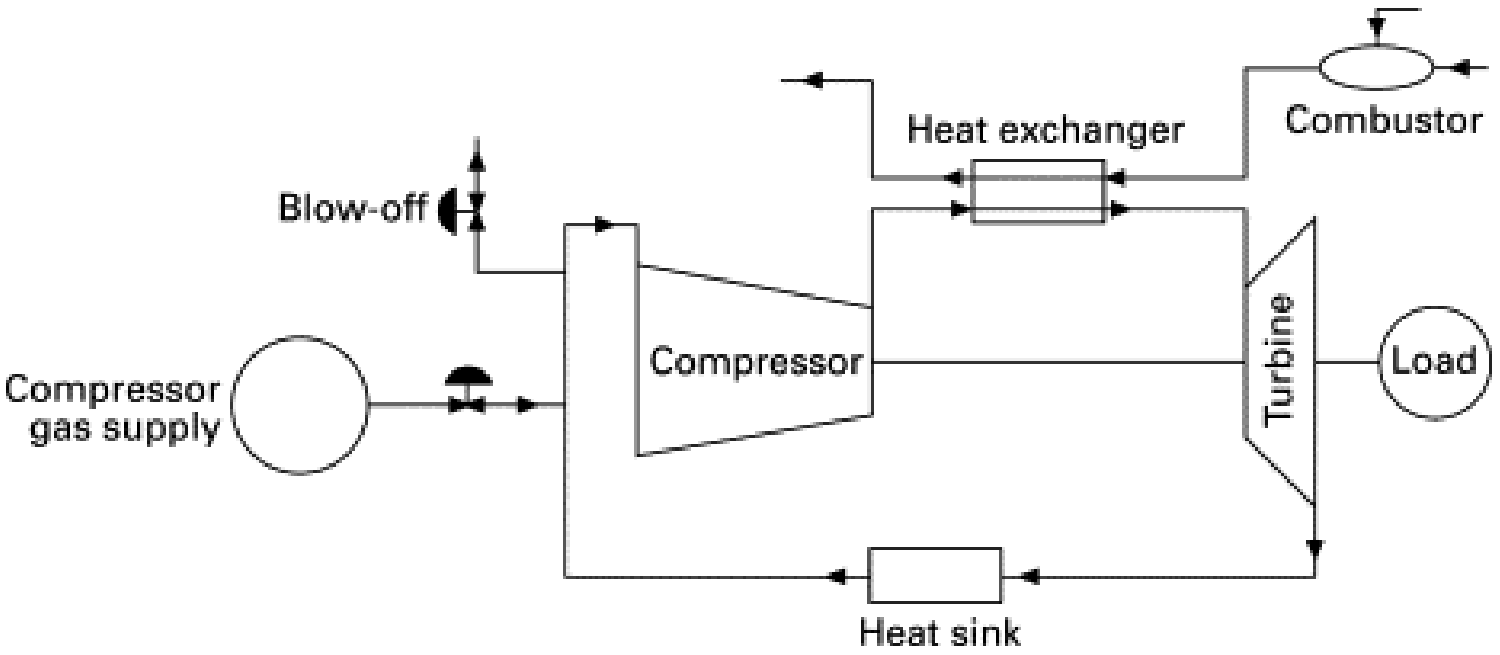
يمكن إسترداد جزء من الحرارة الضائعة (المفقودة) ، على سبيل المثال في مرجل إسترداد الحرارة المفقودة Waste heat recovery boiler ، مما يؤدي في المقابل إلى زيادة الكفاءة .

دورة التوربين الغازي المفتوحة

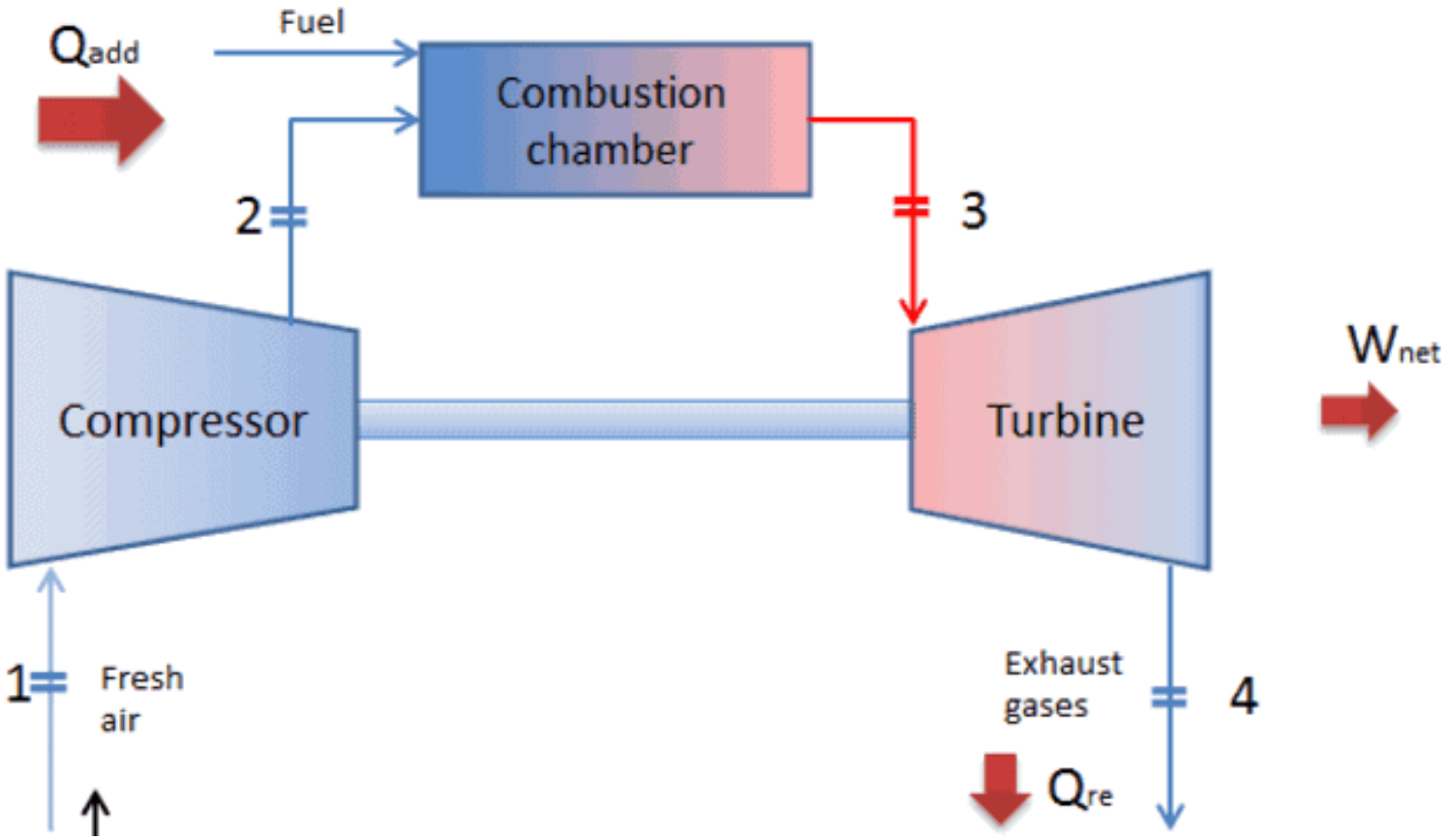
في دورة التوربين الغازي المفتوحة Open Gas Turbine Cycle ، يتم إمتصاص الهواء المحيط Ambient air وضغطه في ضاغط Compressor ، ثم تسخينه في غرفة الإحتراق Combustion chamber عن طريق حقن وحرق الوقود ثم تمدده أخيرا عبر التوربين Turbine راجعا إلى الغلاف الجوي . مائع أو وسط التشغيل Operating medium لدورة التوربين الغازي المفتوحة هو الهواء ومزيج من غازات الهواء والإحتراق .

دورة التوربين الغازي المغلقة

في دورة التوربين الغازي المغلقة Closed Gas Turbine Cycle ، يمر الغاز (المحصور) Enclosed gas ، (مائع التشغيل المستخدم بالدورة : هواء ، نيتروجين ، هيليوم ، أرجون ، هيدروجين ، أو نيون وما إلى ذلك لا يختلط بالوقود داخل غرفة الاحتراق) . ، عبر نفس المراحل كما في الدورة المفتوحة . تتم عملية التسخين في غرفة الإحتراق (المبادل الحراري Heat exchanger) حيث يقوم مصدر خارجي بتسخين الهواء قبل أن يتمدد الغاز عبر التوربين . بعد ذلك يجب تبريد الغازات الساخنة قبل إعادتها إلى الضاغط . يقوم هذا التوربين بتدوير نفس الغاز بشكل متكرر . أستخدام مائع / وسط غير الهواء يجعل النظام أكثر تعقيدا وتكلفة . وقد يتسبب ذلك في مشاكل يصعب إصلاحها . ولكن بالمقارنة مع التوربينات الغازية ذات الدورة المفتوحة ، فإن التوربينات الغازية ذات الدورة المغلقة لديها كفاءة أعلى .



مخطط دورة التوربين الغازي المغلقة البسيطة Simple closed cycle gas turbine



مخطط دورة التوربين الغازي المفتوحة open cycle gas turbine

الدورة الديناميكية الحرارية thermodynamic cycle التي تصف عمل التوربين الغازي هي دورة برايتون Brayton cycle نسبة إلى أسم مخترعها المهندس الأمريكي جورج برايتون (١٨٣٠ - ١٨٩٢) . وهي تعتبر مبدأ عمل المحرك النفاث . وتسمى أحيانا دورة جول Joule cycle . إن الغالبية العظمى من التوربينات الصناعية تشتغل على دورة التوربين البسيط المفتوح للغلاف الجوي Atmosphere ولا تستعمل دورة التوربين المغلقة نظرا لتعقيدها والحجم الكبير الذي تحتاجه .

إجراءات (عمليات) دورة برايتون المثالية

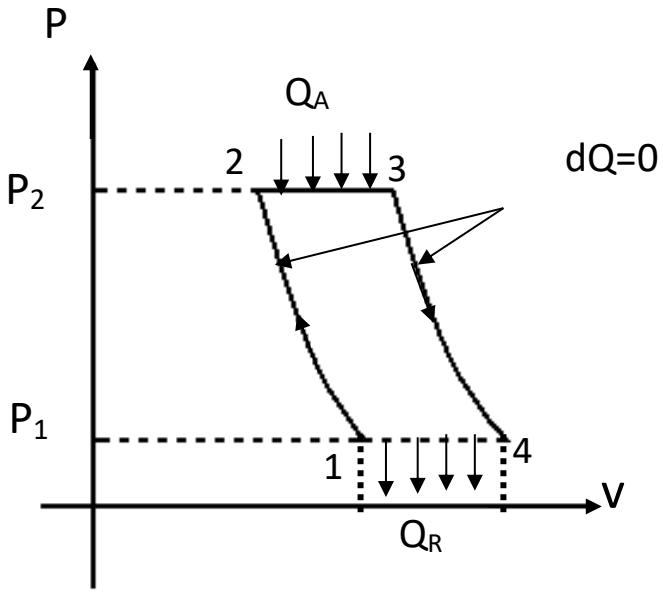
العمليات الأربعة لدورة برايتون المثالية هي :

١- الإجراء (2 – 1) إجراء إنضغاط بثبوت الإنتروبي ويتم في الضاغط
. isentropic compression (in compressor)

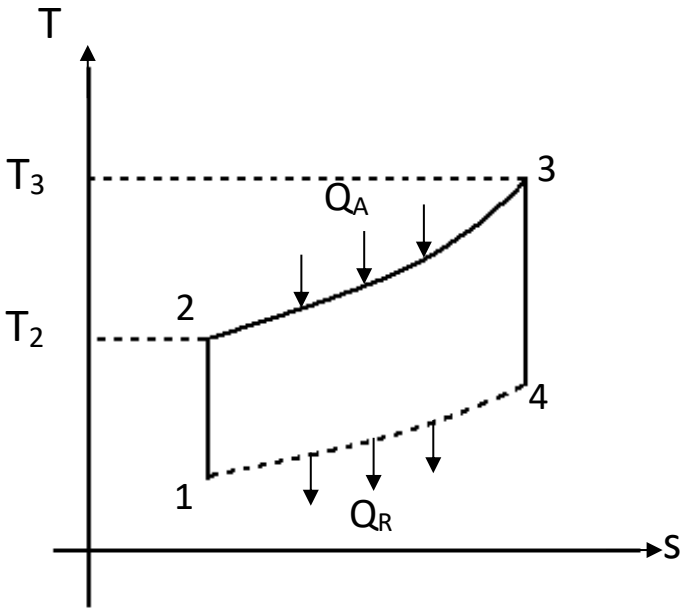
٢- الإجراء (3 – 2) إجراء إضافة حرارة بثبوت الضغط ويتم في غرفة الإحتراق
.const. pressure heat-addition (in combustion chamber)

٣- الإجراء (4 – 3) إجراء تمدد بثبوت الإنتروبي ويتم في التوربين الغازي
. isentropic expansion (in turbine)

٤- الإجراء (1 – 4) إجراء طرح الحرارة بثبوت الضغط
. const. pressure heat rejection (exhaust)



مخطط الضغط - الحجم P-V Diagram



مخطط درجة الحرارة - الأنتروبي T-S Diagram

الوصف الثرموديناميكي لدورة برايتون المثالية :

ملاحظة : مائع التشغيل هو الهواء ، وأنه يتصرف كغاز مثالي ، ويتم إستبدال الإحتراق بعملية نقل حرارة ، وجميع العمليات قابلة للعكس أي عكوسية Reversible .

تعاريف :

- عملية متساوية الإنتروبية isentropic هي العملية التي تتم عند أنتروبي ثابت (ds = 0) أي عملية حرارية مثالية تتم بدون فقدان حرارة ومادة بين النظام والمحيط أي لا أحتكاك في العملية .
- عملية كظومة adiabatic هي العملية التي تتم في النظام المعزول حراريا عن الوسط المحيط به . أي لا يتم خلال تلك العملية أي تبادل للحرارة بين النظام والوسط المحيط (dQ = 0) .

تتكون الدورة من أربعة عمليات (مخطط الضغط والحجم ومخطط درجة الحرارة والأنتروبي) :

١- العملية (2 - 1) متساوية الإنتروبية بالكبس ، عملية ضغط كظومة تتم بواسطة الضاغط ، ($dS = 0 , dQ=0 , dp>0 , dv<0$) ، يرتفع الضغط من P_1 إلى P_2 ، فترتفع درجة الحرارة من T_1 إلى T_2 ، ويقل الحجم النوعي من V_1 إلى V_2 ، وتبقي الإنتروبية ثابتة . الشغل المنجز على الضاغط = W_C .

٢ -العملية (3 - 2) متساوية الضغط ، إضافة حرارة Q_A تتم في غرفة الأحتراق عن طريق أحتراق الوقود ، ($dS > 0 , dp=0 , dQ>0 , dv>0$) ، يبقى الضغط ثابتا ، ترتفع درجة الحرارة من T_2 إلى T_3 ، يتمدد الحجم من V_2 إلى V_3 ، ويزداد الإنتروبي النوعي من S_2 إلى S_3

٣ -العملية (4 - 3) تمدد خلال عملية متساوية الإنتروبية ، عملية تمدد كظومة تتم بواسطة التوربين ، ($dS = 0 , dp<0 , dQ=0 , dv>0$) ، ينخفض الضغط من P_3 إلى P_4 ، وتنخفض درجة الحرارة

من T_3 إلى T_4 ، ويتمدد الحجم النوعي من V_3 إلى V_4 ، الإنتروبية النوعية تبقى ثابتة . الشغل المنجز من قبل التوربين = W_T .

٤ -العملية (1 - 4) متساوية الضغط ، طرح الحرارة Q_R الباقية تتم بواسطة تبادل حراري مع مبرد ، ($dS < 0$, $dp=0$, $dQ<0$, $dv<0$) ، يبقى الضغط ثابتا ، فتنخفض درجة الحرارة من T_4 إلى T_1 ، ويقل الحجم من V_4 إلى V_1 ، وتنخفض الإنتروبية النوعية من S_4 إلى S_1

تعطينا المساحة المحصورة داخل المنحنيات (4- 3- 2- 1) الشغل الصافي W_{net} الناتج من الدورة .

فيما يلي المعادلات التي توضح أداء الدورة :

شغل الضاغط	$W_C = \dot{m}\ Cp\ (T_2 - T_1)$
الحرارة المضافة	$Q_A = \dot{m}\ Cp\ (T_3 - T_2)$
شغل التوربين	$W_T = \dot{m}_p\ Cp_p\ (T_3 - T_4)$
الحرارة المطروحة	$Q_R = \dot{m}\ Cp\ (T_4 - T_1)$
صافي الشغل	$W_{net} = W_T - W_C$
صافي الحرارة	$Q_{net} = Q_A - Q_R$
صافي الحرارة = صافي الشغل	$Q_{net} = W_{net}$
الكفاءة الحرارية النظرية	$\eta_{th} = W_{net} / Q_A$

معادلة الكفاءة النظرية لدورة برايتون المثالية تكون أيضا :

$$\eta_{th} = 1 - (Q_R/Q_H) = 1 - [(T_4 - T_1) / (T_3 - T_2)]$$

$$\eta_{th} = 1 - (T_1/T_2) = 1 - (T_4/T_3)$$

يتضح من المعادلة أعلاه ان الكفاءة الحرارية تعتمد اعتمادا كبيرا على النسبة بين درجتي الحرارة T_1 و T_2 ، ونظرا لأن درجات الحرارة هنا هي درجات الحرارة المطلقة فإن الكفاءة في معظم الآلات لا تتعدى (٥٠%) .

ويمكن حساب درجات الحرارة T_2 و T_4 كما يلي :

$$T_2 = T_1 \cdot r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \qquad T_4 = T_3 \left(\frac{1}{r_p}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

وبما أن نسبة الضغط r_p (pressure ratio) هي نسبة الضغط النهائي إلى الضغط الإبتدائي ، أي أن

$$r_p = P_2 / P_1 = P_3 / P_4$$

لذلك تكون الكفاءة أيضا نظريا فقط :

$$\eta_{th} = 1 - (r_p)^{1-k/k}$$

where : γ or k = 1.4 (نسبة الحرارة النوعية للهواء Specific heat ratio for air)

المعادلة أعلاه تبين أنه كلما زادت نسبة الضغط كلما إزداد الشغل الصافي وبذلك تزداد الكفاءة الحرارية بزيادة نسبة الضغط .

ويمكن التعبير عن معادلة الكفاءة النظرية بأحتساب الإنثالبية (Enthalpy) :

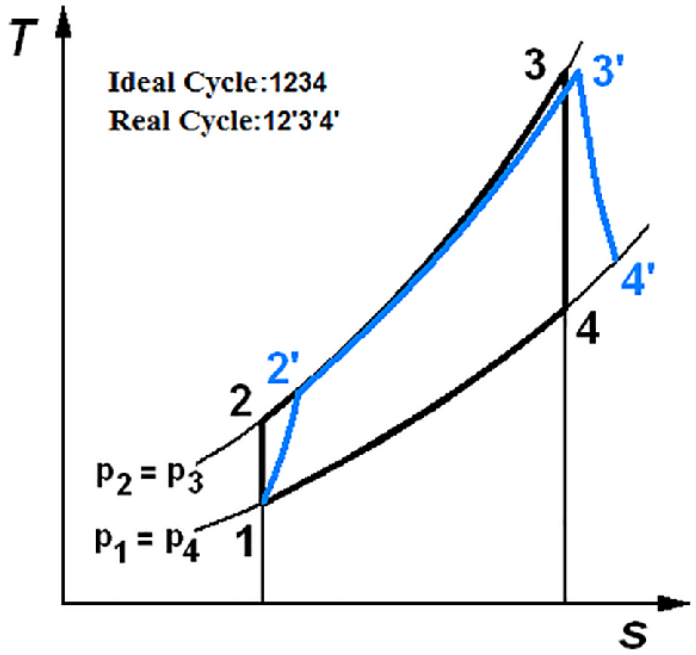
$$\eta_{th} = 1 - (h_4 - h_1 / h_3 - h_2)$$

ويتم إستخراج قيم الإنثالبية للهواء العامل في الدورة الحرارية من مخطط مولر (Enthalpy-Entropy Diagram For Dry Air) .

دورة توربين الغاز الفعلية Actual Gas-turbine Cycle :

دورة توربين الغاز الفعلية (الحقيقية) تختلف عن دورة برايتون المثالية لأن العمليات الثرموديناميكية تكون لا عكوسية والأنتروبية غير ثابتة .

تكون الكفاءة الحرارية الفعلية للدورة : $\eta_{ac} = 1 - (h_{4'} - h_1 / h_{3'} - h_{2'})$



Ideal and real Brayton cycle. T-S Diagram

ويمكن إستخراج قيم الإنثالبية للهواء العامل في الدورة الحرارية من مخطط مولر (Enthalpy-Entropy Diagram For Dry Air) .

وثمة إختلاف آخر بين دورة برايتون الفعلية ودورة برايتون مثالية هو أن هناك هبوط في الضغط خلال عمليتي إضافة الحرارة وطرح الحرارة التي تحدث في غرفة الأحتراق والعادم على التوالي .

يمكن حساب الكفاءة الحقيقية للتوربين الغازي بدلالة صرفيات الوقود (معدل إستهلاك الوقود) كما في المعادلة التالية :

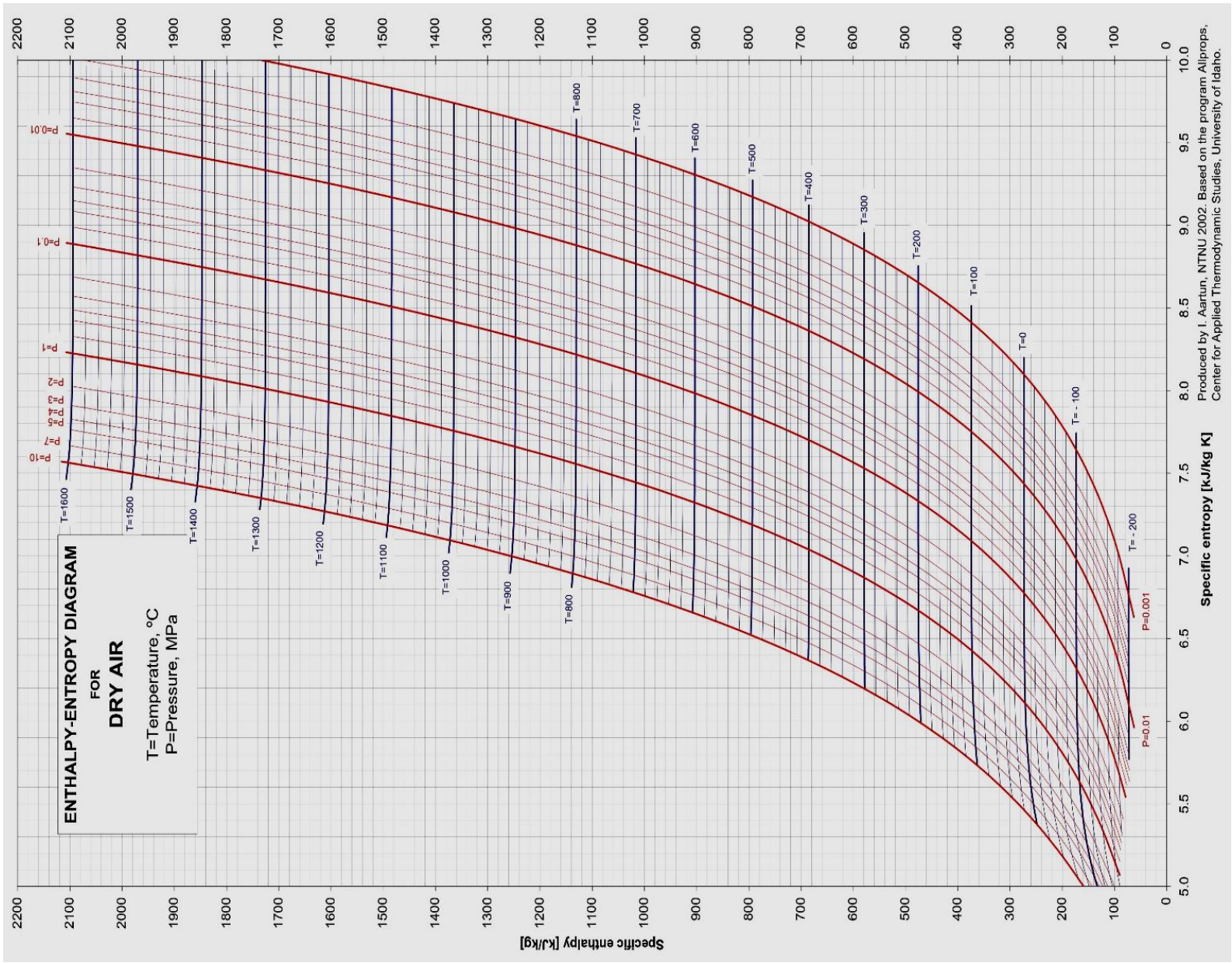
$$\eta_{ac} = \dot{W} / \dot{m}_f F_{hv}$$

مقارنة بين الدورة المثالية والحقيقية للتوربين الغازي :

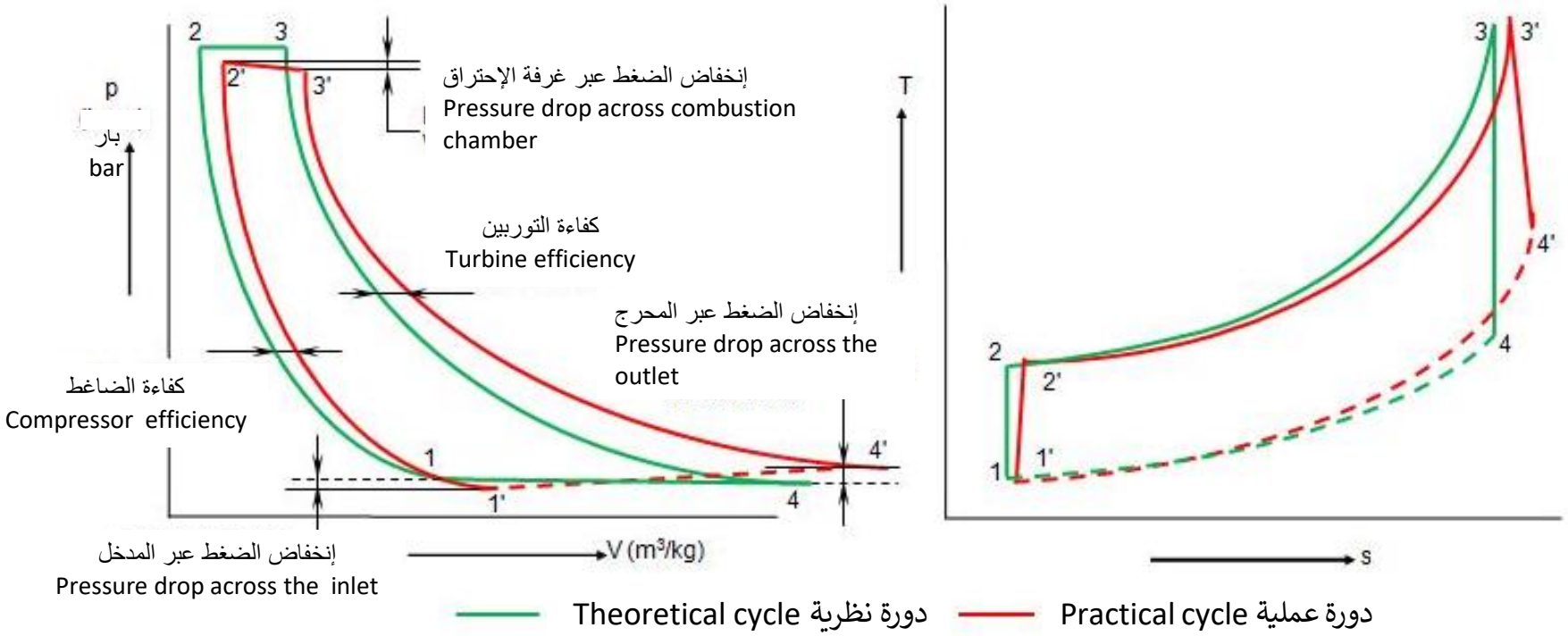
	دورة برايتون المثالية	دورة برايتون الحقيقية
مائع التشغيل working fluid	هواء air كغاز مثالي perfect (ideal) gas في ظروف قياسية (1 bar , 25 C°)	مزيج الوقود والهواء (غازات نواتج الأحتراق)
الدورة الثرموديناميكية	مغلقة	مفتوحة
العمليات الثرموديناميكية	كظومة ومتساوية الأنتروبية dQ = 0 ، dS = 0 أي لا فقدان للطاقة والمادة	غير كظومة ولا عكوسية
عملية إضافة الحرارة	تتم عن طريق مصدر خارجي (مبادل حراري)	تتم في غرفة الإحتراق
عملية طرح الحرارة	تتم عن طريق مصدر خارجي (مبادل حراري) ويؤدي إلى إسترجاع مائع التشغيل إلى ظروفه الإبتدائية .	يتم طرح الغازات الساخنة إلى الجو من خلال العادم
الكفاءة	عالية	واطئة

جدول توضيح رموز المعادلات :

الرمز	المعنى	الوحدة
W_C	شغل الضاغطة Compressor work	KJ/Kg
$\dot{m}$	معدل التدفق الكتلي للهواء Air mass flow rate	Kg/s
Cp	الحرارة النوعية للهواء تحت ضغط ثابت = ١,٠٠٥ = Specific heat at constant pressure for air	KJ/Kg.K
ρ	Density تتراوح كثافة الغاز النوعية بين 0.6 – 0.7	Kg/m^3
T	درجة الحرارة Temperature	C°
Q_A	الحرارة المضافة Added heat	KJ/Kg
W_T	شغل التوربين Work done by the turbine	KJ/Kg
Q_R	الحرارة المطروحة Rejected (exhaust heat)	KJ/Kg
W_{net}	الشغل الصافي Net work	KJ/Kg
η_{th}	الكفاءة الحرارية النظرية Theoretical thermal efficiency	%
η_{ac}	الكفاءة الحرارية الحقيقية Actual thermal efficiency	%
$\dot{W}$	الحمل (القدرة) Load (Power)	MW
$\dot{m}_f$	معدل التدفق الكتلي للوقود Fuel mass flow rate	Kg/s
F_{hv}	القيمة الحرارية للوقود Fuel heating value	KJ/Kg
P	ضغط الهواء Air Pressure	bar
V	حجم الهواء Volume of air	m^3
r_p	نسبة الأنضغاط للهواء Pressure ratio	
γ or k	نسبة الحرارة النوعية للهواء = 1.4 Specific heat ratio for air (معامل ثبات الإنتروبي Isentrope ratio)	
H	الأنثالبية (المحتوى الحراري للهواء) Specific enthalpy for air	KJ/Kg
Q_{net}	صافي الحرارة Net heat	KJ/Kg
$\dot{m}_p$	معدل التدفق الكتلي لنواتج الإحتراق Product mass flow rate	Kg/s
CP_P	الحرارة النوعية لنواتج الإحتراق تحت ضغط ثابت Specific heat capacity of product	KJ/Kg.K
	درجة الحرارة المطلقة (كلفن) K = C° + 273.15	



مخطط موللر للهواء الجاف وفيه قيم الإنثالبي والإنتروبي Mollier Diagram for Dry Air



مخطط (الضغط – الحجم) و مخطط (الإنتروبي – درجة الحرارة) لدورة برايتون (التوربين الغازي)

حساب معدل الحرارة وكفاءة محطة توليد الكهرباء

Calculation of heat rate & efficiency of the power plant

الكفاءة Efficiency

الكفاءة هي نسبة الشغل work المفيد المنجز (Output) إلى الطاقة الحرارية heat energy المجهزة (Input) .

Efficiency = Output / Input

Output = Input – Losses

Efficiency = (Input - Losses) / Input

Efficiency = (100 - Losses) / 100

هذا يعني أن الاحتكاك friction والخسائر Losses الأخرى تُطرح من الشغل الذي تقوم به الدورة الديناميكية الحرارية thermodynamic cycle .

معدل الحرارة Heat rate

معدل الحرارة هو مقدار الطاقة الحرارية heat energy التي يستخدمها المولد الكهربائي (محطة توليد الكهرباء) لتوليد كيلو واط ساعة (kWh) من الكهرباء . (أي الحرارة المطلوبة لتوليد ١ كيلو واط ساعة) .

Heat rate (HR) = Input / Output

في المحطات الغازية لتوليد الكهرباء ، تكون المخرجات طاقة كهربائية (KWh) وتكون المدخلات طاقة الوقود الحرارية (Kcal) .

Output = electric energy or Power generation (KWh) .

Input = heat energy of fuel (Kcal) .

أذا تم في وحدة توليد كهربائية تحويل (100%) من الطاقة الكيمياوية الموجودة في الوقود المجهز للوحدة إلى طاقة كهربائية فأن المعدل الحراري للوحدة يساوي (860 Kcal /KWh) .

1 KWh electricity = 860 Kcal heat

إن المعدل الحراري للوحدة Heat Rate (HR) مؤشر مهم جدا لتقييم كفاءة الوحدة الحرارية لذا يجب أن يكون هدف ومسعى أية محطة تشغيل الوحدة التوليدية ضمن الحدود التصميمية للمعدل الحراري قدر الإمكان ، إضافة إلى أن تحسين المعدل الحراري للمحطة يساعد على تقليل التلوث الناجم من تشغيل الوحدات .

تقليل معدل الحرارة يؤدي إلى تقليل أستهلاك الوقود وتوفير الوقود

عمليات تحول الطاقة أثناء توليد الكهرباء

تحويل الطاقة الكيمياوية الموجودة في الوقود المجهز للمحطة إلى طاقة كهربائية يتم انجازه خلال أربع عمليات رئيسية :

١- الطاقة الكيمياوية (Chemical Energy) في الوقود تتحول إلى طاقة حرارية (Thermal Energy) بالإحتراق .

٢- الطاقة الحرارية (Thermal Energy) تتحول إلى طاقة حركية (Kinetic Energy) بواسطة حركة وسرعة غازات الإحتراق .

٣- الطاقة الحركية (Kinetic Energy) تتحول إلى طاقة ميكانيكية (Mechanical Energy) تتمثل في دوران محور التوربين .

٤- أخيرا الطاقة الميكانيكية (Mechanical Energy) تتحول إلى طاقة كهربائية (Electrical Energy) بالمولدة .

في كل عملية من العمليات أعلاه فأن قسم من الطاقة تفقد إلى المحيط أو البيئة ، حيث أن قســم من الوقود لا يتم أحتراقه وقســم من الطاقة الحرارية تفقد إلى المدخنة ثم إلى الجو وقســم إلى مياه التبريد للتوربين وقســم من الطاقة الحركية والميكانيكية تولد وتنتج حرارة بدلا من الكهرباء بســبب الاحتكاك والتصــادم بريش التوربين وأخيرا فأن قســم من الطاقة الكهربائية تفقد في المولدات و المحولات الرئيسية والمعدات الكهربائية التي تربط المحطة بشبكة النقل وفي تشغيل الأجهزة المساعدة .
لذلك في الواقع عند تحويل الوقود إلى طاقة كهربائية فأن قسم من الطاقة ستفقد بسبب عدم كفاءة العمليات الجارية أثناء توليد الكهرباء ، عدم الكفاءة هذه يتم التعبير عنه بحســاب معدل الحرارة الذي يشــير إلى الكمية الحقيقية المطلوبة من الوقود لإنتاج وحدة كهربائية واحدة (KW.H) وهي تعبر عن كفاءة تحويل الطاقة .

الكفاءة الحرارية Thermal Efficiency تختلف عن كفاءة الطاقة كونها تشمل الحرارة Heat كمدخلات (Input) والقدرة Power كمخرجات (Output)

العلاقة بين معدل الحرارة (HR) والكفاءة الحرارية (η_{th}) هي :

$$\eta_{th} = \frac{860 \times 100}{HR}$$

مثال :

أذا كان معدل الحرارة = 3000 Kcal/KWh

فأن الكفاءة الحرارية $= \frac{860}{3000} \times 100 = 28.66\ \%$

تعاريف

القيمة الحرارية Heat value : (يشار إليها أيضا بأسم الطاقة energy أو القيمة الكالورية calorific value) على أنها كمية الطاقة الكلية المنبعثة كحرارة heat عندما يحدث للمادة (الوقود fuel) إحتراق combustion كامل بالأوكسجين oxygen تحت الظروف القياسية (1 bar , 25 °C) standard conditions . تكون وحدتها هي وحدة طاقة (كيلو جول KJ ، كيلو كالوري Kcal ، وحدة حرارية بريطانية Btu) لكل وحدة من المادة (كيلو غرام Kg ، متر مكعب m^3 ، باوند lb)

القيمة الحرارية هي مقياس لكثافة طاقة الوقود energy density (كمية الطاقة المخزونة energy stored لكل وحدة حجم)

صرفيات أو أســـتهلاك الوقود Fuel consumption : هي كمية الوقود المســـتهلكة في الوحدة التوليدية . وحدة القياس (متر مكعب m^3 أو كيلو غرام Kg) .

معادلات حساب معدل الحرارة والكفاءة الحرارية

- معدل الحرارة (Kcal/KWh) = الطاقة الحرارية للوقود (Kcal) \ الطاقة الكهربائية المتولدة (KWh)

HR (Kcal/KWh) = Heat energy (Kcal) / Power generation (KWh)

- الطاقة الحرارية Heat energy (Kcal) = القيمة الحرارية للوقود ($Kcal/m^3$) × صرفيات الوقود (m^3)

Heat Energy (Kcal) = Heat value ($Kcal/m^3$) x Fuel consumption (m^3)

- الكفاءة الحرارية (100%) = الطاقة الكهربائية المتولدة (**KWh**) × 100 \ الطاقة الحرارية (**Kcal**)

Thermal efficiency (100%) = Power generation (KWh) × 100 / Heat energy (Kcal)

و حيث أن : 1KWh = 860 Kcal

- الكفاءة الحرارية (100%) = 860 (**Kcal/KWh**) × 100 \ معدل الحرارة (**Kcal/KWh**)

Thermal efficiency (100%) = 860 (Kcal/KWh) × 100 / HR (Kcal/KWh)

تحويلات الوحدات

1Kcal = 4 Btu

1Kcal = 4.1868 KJ

1KWh = 860 Kcal

1Kcal = 0.001163 KWh

1bar = 100 kpa

1bar = 1 atm

KJ/Kg = 0.238846 Kcal/Kg

Btu/Ib = 2.326 KJ/Kg

Btu/Ib = 0.5556 Kcal/Kg

Natural Gas Conversion of Units :

1 Kcal = 4.184 KJ
KJ = 0.239 Kcal
1Kcal = 0.001163 KWh
1KWh = 860 Kcal = 3412 BTU
1MWh = 3600000 KJ
1 BTU = 0.000293071 KWh = 1.05506 KJ = 0.252164 Kcal
1 kilogram (Kg) = 1.406 cubic meters (m^3) or **= 1.351 (m^3)** or **= 1.216 (m^3)**
1 (m^3) = 0.74 – 0.83 (Kg)
1 m^3 natural gas = 7580 Kcal = 8.816 KWh = 31736 KJ

1 m^3 of natural gas = 35.315 cubic feet

1 Kcal = 3.9656 BTU

1SCF = 0.028317 m^3

Kcal/m^3 = (BTU/SCF) × 8.9

Kcal/m^3 = (KJ/Kg) × 0.17

Kcal/KW = (KJ/KW) × 4.184

Kcal/KWh = (KJ/KWh) × 4.184

Kcal/Kg = **(KJ/Kg) × 4.184**

1 (Kg/sec) = 1.351 (m^3/sec) for Natural Gas

1 (m^3/h) = 0.20 (Kg/sec) for Petrol , Gasoline

1(m^3/min) = 720 (Kg/min) for Petrol , Gasoline

- Petroleum: 1 litre = 0.79 kilogram.

- Gas, diesel, light fuel oil: 1 litre = 0.84 kilogram.

- Heavy fuel oil: 1 litre = 0,96 kilogram.

- Lubricants: 1 litre = 0.88 kilogram.

تحسين أداء وكفاءة وحدات التوربين الغازي

Improvement of the Thermal Efficiency and Performance of Gas Turbine Units

إن تحسين كفاءة وأداء الوحدات الغازية تعني وثوقية عالية في الأداء وتكلفة إنتاج منخفضة والدراسات والبحوث مستمرة في مجال أقتصاديات الطاقة ومعالجة التلوث من خلال تحسين أداء محطات توليد الطاقة الكهربائية وخاصة المحطات الغازية والتي تتميز بطرح اكثر من 60% من الحرارة الى المحيط .

إن محطات الكهرباء الغازية ذات الدورة البسيطة ليست فعالة حيث إن كفاءتها عند الأستخدام لا تتجاوز (35%) وذلك لسببين رئيسيين و هما :

١- أكثر من ثلثي طاقة التوربين تستخدم لتدوير الضاغط لغرض ضغط الهواء إلى المقدار المطلوب لدورانه خلال التوربين ، والثلث الأخر من الطاقة الدورانية المتبقية هي التي تتحول إلى طاقة كهربائية .

٢- إن غازات الاحتراق الساخنة (والتي تصل درجة حرارتها إلى حدود 550 °C) عند خروجها من التوربين إلى المدخنة فإنها تُطرح إلى الجو الخارجي وهذا يعني فقدان كمية كبيرة من الطاقة الحرارية إلى المحيط الخارجي دون الأستفادة منها .

يمكن إسترداد هذه الطاقة الحرارية الضائعة و الأستفادة منها بأستخدامها في تسخين الهواء المضغوط من الضاغط و قبل دخولها غرفة الاحتراق و بالتالي التقليل من كمية أستهلاك الوقود المستخدم في تشغيل الوحدة .

مؤشرات الكفاءة والأداء للتوربينات الغازية

١- إن الكفاءة الحرارية لمحطات الكهرباء الغازية Gas Turbine Power Plants تعتمد أعتمادا كبيرا على درجة حرارة الهواء العامل خلال الوحدة الغازية (النسبة بين درجتي الحرارة T_1 و T_2) وكما يلي :

- الكفاءة تقل عندما تكون درجة حرارة الهواء الداخل إلى الضاغط (T_1) عالية نسبيا .
- الكفاءة تقل عندما تكون درجة حرارة الهواء الداخل إلى غرفة الأحتراق (T_2) منخفضة نسبيا .

يتم ضبط درجة الحرارة الدنيا (T_1) minimum temperature من خلال درجة حرارة الهواء عند مدخل الدورة . ويتم ضبط درجة الحرارة (T2) من خلال تحديد نسبة الضغط للضاغط pressure ratio (نسبة الضغط النهائي P_2 إلى الضغط الإبتدائي P_1) ، حيث كلما زادت نسبة الضغط كلما أزداد الشغل الصافي وبذلك تزداد الكفاءة الحرارية بزيادة نسبة الضغط .

٢- درجة الحرارة القصوى maximum temperature في دورة التوربين الغازي T_3 محدودة بسبب الظروف المعدنية metallurgical لأن ريش التوربين لا يمكنها تحمل درجات حرارة أعلى من (1027 °C) . يمكن الحصول على درجة حرارة (1327 °C) بأستخدام ريش التوربين الخزفية ceramic turbine blades . لذلك تعتبر السيطرة على حرارة الغازات المحترقة من الأمور الأساسية لتحديد كفاءة الوحدة . و تعتمد درجة الحرارة القصوى على :

- أسلوب تصميم الدورة الحرارية .
- العمر الأفتراضي الذي نريده للتوربين . حيث انه كلما زادت درجة الحرارة القصوى كلما توقعنا عمرا اقصر لريش التوربين .

٣- يمكن تحسين أداء المحطات الغازية عن طريق التدريب الدوري المنتظم لكادر المحطة في مجال الصيانة والتشغيل Operation and Maintenance .

فيما يلي الأساليب الإقتصادية والتقنية المهمة لتحسين أداء المحطات الغازية :

١- زيادة كفاءة الضاغط عن طريق تبريد الهواء قبل دخوله الضاغط مما يؤدي إلى زيادة كثافة الهواء وبدوره يزداد كل من معدل الجريان الكتلي للهواء Mass Flow Rate ونسبة الإنضغاط Pressure Ratio للضاغط وبالنتيجة النهائية تزداد القدرة الخارجة (الطاقة المنتجة) .

من الطرق العملية المستخدمة في تبريد درجة حرارة الهواء الداخل إلى الضاغط هي طريقة التضبيب Fogging أو التبريد التبخيري Evaporating Cooling . حيث ان الطاقة المنتجة تنخفض كلما زادت درجة حرارة الجو كما في الصيف والعكس صحيح . لذلك فان هذا النظام يعتمد على تقليل درجة حرارة الهواء الداخل بواسطة ضخ كمية من الماء البارد (11°C درجة مئوية) في تيار الهواء الداخل بعد تنقية (فلترة) الهواء . وبذلك يتم تخفيض درجة حرارة الهواء قبل دخوله الى الضاغط ، ويساعد ذلك في زيادة وتحسين كفاءة وأداء عملية توليد الطاقة تصل الى حوالي (10% - 20 %) .

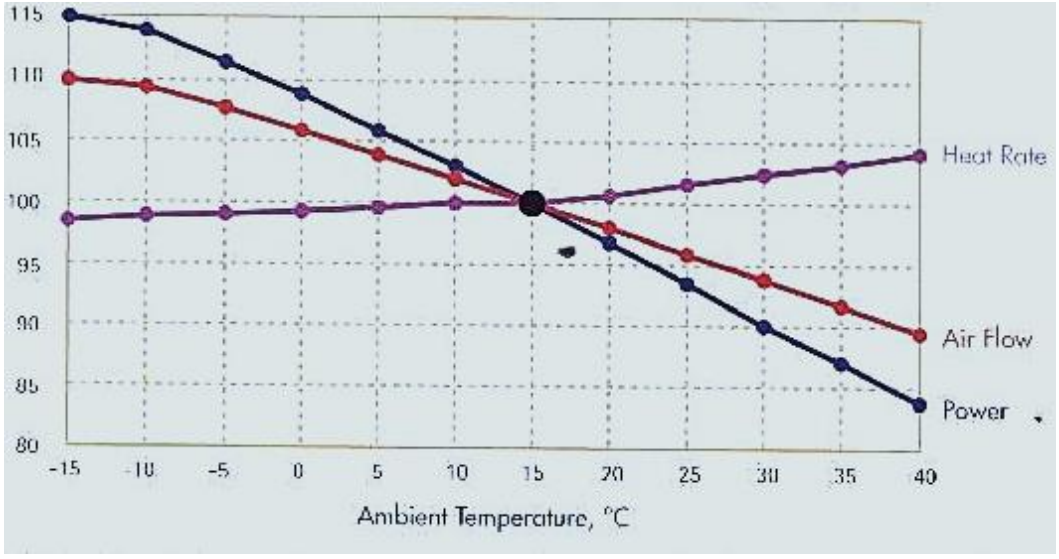
إن منظومة التضبيب تتكون بالأساس من وحدة معالجة الماء ومضخة ضغط عالي وفوهات التضبيب Fogging Nozzles وعادة ما يتم تثبيت مزيلات الرطوبة Moisture Eliminators قبل مرحلة الضاغط للحد من إمكانية إنتقال الرطوبة إلى ريش الضاغط Compressor Blades والذي ينتج بسببها أضرار جسيمة . إن أداء منظومة التضبيب تعتمد على ما يلي :

- تغيرات الرطوبة النسبية للجو المحيط بالتوربين الغازي .

- كفاءة عملية معالجة الماء المُستخدم حيث يجب أن يكون الماء نقي خالي تماما من الأملاح والمعادن الذائبة Demineralised Water وذلك لتجنب مخاطر التعرية Erosion في ريش المراحل الأولى للضاغط .
- كفاءة عملية التذرية للماء المضغوط في تيار الهواء الداخل للضاغط ، حيث أن التذرية غير الكاملة ينتج عنها مشاكل التآكل Corrosion في ريش الضاغط

الكلفة الرأسمالية لتقنية التضبيب منخفضة إضافة إلى بساطة وسهولة آلية تشغيلها وصيانتها ويمكن إضافتها إلى الوحدة الغازية دون تغيير أساسي في النظام الأساسي الأصلي للمحطة .

يبين الشكل ادناه علاقة القدرة Power وكمية الهواء Air Flow ومعدل الحرارة Heat Rate مع درجة حرارة الجو Ambient Temperature :



٢- تقليل الشغل المطلوب لتدوير الضاغط عن طريق ضغط الهواء بمرحلتين مع وجود مبرد بيني Intercooler بينهما حيث بالتبريد سيقل الحجم النوعي للهواء Specific Volume وبدوره سيقل الشغل المطلوب للضاغط . ولكن بالمقابل ستزداد كمية الحرارة المطلوبة لعملية الإحتراق أي زيادة في إستهلاك الوقود وبالتالي لن يتم تحقيق زيادة كبيرة تذكرفي الكفاءة الحرارية للتوربين الغازي وذلك لأن درجة حرارة الهواء الداخل إلى غرفة الإحتراق T_4 بعد عملية الضغط مع التبريد الداخلي البيني ستتطلب إنتقال طاقة حرارية إضافية للوصول إلى درجة الحرارة المطلوبة لدخول التوربين T_5 .

في عملية التبريد البيني intercooling :

١- الحجم النوعي للهواء يقل .

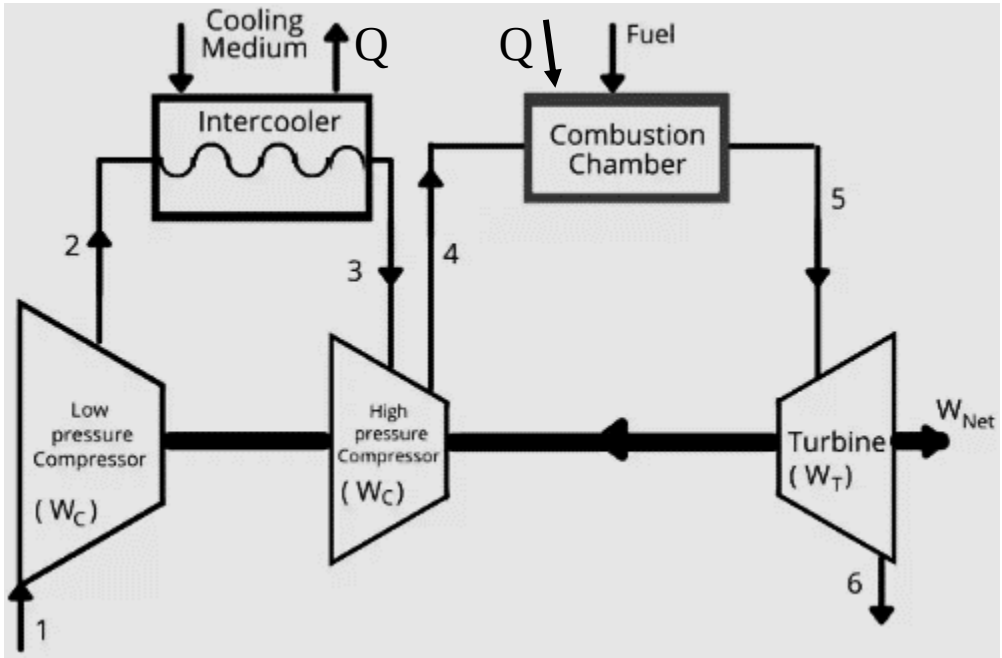
٢- الشغل المنجز على الضاغط يقل .

٣- الطاقة الحرارية المُضافة تزداد .

٤- الشغل الصافي output يزداد

٥- أستهلاك الوقود يزداد .

٦- الكفاءة الحرارية تزداد قليلا .



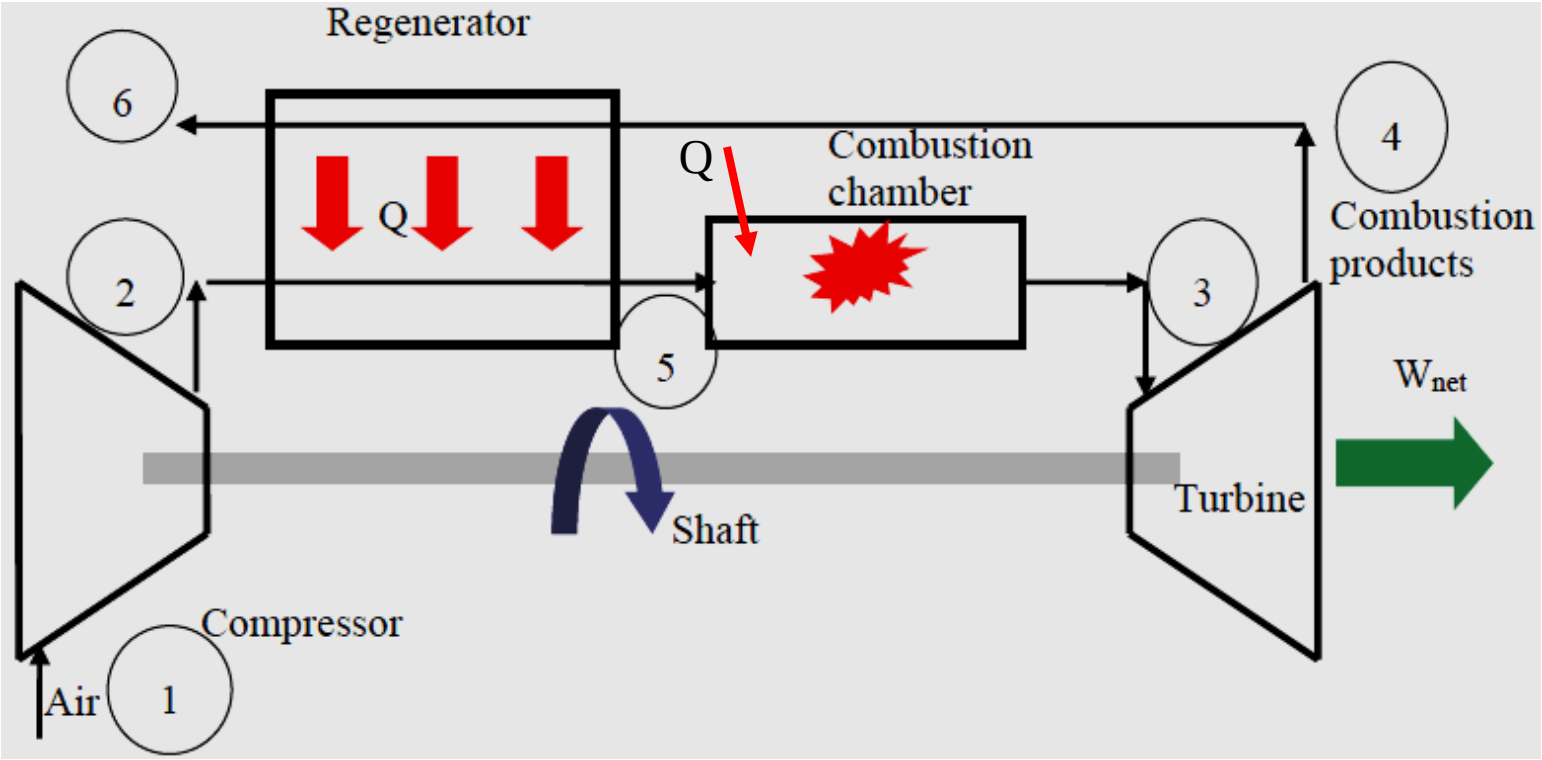
٣- تسخين الهواء المضغوط عن طريق مبادل حراري عكسي Heat Exchanger Counter - Flow أثناء مروره من الضاغطة إلى غرفة الاحتراق **سيقلل من الطاقة الحرارية المطلوبة واللازمة لعملية الاحتراق (تقليل الحرارة المضافة إلى غرفة الإحتراق) وبالتالي يقل الأستهلاك النوعي للوقود** . هذه العملية تسمى التجديد أو الأسترجاع Regeneration و المبادل الحراري يسمى المُسترجع أو المُجدد Regenerator و عملية تسخين الهواء تتم عن طريق إنتقال كمية الطاقة الحرارية الموجودة في غازات العادم الساخنة Exhaust Gases و بذلك **تتم زيادة كفاءة غرفة الاحتراق و بالتالي زيادة الكفاءة الحرارية للوحدة** . أن إستخدام المبادل الحراري سيقلل من الطاقة الحرارية المضافة والمطروحة إلى ومن الدورة بنفس الكمية ولا يؤثر على القدرة المتولدة ولكن يزيد الكفاءة الحرارية للدورة .

في عملية التجديد (الأسترجاع) Regeneration :

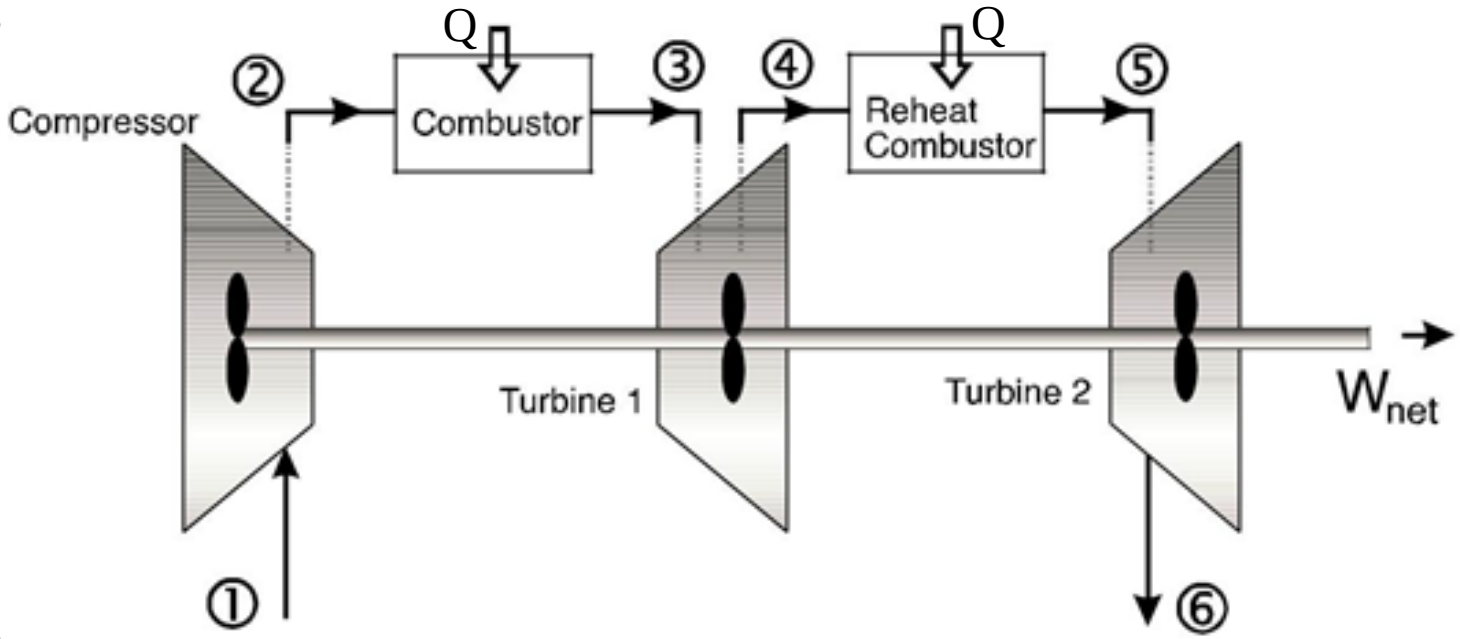
١- الطاقة الحرارية المُضافة تقل بسب التسخين المُسبق للهواء المضغوط من الضاغط .

٢- استهلاك الوقود يقل .

٣- الكفاءة الحرارية تزداد .



٤- يمكن تحقيق زيادة كبيرة في القدرة المتولدة (MW) للتوربين الغازي وذلك من خلال إجراء عملية التمدد في التوربين في مرحلتين وإعادة التسخين ، حيث يستخدم في الدورة توربينين بينهما مبادل حراري يسمى معيد التسخين Reheater (يحتاج إلى وقود وهواء فائض بكميات قليلة) يقوم بإعادة تسخين غازات العادم المتمددة الخارجة من التوربين الأول قبل دخولها إلى التوربين الثاني . في هذه العملية يتم زيادة القدرة المتولدة W_{net} ودرجة حرارة غازات العادم T_6 بدون زيادة درجة حرارة التشغيل القصوى T_3 ولكن بدون زيادة في الكفاءة الحرارية للدورة .



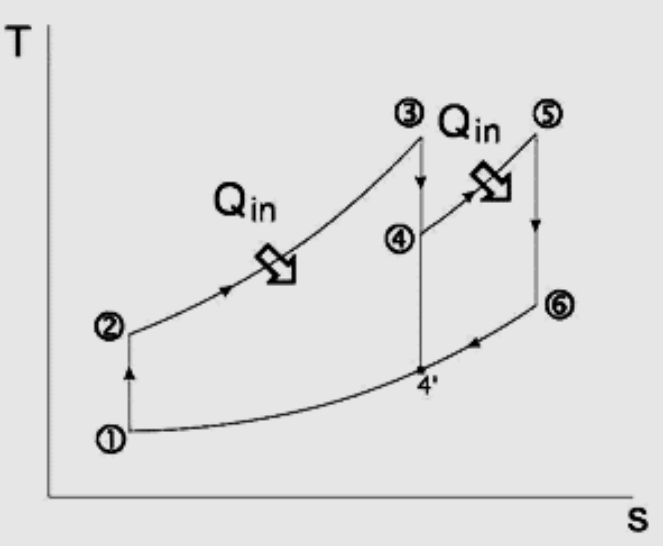
في عملية إعادة التسخين Reheater :

١- يزداد إجمالي الشغل الصافي .

٢- يتطلب إدخال طاقة حرارية إضافية .

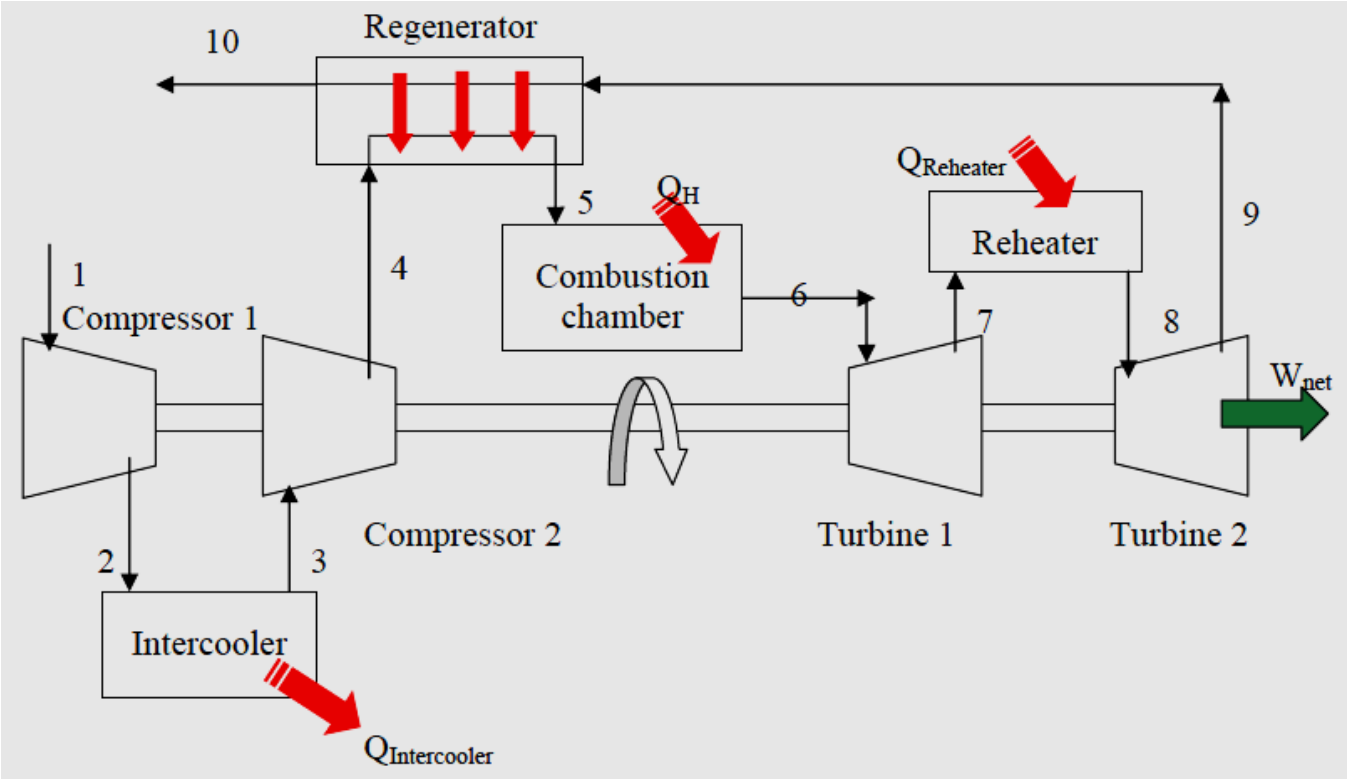
٣- الكفاءة الحرارية قد تزداد أو لا .

بأستخدام عمليتي إعادة التسخين والإسترجاع معا في دورة واحدة ستزداد الكفاءة الحرارية للوحدة التوليدية .



ملاحظة : بأستخدام عمليتي إعادة التسخين والإسترجاع معا في دورة واحدة ستزداد الكفاءة الحرارية للوحدة التوليدية .

٥- يمكن تحقيق كفاءة حرارية عالية جدا وزيادة في القدرة المتولدة الناتجة من التوربين الغازي بأستخدام العمليات الثلاثة السابقة معا (التبريد البيني intercooling و الإسترجاع regeneration و إعادة التسخين reheating) في دورة واحدة .



مخطط توربين غازي مع ضغط compression على مرحلتين ، مع تبريد بيني ، وتمدد expansion على مرحلتين مع إعادة تسخين ، وتجديد .

يمكن زيادة الإنتاج الصافي للدورة عن طريق تقليل الشغل المنجز work input على الضاغط و / أو عن طريق زيادة الشغل المنجز work output من التوربين (أو كليهما) .

حيث بأستخدام الضغط متعدد المراحل multi-stage compression مع التبريد البيني يقلل من الشغل المنجز على الضاغط ، و مع زيادة عدد المراحل ، تصبح عملية الضغط متساوية الحرارة isothermal تقريبا عند درجة حرارة مدخل الضاغط ، ويقل الشغل المطلوب لعملية الضغط W_C .

وبالمثل ، فإن أستخدام التمدد متعدد المراحل multi-stage expansion مع إعادة التسخين (في ترتيب متعدد التوربينات) سيزيد من الشغل الذي تنتجه التوربينات W_T .

الهدف من العملية متعددة المراحل هو الحفاظ على الحجم المحدد عند أدنى مستوى ممكن أثناء الضغط وعلى أعلى مستوى ممكن أثناء التمدد .

عند أستخدام التبريد البيني وإعادة التسخين ، يصبح التجديد أكثر فائدة نظرا لوجود إمكانية أكبر للتجديد .

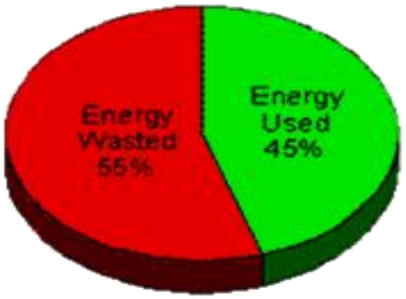
تتحسن نسبة الشغل الراجع back work ratio للتوربين الغازي نتيجة للتبريد البيني وإعادة التسخين و لكنهما يقللان من الكفاءة الحرارية إلا إذا كانا مصحوبين بعملية التجديد .

نسبة الشغل الراجع = نسبة الشغل المنجز على الضاغط W_C إلى الشغل المنجز من التوربين W_T .

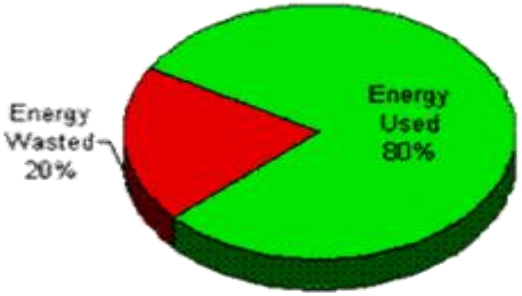
٦- التوليد المشترك للطاقة Cogeneration system :

هو نظام الأنتاج المزدوج للحرارة والطاقة الكهربائية في وقت واحد بأستخدام الطاقة الحرارية الناتجة من محطات التوليد الكهربائية وفي بعض الأحيان تكون عملية أنتاج ثلاثي للحرارة والتبريد والطاقة الكهربائية في نفس الوقت .

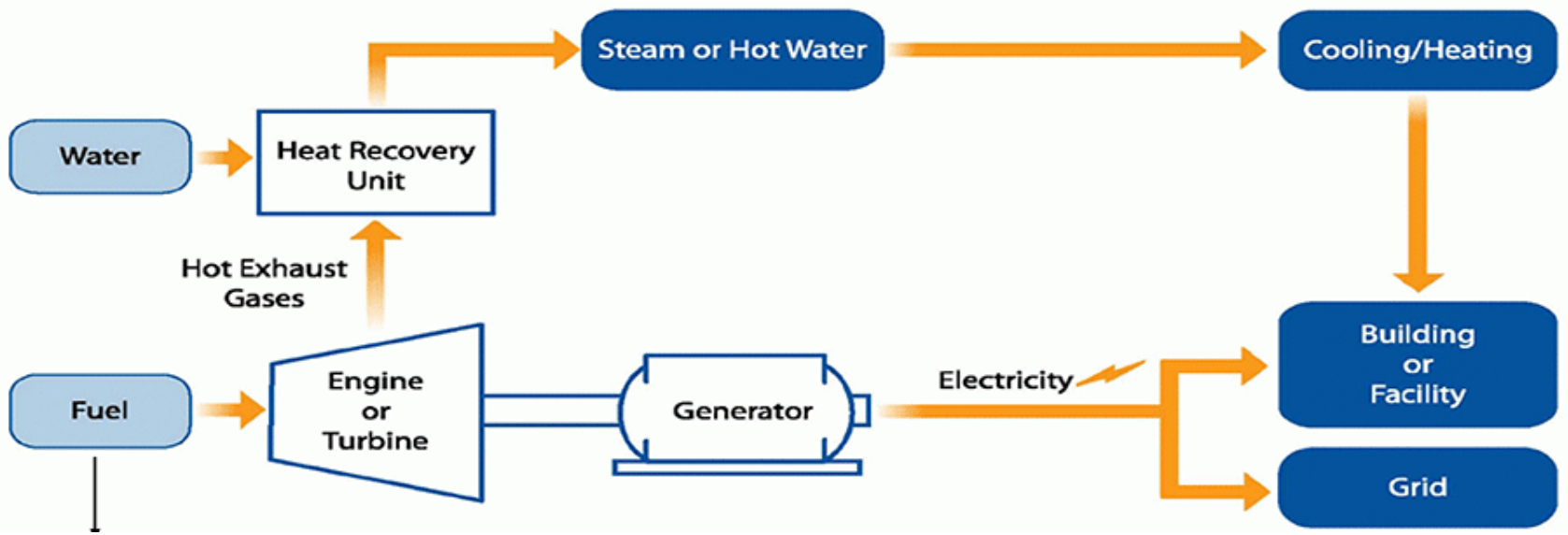
التوليد المشترك للطاقة ثيرموديناميكيا هو الأستخدام الفعال للوقود . جميع محطات الطاقة الحرارية التقليدية conventional power plant تفقد كميات كبيرة من الطاقة الحرارية إلى الجو أثناء توليد الكهرباء من خلال غازات العادم أو أبراج التبريد وهي طاقة حرارية ضائعة (Waste Heat) ، ولكن يأستخدام تقنية التوليد المشترك للطاقة يتم الأستفادة من تلك الطاقة الضائعة وتحوليها الى طاقة مفيدة (كهرباء ، تسخين ، تبريد) في وقت واحد وبالتالي تقليل مخاطر تلوث البيئة . ونظرا للتكاليف الباهظة لبناء شبكة أنابيب لتوزيع الماء الساخن على البيوت والمصانع ، تتخاذل معظم محطات توليد القوى الكهربائية عن هذا التوليد المزدوج للكهرباء والماء الساخن ، وتكتفي بتوليد الكهرباء فقط على حساب البيئة . لأن التخلص من مياه درجة حرارتها 30°C درجة مئوية في الأنهار والبحار بغزارة كبيرة ليس من سبل المحافظة على البيئة .



Conventional Power Plant



Cogeneration Power Plant



Cogeneration Power Plant (طاقة كهربائية وطاقة حرارية) محطة توليد مشترك

فوائد تقنية أو نظام التوليد المشترك :

١- تحسين كفاءة المحطة .

٢- تقليل الأنبعاثات في الهواء من الجسيمات وأكاسيد النيتروجين ، وثاني أوكسيد الكبريت والزئبق وثاني أوكسيد الكربون التي من شأنها أن يؤدي خلاف ذلك إلى ظاهرة الاحتباس الحراري .

٣- تقليل كلفة الإنتاج وتحسين الإنتاجية .

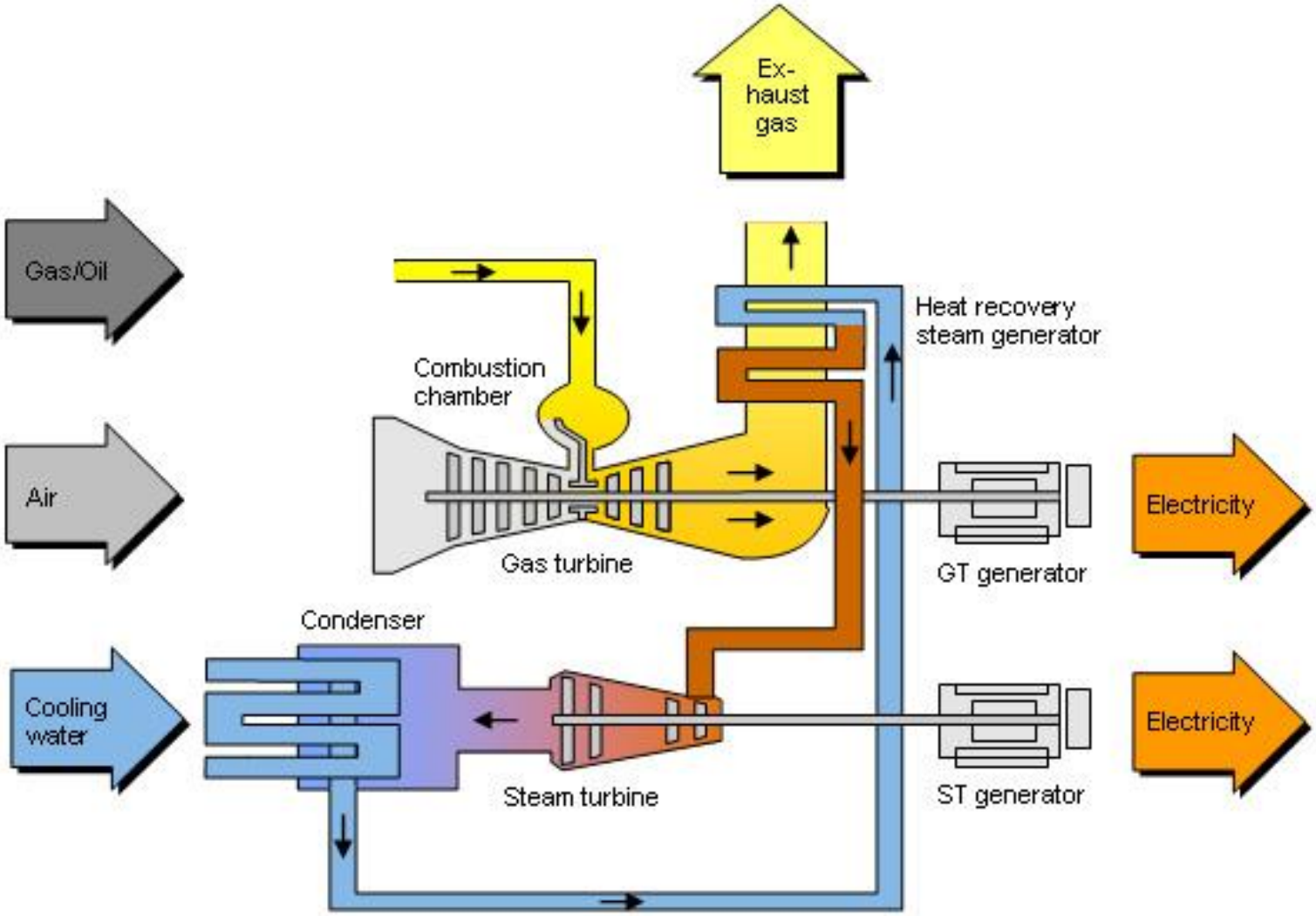
٤- يساعد نظام التوليد المشترك للطاقة في توفير أستهلاك المياه وتكاليف المياه .

٥- نظام التوليد المشترك هو أكثر أقتصادا بالمقارنة مع محطات الطاقة التقليدية .

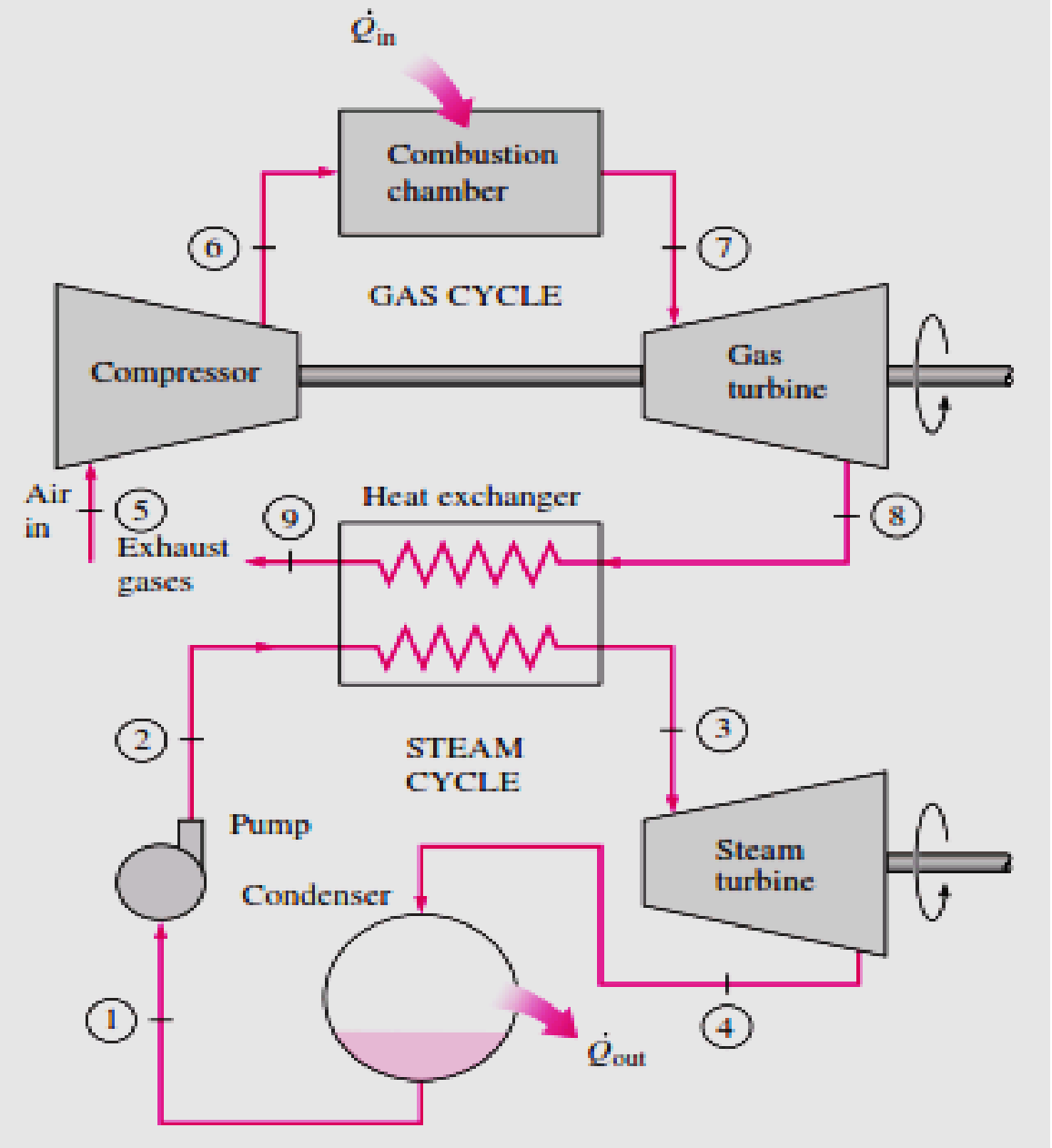
٧- محطات الدورة المركبة (محطات الدورة المشتركة) combined cycle power plant وفيها يتم توليد الطاقة الكهربائية من خلال دورتين حراريتين في وقت واحد هما دورة برايتون Brayton cycle (التوربين الغازي) ودورة رانكن Rankine cycle (التوربين البخاري) حيث يتم إمرار غازات العادم الخارجة من التوربين الغازي ، والتي تصل درجة حرارتها أحيانا إلى حوالي 600 °C خلال مبادل حراري لتوليد البخار الذي يستخدم في إدارة توربين بخاري ، هذا النوع من الدورات المركبة يعطي كفاءة حرارية تصل إلى (60 %) أعلى من أعلى كفاءة يمكننا أن نحصل عليها في حال أستخدام توربين غازي أو توربين بخاري لوحده . في هذه الحالة ستعمل الوحدات الغازية كمحطة حمل أساس .

المبادل الحراري المستخدم في محطات الدورة المركبة يسمى مرجل إسترادادي أو مولد بخار إسترداد الحرارة Heat Recovery Steam Generator (HRSG) ، الغرض منه أستخلاص الطاقة الحرارية من تيار غاز ساخن عادم للاستفادة من حرارته في توليد البخار لغرض إدارة توربين بخاري أو استعماله في عملية صناعية أوغير ذلك .

أيضا المراجل الإستردادية تستخدم في محطات الطاقة التي تعمل بالدورات المركبة التي توظف محرك الديزل كمصدر رئيسي للطاقة ، حيث تمر غازات العادم الناتجة من محرك الديزل خلال المرجل لتوليد البخار وإدارة التوربين البخاري ، كما تعد مراجل إسترداد العادم مكونا أساسيا من مكونات محطات التوليد المشترك Cogeneration Power Plant وعادة ما تكون الكفاءة الكلية لمحطات التوليد المشترك أعلى إذا ما قورنت بكفاءة محطات تعمل بالدورة المركبة حيث تصل إلى 85% ، يرجع ذلك إلى الجزء من الطاقة الذي يفقد في التوربين البخاري في الدورات المركبة .



combined cycle power plant محطة دورة مركبة


$\dot{Q}_{in}$
Combustion chamber
6
7
GAS CYCLE
Compressor
Gas turbine
Air in
5
Exhaust gases
9
Heat exchanger
8
2
3
STEAM CYCLE
Pump
Steam turbine
Condenser
1
4
$\dot{Q}_{out}$

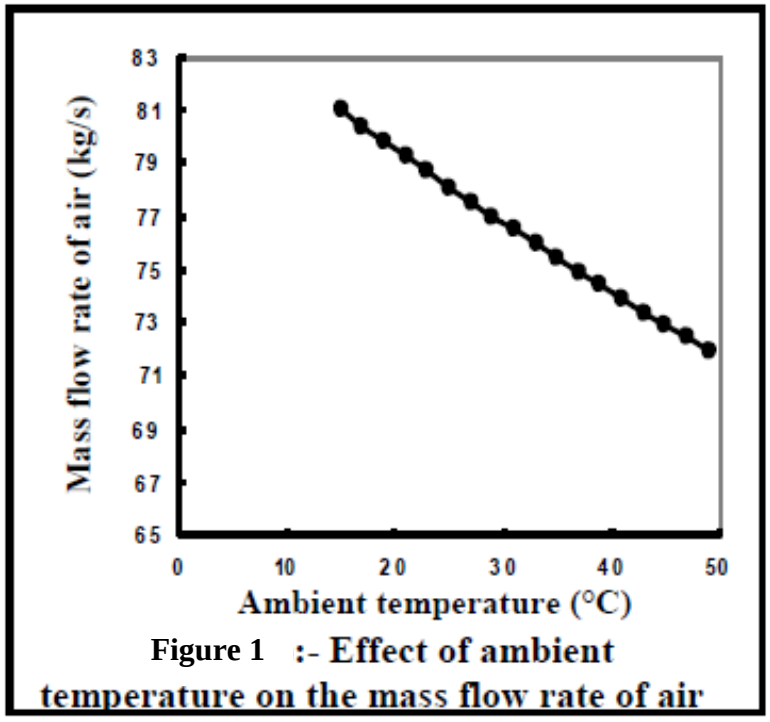


Figure 1 :- Effect of ambient temperature on the mass flow rate of air

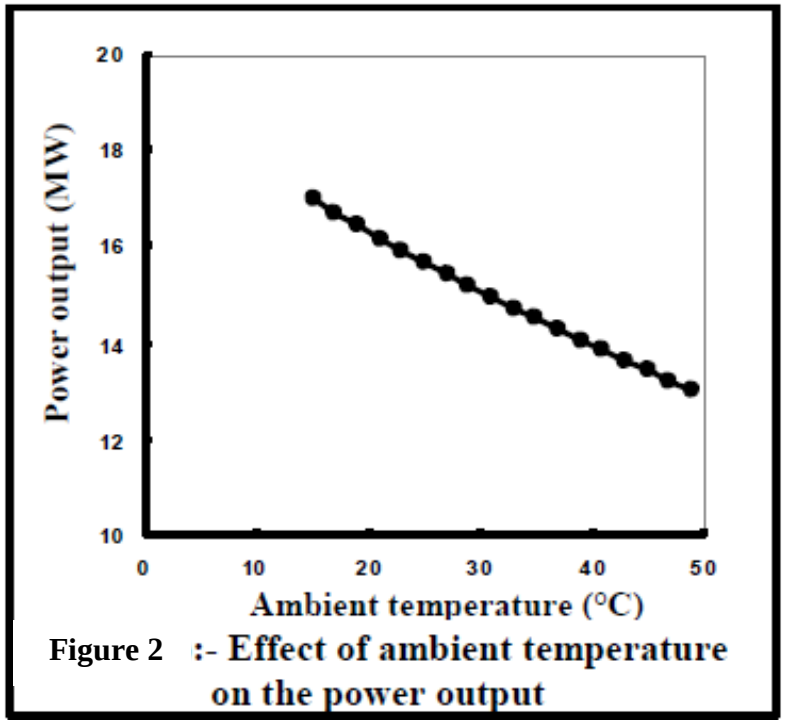


Figure 2 :- Effect of ambient temperature on the power output

يوضح الشكل (1) العلاقة بين معدل التدفق الكتلي للهواء عبر الضاغط ودرجة الحرارة المحيطة . وجد أن هناك انخفاض في كتلة الهواء عن القيمة التصميمية بإرتفاع درجة الحرارة ، ويرجع ذلك إلى إنخفاض كثافة الهواء المحيط مع زيادة درجة حرارته مما يؤثر على معدل تدفق كتلة الهواء الذي ينقله الضاغط

كما هو موضح في الشكل (2) وجد أن القدرة المتولدة تنخفض مع زيادة درجة الحرارة المحيطة ، ويرجع ذلك إلى إنخفاض معدل التدفق الكتلي للهواء مع أرتفاع درجة الحرارة المحيطة مما يؤثر على نسبة الضغط وعمل التوربين وفي النهاية القدرة الناتجة .

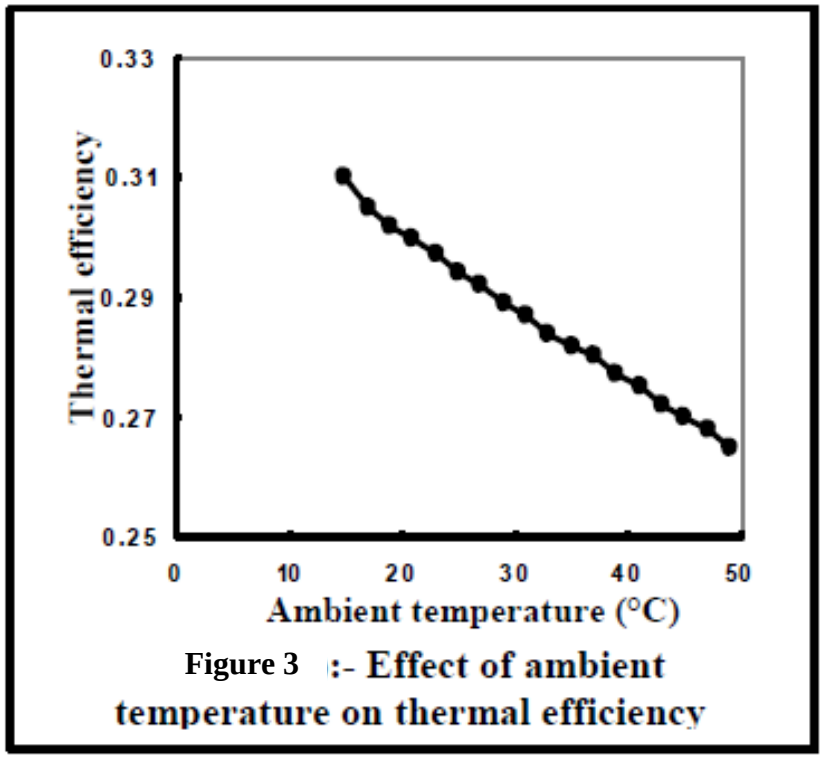


Figure 3 :- Effect of ambient temperature on thermal efficiency

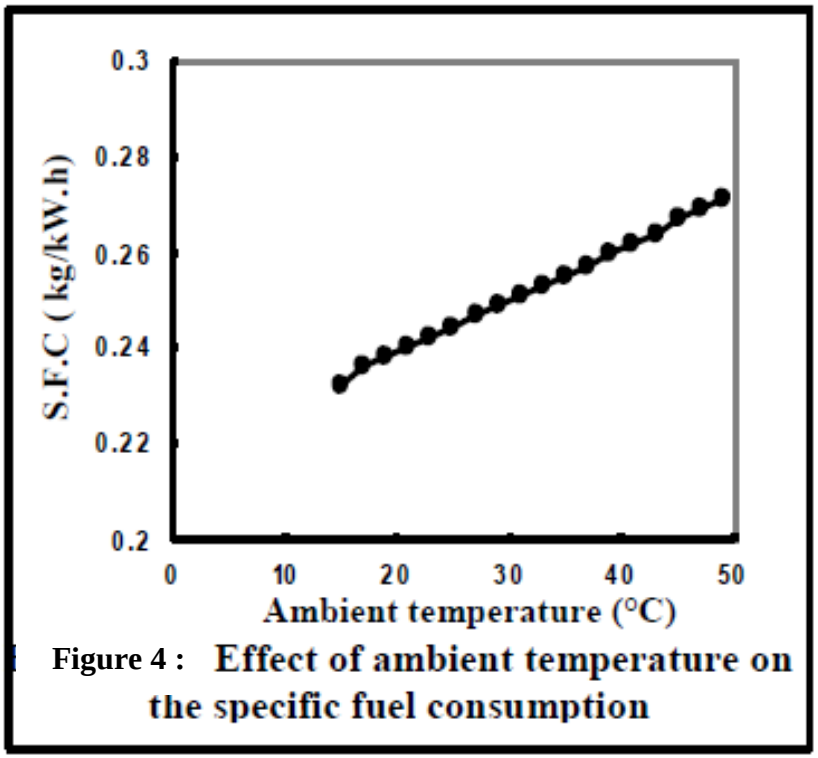


Figure 4 : Effect of ambient temperature on the specific fuel consumption

يوضح الشكل رقم (3) العلاقة بين الكفاءة الحرارية ودرجة الحرارة المحيطة . هناك إنخفاض قليل نسبيا في الكفاءة الحرارية مع أرتفاع درجة الحرارة المحيطة (مقارنة بالقدرة المتولدة) بسبب الإنخفاض في إنتاج الطاقة والزيادة الطفيفة في أستهلاك الوقود النوعي .

يوضح الشكل (4) ، العلاقة بين أستهلاك الوقود النوعي مقابل درجة الحرارة المحيطة . وجد أن أستهلاك الوقود النوعي يزيد مع أرتفاع درجة الحرارة المحيطة وذلك لإنخفاض نسبة الضغط وعمل الضاغط ، مما جعل من الضروري زيادة معدل تدفق كتلة الوقود للحفاظ على درجة حرارة مدخل التوربين ثابتة .

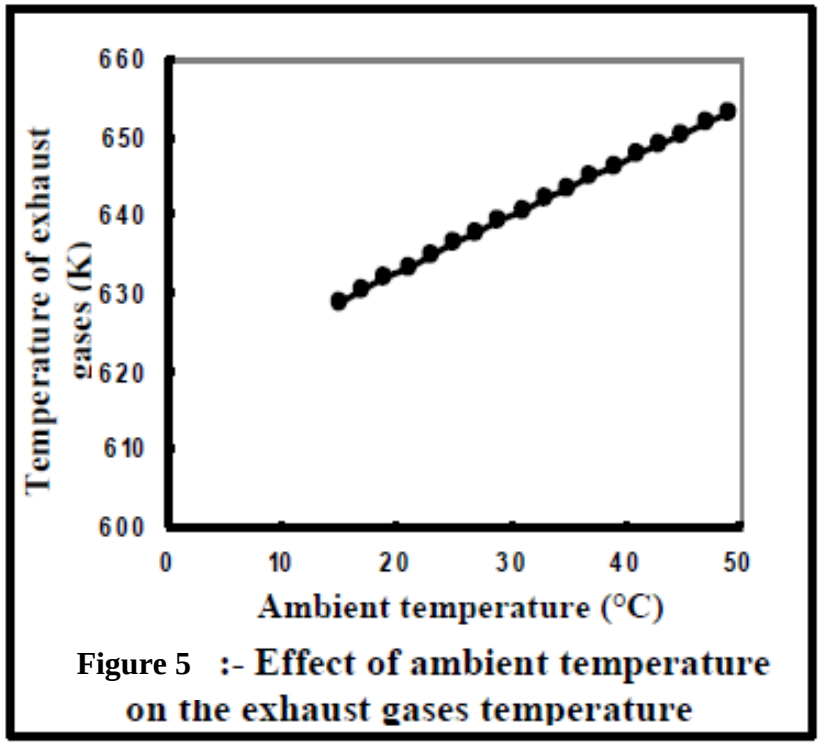


Figure 5 :- Effect of ambient temperature on the exhaust gases temperature

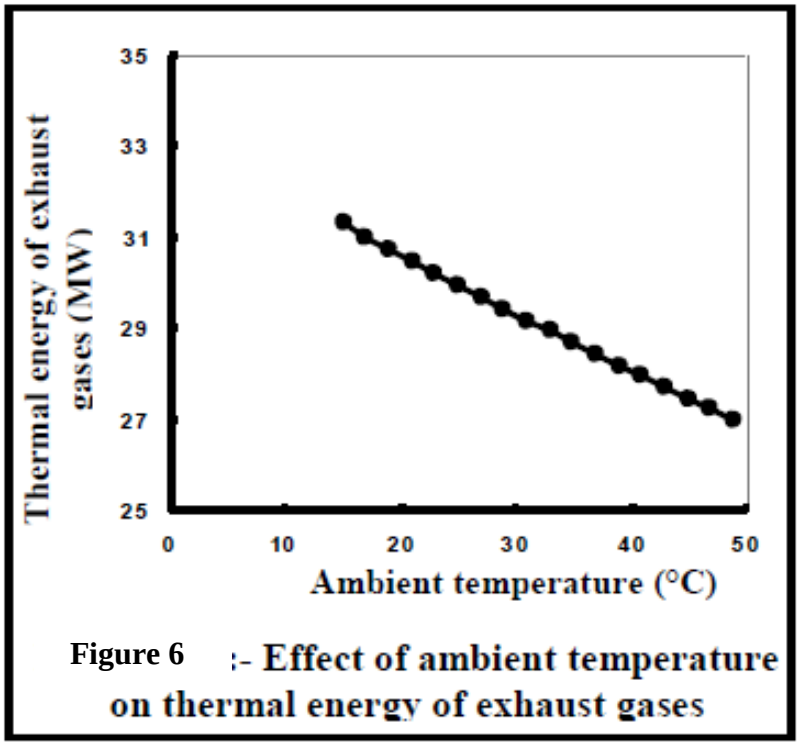


Figure 6 :- Effect of ambient temperature on thermal energy of exhaust gases

يوضح الشكل (5) العلاقة بين درجة الحرارة المحيطة ودرجة حرارة غاز العادم . يمكن ملاحظة أن درجة حرارة غاز العادم تزداد مع أرتفاع درجة الحرارة المحيطة . وأن الطاقة الحرارية المتوفرة في غازات العادم تزداد كما هو موضح في الشكل (6) ، وتمثل الطاقة الحرارية المُهدرة (Q_{exh}) كمية كبيرة من الطاقة تقارب (66% - 70%) من إجمالي الطاقة المزودة التي تم طردها إلى الغلاف الجوي مع أستخدامها في مزيد من العمليات الحرارية أو الطاقة .

أخيرا ، فأن إنتاج الطاقة من وحدات التوربينات الغازية في محطة كهرباء الدبس (على سبيل المثال) يتناقص في فصل الصيف بما في ذلك أشهر حزيران وتموز وآب وأيلول وتشرين الأول .

يمكن ملاحظة أن الطاقة الحرارية المُهدرة في غازات العادم تقارب ضعف الطاقة الناتجة عن التوربينات الغازية . من الواضح أن الحلول المقترحة لمشكلة الطاقة الضائعة هذه يمكن إدراجها في ما يلي :

١- أستبدال التوربينات الغازية القديمة بأخرى جديدة تشتمل على نظام أسترجاع وبذلك تنخفض الطاقة الحرارية المهدورة (الضائعة) .

٢- أستخدام مولد بخار لإسترداد الحرارة لتوليد البخار لأستخدامه في التوربينات البخارية لزيادة إنتاج الطاقة (محطة توليد الطاقة المركبة) .

٣- تطبيق نظام تبريد الهواء الداخل للحصول على قدرة إنتاج ثابتة .

References المراجع

1-Google Translate.
2- Wikipedia- the free encyclopedia ويكيبيديا ، الموسوعة الحرة
3- Dictionary of Engineering – Second Edition - McGraw-Hill
4- https://www.almaany.com/ موقع المعاني
٥- معجم المصطلحات العلمية والفنية والهندسية / أحمد شفيق الخطيب/